

Юрий Барышев и Пекка Теерикорпи

ФРАКТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ

Очерк развития космологии



Специальная астрофизическая обсерватория РАН

**ФРАКТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА
ВСЕЛЕННОЙ
Очерк развития космологии**

Юрий Барышев и Пекка Теерикорпи

САО РАН
Нижний Архыз
2005



Издание осуществлено
при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных
исследований по проекту N 05-02-30050

© Ю.В.Барышев и П.Теерикорпи 2005

© Специальная астрофизическая обсерватория РАН

СОДЕРЖАНИЕ

Об авторах

Предисловие

Глава 1. Первая научная картина мира	1
1.1. Начало космологии в Древней Греции	1
1.2. Анаксимандр решает парадокс неподвижной Земли	2
1.3. Музыка небесных сфер	3
1.4. Атомисты и микрокосмос	4
1.5. Математическое небо Платона	5
1.6. Научный метод и физика Аристотеля	8
1.7. Первое измерение радиуса Земли	10
1.8. Великий синтез Клавдия Птолемея	11
1.9. Первые альтернативные космологии	12
1.10. Идеи античности продолжают жить	14
1.11. Государство и религия объявляют систему Птолемея окончательной истиной	16
Глава 2. Вторая научная картина мира	19
2.1. Николай Кузанский и принцип «центр везде»	19
2.2. Коперник об обращении небесных сфер	20
2.3. Новое понимание устройства неба	22
2.4. Молитва Бруно о бесконечности Вселенной	24
2.5. Галилео направляет первый телескоп на небо	27
2.6. Законы Кеплера для движения планет	29
2.7. Космологический принцип Коперника	31
2.8. Первые шаги по лестнице космических расстояний	34
2.9. Космология Ньютона	37
2.10. Триумф ньютоновской универсальной гравитации	39
2.11. Амбиции лапласовского детерминизма	41

Глава 3. Парадоксы космологии Ньютона	43
3.1. Диалог священника и физика	43
3.2. Почему нет бесконечной силы гравитации?	45
3.3. Распределение Хольцмарка и конечный радиус действия гравитации в бесконечной Вселенной	47
3.4. Устойчивость и флуктуации в ньютоновской космологии	49
3.5. Почему ночное небо темное?	51
3.6. Почему звезды еще не погасли?	54
3.7. Парадокс тепловой смерти Вселенной	55
Глава 4. Иерархический мир туманностей	57
4.1. Открытие туманностей на небесной сфере	57
4.2. Физика Декарта	58
4.3. Самоподобный космос Эмануила Сведенборга	60
4.4. О происхождении Солнечной Системы	64
4.5. «Протохаос» в системе мира Сведенборга	65
4.6. Иерархические модели Канта и Ламберта	66
4.7. Принцип космической субординации Гершеля	69
4.8. Два новых мира Фурнье д'Альбе	72
4.9. Гравитационный потенциал в модели Фурнье	75
4.10. Карл Шарлье решает парадоксы бесконечной Вселенной	76
4.11. На пути к иерархическим мирам без центра	79
4.12. План Лундмарка изучения пространственного распределения туманностей	82
Глава 5. Закон Хаббла как новое космологическое явление	85
5.1. Дискуссия о природе туманностей	85
5.2. Лундмарк измеряет расстояние до туманности Андромеды	87
5.3. Хаббл открывает цефеиды в Андромеде	88
5.4. Разнообразии морфологии галактик	89
5.5. Спектры – «отпечатки пальцев» звездного вещества	91
5.6. Эффект Доплера и движение звезд	93
5.7. Открытие космологического красного смещения	94
5.8. Закон Хаббла – новое физическое явление	96
5.9. Измерение расстояний с помощью закона Хаббла	101
5.10. Вездесущий байес Малмквиста	104
5.11. Чему же равна постоянная Хаббла: 100, 72 или 50?	107

5.12.	Загадочное «спокойствие» закона Хаббла	111
5.13.	Красное смещение квазаров как индикатор расстояния	114
5.14.	Аномальные красные смещения – исключение из пра- ла?	117
5.15.	Все ли эмпирические свойства красного смещения известны?	119

Глава 6. Красота космических фракталов **123**

6.1.	Мандельброт открывает фрактальную геометрию при- роды	123
6.2.	Понятие фрактала в математике	126
6.3.	Фрактальная размерность	128
6.4.	Стохастические фрактальные структуры	133
6.5.	Отличие фрактальных структур от гладких распре- делений	135
6.6.	Фрактальное пространство-время Нотталя	137
6.7.	Фракталы в природе и искусстве	140
6.8.	Порядок и хаос в Солнечной системе	144
6.9.	Фракталы, хаос и странные аттракторы	148
6.10.	Маятник как пример связи хаоса и фракталов	150
6.11.	Фрактальные ландшафты планет	152
6.12.	Межзвездные облака, молекулярные комплексы и области звездообразования	155
6.13.	Гало галактик – фрактальность темной материи	160
6.14.	Фрактальность межгалактической среды	163

Глава 7. Релятивистская и квантовая физика **165**

7.1.	Гамов-Иваненко-Ландау о классификации физических теорий	165
7.2.	Скорость света и ее свойства	167
7.3.	Теория относительности Пуанкаре-Эйнштейна	168
7.4.	Свойства релятивистского пространства-времени	171
7.5.	Свет, электричество и магнетизм	174
7.6.	Принцип наименьшего действия, симметрия и законы сохранения	175
7.7.	Постоянная Планка и квантовая физика	176
7.8.	Принцип неопределенности Гейзенберга	178
7.9.	В погоне за истинным атомом	180
7.10.	Квантовая природа фундаментальных сил	183
7.11.	Шуба виртуальных частиц и кипящий вакуум	185

Глава 8. Гравитация и космология	189
8.1. Природа гравитационного взаимодействия	189
8.2. Гравитационная постоянная и закон Ньютона	191
8.3. Релятивистская гравитация начинается в Солнечной системе	193
8.4. Общая относительность как геометрическая теория гравитации	195
8.5. Черные дыры, машины времени и Большой Взрыв	200
8.6. Парадоксы геометрического подхода	202
8.7. Полевой подход к описанию гравитации	204
8.8. Релятивистская астрофизика – наблюдения сильной гравитации	208
8.9. Компактные релятивистские объекты в рентгеновских двойных	209
8.10. Двойной пульсар – идеальная гравитационная лаборатория	210
8.11. Гравитационно-волновые обсерватории в действии	211
8.12. Обнаружены ли гравитационные волны?	214
8.13. Активность ядер галактик и сверхэнергии во Вселенной	216
8.14. Наблюдения компактных сверхмассивных объектов в ядрах галактик	219
8.15. Космология требует разработки релятивистской и квантовой теории гравитации	224
Глава 9. Третья научная картина мира	227
9.1. Космологические модели Эйнштейна-Фридмана	227
9.2. Закон Хаббла как следствие однородности распределе- ния вещества в пространстве	230
9.3. Возраст Вселенной в модели Фридмана	233
9.4. Геометрия мира и параметр плотности	236
9.5. Горячее начало Вселенной в модели Большого Взрыва	238
9.6. Необходимость инфляции в моделях Фридмана	242
9.7. Необходимость небарионной темной материи	245
9.8. Триумф модели Большого Взрыва – главные компонен- ты и гипотезы	247
Глава 10. Открытие тенденции галактик к сгущиванию	249
10.1. Неоднородности в распределении галактик на небесной сфере	249
10.2. Происхождение спора о сверхскоплениях галактик	250

10.3.	Богатые скопления галактик Эйбла	252
10.4.	Может ли пыль объяснить неоднородное распределение галактик на небесной сфере?	253
10.5.	3-D астрономия из вершины пространственного конуса	256
10.6.	Экзкурсия по местному гиперобъему	259
Глава 11. Фрактальность пространственного распределения галактик		263
11.1.	Ранние аргументы об однородности распределения галактик	263
11.2.	Закон Карпентера - де Вокулера для сгущивания галактик	265
11.3.	Фрактальный подход Мандельброта к скоплениям галактик	269
11.4.	Живем ли мы на вершине айсберга?	272
11.5.	Первые обзоры красных смещений галактик	274
11.6.	Пиетронеро и загадка пяти мегапарсек	277
11.7.	«Принстонские диалоги» о фрактальности крупномасштабной структуры Вселенной	279
11.8.	Метод корреляционной функции указывает на 5 Мпк	281
11.9.	Метод условной плотности находит фрактальность до 100 Мпк	283
11.10.	Искать однородность или предполагать ее наличие?	286
11.11.	Открывая третье тысячелетие: массовые обзоры красных смещений галактик	288
Глава 12. Происхождение мегафрактальных структур		293
12.1.	Гравитация – строитель небесных структур	293
12.2.	Потоки энергии и порядок из хаоса	294
12.3.	Звезда как самогравитирующий ядерный реактор	295
12.4.	Рост крупномасштабной структуры в модели Большого Взрыва	297
12.5.	Выделенность фрактальной размерности $D=2$	301
12.6.	Фрактальные состояния в задаче N тел	304
12.7.	Теория сложности Андерсона	306
12.8.	О чем говорят мегафракталы?	309
Глава 13. Загадки космологической физики		315
13.1.	Загадка сингулярности	315
13.2.	Физические аргументы против сингулярности	317

13.3.	Загадка скрытой массы в космологии	322
13.4.	Гравитационные линзы измеряют количество скрытой массы	325
13.5.	Загадка холодной небарионной скрытой массы	330
13.6.	Загадка темной энергии и космологического вакуума	336
13.7.	Загадка космологического красного смещения: 15-ая проблема Сэндиджа	343
13.8.	Парадокс Хаббла - де Вокулера	347
13.9.	Загадка космологического гравитационного красного смещения	352
13.10.	Загадка остывания газа в расширяющемся пространстве	354
13.11.	Удаление галактик со скоростью больше световой	356
13.12.	Геометрия и физика: взгляды Пуанкаре и Эйнштейна	358
13.13.	Практическая космология: на пути к четвертой научной картине мира	363
Глава 14. Космологические принципы в современных моделях мира		371
14.1.	Три кита космологии	371
14.2.	Лестница ключевых открытий в наблюдательной космологии	373
14.3.	Искусство моделирования вселенных	375
14.4.	Многоликий Космологический Принцип	377
14.5.	Совершенный космологический принцип Бонди-Голда-Хойла	379
14.6.	Космологический принцип Эйнштейна	381
14.7.	Классический вывод однородности из локальной изотропии	382
14.8.	Космологический принцип Мандельброта	384
14.9.	Космологические модели Эйнштейна-Мандельброта	387
Эпилог. Гармония науки и веры		389
Литература		395

Об авторах книги

Юрий Викторович Барышев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Астрономического института им. В.В.Соболева Санкт-Петербургского государственного университета, является специалистом в области внегалактической астрономии. Им опубликованы десятки научных работ, посвященных теоретическим основаниям современных космологических моделей и их наблюдательной проверке.

Пекка Теерикорпи, доктор астрономии, ведущий исследователь Туорла обсерватории Университета г. Турку (Финляндия), автор многих научных работ в области изучения строения и динамики Галактики, анализа методов определения постоянной Хаббла, исследования крупномасштабной структуры Вселенной, а также изучения активных ядер галактик и квазаров. Он является также автором ряда статей по истории астрономии и популярных книг о науке.

Предисловие

История цивилизации особенно наглядно проявляется в истории развития научной картины мира, в тех представлениях человека об окружающей его Вселенной, которые были достигнуты в результате совместных усилий науки и техники определенной эпохи. Современный человек также должен обладать определенным знанием космоса, которое он может получить в школе, колледже и университете, например, в курсах «Концепции современного естествознания» или «Вселенная вокруг нас», читаемых для студентов всех специальностей.

Эта книга задумана как пособие для «самостоятельного чтения», помогающее понять принципы развития науки о Вселенной. Она появилась в результате нашей практической работы в астрономии и представляет собой философское осмысление истории космологии от ее зарождения в Древней Греции до последних достижений в исследованиях крупномасштабной структуры Вселенной. Профессиональное участие в разработке современных моделей мира позволило нам выделить те идеи в истории космологии, которые были ключевыми для научной картины мира каждой эпохи, а также приоткрыть занавес над самим процессом создания космологических моделей.

Эта книга является переработкой и расширением нашей предыдущей книги, “Discovery of cosmic fractals”, вышедшей на английском языке в издательстве World Scientific в 2002 году и получившей много положительных отзывов как от астрономов, так и от читателей, просто интересующихся историей науки и становлением фундаментальных концепций современного естествознания.

Анализ исходных гипотез, лежащих в основании космологии, в их историческом развитии, а также примеры смены парадигмы в науке о Вселенной являются исключительно важным материалом как для молодых людей, только начинающих свой путь в науке, так и для специалистов по астрофизике и космологии, непосредственно создающих новые модели мира.

В нашем подходе к науке о Вселенной мы следуем определению, данному Ричардом Фейнманом: наука – это культура

сомнения, и для ее развития требуется иметь открытый ум и проводить экспериментальную проверку новых идей. Подтверждение такого понимания науки мы находим в истории развития космологии, прошедшей путь от музыки небесных сфер в античном мире до красоты космических фракталов в наши дни.

Благодаря как развитию техники эксперимента, так и появлению квантовой и релятивистской физики, 20-й век особенно богат открытиями в космологии, а наступивший 21-й обещает быть “золотым веком” исследования Вселенной. Одним из наиболее удивительных прорывов в наблюдательной космологии является приход трехмерной астрономии, когда сбывается тысячелетняя мечта астрономов исследовать не только положения объектов на небесной сфере, но и возможность прямого изучения пространственной структуры распределения объектов. Именно эта возможность открыла дорогу фрактальному описанию крупномасштабного распределения галактик и позволила говорить о фрактальной структуре Вселенной.

Стандартная космологическая модель 20-го века – модель Эйнштейна-Фридмана – основана на гипотезе однородного распределения материи во Вселенной. Современные наблюдения крупномасштабной структуры показали, что такая гипотеза явно противоречит реальному неоднородному распределению галактик в пространстве. Возможное решение конфликта между наблюдениями и теорией может быть связано с наличием гипотетической темной материи, распределенной однородно. Во всяком случае, эта новая ситуация в космологии привела к необходимости тщательного анализа всех исходных принципов современных космологических моделей и к необходимости разработки новых наблюдательных тестов, позволяющих различать альтернативные теоретические возможности.

В книге, посвященной истории развития научной картины мира, невозможно обойти молчанием взаимоотношение науки и веры – темы, которая находится в центре борьбы идеологий, и которая затрагивает такие стороны общественной жизни как власть, политика, религия. Космология (от греческого «космос» – «мир, порядок», и «логос» – «слово, наука») – наука о строении и эволюции Вселенной, система знаний о природе, во все века была тесно связана с теологией (от греческого «Теос» – «Бог») – системой знаний о Творце природы, оперирующей такими трудными вопросами, как происхождение материи и законов природы, возникновение жизни, смысл существования отдельного человека и будущее всего человечества.

На рубеже второго и третьего тысячелетий взаимоотношение науки и веры стало особенно актуальным вопросом, широко обсуждаемым в газетах, журналах и на международных конференциях. Эпилог нашей книги посвящен именно этой теме и, мы надеемся, будет способствовать росту взаимопонимания между учеными, познающими природу, и богословами, познающими Творца природы.

В заключение мы выражаем искреннюю благодарность В.В.Соколову и Д.И.Нагирнеру за поддержку нашей работы, стимулирующие обсуждения и ценные замечания. Особенно хочется поблагодарить Татьяну Николаевну Соколову за большой труд с рукописью нашей книги, благодаря чему этот проект дошел до завершения.

Юрий Барышев и Пекка Теерикорпи

Сентябрь 2005 г., Санкт-Петербург.

Глава 1

Первая научная картина мира

История – терпеливый учитель, несмотря на то, что ученики часто надменны. Это правда, что в настоящее время мы обладаем огромными знаниями о Вселенной. Но правда также и то, что бесконечно больше о Вселенной нам неизвестно. Исторический взгляд на зарождение, триумф и угасание «окончательных теорий Вселенной» способствует смирению человеческой гордости. Ограниченность знаний об окружающем нас бесконечном мире приводит к тому, что понимание космоса всегда является упрощением и искажением реальности, хотя часто и довольно элегантно.

Первые шаги в науке о Вселенной заслуживают внимательного изучения, поскольку они позволяют понять общие закономерности развития научной картины мира. Более того, некоторые античные идеи кажутся сейчас такими же свежими и блестящими, как и тысячи лет назад. История познания космического порядка усеяна загадками и парадоксами, раскрашена триумфами и неизбежными кризисами, наполнена радостью открытия и горечью противостояния невежеству.

1.1. Начало космологии в Древней Греции

То, что произошло в VI в. до н.э. среди греков-ионийцев, живших в своих процветающих колониях на западном побережье Малой Азии, называют «чудом Древней Греции». В их представлении обыденные вещи стали выглядеть совершенно иначе. 200 лет спустя Аристотель скажет, что они начали поиск *принципов*.

Что такое принцип? Исходный элемент в рассуждениях о природе, фундаментальное, глубинное свойство мира, которое связывает разные на вид вещи, позволяя тем самым понять окружающее нас разнообразие. Кроме того, используя один принцип, возможно предсказать явления, которые прежде были во власти множества капризных богов. Аристотель говорит:

«То, из чего состоят все вещи, первое, из чего они появляются и к чему в конечном счете возвращаются..., это, как они говорили, является элементом или принципом вещей, и, следовательно, они думали, что ничто не рождается и не разрушается, так как подобная сущность всегда сохраняется...»

Однако не все они были согласны относительно количества и природы этих принципов. Фалес Милетский (Thales of Miletus), основатель такого рода философии, говорил, что таким принципом является вода. Позднее Эмпедокл (ок. 494-434 г. до н.э.) уже сводил все к четырем элементам (Огонь, Воздух, Вода, Земля). Он писал поэмы о силах в Природе и называл силу притяжения «Любовью», а силой отталкивания была «Ненависть». В атмосфере дебатов об элементах у «воды» Фалеса был также конкурент. Анаксимандр (Anaximander), друг Фалеса, говорил, что элемент, из которого все состоит, нельзя указать среди известных видов вещества.

Для современного человека, легко говорящего о «законах Природы», рассуждение о принципах кажется естественным, однако потребовалась революция в мышлении, чтобы за видимым поведением вещей обнаружить проявление действия принципа. Возможно, у такой ментальной революции были предшественники в глубинах истории. Но в Ионии новое мышление о структуре мира прочно вошло в жизнь, и его влияние ощущалось и признавалось более поздними учеными Античности.

Ионические греки, оставившие континент в поисках лучшей жизни, жили в средоточии торговли и обмена идеями между различными нациями. Такая «ситуация принудительной оригинальности» безусловно способствовала появлению новых форм мышления.

Для примера хочется отметить, что деньги были изобретены около 700 г. до н.э. Первые монеты были сделаны в Лидии, в Малой Азии. Греки быстро приняли новое изобретение. Деньги означали, что совершенно разные вещи (например, бык и плуг) имеют что-то общее, что можно сравнивать – их ценность или цена. Но также могло быть общим что-то другое, *«от чего произошли все остальные вещи, при этом оно сохранилось»*. Это было космологическим утверждением о целом мире, в котором гипотетический общий элемент сохраняется при любых изменениях.

1.2. Анаксимандр решает парадокс неподвижной Земли

Что касается общей структуры мира, то Фалес представлял себе, что Земля плоская и плавает на воде. Анаксимандр же известен своим предположением о том, что Земле не требуется на чем-то плавать. Очевидно, что если Земле нужна поддержка, чтобы не упасть, скажем, вода, то что тогда держит воду? Если вода находится в огромной чаше, тогда что делает устойчивой чашу? Анаксимандр решил эту задачу, предположив, что Земля свободно покоится в центре космоса. Он объяснял это тем, что Земля равно удалена от любой части окружающего ее космоса и у нее нет причин двигаться в каком-то особом направлении, поэтому она остается в покое. Гордиев узел бесконечной цепи поддержек был разрушен предположением о том, что Вселенная сферически симметрична, т.е. одинакова во всех направлениях относительно Земли.

Это рассуждение вызвало сдержанную шутку Аристотеля: это все равно, как если бы человек, окруженный пищей и вином, умирал с голода оттого, что не мог решить, в каком направлении идти за едой... Средневековым единомышленником этого бедняги был знаменитый Буриданов осел, страдающий меж двух огромных и вкусных стогов сена.

1.3. Музыка небесных сфер

Считается, что тогда как большинство философов искало основной элемент среди каких-то субстанций (вода, воздух или что-то более экзотическое), Пифагор Самосский (Pythagoras of Samos) – загадочная и очень влиятельная фигура в истории – сделал далеко идущее заявление, что сущностью вещей является *число*. Так как космос (в смысле «упорядоченная Вселенная») управляется математикой, мыслящее человеческое существо может познать его структуру, даже не посещая каждый его уголок.

Геометрические формы и числа стали частью космологического мышления, что возвестило об особой роли математики, являющейся отныне основой науки: описания или *модели* явлений задаются языком математики. Современная философия математики рассматривает математические объекты как абстрактные понятия, которые отделяют форму от содержания, фиксируют отдельные стороны реальности, тем самым существенно упрощая и отрубая действительный мир. Математика также может быть определена как теория формы всех возможных миров. Иногда

*Пифагор
Самосский
ок. 580 -500
г. до н.э.*

математика определяется, как идеальная техника, позволяющая изучать формализуемые аспекты природы.

Пифагорейцы учили, что Земля имеет сферическую форму, так же, как звездное небо. Были некоторые намеки на то, что мы живем на земном шаре. Например, мореплаватели заметили, что уплывающий корабль исчезает за горизонтом, начиная с корпуса и заканчивая вершиной мачты. И путешественники заметили, что небо меняется, когда они двигаются с севера на юг, но остается неизменным при путешествии в восточно-западном направлении.

Согласно взглядам Пифагора все «планеты», включая Солнце и Луну, прикреплены к своим собственным сферам, вращающимся вокруг Земли. Радиусы сфер находились в «гармоническом» соотношении. Эта концепция пришла из первых физических экспериментов, результаты которых задавались в числах: было найдено целое соотношение струн лиры, делавшее гармоника приятными для человеческого уха. И первые космологи, которые называли музыку и астрономию науками-сестрами, наблюдая за звездным небом, наслаждались музыкой небесных сфер. Теперь мы знаем, что они поторопились обобщить «локальные» физические законы гармонии на небесные явления, что охотно делают и современные космологи.

Пифагорейцы считали, что все в природе можно измерить целыми числами – единственным типом чисел, известным в то время. Шок наступил, когда один из них с помощью знаменитой теоремы их учителя показал, что отношение диагонали и стороны любого квадрата нельзя выразить целым числом ($=\sqrt{2}$). Они представляли себе, что линии сформированы из большого числа точек, как атомы рядом друг с другом, и отношение («рацио») любых двух отрезков линии всегда должно быть рациональным. От этой точки зрения пришлось отказаться. Ее сменили два типа чисел: старые «рациональные» и новые «иррациональные». Была открыта дорога вещественным числам и математическому континууму современной математики.

1.4. Атомисты и микрокосмос

*Левкипп
Милетский
ок.500 – 440
г. до н.э.*

Существовали также и другие принципы. К примеру, атомисты считали, что материя не непрерывна, но образована из очень маленьких твердых частиц, которые называются атомами (что означает «неделимые»). Согласно античным атомистам – Левкиппу и

*Демокрит
из Абдер
ок.460 – 370
г. до н.э.*

Демокриту – мир представлялся как пустота, в которой без цели и назначения летают атомы. Безграничное пространство и бесконечное время гарантируют, что рано или поздно атомы, которые иногда сталкиваются, образуют целые миры. Наш мир является одним из таких примеров. Вакуум атомистов был похож на ньютоновское пространство: бесконечный и не оказывающий никакого сопротивления атомам, стремительно движущимся сквозь него.

Так как атомы лежат в основе всего, атомисты могли предложить объяснение видимых вещей, начиная с невидимых. Практическим примером может служить мокрая одежда, которая висит на веревке и сохнет на солнце. Мы не можем видеть, как из одежды уходит влага, потому что она состоит из мелких частиц, невидимых глазу. Так же мы не видим воздух, хотя совершенно очевидно, что это материальная субстанция, о чем свидетельствует любой ветреный день. Невидимые частицы стремительно двигаются, и когда они все вместе бомбардируют паруса корабля, в результате происходит видимый эффект.

Для современного человека понятие атома естественно, как молоко матери, и из всех греческих научных идей ему наиболее легко даются атомы, странствующие по бесконечной Вселенной. Однако атомисты при всей своей оригинальности и настойчивости в поиске истины не могли продвинуть свою науку дальше рассуждений о земных вещах. Цепь размышлений, ведущая к построению космологии, началась с созерцания регулярных небесных движений.

1.5. Математическое небо Платона

На пути науки важный шаг был сделан по инициативе человека, который придерживался радикальной точки зрения, считая, что можно познать мировую истину посредством чистого размышления. Философ Платон (Plato) учил, что то, что мы видим, является всего лишь неполным и тусклым отражением реального мира, но мыслитель должен быть способен проникнуть сквозь этот смутный занавес и найти истинные математические законы. И хотя современный ученый, знающий о важности наблюдений и даже о парадоксах внутри самой математики, уже не так уверен в силе чистого мышления, он, как и Платон, предполагает, что Вселенную и ее явления можно описать математически, по крайней мере, ее формализуемые аспекты. Для Платона это было возможно только для

*Платон
427-347 г.
до н.э.*

упорядоченных Небес, в то время как весь беспорядок находился на Земле.

В своей Академии, расположенной в тихом Афинском парке, названном по имени мифического героя Академоса, у Платона была группа талантливых учеников. Говорят, он задал им задачу: можно ли объяснить сложные движения звезд и планет, порой столь запутанные на вид, простыми равномерными движениями, приятными для ума и присущими истинному Миру? Хотя действительная роль Платона не очень ясна, Евдокс Книдский (Eudoxos of Cnidos) предложил по этому принципу свою знаменитую *теорию гомоцентрических сфер*. Для модели потребовалось 26 сфер, вращающихся с разными, но равномерными скоростями вокруг своих осей. Эти оси связывали внутреннюю сферу со следующей и были наклонены относительно друг друга под неизменным углом. Это была первая математическая модель, созданная для довольно подробного объяснения небесных движений.

На склоне лет Платон написал знаменитый диалог «Тимей» (Timaeus), в котором он дал свое видение Вселенной. Стержнем философии Платона является существование реального, непосредственно не наблюдаемого, вечного мира, к которому можно приблизиться только разумом. Ему присущи красота, гармония, порядок, подобие и симметрия, т.е. понятия, которые Платон ассоциирует с математикой. Платон предполагал, что наблюдаемая Вселенная была создана великодушным Демиургом (от греч. «мастер»), изобретателем мира, как уникальная копия подлинного мира. Кстати, он мудро подчеркивает, что это всего лишь одна из возможных историй того, как была создана Вселенная. По его мнению, структуру Вселенной тоже можно узнать только приблизительно. Но имеет большой смысл попытаться!

Как хороший архитектор, Демиург хотел сделать свою конструкцию как можно лучше, в действительности наилучшей. Он хотел нанести отпечаток математического узора подлинного мира на лишенную черт первичную материю. Чтобы полностью отразить его идеалы, получившийся материальный мир должен иметь такую форму, которая содержит все существующие формы, включая его самого. Платон считал, что из всех геометрических форм сфера является самой совершенной и наиболее похожей на саму себя. И таким образом, Демиург, *«который ценил сходство в тысячу раз выше, чем несходство»*, решил, что формой Вселенной должна быть сфера. И она

была запущена во вращение. Равномерное круговое движение, при котором небесные тела регулярно возвращаются на свое предыдущее

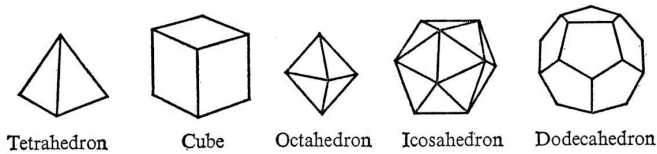


Рис. 1.1. Тетраэдр, Куб, Октаэдр, Икосаэдр, Додекаэдр – пять правильных платоновых тел, представляющих (слева направо) огонь, землю, воздух, воду и небесную материю. Таким образом, регулярная геометрия принадлежала не только царству небесных сфер, но ее можно было также обнаружить среди вещей здесь, внизу, хотя у них плоские поверхности и острые грани.

место, ближе всего к «неизменности» – свойству ненаблюдаемого вечного мира.

Звезды были сделаны сферическими, как и сама Вселенная и, кроме того, что они принимают участие во вселенском вращении вместе со сферическим небом, они также вращаются вокруг своей оси. В «Тимее» Платон упоминает «хоровод» планет, но не вдается в подробности, которые, как он говорит, потребовали бы «инструмента», ссылаясь, вероятно, на модель Евдокса.

Разумеется, Земля также имеет сферическую форму. Но как может «беспорядок» здесь, внизу, отражать порядок вечного мира? У Платона было оригинальное решение. Демиург спрятал порядок и математику в микромир. Вокруг нас находятся четыре элемента - но нелегко заметить, что элементы сделаны из очень маленьких геометрических форм, как бы атомов или кристаллов. Демиург сделал эту материальную основу как можно более красивой. Элементарные формы - это правильные тела, каждое из которых соответствует одному элементу (см. Рис.1.1). Тетраэдр был связан с огнем, куб – с землей, октаэдр – с воздухом, икосаэдр с его 20 равносторонними треугольниками ассоциировался с водой. Существует также пятое правильное тело – додекаэдр, состоящий из 12 пятиугольников. Своими очертаниями он близок к сфере, и Платон был склонен ассоциировать его с Вселенной в целом. Более поздние философы говорили о пятом элементе, из которого состоит небесное царство.

Эти геометрические формы были не просто пассивными. Платон в общих чертах описал своего рода химию, допускавшую трансформацию одного элемента в другой. Порождения новых

комбинаций приводит к богатому материальному миру, который мы видим вокруг нас. Куб (земля) не состоит из фундаментальных треугольников, поэтому этот самый «твердый» из элементов не участвует в трансформациях.

1.6. Научный метод и физика Аристотеля

Аристотель, выдающийся ученик Платона, дал определение тому, что есть научное знание. Согласно Аристотелю, различные ветви науки имеют своим основанием исходные аксиомы, из которых можно логически вывести все знания. Аксиомы можно познать через внимательное *наблюдение* природы, вместе с глубокой *интуицией*. Примерно так думают и современные ученые, хотя в нашей науке эксперименты носят активный исследовательский характер. Аристотель очень твердо требовал, чтобы аксиомы представляли собой высший уровень знаний: они должны быть *«истинными, первичными, непосредственными, хорошо известными, априорными и порождающими необходимые следствия»*. Современный ученый более скромнее со своими исходными аксиомами, которые являются скорее временными предположениями или гипотезами.

Физика Аристотеля опиралась на наблюдения природных явлений. Очевидно, что мир вокруг нас является ареной изменений и движений. Движение – это основное явление, которое хотел бы понять пытливый ум. Аристотель рассматривал два типа движений. *Естественное* движение, которое соответствует стремлению к центру мира (который совпадает с центром Земли), либо от него, либо является круговым движением вокруг него. Имеется также *вынужденное*, обусловленное внешними воздействиями. Таким образом, нет свободно движущихся тел: любое движение либо требует постоянной силы, либо является естественным. Говоря современными терминами, физика Аристотеля, в отличие от физики Галилея, не содержала движения по инерции.

Аристотель взял планетарную модель Евдокса и свою физику движения в качестве основы для построения геоцентрической космологии. Земля находится в центре гигантского «часового механизма», состоящего не менее чем из 56 сфер. Внешняя сфера содержит на своей поверхности неподвижные звезды и находится в непрерывном равномерном вращении. От нее передается вниз

движение на различные внутренние сферы, производя вращение сфер, соответствующих каждой планете.

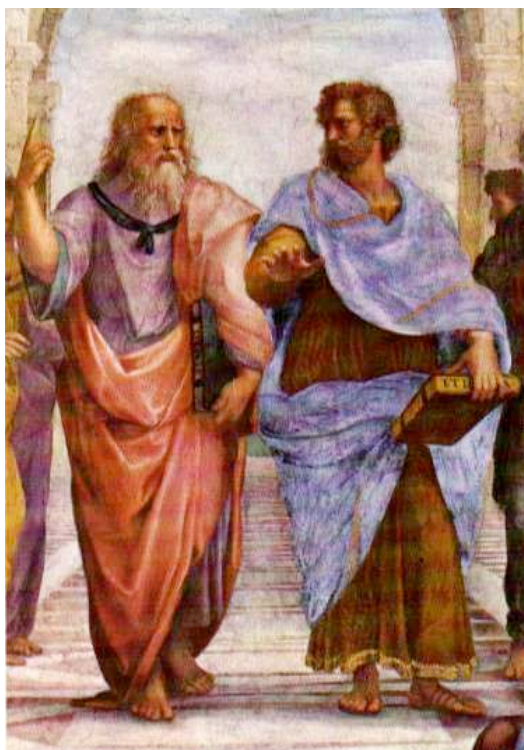


Рис. 1.2. Платон и Аристотель в Академии среди учеников (фрагмент фрески Рафаэля). Платон указывает на небо, а Аристотель на землю. Это олицетворяет существо спора двух великих философов – что первично, идеальное математическое небо или земная реальность.

Можно описать космос Аристотеля как стационарный – он всегда существовал и не эволюционирует. При взгляде на различные цепочки явлений, казалось, что они текут по готовым каналам к конечной причине процессов. Камень падает потому, что его целью является естественное место в центре Вселенной. Аристотель настаивал на том, что научное объяснение процесса не полно без учета его конечной цели (*telos*), которая похожа на силу, приходящую из будущего, влияя на то, что должно случиться сейчас. Для нас это

кажется экзотикой – современная наука начинает скорее с прошлого (с «начальных условий»), допускает эволюцию и старается понять, что произойдет в будущем.

В средневековой Европе Аристотель был возведен на престол как величайший авторитет в науке. Однако в современной литературе встречается и противоположное мнение о том, что влияние Аристотеля замедлило развитие науки. Конечно, такой взгляд не соответствует действительному положению вещей, поскольку им были сделаны лишь первые шаги, всегда наиболее трудные. Тексты греческих философов послужили базисом для развития современной науки.

Аристотель был проницательным наблюдателем природы, настоящим ученым и плодотворным писателем, создавшим основополагающие тексты во многих областях знаний. Его научный метод был направлен на обнаружение фундаментальных принципов через наблюдение явлений. Нет вины Аристотеля в том, что средневековые последователи предпочитали считать его книги окончательной истиной. Так студенты считают университетские учебники завершенными, не осознавая даже, что наука – это та деятельность, которая меняет содержимое этих книг.

Аристотелю принадлежит множество трудов. Примером того, как слаба наша связь с прошлым, является то, что ни одна из них не сохранилась в полном виде. Наше знание его мыслей основано на «записях лекций» и кратких изложениях, но даже они были утеряны на два века, прежде, чем были обнаружены в подвале потомка одного из его учеников. Интересно, что всего несколько лет назад археологи открыли то место в Афинах, где располагался знаменитый Лицей (*Lyceum*) Аристотеля.

1.7. Первое измерение радиуса Земли

Согласно космологической модели Аристотеля, Земля имеет форму шара, и наблюдательным тестом этой модели могло быть измерение радиуса земного шара. Хотя в повседневной жизни представление о плоской Земле является вполне достаточным, однако теория, объясняющая устройство мира, всегда нуждается в проверке предсказаний.

Географ и библиотекарь Александрийской библиотеки Эратосфен (*Eratosthenes*) сделал первое документированное

Эратосфен
ок.275-195
г. до н.э.

измерение размера Земли, опираясь на гипотезу о ее сферической форме и на наблюдения Солнца. Эратосфен просто измерил высоту Солнца над уровнем горизонта в двух городах Египта, Сиене и Александрии, лежащих приблизительно на одном меридиане (направление север – юг) в момент летнего солнцестояния. Оценив расстояние между этими городами и разницу углов высоты Солнца, он нашел, что длина окружности большого круга Земли составляет 250000 стадий, т.е. примерно 40000 км, что близко к реальному значению.

Таким образом, во времена Античности форма и размер Земли были известны довольно хорошо. Людям понадобилось более двух тысячелетий, что бы подняться на космическом корабле над землей и ясно увидеть, что она действительно является шаром. Эратосфен продемонстрировал, что можно измерить размер того, что нельзя увидеть целиком. Аналогично пытаются измерить Вселенную и современные космологи, в рамках определенных предположений о ее «форме» или геометрии.

1.8. Великий синтез Клавдия Птолемея

Модель Евдокса была геометрической конструкцией, отражающей Платоновский мир идей, тогда как система Аристотеля была более направлена на воспроизведение наблюдаемой Вселенной. Но с планетарной моделью Евдокса была одна проблема – из наблюдений положений и яркости планет на небесной сфере уже было известно, что когда планеты совершают свои петли, они ярче, чем в другое время, так что, возможно, они ближе к Земле. В модели Евдокса планеты всегда остаются на одинаковом расстоянии от Земли.

Это противоречие с наблюдениями устранил Апполоний из Перги (Apollonius of Perga). Он разработал *теорию эпициклов*. В его модели планета не оставалась жестко на своей сфере-носителе. Ей было предназначено странствовать на меньшей сфере (эпицикле), центр которой был закреплен на вращающемся главном шаре. Такая космическая «карусель» прекрасно объясняла движения планет.

Законченный вид теории эпициклов дает Птолемей Александрийский (Claudius Ptolemy) в своей книге «Великий синтез» (*Great Synthesis*), позже названной мусульманскими учеными «Альмагест» (*Almagest*). Система Птолемея была настоящей научной моделью мира. Она основывалась на астрономических наблюдениях, выполненных с

*Апполоний
ок. 265-176 г.
до н.э.*

*Клавдий
Птолемей
87-165 г.*

помощью инструментов, измеряющих углы на небе. Теория Птолемея использовала математику того времени и предсказывала движение небесных объектов с хорошей точностью. Действительно, судьба физической теории зависит от ее способности к предсказаниям –

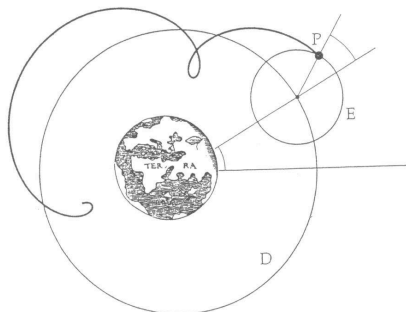


Рис. 1.3. Апполоний объяснял сложное движение планеты (P) вокруг Земли как сумму двух круговых движений: движения по эпициклу (E), центр которого движется по деференту (D). Во время петли на небе планета находится ближе всего к Земле.

теория небес подвергается проверке практически каждый день.

Нам часто будут встречаться «три кита космологии»: принцип, теория и наблюдение. Эти элементы ясно видны в системе Птолемея. Кроме геоцентризма, Птолемей принял и другой принцип, традиционно считавшийся истинным. Он писал:

«... цель, к которой должен стремиться астроном, состоит в следующем: показать, что явления на небесах происходят с равномерными круговыми движениями».

Таким образом, равномерное движение по кругу стало космологическим принципом для ученых, которые рассматривали его как единственное подходящее небесам движение. Каждый солнечный день и каждая звездная ночь являются для того, чтобы подкрепить эту идею. Эта традиция мышления была так сильна, что даже Коперник (великий революционер) был ей верен, и даже Галилей не мог допустить иного, чем круговое, движения для планет.

1.9. Первые альтернативные космологии

Хотя система мира Аристотеля-Птолемея была доминирующей идеей (своего рода стандартной космологической моделью), в то же время существовали и другие блестящие идеи об устройстве мира и роли вращения небесных тел, которые, однако, были недостаточно зрелыми, чтобы защищать себя. К примеру, Филолай (Philolaus) учил, что Земля и другие небесные тела вращаются вокруг огня, горящего в центре мира. Огонь нельзя увидеть, потому что Земля всегда повернута к нему одной стороной.

*Филолай
ок. 450 г.
до н.э.*

Гераклид Понтийский (Heraclides of Pontus), ученик Платона, учил, что Земля вращается вокруг своей собственной оси. Ежедневное движение неба – всего лишь кажущееся явление для наблюдателя на вращающейся Земле.

*Гераклид
388-315 г.
до н.э.*

Должно быть, в Академии Платона вопросу о движении Земли уделяли достаточно внимания. В «Тимее» даже есть намек на то, что, возможно, сам Платон считал, что наш земной шар вращается. Гераклид был близок к тому, чтобы стать главой Академии после смерти преемника Платона Спевсиппа (Speusippos), но на выборах он получил на несколько голосов меньше, чем Ксенократ (Xenocrates), который поддерживал теорию неподвижной Земли.

Аристарх Самосский (Aristarchus of Samos) учил, что Земля и планеты вращаются вокруг Солнца. К сожалению, мало известно о том, как «Коперник Античности» пришел к такой идее. На основе Эвклидовой геометрии он разработал искусные методы определения космических расстояний. Он смог достаточно хорошо измерить расстояние до Луны и ее размер, хотя его оценка расстояния до Солнца была большой промашкой (слишком маленькое расстояние). Несмотря на это, он осознал, что Солнце намного больше, чем Земля, и, возможно, именно по этой причине в центр он поместил сверкающий факел, а не наш скромный каменистый земной шар.

*Аристарх
310-230 г.
до н.э.*

Самый важный принцип системы Аристотеля-Птолемея состоял в том, что Земля является естественным центром Вселенной. Но, как это характерно для научной интуиции греков, они также рассматривали совершенно противоположную идею – идею отсутствия центра.

Интересно мнение других античных мыслителей на этот счет. Например, удивительной кладовой космологических идей является письмо Эпикура (Epicurus) Самосского к своему ученику Героду. В 35-летнем возрасте Эпикур переехал в Афины и создал там школу, основанную на идеях атомизма.

*Эпикур
341-270 г.
до н.э.*

Эпикур объясняет, что Вселенная в целом не может измениться. Она всегда была и всегда будет такой, какой является сегодня: «Нет нечего, во что она могла бы превратиться, так как ничего нет вне полноты Вселенной, что могло бы ее содержать и вызвать ее изменение». Вселенная состоит из тел и вакуума, а тела состоят из неделимых атомов. Мир не может иметь границу, иначе у него была бы «внешняя» часть.

Хотя бесконечная Вселенная атомистов кажется знакомой, интригующая особенность отличает ее от нашей обычной концепции бесконечного пространства. Вселенная Эпикура еще не была изотропна, т.е. имела разные свойства в разных направлениях. В ней было выделено направление, в котором все время падали атомы. Интересно, что маленькие и большие атомы падали одинаково, с равной огромной скоростью! Иногда они неожиданно взаимодействовали, от чего возникали зародыши космических структур, таких, как миры, похожие на наш.

Римский поэт Лукреций (Lucretius), поклонник атомистов и Эпикура, писал:

«Мир бесконечен во всех направлениях. ...Так как вне Вселенной ничего нет, у нее нет ни границ, ни размера, ни конца. Неважно, в каком месте вы находитесь, ...в любом направлении Вселенная безгранично велика».

Эти слова проливают свет на то, как понимали в Античности космологический принцип отсутствия центра Вселенной. Но жизнь этой смелой идеи омрачалась вращением ночного купола, которое делало Землю особой точкой – центром Вселенной, что интерпретировалось как наблюдательное подтверждение геоцентрической системы мира.

1.10. Идеи античности продолжают жить

Птолемей жил в Александрии в эпоху Римской империи, когда культурное наследие Греции угасало. Основанный примерно в 300г. до н.э. мировой научный центр – Музей Александрии – хранил около 500000 рукописей, которые философы и ученые могли использовать в своих занятиях литературой, математикой, астрономией и медициной.

В 312 г. н.э. Константин Великий принял христианство, в результате чего произошло объединение религии и государства. Для науки последствия были отрицательными. Помимо общего неприятия

Лукреций
ок. 98-55 г.
до н.э.

изучения мирских вещей, появились экстремисты, выступавшие против языческой культуры. В 390 г. н.э. большая часть Александрийской библиотеки была разрушена христианами. В 415 г. н.э. была убита женщина-философ Гипатия, чье редкое для античной женщины занятие не прибавило ей популярности среди экстремистов. После такого кровавого деяния многие ученые переселились в Афинскую Академию и в Константинополь. Окончательный смертельный удар был нанесен библиотеке в 624 г. н.э., когда магометане покорили Александрию. История повествует, что бесценные рукописи полгода были топливом для 4000 городских бань...

В 529 г. н.э. император Юстиниан закрыл Академию Платона после девяти веков работы. В Европе начались Темные Времена, и целые века здесь прошли без особого интереса к науке. Многие помнили, как Св. Августин, в IV веке, предостерегал в своих «Откровениях» от «болезни любопытства...», которая подвигает нас на попытки открыть тайны природы, находящиеся выше нашего понимания... Я больше не мечтаю о звездах».

Однако удивительным образом интеллектуальные сокровища прошлого были частично сохранены в империи Магомета. Ее способные ученые перевели греческие тексты, которым посчастливилось пережить тяжелые времена.

Одна из самых ранних карт мира была составлена Косьмой Индикоплавом (Cosmas Indicopleustes) на грани Темных Времен, в VI веке. Уроженец Александрии Косьма много лет был торговцем-мореплавателем, путешествуя в Азию и Африку, прежде чем ушел в монастырь. Там он писал книги о географии, структуре мира и Священном Писании. Из них до нас дошла «Христианская топография», известная своей попыткой нарисовать картину Вселенной строго в соответствии с Библией, с учетом того, что Косьма видел во время своих далеких путешествий. Конечно, получившееся мирописание теперь кажется довольно странным, с его шатерообразной Вселенной, четырехугольной землей и умышленным отсутствием каких-либо «языческих» сфер и круговых движений. Очевидно, на конструкцию очень повлияло то, что Косьма, как он думал, нашел в Библии, и даже его довольно далекие путешествия этой картине не противоречили.

Современная космография позволяет строить карты глубин Вселенной не потому, что человек может путешествовать намного дальше, чем Косьма, а потому, что после Галилея мы научились

*Косьма
Индикоплав
VI в.*

получать информацию от небесных посланников – лучей света, падающих с неба. Однако даже большие телескопы проникают на ограниченное расстояние, и даже в наши дни исследована лишь малая часть Вселенной.

1.11. Государство и религия объявляют систему Птолемея окончательной истиной

В XII веке начали переводить греческие тексты на латынь, в основном с арабских версий. Работы Аристотеля и других были приняты среди Европейских ученых с энтузиазмом. Должно быть, у них появилось ощущение, что их глазам открывается сокровище. Послушайте слова Бернара из Шартра, ученого, жившего во Франции XII века: «Мы карлики, которых подняли на плечи гигантов. Таким образом, мы видим больше и дальше, чем они. Не потому, что наши глаза острее или мы выше, но потому, что они держат нас в воздухе, на своей гигантской высоте...»

Сначала религиозная власть была очень недовольна твердыми взглядами Аристотеля на Вселенную и естественные законы, которые, кажется, даже подвергали сомнению безграничную власть Бога. Но когда Св. Фома Аквинский (St. Thomas Aquinas) смог объединить Священное Писание и идеи «гигантов», появилась особая средневековая космология. Это учение включало в себя Бога, Человека, Небо и Землю, и сделало физику и космологию Аристотеля официальной системой понятий, преподаваемой в школах и университетах. В конце концов, Вселенная сфер, казалось, хорошо соответствует Священному Писанию: Бог создал неподвижную Землю и все остальное, вращающееся вокруг человека – венца творения.

В своей «Божественной комедии» Данте Алигьери нарисовал незабываемую картину средневековой космологии. В поэме описано путешествие Данте в Ад, Чистилище и Рай. Ад – это конус, расширяющийся вниз к центру Земли, тогда как Чистилище – это коническая гора с противоположной стороны. С вершины Чистилища Данте, наконец, поднимается в Рай, состоящий из все более прекрасных уровней (планетарных сфер) и оканчивающийся десятым Небом, Эмпиреей, которое есть самое благословенное место - место обитания Бога.

Данте, как поэт, почти не упоминает эпициклы и другие тонкости математической системы мира. Он рисует общую картину, какой ее представляли все, кроме астрономов, показывая реальную

*Св. Фома
Аквинский
1225-1274*

*Данте
Алигьери
1265-1321*

важность ее структуры для человеческого существа. Будучи и материальной, и духовной сущностью, у Человека есть два соперничающих направления движения. В зависимости от баланса между его материальной и духовной сторонами, после смерти он либо спустится в ужасные глубины Ада, либо поднимется на Небеса, к Богу.



Рис. 2.1. Космос Средневековья был ограничен сферой Primum Mobile или первичной движущей силы, за которой находилось жилище Бога. Считалось, что небесный мир физически совершенно отличается от Земли и ее атмосферы – смертное существо не смогло бы прожить там ни мгновения. Однако если бы кто-то смог каким-то образом добраться до «внешней границы», то увидел бы, как меняется физическая реальность, а пространство и время меняют свое привычное значение. Согласно Данте, «там, где правит Бог, расстояние ни уменьшается, ни увеличивается. Законы Природы там не существуют».

Вот почему конкретный *астрономический* мир был так важен для средневекового ума. Эта попытка объединения науки и веры привела к цельному взгляду на космическое положение человека, как венца творения, взгляду, утерянному во время коперниковской революции.

Наука Средневековья – схоластика – была сосредоточена на мышлении и рассуждении. Слияние предвзятой интерпретации Библии и ограниченной физики Аристотеля воздвигло кажущуюся понятной геоцентрическую модель Вселенной, которую государство и религия

Жан Буридан
ок. 1297-1358

объявили «окончательной» истиной. Ученому оставалось только объяснять все явления на основе «круговых движений».

В XIV веке Жан Буридан (Jean Buridan) и его ученик Николь Оресм (Nicole Oresme) критиковали аристотелевское понятие силы. *Николь Оресм
ок.1320-1382* Краеугольным камнем физики Аристотеля было то, что «*все, что находится в движении, должно быть движимо чем-то*». Стрела летит вперед потому, что ее толкает воздух. Гигантские сферы с планетами вращаются потому, что на них все время действует сила, направленная из сферы неподвижных звезд. Но почему тогда стрела с тупым концом не летит быстрее, чем стрела с острым хвостом? Буридан предполагал, что что-то добавляется к телу, когда оно брошено на свою траекторию. Это что-то он называл «импульсом» (*impetus*).

Буридан применил понятие импульса к движению сфер, что явилось важным шагом в развитии космологии. Принято было думать, что звездную сферу вращают ангелы. Однако Буридан заметил, что Библия об этом умалчивает. Так что, возможно Бог придал сферам их движение, когда Он создавал Мир. Получив импульс, они начали вращаться сами по себе, без всякого трения, проявляя тем самым наличие начального импульса в чистом виде. Вспомним, как позднее была открыта динамика Ньютона в свободной от трения Солнечной системе.

Оресм не принял Аристотелевских доказательств неподвижности Земли, приводя аргумент, что любое движение относительно. Возможно, что Земля вращается вокруг своей оси, и при этом кажется, что вращается звездное небо, «как человек в движущемся экипаже думает, что двигаются деревья снаружи экипажа». У Аристотеля против этого был аргумент, что камень, брошенный прямо вверх, падает вниз в то же точку. А поверхность вращающейся Земли за это время передвигается на сотни метров в сторону. Оресм увидел доказательство в свете понятия импульса: камень просто сохраняет свою часть импульса, который он имеет вместе с движущейся Землей.

Будучи результатом многочисленных исследований, усилий и размышлений, взгляд на мир является продуктом своего времени, дорогим для его современников, с элементами, которые тогда обращались и к душе и к разуму. Так что и Жан Буридан, и Николь Оресм приняли, что Земля неподвижна, и, хотя они и критиковали доказательства Аристотеля, для смены парадигмы нужны были более сильные аргументы. То, что стало возможным представить вращение

гигантских небесных сфер без толкающих ангелов, можно назвать подгонкой космологической модели, чтобы она лучше соответствовала новым идеям, развитым физиками на Земле. Однако путь мелких поправок подошел к концу.

Глава 2

Вторая научная картина мира

2.1. Николай Кузанский и принцип «центр везде»

Еще в 3-м столетии н.э. влиятельный «неоплатонист» Плотин (Plotinus) описал свою одухотворенную космологию в произведении «Эннеады» (*Enneads*). В интереснейшем разделе под названием «Небесный круг» он писал: «небеса, по своей природе, будут либо неподвижны, либо будут вращаться». И, сам того не сознавая, он почти ступил на Землю Обетованную: «Центр круга есть особая точка покоя: если бы внешняя окружность не находилась в движении, то вселенная была бы всего лишь одним огромным центром». Но небеса продолжали вращаться.

*Плотин
205-270*

Удивительный прорыв в осознании бесконечной Вселенной был сделан примерно в 1440 году кардиналом-миротворцем Николаем Кузанским (Nicolas of Cusa), который в своем философском трактате «Об ученом невежестве» так сформулировал космологический принцип:

*Николай
Кузанский
1401-1464*

Вселенная это шар, центр которого находится везде, а граница нигде.

Николай Кузанский пришел к такой идее в попытке описать Бога, который по сути своей непостижим. В действительности, контекстом, в котором он формулирует этот принцип, является относительность движения. Так как только Бог может находиться в абсолютном покое, то даже Земля должна каким-то образом двигаться. К тому же, «у каждого человека, находится ли он на Земле, на Солнце или на другой планете, всегда такое впечатление, что все другое движется, тогда как он сам находится в некоем неподвижном центре». Вследствие этого «будет существовать мировая машина, центр которой, так сказать, находится везде, а границы нет нигде, так как Бог является ее границей и центром, а Он везде и нигде».

Еще более удивительной кажется интуитивная догадка Николая Кузанского об иерархии круговых движений небесных тел.

Вот его аргументы в объяснении того, что не существует абсолютного центра круговых движений небесных тел:

Затем возьмите все эти различные образы, которые вы создали, и сложите их в один, так чтобы центр стал зенитом и наоборот; и тогда ваш ум, которому так сильно помогло невежество, т.е. обучение, увидит невозможность понять мир, его движение и форму, так как он будет выглядеть как колесо в колесе, сфера в сфере без центра или какой-либо границы...

Совместное выполнение принципов отсутствия центра и наличия круговых движений привело Николая Кузанского к представлению об иерархии вложенных структур. Говоря современным языком, он предугадал фрактальную структуру мира, и был наполнен трепетом и восхищением перед мудростью Творца.

2.2. Коперник об обращении небесных сфер

Николай Коперник (Nicolaus Copernicus) был удивительным человеком, образно говоря, остановившим вращение неба и сдвинувшим нашу Землю с проверенного временем центрального положения. Он показал, что сам по себе наблюдательный факт движения Солнца и звезд по небосводу ничего не доказывает, и только совместное использование наблюдения и теоретической модели может привести к правильному пониманию этого факта. Осознание того, что огромный земной шар находится в движении, привело к смене парадигмы. Так появилась вторая научная картина мира в течение следующих полутора веков.

В 1543 году, после многолетних колебаний, польский астроном и каноник епископского совета Фрауенбурга опубликовал свою великую работу всей жизни *De Revolutionibus Orbitum Coelestium*. Через эту книгу «Об обращении небесных сфер» Земля стала всего лишь обычной планетой. По его словам:

«Все видимые нами движения Солнца принадлежат не ему, а Земле и нашей сфере, вместе с которой мы вращаемся вокруг Солнца, как и любая другая планета... Таким образом, одного этого движения достаточно для объяснения большого числа кажущихся неупорядоченностей.»

Это было открытие Солнечной Системы, нашего настоящего дома, построенного на универсальных законах, а также открытие первого

Николай
Коперник
1473-1543



Рис. 2.1. Николай Коперник, польский астроном, врач и каноник сделал решающий шаг в смене первой научной картины мира.

звена в цепи космической иерархии.

Что привело этого тихого и довольно робкого служителя католической церкви к его поразительной идее о космическом порядке с центром, расположенным в Солнце? Ни небо, ни Земля не представляли неопровержимых доказательств против системы Птолемея. Томас Кун (Thomas Kuhn), который взял коперниковскую революцию в качестве примера «слома парадигмы», думает, что старая система стала невыносимо сложным и неуклюжим «монстром». Некоторые считают, что это направление мысли могли подсказать также религиозные и философские течения, имевшие в своих программах культ Солнца.

Финский математик Раймо Лехти (Raimo Lehti) занимался этим вопросом и пришел к выводу, что разгадкой были *солнечные связи*. Планеты совершают свой танец по небу так, будто их ведет Солнце. Например, петли планет всегда происходят тогда, когда Солнце находится в противоположной стороне неба. Возможно, у Коперника возникла идея о центральном положении Солнца из этих закономерностей, которые прежде считались чудом, которое Бог наложил на движения планет. Это привело Коперника к поиску новой системы в тех математических конструкциях, которые разработал Птолемей, оставшийся для Коперника великим Учителем. «Коперник открыл гелиоцентричность, не наблюдая Природу, а изучая Альмагест Птолемея», – пишет Лехти. Альмагест, сам основанный на наблюдениях планет, содержал зародыш будущей космологии.

Коперник получил также другое послание из прошлого. Он ссылаясь на древних греков, которые размышляли над альтернативными космологическими идеями:

«Воспользовавшись этим, я тоже начал думать о подвижности Земли; и хотя эта точка зрения кажется абсурдной, однако, зная, как другим до меня была дарована свобода представлять себе такие круги, какие они выбрали для объяснения феномена звезд, я посчитал, что мне тоже может быть вполне позволительно проверить, допустив некоторое движение Земли, может ли быть открыто более логичное, чем их, объяснение вращения небесных сфер.»

«Абсурдные» идеи, по счастливой случайности переданные из прошлого, возможно, были сокровищем, которое нужно было обнаружить среди пыльных текстов: «камень, который отвергли строители, тот самый сделался главою угла»...

2.3. Новое понимание устройства неба

Во времена Античности небо представляли как гигантскую звездную сферу, в центре которой покоится Земля. Однако тогда для объяснения движения планет потребовалась сложная эклиптическая механика. Коперник осознал, что если допустить реальное движение Земли, то можно просто понять небесные явления:

- * *суточное вращение звездного неба,*
- * *годовое перемещение Солнца по небу,*
- * *регулярно повторяющиеся петли планет.*

По сути, Коперник следовал Птолемею, который считал, что «хорошим принципом является объяснение явлений с помощью наиболее простой из возможных гипотез до тех пор, пока наблюдения существенно не противоречат подобной процедуре». Сам Птолемей, возможно, согласился бы, что предположение о движении Земли было бы упрощением модели, но он не принял бы такого движения по соображениям противоречия аристотелевской физике. Действительно, новая модель, которая, как кажется, должна быть простой, была в то время почти столь же технически сложной, как и ее прославленная предшественница: множество сфер, круговых движений и эпициклов объясняли детали небесных движений. Эта модель была принята со сдержанным энтузиазмом некоторыми математиками, которые смогли тщательно разобрать трудную книгу «О вращении...» (В действительности, эта книга не была бестселлером; ее первое издание тиражом в тысячу экземпляров так и не было распродано.)

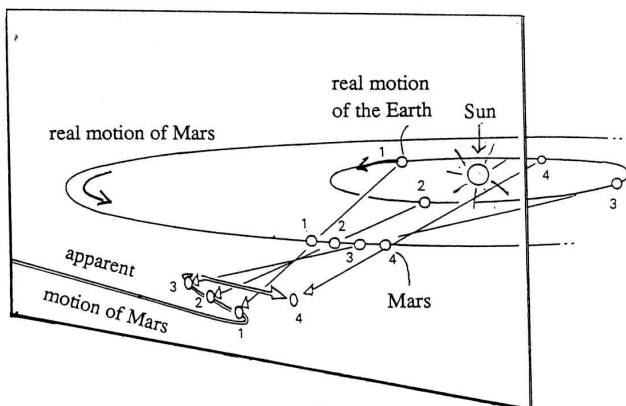


Рис. 2.2. Время от времени планеты совершают петли, когда они странствуют относительно неподвижных звезд. Для Птолемея танец планет (на рисунке обозначено как «видимое движение Марса») был поводом, чтобы добавить в его систему эпициклы, тогда как для Коперника это явление выявляло движение Земли вокруг Солнца. Аристарх предполагал, что Солнце находится в центре. Применял ли он свою идею к танцующим планетам? Мы не знаем.

Католическая церковь отнеслась к новой модели вначале довольно равнодушно, а православная церковь вообще считала вопрос о движении физической Земли неуместным. Гневные протесты против католического служителя поступили от лютеран. Только в 1616 году, через семьдесят лет после публикации, Святая Палата Римской католической церкви предприняла действия. Возможно, тот длительный период, когда любой католик мог прочесть Коперника, был обеспечен благодаря предисловию, добавленному в книгу без согласия автора. В нем пояснялось, что книга предлагает новый метод вычисления положений планет, но не заявляет, что Солнце действительно является центром вселенной.

Такое утверждение отражало длительную традицию. Астроном мог разрабатывать модели, объясняющие небесные явления, но не предполагая, что все сферы действительно существуют на небе. Средневековые последователи Аристотеля не приписывали конкретную реальность эпициклам, которые были математической механикой для воспроизводства того, что наблюдалось на небе. А что же Коперник? Из его собственного предисловия к книге «О вращении...» ясно, что он представляет новую *физическую* модель

мира, согласно которой Земля действительно движется в пространстве. К списку достижений можно добавить прецессию весеннего равноденствия. В течение года Солнце странствует по небу и пересекает экватор дважды, один раз весной во время весеннего равноденствия, когда оно переходит из северного полушария небесной сферы в южное, и один раз осенью (осеннее равноденствие). Точки пересечения медленно сдвигаются по зодиакальному кругу из одного созвездия в другое в течение тысяч лет, как это было показано Гиппархом (Hipparchus) (ок. 190-120 г. до н.э.). Это движение отражает медленное веретенообразное качание Земной оси.

Математику Ретикусу (Rheticus) было 23 года, когда он решил отправиться на личную встречу с Коперником, чьи идеи о структуре мира дошли до молодого ученого в виде короткой «самиздатовской» рукописи, которая ходила среди астрономов. Ретикус захотел убедить Коперника, которому в то время было 66 лет, опубликовать свою великую работу полностью. У него даже были в качестве соблазнительных подарков красивые книги по математике в обложках из белой свиной кожи. Визит занял намного больше времени, чем планировалось, почти два года. Ретикус был очень возбужден новыми идеями и начал распространять систему Коперника, хотя пока еще анонимно. В результате усилий Ретикуса и других друзей, Коперник, наконец, согласился опубликовать свою большую рукопись.

Вероятно, Коперник начал думать о новой системе во время обучения в Италии в университете, где он изучал теологию, право и медицину, а также познакомился с астрономией. Этот довольно робкий человек с разносторонним образованием эпохи Возрождения не распространял активно свои революционные идеи. Напротив, без вмешательства молодого поколения книга «О вращении...» вполне могла остаться неопубликованной. Когда Коперник, в возрасте 70 лет, получил свежее отпечатанное первое издание своей книги, он лежал уже смертельно больной в своей постели, но его великая миссия была выполнена.

2.4. Молитва Бруно о бесконечности Вселенной

Когда Коперник «остановил» вращение звездной сферы, он не задавал вопрос о природе самой этой сферы, и оставил на ней неподвижные звезды. За следующие сто лет люди начали осознавать, что такая кристаллическая сфера без ее первоначальной функции заставлять планеты вращаться, больше не нужна. Нагретая находя-

*Ретикус
1514-1574*

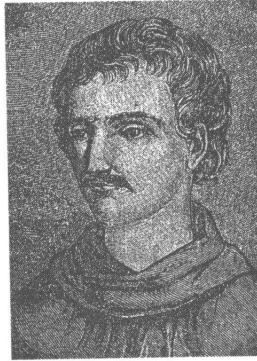


Рис. 2.3. Джордано Бруно (Giordano Bruno) совершил огромный интеллектуальный шаг к новой картине космоса. Он четко представил космологические принципы Отсутствия Центра и Универсальности Земных Законов.

щимся в центре коперниковским Солнцем, она испарилась на глазах одного или двух поколений, рассеяв звезды по далеким глубинам пространства.

В сочинениях Джордано Бруно, вдохновленных, вероятно, его современником Томасом Диггесом (Thomas Digges) (о котором речь пойдет ниже), можно ясно видеть это появление нового порядка мира: «Как только мы осознаем, что видимое небесное вращение вызвано реальным дневным движением Земли... тогда нет причин думать, что звезды находятся на равном расстоянии от нас».

*Джордано
Бруно
1548-1600*

Бруно горячо поддержал Коперника и пошел даже дальше: он сказал, что Солнце – это всего лишь одна из звезд, а они рассеяны в бесконечной вселенной. «Так как вселенная бесконечна, должны быть другие солнца... можно предположить, что существует бесконечное число солнц, многие из которых мы видим как маленькие тела; и многие могут казаться нам маленькими звездами».

Джордано Бруно в молодости ушел в монастырь. Его оригинальное мышление будоражило его, и в возрасте 28 лет он сбежал из монастыря и много лет странствовал по Европе, преподавая в университетах и обычно вызывая бурные протесты со стороны более консервативной части слушателей.

В 1591 году произошло роковое возвращение Бруно в родную Италию по приглашению молодого аристократа, чье стремление

узнать тайны философии оказалась поверхностным желанием экзотики. Разочарованный ученик предал своего учителя в руки Инквизиции. Бруно был арестован и обвинен в ереси: он не только заявлял, что господствовавший взгляд на град Божий и град Человечий был ошибочен, но, что более важно, он считал Бога пантеистическим духом, а также отрицал некоторые догматы католической церкви. Бруно томился в тюрьме инквизиции семь лет, перед тем, как его сожгли заживо в Риме, на Площади Цветов (Campo dei Fiori) весной 1600 года. Сейчас на этом месте возвышается памятник Джордано Бруно, увековечивая ужасы инквизиции.

Эти трагические события заставляют нас поделиться с читателем несколькими строками «Молитвы Альбертино» из книги Бруно «О Бесконечности, Вселенной и Мирах»:

«Убеди нас в доктрине бесконечной Вселенной! Разбей эти воображаемые своды и сферы, которые так ограничивают и используют так много небес и элементов. Дай нам доктрину об универсальности Земных законов во всех мирах и об однородности космической материи. Открой для нас врата, через которые мы сможем взглянуть на бесчисленные, повсюду подобные звездные миры.»

Под такими вдохновенными словами мог бы подписаться любой современный космолог – они передают сущность того, как мы сегодня представляем себе Вселенную. Рассматривая их более пристально, можно увидеть три аспекта: 1) космологическая модель бесконечной вселенной, вместо старой модели с хрустальными сферами; 2) космологический принцип универсальности законов и материи (позже мы встретимся с принципом Бруно об отсутствии центра); 3) понимание необходимости новых наблюдательных средств для исследования глубин пространства.

«Три кита космологии» – теория, принцип и наблюдения – уже осуществились в уме Бруно. Хотя он не был астрономом, он сознавал трудности, которые препятствовали попыткам наблюдать далекие небесные тела. Звезды похожи на наше Солнце, но они так далеко, что кажутся светящимися точками. Вокруг них есть планетные системы, но планеты слишком слабы, чтобы их можно было увидеть. Бруно также утверждал, что даже в нашей Солнечной Системе могут быть другие планеты, невидимые по различным причинам, например, они могут быть очень далекими или маленькими по размеру, или они

могут плохо отражать солнечный свет. Вынужденный основывать свои

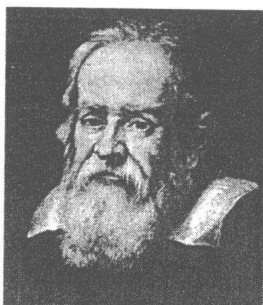


Рис. 2.4. «Есть многое на свете, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам», – написал Вильям Шекспир за десять лет до того, как Галилео направил свой телескоп на небо. Галилео указал один путь снять покров с этого неожиданного «многого», просто глядя в далекое пространство. Но он также вымостил другой путь, подходящий для «многого» здесь, на Земле, путь экспериментальной проверки философских утверждений о материи и движении.

космологические размышления на скудных наблюдениях, Бруно объяснил отсутствие прямого свидетельства как результат *эффектов селекции* – это понятие очень важно в современной космологии.

2.5. Галилео направляет первый телескоп на небо

Галилео Галилей (Galileo Galilei) сделал астрономический телескоп и наблюдал структуру вселенной намного лучше, чем это было возможно для невооруженного глаза всех предшествующих философов. Этот профессор математики из Падуи открыл врата в небеса через несколько лет после смерти Бруно.

Галилео услышал, что в Голландии один шлифовальщик линз сделал устройство, через которое далекие предметы кажутся близкими. Вскоре, в 1609 году, ему самому удалось сделать такой инструмент. Два телескопа, созданные Галилеем, сохранились в Институте и Музее истории науки (Istituto e Museo di storia della scienza) во Флоренции. Диаметр их главных линз равен 16 и 26 мм. По современным стандартам увеличительная труба Галилео была очень скромной, тем не менее, в тот момент, когда она была направлена на

Галилео
Галилей
1564-1642

небо, сила человеческого глаза резко возросла, и через трубу полился поток неожиданной информации. На Луне есть горы, а вокруг Юпитера – спутники, Венера имеет фазы, на Солнечном лике есть пятна, а Млечный Путь – это гигантское облако слабых звезд.

Галилей был также основателем новой физики, базирующейся на экспериментах и измерениях. Так, из опытов с шарами, катящимися по наклонным дощечкам, он сделал вывод, что тело сохраняет равномерное движение, если на него не действует трение. Подобный взгляд – ключевой для создания новой космологии – объяснял, почему атмосфера может вращаться вместе с Землей, и при этом нет ужасного ветра. Понятие об инерциальном движении свободного тела, которого не было в физике Аристотеля, было позднее принято Ньютоном как краеугольный камень его механики.

Естественно, геоцентрический взгляд был глубоко укоренен в обществе. Потребовалось время, чтобы даже в научных кругах к работе Коперника отнеслись как к новой космологии, а не как к еще одному хитрому способу вычисления календаря. Кроме того, система все еще основывалась на старых сферах и однородных круговых движениях. Это нужно было «модернизировать». В ту эпоху перемен яркими звездами сияли имена Галилео, Тихо и Кеплера.

То, что Галилео увидел в телескоп, явно было в пользу Коперника. Спутники Юпитера вращались вокруг Юпитера, а не вокруг центра вселенной – Земли. У Венеры были фазы, как у Луны, что возможно, только если она вращается вокруг Солнца. Это были абсолютно новые и радикальные факты, и многие люди, которые должны были верить Галилею только на слово, не могли принять их сразу. И не все, у кого была возможность посмотреть через маленькую увеличительную трубу, могли увидеть то же, что Галилей: из-за размытого дрожащего изображения труба была неудобна для пользователя. В любой современной маленький бинокль видно лучше. Попробуйте найти на небе Юпитер и ощутите радость, от зрелища его больших лун Ио, Европы, Ганимеда и Каллисто! В любом случае, в 1610 году открытия Галилея стали сенсацией в Европе, и он стал знаменитым человеком.

В 1616 году католическая церковь объявила учение о движении Земли абсурдным и еретическим. Этому шагу предшествовала сложная цепь событий, включающая зависть мирских профессоров, споры между вспыльчивым от природы Галилеем и университетскими чиновниками, а также план втянуть Галилея в противоречия между его системой мира и утверждениями Библии.

Книга священника-кармелита Фоскарини, в которой он попытался показать, что движение Земли согласуется с Библией, была отвергнута инквизицией. В результате книги Коперника и Фоскарини были «временно запрещены до их исправления» (только после редактирования Списка запрещенных книг в 1835 году идеи Коперника больше не подавлялись). Одним из аргументов религиозного сообщества, и достаточно веским в те времена, было то, что движение Земли не было доказано. Эта радикальная теория реальности вынуждена была сражаться на два связанных фронта – в науке и в обществе.

В 1632-33 гг. состоялся знаменитый суд, на котором Галилей предстал перед трибуналом инквизиции в Риме. К счастью, на всем его протяжении с семидесятилетним ученым обращались хорошо. Его так и не бросили в камеру и не пытали. Непосредственным поводом для суда стал «Диалог о Двух Главных Системах Мира». Папа Урбан VIII, который проявлял интерес к небесным явлениям, предложил своему старому другу Галилею написать новую книгу по космологии. Но он сказал ему, что систему Коперника нужно описывать только как гипотезу (что было разрешено Декретом 1616 года). Тем не менее, в книге была ясная попытка доказать движение Земли, и избежать суда было невозможно.

Суд над Галилеем (так же как суды над Сократом и Бруно) превратился в символ борьбы за свободу мысли. Но было бы упрощением описывать его как столкновение между наукой и религией. Работу Коперника современные ему религиозные лидеры считали абсурдной и еретической, так как они приняли гипотезу Птолемея как одну из своих доктрин, что привело к «незаконному браку между наукой и религией» (так охарактеризовал эту ситуацию по Российскому Центральному Телевидению 11 июля 1997 года митрополит Смоленский и Калининградский Кирилл). Важно отметить, что такие выдающиеся научные революционеры как Коперник, Кеплер и Галилей, а также Ньютон, верили в Бога. Они не только не считали, что Библия противоречит науке, но утверждали, что именно изучение Библии помогало им в научной деятельности.

Суд можно также считать обострением космологического кризиса. По приговору суда Галилей должен был публично заявить, что Земля не движется. Но время уже нельзя было повернуть назад.

2.6. Законы Кеплера для движения планет

*Тихо Браге
1546-1601*

Тихо Браге (Tycho Brahe) многие годы проводил тщательные визуальные наблюдения планет. От короля Дании он получил длительную поддержку, а также остров Гвееен, на котором построил великолепную обсерваторию – Ураниборг. Все это было очень дорого – несколько процентов национального дохода Дании уходило на «Небесный Замок». Но эти деньги были хорошим вложением. Они подняли наблюдения неба на совершенно новый уровень, хотя производились до изобретения телескопа. Когда аккуратные наблюдения Тихо изучил Иоганн Кеплер (Johannes Kepler), это привело также к новой стадии коперниковской революции. Скрупулезно анализируя наблюдения планеты Марс, Кеплер открыл математические законы того, как планеты двигаются вокруг Солнца, в каком-то смысле решив задачу, которую Платон поставил за две тысячи лет до этого. Оказалось, что вместо «совершенных» круговых движений, планеты движутся по эллипсам.

Для Кеплера вселенная все еще была ограниченной, со звездами, расположенными на последней сфере. Что бы ни было за этой сферой, внутри был наш мир, подчиняющийся математическим законам природы. Это была основная идея Кеплера, который одной ногой стоял в прошлом, а другой шагнул в современную астрофизику. Он уже не верил в материальность планетарных сфер. Планеты двигались в пустом пространстве под действием сил, подчиняясь тому, что называется Кеплеровскими законами движений планет. Законы Кеплера таковы: I. Планеты движутся вокруг Солнца в плоскости по эллиптическим орбитам, при этом Солнце находится в одном из фокусов эллипса. II. Радиус-вектор от Солнца до планеты зачерчивает равные площади за равное время. III. Квадраты орбитальных периодов планет пропорциональны кубам главных полуосей их орбит

То, как Кеплер пришел к новому, революционному взгляду на движение планет – это длинная история. Сначала он пытался понять движение Марса согласно старому принципу кругового движения. Но после нескольких лет борьбы с кругами и эпициклами он, наконец, обнаружил, что наблюдения Марса можно объяснить только эллиптической орбитой. Все зависело от маленького упрямого отклонения в 8 угловых минут, которые Кеплер не мог обуздать с помощью «совершенных» кругов.

Эллипсы были известны со времен Апполония, который изучал эти кривые вместе с другими коническими сечениями (гиперболой и параболой). Любопытное совпадение, что он также создал эпициклическую теорию движений планет. Ни ему, ни кому-то

другому до Кеплера не пришло в голову, что планеты могут двигаться по эллипсам. Открытие Кеплера было совершенно неожиданным. Человек, наконец, вошел в Космическую Лабораторию.

Интригующим было то, что планеты совершают свое движение по замкнутым орбитам. Как они могут найти дорогу назад в ту же точку пространства, а затем повторить ту же вытянутую орбиту? Казалось, что при круговом движении это легче. Кеплер так обрисовал две силы: одна передвигает планету по кругу, а другая – «магнетизм» – подходящим образом деформирует круг, превращая его в эллипс.

Загадка эллипса получила великое решение, когда Ньютон, примерно через пятьдесят лет после Кеплера, сделал решающий шаг, показав, что одной силы – всемирной гравитации – достаточно, чтобы объяснить законы движения планет. Но мы забежали немного вперед нашей истории. Давайте оглянемся и посмотрим, как принцип отсутствия центра возник в новой картине мира.

2.7. Космологический принцип Коперника

Николай Кузанский не нарисовал никакой определенной картины астрономической вселенной. Коперник, который родился через десять лет после смерти Николая Кузанского, не размышлял о мире, находящемся за пределами далекой материальной сферы звезд – его великой задачей было пролить свет на порядок вещей внутри этой сферы. Но он дал огромный импульс к тому, чтобы посмотреть на звезды новыми глазами. Человек, который осознал, что неподвижная сфера звезд больше не нужна, родился в том же году, когда умер Коперник. В 1576 году английский астроном Томас Диггес (Thomas Digges) впервые опубликовал карту Вселенной, на которой звезды были отделены от их сферы и рассеяны в пространстве. Он писал:

Этот мир неподвижных звезд бесконечно сферически продолжается вверх... неся бесчисленные вечные сверкающие славой огни, намного превосходящие наше Солнце и по количеству и по качеству.

Однако, похоже, Диггес все-таки сохранил особое место для Солнца в центре бесконечного звездного мира. И он еще не утверждал, что звезды – это далекие солнца. Диггес уже не считал, что круговое движение является единственным движением, подобающим небесам.

Теперь он приводил аргументы, что покой и отсутствие движения и изменения – более благородное и божественное состояние, особенно

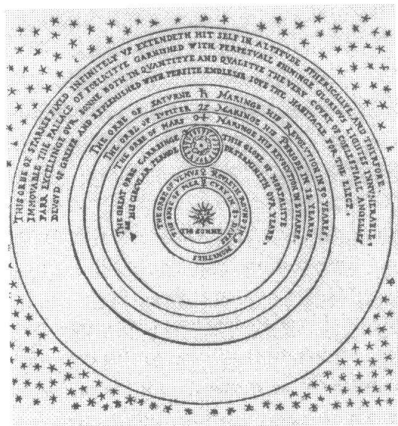


Рис. 2.5. В 1576 году Томас Диггес рассеял звезды наружу с поверхности внешней сферы в бесконечное пространство. Он считал, что состояние покоя в высшей степени подобает бесконечной структуре. Бруно придал звездам физический статус далеких солнц.

для бесконечно толстой сферы звезд, чем беспокойное состояние Земли.

По-видимому, Николай Кузанский и, затем, Джордано Бруно первыми представили, что звезды, эти слабые точки на небе, являются в действительности другими солнцами. Во времена Античности Анаксагор (Anaxagoras) тоже подошел очень близко к этому. В V веке до н.э., когда Афины стали центром Греческой культуры, говорят, он ввез философию и науку из Ионии. Анаксагор утверждал, что явления на небе и на земле можно понимать одинаково. Согласно более поздним комментаторам, он заявил, что Солнце – это огромный пылающий камень, а Луна – это земля. Кроме того, звезды – это огненные камни, зажженные вращающимся эфиром. Мы не чувствуем тепла звезд, потому что они очень далеко от Земли.

Когда началось обсуждение идеи Диггеса, Джордано Бруно, добровольно покинувшему тогда родную Италию, довелось жить в Лондоне. Выше мы цитировали книгу Бруно, которую он написал в Лондоне. В ней он решительно подчеркивал принцип единообразия законов природы во всей Вселенной: «Дай нам учение об

*Анаксагор
ок. 500-428
г. до н.э.*

универсальности Земных законов во всех мирах и об однородности космической материи». Здесь «однородность» означает «подобие» – материя на небесах похожа на материю на Земле. Эта точка зрения перекликается с древним мнением Анаксагора и атомистов.

Страстный распространитель идеи о том, что вселенная бесконечна и заполнена звездами и планетами, Бруно следующим образом сформулировал свой космологический принцип:

Во вселенной нет ни центра, ни пределов; центр находится везде.

Это означает, что все места вселенной похожи друг на друга. Это было вопиющим противоречием со старой космологией, в которой существовал центр, занимаемый Землей. В современной космологии отсутствие какого-либо центра считается естественным основанием.

Иногда говорят о Принципе Коперника, когда имеется в виду, что мы не находимся в каком-то особом месте. Как писал Герман Бонди (Hermann Bondi) «Этот принцип был принят всеми людьми науки. От этого принципа всего маленький шаг до утверждения, что Земля находится в *обычном местоположении...*» В действительности, Коперник думал, что Солнце находится в центре (или почти так), а Земля – нет. Следовательно, хотя частично это вопрос определения, строго говоря, Принцип Коперника – это не то же самое, что Принцип Отсутствия Центра, если мы хотим связать имя человека с тем, о чем он думал. В любом случае, отказ от естественного центрального положения Земли был таким радикальным изменением, что название «Принцип Коперника» вполне оправдан наряду с термином «Революция Коперника». Польский космолог из Кракова Конрад Рудницкий (Konrad Rudnicki), учитывая и современный дух, и реальную астрономическую ситуацию во времена Коперника, сформулировал этот принцип так:

Вселенная, наблюдаемая с любой планеты, выглядит почти одинаково.

Джордано Бруно приводил также аргумент, что если бы Земля была единственной планетой, населенной живыми существами, то это сделало бы ее выделенным местом, своего рода центром Вселенной. Это звучит знакомо: современная биоастрономия основывается на универсальности законов, царящих и в неодушевленной, и в органической Природе.

2.8. Первые шаги по лестнице космических расстояний

Уже во втором столетии до н.э. Эратосфен провел измерение радиуса Земли, что можно считать первым шагом человечества по лестнице космических расстояний. Были также серьезные попытки измерить расстояние до Луны и Солнца. Аристарх и другие греческие астрономы знали расстояние до Луны довольно хорошо. Однако Солнце находится слишком далеко для их простых геометрических методов, и расстояние до него оставалось очень заниженным до XVII века. Радиус большой сферы неподвижных звезд – «размер мира» – был настолько велик, что не мог основываться на чем-либо действительно измеримом. В таблице показано состояние дел до времени Коперника и Кеплера, расстояния тогда выражали в радиусах Земли как естественной единице геоцентрической космологии:

	Расстояние до Солнца	Расстояние до звездной сферы
Аристарх	1520	«намного дальше, чем Солнце»
Птолемей	1210	19865
Коперник	1142	«огромное»
Кеплер	3469	«огромное»
Сегодня	23500	–

Расстояние до Солнца было плохо известно еще Копернику и Кеплеру, а размер звездной сферы был просто неизвестен. Тот факт, что звезды не обнаруживают никаких колебаний, когда Земля совершает свое путешествие вокруг Солнца, был для них, как и для Аристарха, доказательством того, что звезды, должно быть, очень далеки.

Коперник сделал важным расстояние до Солнца: все расстояния в Солнечной Системе теперь можно было выразить этим мерным стержнем, используя его в качестве единицы длины. Здесь нужно вернуться к законам Кеплера о движении планет. Третий закон представляет собой соотношение между орбитальным периодом и размером орбиты (*квадрат периода пропорционален кубу размера орбиты*). Зная период, можно нарисовать карту Солнечной системы, хотя *шкала* пока не известна. Для того чтобы узнать действительные расстояния между небесными телами необходимо измерить, по крайней мере, одно расстояние от Земли до другой планеты. Тогда

сразу становятся известными все расстояния, в том числе и расстояние до Солнца.

С XVII по XIX век установление размера Солнечной Системы было основной астрономической задачей (очень похожей на современную задачу определения шкалы внегалактических расстояний), где были испробованы различные методы. Для проведения наблюдений с разных точек земного шара в далекие уголки Земли посылали дорогие экспедиции. В 1672 году первый успешный метод определения так называемого горизонтального параллакса Марса дал расстояние до Солнца равное примерно 21000 радиусов Земли (Джованни Кассини (Giovanni Cassini), Джеймс Флемстид (James Flamsteed)). Принятое в настоящее время среднее расстояние до Солнца, или астрономическая единица (а.е.), равна примерно 150 млн. километров:

*Джованни
Кассини
1625-1712*

*Джеймс
Флемстид
1646-1719*

*Расстояние до Солнца = 1 а.е. = 149 597 892 км = 23500 радиусов
Земли*

Одним из результатов революции Коперника было новое отношение к звездам. Еще Тихо Браге думал, что звезды имеют угловые размеры около одной минуты дуги – одной тридцатой части диска Солнца. Когда он скомбинировал это значение с огромными (хотя и неизвестными) расстояниями, требуемыми в модели Коперника, он получил фантастически большие действительные размеры для звезд. Этот парадокс огромных звезд, который был возражением против Коперника, исчез, когда Галилей умело показал, что звезды намного меньше, чем можно предположить, судя по невооруженному глазу. Он натянул шнур на фоне звездного неба и отметил, на каком расстоянии шнур заслоняет звезду. Это соответствует размеру в 5 секунд дуги (1/12 минуты дуги). Действительный размер звезд даже намного меньше этого: атмосфера Земли размывает резкие изображения.

Джордано Бруно говорил о звездах как о других солнцах, не имея никаких реальных свидетельств в поддержку этого предположения. Кеплер уже делал различие между физической природой звезд и планет: «используя слова Бруно, первые являются солнцахми, а последние – лунами или землями», т.е. звезды излучают собственный свет, тогда как планеты отражают солнечный свет. Но для того, чтобы уравнивать Солнце и звезды, нужно знать, по крайней мере, одну вещь: являются ли звезды столь же мощными источниками

света, как ослепительно яркое Солнце? Для этого требуется знать расстояние до звезд.

Светимость звезды означает сколько световой энергии она посылает в пространство каждую секунду. Частицы света (фотоны) летят во всех направлениях со скоростью света, унося энергию от звезды. На расстоянии R от звезды энергия равномерно распределена по поверхности сферы радиусом R . Тогда, *поток* f света на расстоянии R равен светимости, деленной на площадь $4\pi R^2$, на которую она падает: $f = L/4\pi R^2$. Это самая важная формула в астрономии. Поток f – это то, что астроном может измерить, светимость L – это свойство звезды. Если измерено расстояние до звезды и ее поток, то можно вычислить ее светимость.

Галилей не разделял мнения Кеплера о том, что звезды находятся на тонкой сфере. Некоторые из них могут быть в два или три раза дальше, чем другие, а у близких звезд должны быть регулярные годовые движения на фоне далеких звезд. В XVII веке астрономы начали искать такие звездные смещения. Это изменение положения, или параллакс, говорил бы о расстоянии до звезды. Это было бы доказательством движения Земли, что делает поиск параллакса также космологическим тестом.

Чтобы понять явление параллакса, просто посмотрите одним глазом на свой палец на фоне обоев. Затем закройте этот глаз и откройте другой. Вы увидите, как палец сдвигается. Смещение получается больше, когда вы помещаете палец ближе к глазам. Подобным образом Фалес Милетский (Thales of Miletus) смог измерить методом триангуляции расстояние до корабля, находящегося далеко от берега, не привязывая к судну измерительную ленту.

Смещения даже самых близких звезд очень малы, их трудно обнаружить даже при широко разнесенных астрономических «глазах» (размере орбиты Земли). Только в 1838 году Фридриху Бесселю (Friedrich Bessel) удалось сделать это для звезды в созвездии Лебедя. Ее параллакс, равный 0.3 угл. сек., помещает ее на расстояние, в 650 000 раз превышающее расстояние от Земли до Солнца. Это доказало, что звезды так далеки, что для того, чтобы их было видно на небе, они должны изливать столько же или даже больше света, чем наше Солнце.

Параллаксы дают астрономии одну из ее странных единиц – парсек: звезда находится на расстоянии в один парсек, если ее угол годового параллакса равен одной угловой секунде. Это определение хитро спрятано в названии единицы (*параллакс* = 1 угл.сек.). Чему

равен один парсек, выраженный в единицах расстояния от Земли до Солнца (или а.е.)? Ответ таков: 1 пк = 206265 а.е. Расстояние до всех известных звезд больше 1 парсека, так что отклонение на небе (параллакс) всегда меньше одной угл. секунды. Турбулентные движения воздуха в земной атмосфере размывают изображение звезды в расплывчатое пятно, что ограничивает измерения расстояний до звезд методом параллакса величиной около 50 парсек.

2.9. Космология Ньютона

Геоцентрическая система Птолемея казалась естественной и очевидной, и на протяжении многих столетий являлась общепринятой научной картиной мира. Однако с приходом новой техники астрономических наблюдений, новых теоретических моделей и физических экспериментов оказалось, что очевидное и абсурдное поменялись местами. Так, «абсурдная» идея о движущейся Земле оказалась совершенно здоровой, а прежде «очевидное» представление о вращающемся небе и покоящейся Земле становится абсурдным...

Теоретической основой второй научной картины мира стала ньютоновская механика и теория всемирного тяготения. Исаак Ньютон (Isaac Newton), выдающийся математик, физик, философ и теолог, опираясь на опыты Галилея и других предшественников, разработал новую механику, в основе которой лежали понятия инерции и силы. Наличие силы обнаруживает себя как изменение скорости частицы, которая испытывает ускорение, выраженное законом движения Ньютона в виде:

$$\text{сила} = \text{масса} \cdot \text{ускорение}, \text{ или } F = m \cdot a$$

Новая механика резко отличалась от механики Аристотеля. Закон Ньютона гласит, что когда сила перестает действовать на тело ($F=0$), то его ускорение отсутствует ($a=0$), однако при этом тело продолжает движение без ускорения, т.е. с постоянной скоростью, поскольку ускорение определяется как приращение скорости за единицу времени ($a=dv/dt$). Согласно старой механике, прекращение действия силы приводит к остановке тела.

Механика Ньютона базируется на трех универсальных законах движения: I. Если полная сила, действующая на тело, равна нулю, тогда тело либо находится в состоянии покоя, либо движется по инерции, т.е. по прямой линии без ускорения. II. Сила, действующая

*Исаак
Ньютон
1642-1727*



Рис. 2.6. Исаак Ньютон в 1687 году опубликовал фундаментальный труд «Математические начала натуральной философии», ставший теоретической основой второй научной картины мира. Теперь бесконечное евклидово пространство равномерно заполнено звездами, а движение всех небесных тел происходит под действием силы всемирного тяготения.

на тело, равна произведению массы на ускорение. III. Если тело А действует силой на тело В, тогда тело В оказывает равную, но противоположно направленную силу на тело А. Существует также четвертый закон ньютоновской механики – закон гравитации, о котором речь пойдет ниже. На основе этих законов, с использованием дифференциального и интегрального исчисления, удается не только описать огромное множество механических явлений природы, но и разработать практическое применение механики, сделавшее революцию в техническом оснащении человечества.

В основании второй научной картины мира, развитой Ньютоном и его последователями, мы опять узнаем три знакомых элемента – три кита космологии Ньютона:

- * Космологический Принцип – *во Вселенной не существует выделенных точек, звезды равномерно распределены в бесконечном пространстве.*
- * Наблюдения – *астрономические наблюдения положений звезд и планет.*
- * Теория – *механика и теория всемирного тяготения Ньютона, применимые везде во Вселенной.*

2.10. Триумф ньютоновской универсальной гравитации

Понятия силы, ускорения и инерционного движения, осмысленные Ньютоном и описанные в его книге «Математические начала натуральной философии» (или *Principia*), вышедшей в 1687 году, дали нам прекрасную модель физического мира (хотя, как и у любой модели, у нее есть ограничения). Физические явления происходят «in an uncorruptable stage», в абсолютном пространстве, которое бесконечно и Евклидово, и протекают в абсолютном времени, которое течет равномерно и независимо от самих процессов. Наша Солнечная система помещается в сфере, вырезанной из большого мира, и является представительной частью Вселенной, где действуют и могут изучаться все универсальные законы природы.

Именно таким универсальным законом является закон всемирного тяготения. Поскольку планета не движется по прямой линии, значит должна быть действующая на нее сила. Какова природа этой силы? До Ньютона Роберт Гук (*Robert Hooke*) предположил, что движение планет вызвано силой, направленной к центральному телу – Солнцу. Эта сила заставляет планету падать к центру, отклоняя ее от прямолинейного движения. В письме Гук спрашивал Ньютона, какие свойства были бы у траектории такого движения.

*Роберт Гук
1635-1703*

Ньютон не написал ответа. Однако, возможно вопрос Гука был импульсом, который несколько лет спустя привел Ньютона к формулировке закона гравитации, описывающего силу F , действующую между двумя телами, пропорциональную произведению их масс mM , деленную на квадрат расстояния между ними:

$$F = G m M / R^2$$

где G называется гравитационной постоянной.

С помощью этого закона гравитации и других своих законов движения Ньютон объяснил, почему планета движется по эллиптической орбите вокруг Солнца, и как приливы связаны с деформацией мирового океана под действием притяжения Луны. Закон гравитации был еще одним великим следствием процесса, запущенного в движение тихим каноником из Фрауенбурга. Старая механика стояла беспомощно перед эллиптическими орбитами. Ньютон открыл секрет, почему планета может вечно двигаться по одному и тому же эллипсу: это прямое математическое следствие закона обратных квадратов силы гравитации. Действительно, даже малое отклонение от этого закона неизбежно привело бы к более

сложной орбите. Такой «вращающийся эллипс» (эллипс планеты Меркурий) был еще припасен на открытие в будущем.

Впечатляющее предсказание появления кометы Галлея в 1758 году принесло теории Ньютона большую известность. Еще одна сенсация произошла, когда астрономы предсказали существование неизвестной планеты, названной Нептун, которая была открыта в 1846 году. Планета Уран, которую тогда считали самой далекой, двигалась не так, как надлежит по теории Ньютона, но медленно отклонялась от вычисленной орбиты, так что в 1845 году она уже находилась в 2 мин. дуги от ожидаемого положения на небе. Это было достаточно большое отклонение. Для Кеплера, использовавшего менее точные *визуальные* наблюдения, несколько минут дуги были сигналом тревоги в его борьбе с Марсом. Что-то было не так в картине нашей Солнечной системы. Какая-то неизвестная масса должна была сбивать Уран с его правильного курса.

Урбен Ле Веррье (1811 - 1877) из Франции и Джон Адамс (1819 - 1892) из Англии вычислили, независимо друг от друга, где должна была находиться такая планета, чтобы вызывать неправильное поведение Урана. Окончательно открытие новой планеты с помощью наблюдений на телескопе сделал Йохан Галле в Германии. Нептун странствовал по небу всего в 1 градусе от предсказанной точки. Разумеется, в Британской и Французской прессе долго шел спор о приоритете открытия... Однако, Джон Адамс и Урбен Ле Веррье сохранили взаимное уважение. Произошло даже так, что первый, будучи президентом Королевского Астрономического Общества, представил последнего, директора Парижской Обсерватории, к золотой медали.

Предсказание появления кометы Галлея и открытие Нептуна были плодами новой науки – *небесной механики*. Она могла предсказать положение планеты на небе в тысячу раз точнее, чем рецепты Птолемея или Коперника. Это означает, что, глядя на природу глазами теории Ньютона, мы лучше ее понимаем. Действительно, ньютоновская механика делала намного больше, чем старые модели. Это физическая теория, которую можно применить к множеству ситуаций. Когда говорят, что с нашей наукой мы достигли власти над природой, это означает «волшебное» знание, например, того, в каком направлении и когда нужно запускать ракету, чтобы она достигла желаемой планеты.

В 1987 году отмечалось 300-летие ньютоновской теории гравитации, и не только по историческим причинам: механика

Ньютона по сей день прекрасно работает в физике и астрономии. Орбиты космических кораблей надежно вычисляются по законам Ньютона. Теория Ньютона является прототипом и «королевой» научных теорий. Она продолжает процветать и знает о своих границах.

2.11. Амбиции лапласовского детерминизма

При всем восхищении ньютоновской механикой нужно признать, что движение тел можно точно предсказать только в очень простых ситуациях. Можно точно рассчитать, как две массивные частицы будут двигаться относительно друг друга. Однако добавим всего одну частицу, и мы сталкиваемся с чрезвычайно более сложной *задачей трех тел*. Зная начальные положения и скорости трех притягивающихся тел, нельзя точно сказать заранее, как они будут двигаться в какой-то отдаленный момент в будущем. Даже если каждое тело, испытывая притяжение двух других, подчиняется строгим законам движения, три тела образуют хаотическую систему. На практике, их длительное поведение можно предсказать только в статистическом смысле. Рано или поздно тройная система распадается, когда одна из масс покидает систему. Однако нельзя сказать, когда это произойдет. В конце XIX века Анри Пуанкаре (Henri Poincaré) первым изучал хаотическое поведение динамических систем. При этом он открыл математические объекты, которые теперь называются странными аттракторами, и которые связаны с фракталами.

Ньютоновская физика вызвала большой оптимизм по поводу возможности нарисовать окончательную картину мира. Пьер Лаплас (Pierre de Laplace) представил Вселенную как огромные, полностью предсказуемые часы и сделал следующее далеко идущее заявление, известное теперь как «лапласовский детерминизм»:

*Пьер
Лаплас
1749-1827*

Разум, который знал бы в какой-то данный момент все силы, движущие природой, и взаимные положения частиц, к которым они приложены, и который, кроме того, был бы достаточно большим, чтобы подвергнуть эти данные анализу, охватил бы в одной формуле движение самых больших тел вселенной и движение малейших атомов: для него все было бы определено, и перед его глазами предстало бы не только прошлое, но и будущее.

Бесконечное абсолютное пространство, которое Исаак Ньютон представлял как сцену для физических явлений, стало также частью смелой попытки разума охватить одной математической рамкой вселенную в целом. Астрономические наблюдения и небесная механика объединились и стали основанием для изучения вселенной в течение двух столетий. У самого Ньютона было такое ощущение: «Мне кажется, что я был всего лишь мальчиком, играющим на морском берегу, ... а передо мной расстился великий океан истины, которая оставалась неоткрытой».

Однако, многим его последователям казалось, что окончательная истина уже найдена, и в будущем наука будет иметь только педагогическую ценность. Но победа была не окончательной, и годы спустя пришло осознание, что бесконечная Вселенная, столь величественная, после замкнутого средневекового шара с его загадочной внешней границей, совсем не проста, но скрывает глубокие тайны. История показала, что амбиции лапласовского детерминизма бесперспективны. Это следует из вероятностных законов квантовой физики. Кроме того, постепенно стало также ясно, что ньютоновская бесконечная Вселенная сталкивается с неприятными парадоксами.

Глава 3

Парадоксы космологии Ньютона

3.1. Диалог священника и физика

Замечательный пример плодотворной дискуссии физика и теолога дошел до нас в виде небольшой книги «Четыре письма Сэра Исаака Ньютона к Доктору Бентли, содержащие некоторые аргументы, доказывающие Божественность». Это произошло, когда в 1692 году Ричарду Бентли (Richard Bentley), молодому капеллану (позже профессору теологии в Кембридже), понадобился совет по космологии. Он спросил мнение Ньютона о поведении звезд, равномерно рассеянных в бесконечном пространстве. Что произойдет с однородным распределением звезд под действием их собственного тяготения? Бентли поставил и другие принципиальные вопросы, по существу предвосхитив будущее развитие космологии. Какова продолжительность жизни Солнца и звезд? В чем разница между Солнцем и планетами? Что передает тяготение от одного тела к другому? Эта переписка очень повлияла на размышления Ньютона о космологии – предмете, которым он пренебрегал в молодые годы.

*Ричард
Бентли
1662-1742*

Революция Коперника действительно повлекла за собой серьезные последствия для развития науки о Вселенной. Интересно, что сначала потребовалось поместить Солнце в центр Вселенной и только затем стало возможным избавиться от сферы звезд и позволить им странствовать в бесконечном пространстве. Этот драматический поворот мотивировал и облегчил путь радикальной идее оторвать и Солнце от его привилегированного положения, и придать ему статус обычной звезды. Следующий отважный шаг в глубины Вселенной из Солнечной системы в царство звезд совершил Бруно и другие мыслители, еще до каких-либо физических доказательств того, что слабые звезды – это в действительности очень далекие солнца.

В Principia Ньютона звезды не очень занимали. Он только отметил, что звезды так далеки, что их притяжением можно пренебречь при вычислении орбит планет движущихся вокруг Солнца. Диалог с доктором Бентли подтолкнул его к размышлению над

звездами, как основными составляющими большой Вселенной. До конца жизни для Ньютона осталось неразрешимой загадкой, как звезды могут оставаться в покое, хотя они притягивают друг друга. Неподвижные звезды всегда были символом неизменности, и для Ньютона тоже. Впервые движение звезд было обнаружено только Эдмундом Галлеем (Edmond Halley) в 1718 году. Самая яркая звезда – Сириус – сдвинулась относительно других звезд примерно на полградуса (размер полной луны) со времен Птолемея.

Ньютон думал, что неподвижность звезд продиктована структурой звездной Вселенной. Каждую звезду со всех сторон притягивают другие звезды, так что, наверное, эти силы взаимно уничтожаются. Кроме того, звезды находятся очень далеко друг от друга. Ему казалось, что за этим неизменным расположением должна быть Божественная рука.

Только параллаксы звезд в 1830 году дали прямые геометрические данные о расстоянии до них. Хотя имелись «убедительные предположения», основанные на малой яркости звезд, и Ньютон знал об огромных межзвездных расстояниях. В 1668 году шотландский математик Джеймс Грегори (James Gregory) предложил метод «стандартных свечей». Если все звезды похожи на наше Солнце, тогда более далекие звезды кажутся более слабыми, чем близкие, и можно вывести расстояние до них. Но трудно сравнивать свет сверкающего Солнца со светом слабой звезды (учитывая, что они не особенно часто появляются на небе вместе!). В методе Грегори в качестве промежуточного шага использовалась планета (яркость планеты зависит от отраженного света Солнца). Таким образом, Ньютон смог вычислить расстояние до Сириуса с помощью Сатурна. Оказалось, что эта звезда находится примерно в миллион раз дальше, чем Солнце. Это в 2 раза больше, чем на самом деле, но дает правильное понятие об огромных расстояниях. Ньютонский взгляд на звезды содержится в его словах из рукописи:

«Солнце – это неподвижная звезда. Неподвижные звезды рассеяны по всему небу на очень больших расстояниях друг от друга. Они находятся в покое в своих определенных областях и являются огромными круглыми светящимися очень горячими телами. По причине огромного количества вещества в них, они наделены очень мощной притягивающей силой».

Ньютон полагал, что Бог создал Вселенную бесконечной и разместил вечные звезды равномерно в их неподвижных положениях в

Эдмунд
Галлей
1656-1742

Джеймс
Грегори
1638-1675

абсолютном бесконечном пространстве. Такая вселенная – бесконечная в пространстве и времени – интуитивно привлекательна и образует естественную точку отчета для космологических размышлений.

Однако, как это впервые увидел Бентли, космологическая модель Ньютона содержит в себе глубокие парадоксы. Что такое космологический парадокс? Этот термин происходит от греческого «парадоксон» – невероятный, за пределами мыслимого. Первоначально это было утверждение, кажущееся противоречивым или абсурдным, но (и это важно) в действительности выражающее вероятную истину. Парадоксы такого рода могут быть связаны со странными предсказаниями признанных теорий, таких как ньютоновская механика (или в наше время специальная теория относительности и квантовая механика). Наличие парадоксов не означает, что теория неверна, но подчеркивают трудные концептуальные моменты, которые должны найти свое решение в будущей более глубокой теории.

Космологический парадокс – это нечто другое. Он является следствием далеко идущей экстраполяции космологической теории, утверждением, следующим из основных космологических предположений, но которое противоречит имеющимся наблюдательным фактам. Здесь противоречие подлинное, и оно может быть настолько поразительным, что придется признать, что с теорией что-то не в порядке. Космологические парадоксы по существу являются движущей силой для дальнейшего развития моделей мира.

3.2. Почему нет бесконечной силы гравитации?

Если звезды заполняют бесконечное пространство, значит, на нас действует сила притяжения от бесконечного числа звездных масс. Где же тогда признаки огромных сил, разрывающих нас на части? Почему звезды двигаются столь царственно медленно? Как бесконечности могут уничтожать друг друга и в результате давать ноль?

Этот гравитационный парадокс носит также имя парадокса Зеелигера. Немецкий астроном Хуго Зеелигер (Hugo Seeliger) в 1897 году писал, что «закон Ньютона, примененный к бесконечно большой вселенной, приводит к непреодолимым трудностям и неразрешимым

*Хуго
Зеелигер
1849-1924*

противоречиям, когда предполагается, что имеется бесконечное количество вещества, рассеянного по вселенной».

Доводы Зеелигера можно описать довольно просто. Вместо того чтобы рассуждать сразу о бесконечном пространстве, заполненном звездами, давайте начнем с конечного облака звезд в виде однородной сферы радиуса R в пустом пространстве. Какая сила действует на отдельную звезду, находящуюся на границе облака? Теория Ньютона говорит, что сила гравитации направлена к центру облака, а ее величина F пропорциональна M/R^2 , где масса сферы M пропорциональна кубу радиуса, следовательно, сила F прямо пропорциональна расстоянию R . Так, что при увеличении радиуса сферы в два раза, сила гравитации, действующая на звезду на поверхности шара, оказывается в два раза больше.

Представим, что к звездному облаку прибавляется все больше и больше слоев. Тогда сила гравитации, действующая на звезду на поверхности сферы, продолжает возрастать. Теперь сделаем решающий (и довольно ответственный) шаг и представим, что облако бесконечно велико. Можно выбрать его «центр» везде, а радиус облака может быть сколь угодно большим. Для любой конкретной звезды можно считать, что она расположена на поверхности сферы, центр которой находится на бесконечно большом расстоянии. Тогда получающаяся сила бесконечно велика, поскольку, если R бесконечно возрастает, то и сила F тоже стремится к бесконечности.

Однако подобные рассуждения можно провести и другим образом, но выбирая пробную звезду не на краю, а в центре шара. Поскольку сила, действующая на звезду в центре шара всегда равна нулю, то это приведет нас к заключению о нулевой силе, действующей на любую звезду в бесконечной однородной Вселенной.

Таким образом, внутри бесконечно распределенной материи ньютоновская сила гравитации не является однозначно определенной величиной. Эта сила может быть как бесконечно большой, так и нулевой, в зависимости от выбора способа доказательства. Часто именно эта неоднозначность расчета силы гравитации в бесконечной Вселенной называется гравитационным парадоксом ньютоновской космологии.

На более строгом математическом языке эта «непроходимая трудность» ньютоновской космологии появляется при рассмотрении уравнения для гравитационного потенциала: $\nabla^2\varphi = 4\pi G\rho$, где ρ – плотность вещества. В однородном мире потенциал φ , как и другие физические величины, должен быть константой, но тогда его градиент

равен нулю, и это уравнение означает, что $\rho = 0$, т.е. исключает наличие вещества в однородном мире! Чтобы разрешить этот парадокс, нужно использовать релятивистские уравнения для гравитации, которые мы будем обсуждать в последующих главах.

3.3. Распределение Хольцмарка и конечный радиус действия гравитации в бесконечной Вселенной

Если отвлечься от проблемы определения гравитационного потенциала, и проводить рассуждения на уровне сил, то можно получить решение задачи о распределении вероятности флуктуации силы для случая бесконечного стохастического однородного распределения точечных масс.

Можно сказать, что силы гравитации действуют на звезду со всех сторон так, что они взаимно компенсируют друг друга. Но допустимо ли вычитать две бесконечности и получать ноль? В своем первом космологическом письме к Бентли Ньютон утверждал, что «если бы вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, то оно никогда не могло бы собраться в одну массу», но во втором письме он написал, что есть трудность в доводе Бентли о том, что «каждая частица вещества в бесконечном пространстве имеет бесконечное количество вещества со всех сторон, и, следовательно, бесконечное притяжение во всех направлениях, и, таким образом, она должна оставаться в равновесии, так как все бесконечности равны». Ньютон хотел пояснить, что бесконечность – это не обычная величина, с которой можно производить рутинные вычисления, например, вычитать одну бесконечность из другой. Однако, в особых ситуациях это возможно. Он имел в виду изотропное распределение вещества, которое, даже при распространении в бесконечность приводит к полному уничтожению бесконечных сил, направленных на тело с противоположных сторон. И «если к любой из этих сил вы добавите какую-либо новую конечную притягивающую силу, то эта новая сила, какой бы малой она ни была, нарушит их равновесие и приведет тело в то же самое движение, в которое оно было бы приведено, если бы те две противоположные равные силы были всего лишь конечными или их не было совсем. Так что в этом случае две равных бесконечности путем добавления конечности к одной из них, становятся неравными при нашем способе вычислений».

В 1908 году Сванте Аррениус (Svante Arrhenius) высказал точку зрения, похожую на рассуждения Ньютона. Шведский физик обратил внимание, что для любой одиночной звезды полную силу тяготения от всех остальных звезд можно разделить на две части. Одна часть обусловлена близкими звездами и флуктуирует от одного места к другому. Вторая часть вызвана всеми другими звездами вплоть до бесконечности. Она равна нулю, потому что симметрична во всех направлениях. Это заключение было математически подтверждено Яном Хольцмарком (Jan Holtzmark) в 1919 году. Норвежский физик предположил, что частицы были рассеяны равномерно в пространстве, так что их распределение в среднем равномерно, но с небольшой разницей в количестве частиц от одного места к другому (так называемый закон Пуассона). При этом оказывается возможным получить точное выражение для распределения вероятности модуля силы, действующей на отдельную частицу.

Формула Хольцмарка гласит, что в бесконечной вселенной, заполненной такими взаимодействующими частицами, на каждую из них действует конечная средняя сила, причем ее величина определяется в основном ближайшими соседями. Важность результата Хольцмарка для динамики звездных систем неустанно пропагандировал Татеос Артемьевич Агекян из Санкт-Петербургского Университета, один из основателей науки, изучающей движения звезд и галактик. Хольцмарк рассматривал электрические частицы одного знака, между которыми действуют силы отталкивания. Но, так как электрическая сила имеет ту же зависимость $1/r^2$, что и сила притяжения, его анализ также применим к гравитации, как позднее показал Субраманьян Чандрасекар. Сила Хольцмарка хотя и является конечной, но имеет бесконечную дисперсию, обусловленную наличием очень близких пролетов допускаемых в модели точечных частиц. Ученица Агекяна Ирина Петровская (1938-1999) в 1986 году обобщила распределение Хольцмарка на модель частиц конечного размера. Тогда дисперсия флуктуаций силы становится конечной.

Другое решение гравитационного парадокса предложил сам Зеелигер. Вместо того, чтобы отрицать бесконечное распределение материи, Зеелигер предположил, что ньютоновский закон гравитации выполняется только до определенных масштабов. Если сила притяжения уменьшается с увеличением расстояния быстрее, чем гласит закон Ньютона (например, как в случае экспоненциального обрезания гравитационного потенциала), тогда для изотропного мира

*Сванте
Аррениус
1859-1927*

*Ян
Хольцмарк
1894-1975*

не нужно вычитать друг из друга бесконечности и парадокса не возникает.

Интересно, что Зеелигер имеет предшественника подобной идеи. Вот что писал Бруно, страстный сторонник бесконечности:

Вопрос: Но что вы скажете о взаимодействии между конечной и бесконечной материей, как, например, между Землей, холодным телом, и небом с бесчисленными звездами? Не думаете ли вы, что, как утверждал Аристотель, бесконечность поглотит и разрушит конечность?

Ответ: Вообще нет... Ибо в то время как материальная сила распространена и распространяется на бесконечное пространство, бесконечная материя не действует на конечную с бесконечной силой, а только с такой силой, которая может быть излучена от ограниченного числа частей и с некоторых расстояний от конечного тела, она не может влиять всеми своими частями везде, а только своими ближайшими частями.

Бруно здесь говорит, что тела не могут действовать друг на друга за пределами конечного расстояния. Вольно переводя в современные термины, он в действительности предполагал конечность радиуса действия гравитации, как решение парадокса бесконечных сил.

Нужно также отметить, что в теории Ньютона гравитация является дальнодействием. Это означает, что гравитация распространяется бесконечно быстро и от нее нельзя заслониться или ее поглотить. В действительности именно эти качества ньютоновской теории и приводят к гравитационному парадоксу, как говорят физики, на уровне уравнения гравитационного потенциала. Без современной релятивистской и квантовой физики сила гравитации в бесконечном пространстве остается парадоксальным понятием.

3.4. Устойчивость и флуктуации в ньютоновской космологии

Ньютон предполагал, что звезды распределены довольно однородно и находятся в состоянии покоя, как будто их «прибили гвоздями» к абсолютному пространству. Естественно, что Бог, создавший абсолютное пространство и звезды, мог установить такие начальные условия. Тогда возникает вопрос, что произойдет со звездами в дальнейшем, если учесть силы гравитации между ними.

В письме к Ричарду Бентли Ньютон писал:

... если бы вещество нашего Солнца и планет, и все вещество Вселенной было равномерно рассеяно по всем Небесам, и каждая частица имела бы врожденное притяжение ко всему остальному, и все пространство, по которому рассеяно это вещество, было бы только конечным, то вещество снаружи этого пространства из-за своей гравитации стремилось бы ко всему веществу внутри и, следовательно, упало бы в центр целого пространства, и здесь составила бы одна великая сферическая масса. Но если бы вещество было равномерно распределено по всему бесконечному пространству, то оно никогда не могло бы собраться в одну массу, но что-то из него собралось бы в одну массу, а что-то – в другую, и так образовалось бы бесконечное число огромных масс, рассеянных на огромных расстояниях друг от друга по всему бесконечному пространству. И таким образом могло бы образоваться Солнце и неподвижные звезды, если предположить, что вещество было светящейся природы.

Здесь Ньютон проводит различие между поведением конечного и бесконечного облаков вещества. У конечного облака, исходно находящего в состоянии покоя, всегда есть центр, в который оно неизбежно коллапсирует. Середина облака радикально отличается от остальных точек: здесь силы притяжения от других частей этого облака взаимно компенсируют друг друга. Однако если рассмотреть бесконечно большое облако, тогда произойдет чудо – все точки становятся равноправными и больше не существует одного выделенного центра, а возможно возникновение многих массивных центров. Так как наблюдается огромное множество звезд, а не одна сколлапсировавшая масса, Ньютон сделал вывод, что наша Вселенная должна быть бесконечной. Кроме того, он обрисовал также и процесс образования в ней звезд. Вещество, равномерно распределенное по бесконечной Вселенной, неустойчиво: из маленьких зародышей плотности образуются конденсации. Под действием вездесущей гравитации, первоначально однородный и монотонный ландшафт начинает «жить своей жизнью», эволюционируя в сложный, структурированный пейзаж.

В 1902 году Джеймс Джинс (James Jeans) открыл критерий начала нестабильности в гравитирующем однородном веществе. В областях, размером больше критического размера $R_J = v / (G\rho)^{1/2}$, начинают расти структуры с характерным временем $\tau = 1/(G\rho)^{1/2}$.

Плотность однородного вещества равна ρ , а v – это начальная хаотическая скорость частиц (для теплового газа $v^2 \approx kT/m$)

Ньютон сравнил неизбежную нестабильность первоначально однородного газа с невозможностью заставить бесконечное число иголок стоять точно на своих кончиках на жесткой бесконечной поверхности. Таким образом, в бесконечной изначально однородной Вселенной будет образовано бесконечно много звезд. Кстати, иголка Ньютона стала популярным примером в физике хаоса: даже микроскопические атомные колебания заставили бы реальную иголку упасть менее чем через 4 секунды.

3.5. Почему ночное небо темное?

Чтобы избежать коллапса звездной Вселенной в один ком, Ньютон предположил, что она бесконечно велика. Но, увы, это приводит к другому парадоксу. Во вселенной, однородно заполненной звездами, весь небесный свод сверкал бы так же ярко, как поверхность Солнца.

Это умозаключение, известное как парадокс Ольберса (Heinrich Olbers), названо по имени немецкого физика и астронома. Его история восходит к Кеплеру, который еще думал, что звезды находятся на небесной сфере. Любопытно, что Ньютон не заметил этой проблемы в своем собственном бесконечном космосе, хотя записанные им вычисления показывают, что он был всего в одном шаге от этого парадокса.

Как будет выглядеть ночное небо в бесконечной звездной Вселенной? Проще всего получить ответ на этот вопрос, воспользовавшись аналогией с человеком, находящимся в лесу. Представьте лес. Если он густой, то его нельзя увидеть полностью насквозь. В любом направлении луч зрения наткнется на ствол дерева, перед тем, как дойдет до границы леса. Это происходит потому, что стволы не являются тонкими математическими линиями. Так, если деревья растут в 10 м друг от друга и имеют толщину 1 м, то нельзя увидеть дальше, чем на 100 м. Похожее явление происходит во вселенной, равномерно заполненной звездами. Неважно, как велики типичные расстояния между звездами, в любом направлении луч зрения рано или поздно наталкивается на звездный диск. Звезды не являются математическими точками.

*Генрих
Ольберс
1758-1840*

Легко получить формулу для величины критического расстояния, после которого звездные диски начинают покрывать все небо, т.е. когда ночное небо начинает светиться как поверхность Солнца (т.к. оно является типичной звездой). Для этого надо взять известное выражение для длины свободного пробега частицы в газе в виде $l = 1 / n\sigma$, где n - это концентрация частиц газа в 1 см^3 , а σ - это поперечное сечение одной частицы, измеренное в см^2 . Тогда в задаче на плоскости (как в случае наблюдения в лесу сквозь деревья) для среднего расстояния между деревьями L и среднего диаметра дерева d глубина видимости в лесу будет $l = L (L/d)$. В случае пространственной задачи, для среднего расстояния между звездами L и среднего размера звезды d , критическое расстояние в такой вселенной будет $l = L (L/d)^2$.

Среднее расстояние между звездами в Галактике составляет около $3 \cdot 10^{13}$ км, а размер средней звезды (скажем, Солнца) около 1 000 000 км. Используя полученную выше формулу, можно подсчитать расстояние, после которого небо было бы покрыто звездными дисками и стало непереносимо ярким, как поверхность Солнца. Это расстояние огромно, но конечно, примерно в 10^{15} раз больше, чем расстояние до ближайшей звезды. Так как размер нашей Галактики (Млечный Путь) составляет всего 10^4 таких единиц длины, мы можем легко видеть другие галактики сквозь «звездный лес» Млечного Пути.

Поскольку ночное небо выглядит темным, то это означает, что какие-то предположения ньютоновской космологии неверны. Многие мыслители пытались понять это кажущееся невинным явление - темноту ночного неба. Кеплер рассматривал темное небо как свидетельство тонкой звездной сферы. Отто фон Герике (Otto von Guericke), прославившийся своими воздушными насосами и экспериментами с вакуумом, считал, что звезды образуют огромный, хотя и конечный, остров в бесконечной Вселенной, в остальном пустой.

А может ли быть так, что звездная Вселенная бесконечна, но видимая вселенная конечна? Ольберс думал, что звездный свет поглощается при пересечении огромного пространства - космический туман ограничивает видимость: «Всемогущий, с великодушной мудростью, создал вселенную с великой, но не вполне совершенной прозрачностью, и таким образом свел область видения к ограниченной части бесконечного пространства». Хотя заманчиво объяснять темное небо поглощением звездного света, позже осознали, что это привело бы к нагреву поглощающей среды до температуры опять-таки равной

Отто
фон Герике
1602-1686



Рис. 3.1. Разреженность звездного леса в Млечном Пути позволяет видеть туманность Андромеды. Впервые наблюдавшаяся арабским астрономом Аль-Суфи (Al-Sufi) (903-986), эта близкая Островная Вселенная видна невооруженным глазом как слабая размытая точка прямо над созвездием Пегаса. Мирный звездный пейзаж шептал Ньютону, что Вселенная бесконечно велика и заполнена звездами. Но для некоторых других мыслителей космологической загадкой была ночная тьма, а не сверкающие звезды.

температуре поверхности звезды.

Более хороший способ ограничить видимую вселенную – это предположить, что звезды существовали не всегда, а были включены какое-то конечное время назад. Когда мы смотрим глубоко в пространство, мы также смотрим назад во времени, в древнюю эпоху, когда звезды еще не образовались. Эту идею обсуждал Вильям Томсон (William Thomson), который в течение 53 лет был профессором университета Глазго и больше известен как лорд Кельвин («Кельвин» происходит от названия реки, протекающей возле университета). Если бы звезды светили не больше, чем 100 млн. лет, то радиус видимой вселенной был бы самое большее 100 млн. световых лет. Возрасты такого порядка появились в популярной в то время теории, которая приписывала нагрев Солнца энергии, выделяемой при его постепенном сжатии под действием собственной гравитации. Забегая вперед, отметим, что такое решение парадокса Ольберса предлагается в космологии большого взрыва.

Этот парадокс также впервые побудил рассмотреть иерархическое распределение звезд. В начале XX века Фурнье

*Вильям
Томсон
1824-1907*

Д'Альбе и Шарлье построили первые математические модели иерархической Вселенной, свободной от парадоксов Зеелигера и Ольберса (об этом мы будем говорить в следующих главах).

3.6. Почему звезды еще не погасли?

Закон *сохранения энергии* был открыт в XIX веке несколькими пылкими исследователями природы тепла. В зачаточном виде его выразил еще в 1748 году русский ученый Михайло Ломоносов, который в письме Леонарду Эйлеру (Leonard Euler) писал: «... все изменения в Природе происходят так, что если что-то к чему-то прибавляется, то это от чего-то отнимается. Так что, сколько к чему-то прибавит, столько же от чего-то убудет, ... Так как это общий закон Природы, он применим также к законам движения: тело, которое ударом приводит другое тело в движение, столько же теряет от своего движения...» Или, как позже это выразил Антуан-Лоран Лавуазье (Antoine-Laurent Lavoisier): «Ничто не исчезает, ничто не возникает, все трансформируется».

Первым сформулировал закон сохранения энергии во всей его полноте в 1842 году немецкий врач Юлиус Майер (Julius Mayer), который начал заниматься физикой случайно. Работая судовым врачом во время путешествия на Яву, он заметил, что кровь у моряков была более красной, чем в его более холодной родной стране. Он связал это наблюдение с теорией, предложенной Лавуазье, о том, что тепло тела производится процессом горения, кислород для которого дает кровь. Кровь была более красной, потому что в тропиках требуется меньше горения и кислорода. Это вдохновило Майера на мысль о связи между теплом и механической работой, выполняемой мускулами. Он рассуждал, что тепло и работа – это две формы энергии. Существуют различные виды энергии. Полная их сумма сохраняется в физическом процессе и, в конечном счете, во всей вселенной.

Идеи Майера были опубликованы в частных брошюрах и не очень тепло были приняты его современниками. Чтобы научное сообщество приняло закон сохранения энергии, потребовались искусные опыты Джеймса Джоуля (James Joule) (1818-1889).

Если бы звезды светили благодаря тому запасу энергии, который содержится в скрытом виде в их массе, и если бы возраст Вселенной был бесконечен, то все топливо было бы израсходовано за

Антуан-
Лоран
Лавуазье
1743-1794

Юлиус
Майер
1812-1878

конечное время, и мы бы не увидели прекрасного звездного неба! Согласно нашим современным знаниям, масса звезды может дать не больше энергии, чем допустимо знаменитой формулой Эйнштейна $E = M c^2$. Звезда, излучающая энергию, не может прожить дольше, чем время жизни, задаваемое полной энергией звезды, деленной на мощность ее излучения. Максимальное время жизни звезды можно вычислить исходя из максимального запаса ее внутренней энергии M^*c^2 (для Солнца $M_{\odot}c^2 = 1.8 \times 10^{54}$ эрг). Если звезда теряет энергию со скоростью L^* (для Солнца $L_{\odot} = 4 \times 10^{33}$ эрг/сек), то ее возраст не может превышать $\tau_{max} = M^*c^2/L^*$ (для Солнца $\tau_{max} \approx 5 \times 10^{20}$ сек). Таким образом, для звезды типа нашего Солнца время жизни не превышает 20 000 млрд. лет – почтенный, но ограниченный возраст. В вечной Вселенной звезды были бы всего лишь короткими вспышками света.

3.7. Парадокс тепловой смерти

Еще одной проблемой вечного мира является неизбежная тепловая смерть Вселенной. Термодинамика утверждает, что когда физический процесс происходит без взаимодействия с внешним миром, то *энтропия* такой замкнутой системы всегда возрастает. Эта величина характеризует уровень порядка: чем больше энтропия, тем больше хаоса, беспорядка в системе. Мерой энтропии может являться количество отдельных единиц в системе: то, что сначала является целым, имеет тенденцию в конце быть разбитым на части. Вещи, предоставленные самим себе, постепенно разрушаются, превращаясь в груды пыли.

Закон энтропии хорошо знаком. Когда вы роняете чашку, энтропия возрастает, и бессмысленно ждать, когда осколки сами соберутся с пола и снова образуют чашку. Также тепло всегда переходит от горячего тела к более холодному, позволяя нам обогревать дом с помощью печи. Это означает, что в реальной жизни время течет необратимо, как говорят, существует стрела времени, люди никогда не становятся моложе.

В 1852 году Герман фон Гельмгольц (Hermann von Helmholtz) прочитал в Кенигсберге лекцию, на которой он представил идею тепловой смерти вселенной. Возрастающая энтропия означает, что во Вселенной существует постоянное рассеяние энергии, происходящее

*Герман фон
Гельмгольц
1821-1894*

до тех пор, пока не прекратятся все движения, т.е. не наступит тепловая смерть.

Людвиг Больцман (Ludwig Boltzman), основатель статистической механики, выразил закон энтропии следующим образом: система, состоящая из большого числа частиц, стремится к более вероятному состоянию. Вы, наверное, согласитесь, что воздух в вашем кабинете (около 10^{24} молекул) никогда не соберется в одном углу, оставив пустой ту часть, где вы сидите и размышляете о Вселенной. Такое распределение молекул воздуха крайне невероятно. Самым вероятным состоянием газа является его термодинамическое равновесие, когда все молекулы распределены в пространстве равномерно. В вечной вселенной Ньютона достаточно времени, чтобы достичь такого равновесного состояния, когда уже не будет ни звезд, ни планет, ни сложных структур, ни жизни...

Чтобы объяснить, почему Природа была к нам благосклонна, Больцман предположил, что то, что мы видим, является в действительности гигантской флуктуацией в мире молекул. Ясно, что вероятность того, что такое отклонение от однородности произойдет случайно, очень мала. Однако можно рассуждать так же, как греческие атомисты: времени достаточно, пространства достаточно и произойти может все, что угодно. Но нужно предупредить, что тепловая смерть – это смелая экстраполяция термодинамики газов на большую Вселенную. Больцман не учел, что гравитация и другие силы между его частицами приводят к росту космических структур.

Парадоксы бесконечного и вечного космоса Ньютона послужили мощным стимулом для поиска новой модели мира, свободной от этих противоречий. Одним из путей в этом направлении была разработка моделей с неоднородным космологическим распределением вещества. Эта точка зрения берет свое начало в привлекательной аналогии с Солнечной системой и в понятии о самоподобии. Открытие астрономами слабых туманных пятен на звездном небе дали крылья космологическим размышлениям об иерархии космических структур.

*Людвиг
Больцман
1844-1906*

Глава 4

Иерархический мир туманностей

4.1. Открытие туманностей на небесной сфере

XVIII век был эпохой Просвещения, когда все наблюдаемые явления, начиная с человеческого тела и кончая часовым механизмом вселенной, стали объектами научного рассмотрения и объяснения. К загадке светил ночного неба, рассеянных в глубинах космоса, добавилась загадка сверкающей ленты Млечного Пути.

Одной ясной ночью Иоганн Ламберт (Johann Lambert) смотрел в небо, надеясь уловить какой-то порядок: «Прошлой ночью я снова пристально рассматривал звездное небо, так как я так и не смог найти какую-то определенную *симметрию* в его виде. И снова напрасно. Затем я заметил, что звезды первой, второй и третьей величины распределены очень неравномерно, где-то более плотно, а в других местах неба имеются большие пустые пространства, едва содержащие несколько звезд шестой величины. Вот так, подумал я, выглядела бы для нас солнечная система, если бы мы могли видеть все планеты и кометы одновременно».

Какая чудесная ночь! Небо раскрывает тайну структуры, говорящую о том, как звезды распределены в *пространстве*. Может быть, они образуют большую плоскую систему, похожую на наш рой планет вокруг Солнца? Во времена Ламберта третье измерение – глубина пространства – обрело новую привлекательность.

Исаак Ньютон считал, что звезды равномерно распределены по бесконечному пространству. Иначе трудно было понять, почему мирный пейзаж, в котором мы живем, не сколлапсировал в одну огромную массу, и мы не ощущаем непереносимых сил, исходящих из пучин космоса. Однородная материя была нужна для того, чтобы компенсировать бесконечную силу тяготения, действующую со всех сторон одинаково. Но настоящие звезды видимые на небе представляли собой проблему. Самой заметной особенностью звездного свода является Млечный Путь. Галилей через свою

увеличительную трубу увидел, что жемчужное сияние исходит от бесчисленных слабых звезд.

Ньютон пытался показать, что, когда мы двигаемся все дальше и дальше в космос, т.е. смотрим на более слабые звезды, то встречаемся с однородностью. У современных космологов та же мечта: глядя на достаточно большие части вселенной, в конце концов, мы должны увидеть однородный мир галактик (это новая основная единица материи в больших масштабах). Попытки Ньютона остались безрезультатными. И это не удивительно. Близкие звезды действительно образуют большое сплющенное облако. Кроме того, Ньютон не знал, как величина звезд зависит от расстояния до них, и, следовательно, как растет число звезд при подсчете все более слабых звезд, если действительно звезды равномерно рассеяны по пространству. Впервые этот космологический тест попытался сделать Хаббл в начале 20 века.

Со времен Ньютона увлеченные наблюдатели начали смотреть в свои телескопы не только на звезды, но и на удивительные туманные пятна среди звезд. В XVIII веке стала популярной охота за кометами. Однако не все расплывчатые пятна на небе были кометами. Было много неподвижных туманностей, которые раздражали охотников за кометами, потому что их легко было спутать с медленно движущимися кометами. Шарль Мессье (Charles Messier) решил составить полезный каталог таких помех. За свою карьеру Мессье открыл почти двадцать новых комет и был приглашен в члены Французской Академии. Хотя теперь его больше помнят не за открытые кометы, а за каталог неподвижных туманностей, в котором было 103 объекта с их описаниями вида и положениями на небе. Астрономы до сих пор ссылаются на M31 (или Мессье 31), когда говорят о туманности Андромеды. И многие другие ночные красавицы известны по их номерам Мессье. Хотя Мессье совсем не интересовали туманности сами по себе, некоторые умы начали задаваться вопросом, что же это такое.

*Шарль
Мессье
1730-1817*

4.2. Физика Декарта

Рене Декарт (René Descartes) французский математик, физик и философ проложил дорогу для современной науки в то время, когда говорить о Копернике не всегда было безопасно для жизни. У Декарта было солидное фамильное состояние, которое позволило ему сочетать

*Рене
Декарт
1596-1650*

занятия наукой с путешествиями по Европе. Он жил и умер за пределами своей родины, проведя двадцать лет в более тихой и либеральной Голландии. Последние месяцы жизни он провел в Стокгольме, куда его пригласила Королева Кристина. Холодная северная зима и занятия философией, проходившие по приказу королевы ранним утром, оказались непосильными для его здоровья, которое всегда было слабым.

Действительно, еще в школьные годы болезненному мальчику советовали оставаться в постели утром столько, сколько ему хочется. Существует предание, что благодаря этой пожизненной привычке (которую он сочетал с размышлениями) он изобрел аналитическую геометрию. Однажды утром ему на глаза попала муха, ползавшая по потолку его спальни. Как можно было бы описать путь мухи математически? Ответ был дан в координатах x и y : в воображении Декарт приписал каждой точке потолка пару чисел (x,y) . Геометрия и алгебра счастливо поженились. А свата стали называть отцом современной математики.

В 1619 году Декарту приснилось три сна, которые он интерпретировал как приглашение к тому, чтобы реконструировать и поднять человеческие знания до уровня достоверности, используя для этого математику. Одним из результатов стала теория декартовой системы мира. В семнадцатом и восемнадцатом веках она пользовалась большой популярностью, хотя на нее нападали религия (и католическая и протестантская), как на плохо замаскированное коперниканство.

Исходной точкой декартовой физики был закон инерции, до этого обсуждавшийся Галилеем, но который Декарт ясно сформулировал для частицы, покоящейся в бесконечной вселенной. Не вступая в контакт с другими частицами, она либо сохранит свое исходное состояние покоя, либо будет двигаться с постоянной скоростью по прямой линии, пока ее не отклонит столкновение с другой частицей. В свете этого принципа (в котором узнается сформулированный позже ньютоновский первый закон движения), различные изменения движения в реальном мире вызываются каким-то воздействием. Нет ни вакуума, ни загадочного дальнего действия. Тела все время находятся в контакте с другими телами.

Декарт интерпретировал видимые явления в терминах микроскопических взаимодействий. Так, притяжение магнитом куска железа вызвано невидимыми винтообразными частицами, которые излучаются магнитом и входят в винтовые каналы, существующие в

железе. Движения планет вызываются вихрями эфира вокруг солнца, наподобие того, как водоворот захватывает щепку. Похожие вечные вихри существуют вокруг других звезд. Пространство между звездами не пусто, а заполнено частицами эфирного океана.

4.3. Самоподобный космос Эммануила Сведенборга

Эммануил Сведенборг (Emanuel Swedenborg), шведский ученый, энциклопедист и теолог, открыл человечеству то, что теперь называется иерархическими космологическими моделями. Его отец был профессором Университета Уппсалы, а позже епископом Скары. В молодости Эммануил изучал языки и естественные науки, а после окончания университета в 1709 году отправился путешествовать по Европе. Здесь он познакомится с научными кругами того времени и приобрел репутацию умелого конструктора инструментов. По возвращении домой он работал редактором первого Шведского научного журнала, а в возрасте 28 лет был назначен чиновником по особым поручениям в колледже Минеса и занимал этот высокий пост более тридцати лет. Он был также член-корреспондентом Императорской Академии наук Санкт-Петербурга. Останки этого необыкновенного человека покоятся в соборе Уппсалы.

Сведенборг был плодотворным мыслителем и писателем, который обсуждал практически все области науки того времени и написал трактаты по психологии, зоологии, химии, геологии, минералогии, физике и астрономии. Например, теперь признано, что сочинения Сведенборга о мозге и органах чувств были «наблюдательно более точными, а теоретически более глубокими, чем сочинения всех других ученых восемнадцатого столетия» (цитата из журнала *Nature*, т. 394, стр. 144 (1998)).

В 1734 году в своей книге *Principia* Сведенборг выдвинул принципиально новые взгляды на самоподобие и космическую иерархию: элементарные частицы образуют небесные тела, которые образуют системы, которые в свою очередь могут быть элементами систем более высоких иерархий и так далее. Эта точка зрения отражает его общее мнение о том, что все в мире сконструировано согласно общему плану.

Последние три десятилетия своей жизни Сведенборг занимался довольно странными вещами: он стал ясновидцем, разговаривал с духами и ангелами и писал книги о духовном мире и

Эммануил
Сведенборг
1688-1772

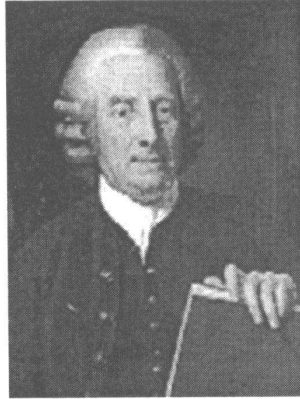


Рис. 4.1. Эммануил Сведенборг выражал свой принцип самоподобия разными способами. Один из них: «Похоже, Природа любит свое собственным очарованием».

теологии. Но напомним, что великий физик Ньютон посвятил большую часть своего времени не тому, что мы теперь называем научной деятельностью, он также занимался духовным знанием, изучал Библию и писал книги по теологии.

Сведенборг увлекался теорией Ньютона, которая во времена Декарта еще не была известна, и которой суждено было заменить картезианство. Он даже привез в Швецию математику новой физики – интегральное исчисление. Однако, его также привлекали основные идеи Декарта (материальное взаимодействие, вихри, отсутствие вакуума) и на их основе он пытался нарисовать картину мира. Он руководствовался особым предположением о том, что все в мире, не только большое, но и малое, сделано по одинаковым принципам. Эта идея о самоподобии золотой нитью проходит через книгу Сведенборга *Principia*. На ней он основывает свою попытку построить согласованную теорию частиц и небесных тел. Его восхищала возможность открыть научным способом («опыт, геометрия, рациональное рассуждение») секреты невидимого мира элементарных частиц.

Сведенборга очень интересовали свойства магнетизма, особенно концентрация частиц железа вдоль, как их тогда называли,

силовых линий. Концентрация является самой большой рядом с осью

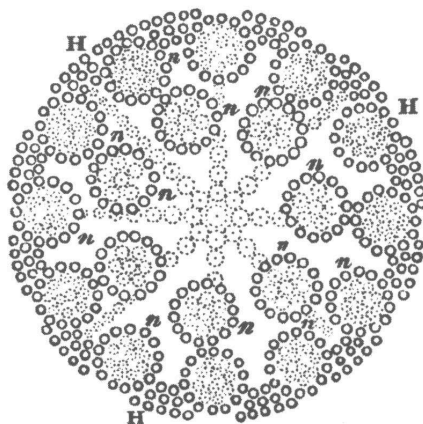


Рис. 4.2. Модель элементарных частиц по Сведенборгу. Поверхность частицы состоит из более мелких частиц, которые внутри частицы образуют идентичные копии последней.

магнита. Так как магнитная сила намного больше, чем гравитация, можно также увидеть признак ее космического аналога в структуре Небес: «... по ничтожному камню земли и его магнитным силам разглядите подобное и на самом большом масштабе».

Данте писал в своей Божественной Комедии: «Протянутый своими большими и малыми огнями между полюсами вселенной, Млечный Путь так светится белым, что побуждает задавать мудрые вопросы». Шведский мудрец обратил внимание на то, что звезды плотнее всего располагаются вдоль Млечного Пути, и сделал вывод, что это должно соответствовать оси системы звезд. Из текстов Сведенборга видно, что он представлял Млечный Путь как прямую колонну в пространстве. Менее вероятная интерпретация состоит в том, что он описывал кольцо (похожее на круговые силовые линии вокруг кольцеобразного магнита). Во всяком случае, он видимо первым осознал, что то, что мы видим спроектированным на небо, может нести информацию о широкомасштабном распределении вещества.

Ось нашей Солнечной Системы, которая также является большим магнитом, отклоняется от космической оси, определяемой Млечным Путем. Это означает, что мы находимся несколько в стороне

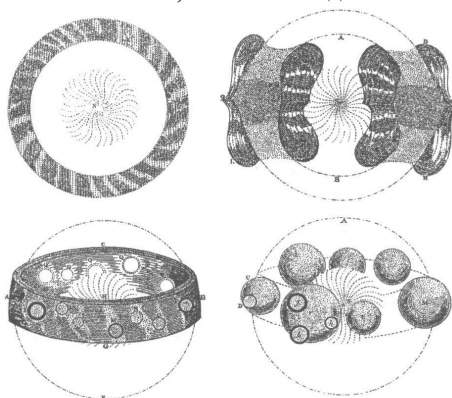


Рис. 4.3. Взгляд Сведенборга на то, как образовались планеты посредством конденсации из кольца вещества, коллапсировавшего на себя вокруг первичного Солнца. Вращающееся кольцо объясняет, почему планеты находятся в одной плоскости и движутся в одном направлении.

от главной концентрации, и поэтому мы можем видеть ее как колонну на небе, согласно Сведенборгу.

Сведенборг считал, что микромир состоит из все более и более мелких частиц. Но эта последовательность не тянется до бесконечно малого размера или произвольно тонких субстанций. Существует «первый предел» или субстанция, где «начинается геометрия», рожденная из «естественной точки», которая является своего рода особым состоянием между непознаваемой Бесконечностью и нашим миром.

Нет вакуума и независимого пространства (как постулировал Ньютон), а понятие пространства относится к взаимосвязям между частицами. Начиная с микромира, планет и звезд, Сведенборг распространял многоуровневую структуру также на еще большие масштабы, которые, как он представлял, существуют в макромире. Млечный Путь, образованный другими солнцами, есть только один элемент более крупной системы, которая является элементом еще более крупной, и так далее. Этот грандиозный взгляд был принят Кантом и Ламбертом несколько десятилетий спустя.

Время почти стерло амбициозную архитектуру мира Сведенборга, основанную не на гравитации, а на магнетизме, и не принимавшую в расчет неизвестные тогда квантовые законы микромира. Тем не менее, его книга *Principia* была результатом весьма проницательных размышлений, и читать ее до сих пор увлекательно.

4.4. О происхождении Солнечной Системы

Эммануил Сведенборг составил набросок рождения планетных систем (из которых наша была известна, а другие предполагались). Происхождение плоской Солнечной Системы, в которой планеты вращаются по почти круговым орбитам, представлялось великой загадкой в письмах Ньютона к Бентли. Декарт думал, что планеты сначала были звездами, блуждающими в космическом пространстве между другими звездами. После того, как они погасли, их эфирный вихрь ослабел, и им стал угрожать водоворот солнечного притяжения. Обладая тонкой интуицией и при поддержке идеи о сомоподобии, Сведенборг считал, что легче представить себе, что происхождение планет и спутников связано с самим первичным веществом Солнца. Он предположил, что стремительное вращение солнечной массы в результате центробежной силы приводит к тому, что самые внешние части отбрасываются.

Затем он предположил, что планеты образованы конденсацией из оторванного кольца вещества. Позднее Кант и Лаплас представили в целом похожую картину происхождения планет, уже одетую в ньютоновскую одежду, – знаменитую небулярную гипотезу Канта-Лапласа. Эти старые идеи все еще являются частью нашего взгляда на астрономический мир, несмотря на то, что физика оказалась более сложной.

Сведенборг даже указал на доказательство такого эволюционного процесса: звездное небо не является совершенно неизменным. Иногда загорается, а затем гаснет новая звезда. Это происходит, когда широкий пояс конденсированного вещества скрывает от взгляда молодую звезду. Теперь мы знаем, что такие взрывающиеся и гаснущие новые звезды в действительности являются поздней фазой в жизни массивных звезд.

Часто говорят, что французский ученый Жорж Бюффон (Georges Buffon) первым представил научную теорию образования Солнечной Системы. Однако его теория, основанная на идее об отрыве

*Жорж
Бюффон
1707-1788*

вещества из Солнца кометой, была опубликована через десять лет после книги Сведенборга *Principia*. Отметим, что *Principia* была удостоена чести быть включенной в Индекс запрещенных книг католической церкви. Переводчик *Principia* преподобный Август Клиссолд (Augustus Clissold) полагает, что это произошло потому, что предложенное образование Солнечной системы было трудно согласовать с доктриной о том, что Бог создал все из нечего, и с буквальной интерпретацией первой главы Книги Бытия.

4.5. «Протохаос» в системе мира Сведенборга

Мы время от времени ссылаемся на ранние сочинения Эммануила Сведенборга по той простой причине, что это неистощимый источник интересных идей, приходящих из детства науки, даже если они не очень повлияли на ее развитие. Уместно упомянуть его взгляды на предсказуемость, эволюционные цепочки и разнообразие миров.

Сведенборга восхищала возможность получить научными методами, включающими опыт, теорию и рациональные рассуждения, знание о мире большого и малого. Он приводил в качестве примера идеального суперученого, который странно напоминает нам могучий ньютоновский интеллект, который позже описал Лаплас, и который мы помним по Главе 2. Сведенборг писал: «Такой человек мог бы считать свое местоположение как бы центральным; и, смотря отсюда на все окружение своей системы единым взглядом, он мог бы познать вещи настоящие, прошлые и будущие, зная их причины и их состав, заданный или предполагаемый».

Но Сведенборг признавал, что такой суперученый, непрерывно получающий и моментально анализирующий всю информацию, – всего лишь мечта. В реальности человек намного менее идеален и более беспомощен в своих попытках понять мир, увидеть прошлое и предсказать будущее.

Космос Сведенборга был очень динамичным и эволюционирующим. Он был заполнен планетными системами, «мирами», каждый из которых пришел в их настоящее состояние по длинной цепочке шагов, в предположении, «что ни один мир, изобилующий множеством объектов и явлений, не может существовать, не пройдя последовательность состояний и интервалов времени». Хотя законы или принципы, движущие такую эволюцию,

одинаковы, конечные результаты могут варьироваться. Он приводит пример, в котором, чтобы достичь настоящего состояния, потребовалась 1000 шагов. Но в этой цепочке даже небольшая разница в один-единственный шаг немедленно порождает новую цепочку и совершенно другое финальное состояние. Существует не только большое разнообразие настоящих «миров», но и бесконечно много цепочек эволюции.

«Теперь у нас может быть столь же огромное разнообразие последовательностей; поскольку если есть малейшая разница в любом промежуточном изменении, это немедленно порождает другой, побочный и совершенно отличающийся ряд вещей, существующих последовательно и одновременно. ... может быть столько же последовательностей, сколько существует миров; или столько же миров, сколько последовательностей».

Сведенборг касается также предмета, который мы назвали бы вземной биологией: «Если ... на этих землях мы могли бы предположить существование царства животных того же типа, что наше, тогда мы должны также предположить, что оно подвержено тем же случайностям, изменениям, формам и последовательностям, через которое оно должно пройти, чтобы придти к тому же совершенству; но так как мы не можем предполагать, что в этом отношении все другие миры совершенно похожи на наше солнце, так же мы не можем предполагать, что они населены в точности похожими видами живых существ».

Космос Сведенборга был не только самоподобной структурой. Он был динамичным и – в современном смысле – хаотичным. Для шведского мыслителя эволюционное стремление к огромному многообразию было подлинным признаком вселенной. Он писал, что сам мир – это чудо. Его красота и совершенство отражаются в великом множестве модификаций. И, что парадоксально (а теперь основывается на глубокой аргументации хаоса) «в том, следовательно, состоит наша величайшая мудрость, что мы знаем, как мало простираются наши знания».

4.6. Иерархические модели Канта и Ламберта

Иммануил Кант и Иоганн Ламберт также размышляли о зрелище ночного неба над своими родными городами Кенигсберг

*Иоганн
Ламберт
1728-1777*

(теперь Калининград) и Мюлсхаузен (последний находился в Швейцарском Сундгене, в настоящее время это французский Эльзас).

В письме, написанном математиком и физиком Ламбертом философу Канту, можно прочесть, как может родиться простая, но глубокая идея: «вопреки своей привычке, я пришел в свою комнату

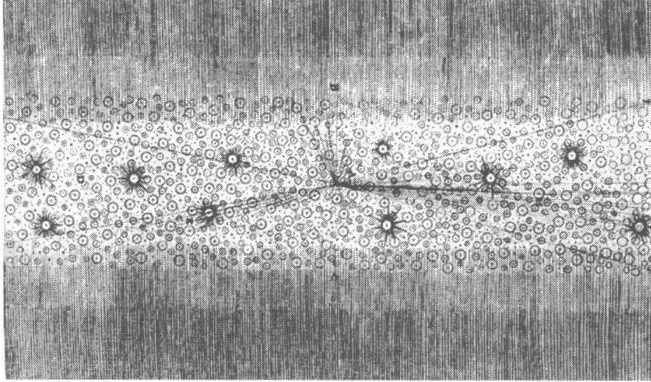


Рис. 4.4. Томас Райт объяснил, как тонкий слой звезд дает звездную полосу на небе – Млечный Путь. Представьте, что вы находитесь в середине слоя.

после вечерней трапезы и стал смотреть через окно на звездное небо, особенно на Млечный Путь. Мне явилось видение, в котором я увидел его как эклиптику неподвижных звезд. Я записал его на четверти листа бумаги».

В своих *Космологических Письмах* Ламберт описывает мысли, вызванные Млечным Путем. Он любовался великим числом слабых звезд в этой узкой полосе, пересекающей небо, и подумал, что трудно поверить, чтобы они могли лежать плотно друг к другу на одинаковом расстоянии от нас. Они должны быть распределены по глубине, и яркость Млечного Пути навела его на мысль, что в этом направлении вереницы звезд должны быть намного длиннее, чем вне него. «Коротко говоря, звездное строение не сферично, а плоско, даже очень плоско».

Томас Райт
1711-1786

Примерно в то же время, когда Ламберт рассматривал небо (1749), самоучка богослов и ученый Томас Райт (Thomas Wright) пришел к примечательному пониманию небес. Много лет он стремился создать модель мира, в которой был бы Бог, и которая объясняла бы вид звездного неба. С этой целью он представил себе,

что Солнце находится в центральной плоскости слоя звезд. Когда мы смотрим в направлении слоя, видно много звезд, что похоже на то, как думал Ламберт. Однако Райт предпочел нечто большее, чем плоское облако. Он представил себе огромную сферическую оболочку, образованную звездами, которые вращаются вокруг далекого центра, содержащего “Primum Mobile” (первичный двигатель) – большую притягивающую массу. Этот центр является также жилищем Бога. Если звездная оболочка сравнительно тонкая, тогда в окрестностях Солнца она почти плоская до какого-то расстояния, что дает большой круг Млечного Пути на небе. Райт также считал возможным, что существуют другие Млечные Пути на небе, «которые мы воспринимаем только как множество туманных пятен».

Кант как-то прочитал в газете сообщение, описывающее книгу, написанную Райтом. Она дала Канту пищу для размышлений, и он также нарисовал космологическую картину, в которой Млечный Путь был плоским облаком звезд, а Солнце было частью этого облака. Далее, так же, как Ламберт и Райт, он представил гипотезу о том, что бледные эллиптические туманности, наблюдаемые астрономами, это другие Млечные Пути. Огромное расстояние до них не позволяет нам видеть, что они состоят из звезд.

Кант и Ламберт также предполагали, что звездные системы образуют иерархическую структуру, так что они не распределены однородно. Кант писал: «Можно далее предположить, что эти более высокие вселенные как-то связаны друг с другом, и что этими взаимными связями они образуют снова еще более грандиозную систему, которая, возможно, как и предыдущая, снова является только членом в новой комбинации чисел. Мы видим первые члены последовательной связи миров и систем; и уже первая часть этой бесконечной последовательности дает нам возможность осознать, какие догадки нужно делать о целом. Конца нет, а есть бесконечная бездна».

Сведенборг писал о своих космических сферах: «Могут существовать бесчисленные сферы звездных небес в бесконечной вселенной, и они могут быть связаны друг с другом, как сферы двух магнитов. И все видимое звездное небо является, возможно, всего лишь точкой по отношению ко вселенной».

Конечная или бесконечная Вселенная?

Между этими моделями мира была разница. Кант и, вероятно, Сведенборг представляли, что иерархия тянется без конца ко все более

и более высоким уровням небесных систем: это была бесконечная иерархия. Ламберт думал, что после большого (в качестве примера он приводил 1000), но конечного числа шагов иерархия заканчивается. Он думал, что звездные системы удерживает вместе тяготение темных звездных масс: «... в конце концов, вы приходите в центральную точку всей мировой структуры, и здесь я нахожу свою первичную массу, которая управляет всем созданием».

В своей книге «Всемирная естественная история» Кант объясняет, почему должна существовать иерархия небесных тел. Всемирная гравитация заставляет более маленькие тела обращаться вокруг больших масс. Примером являются планеты, вращающиеся вокруг Солнца, и подобным же образом звезды Млечного пути должны, согласно Канту, вращаться вокруг какой-то массы, находящейся в центре звездной системы. Аналогично, Млечный Путь есть элемент системы большего масштаба, снова вращающейся вокруг своего центра. Проникающая повсюду гравитация связывает большие и малые системы вместе, делая возможной мировую структуру. Казалось, иерархическая система предлагала решение проблемы стабильности вселенной, которая так озадачивала в однородном звездном мире Ньютона. Звезды и их системы не сжимаются, а вращаются вокруг далеких центров.

Кант размышлял о том, как могла быть сформирована такая иерархия. Он принял, что вселенная бесконечна в пространстве и первоначально заполнена тонким субстратом, и предположил, что какое-то конечное время назад произошел момент создания, когда в какой-то точке бесконечной вселенной появилась большая масса. Эта масса, определяющая «центр» вселенной, привела вещество в движение вокруг себя, вокруг центра начали происходить скопления других масс, и этот процесс, распространяясь, как цепная реакция, дальше и дальше от первичного центра, привел к системам другого порядка.

4.7. Принцип космической субординации Гершеля

Понятие иерархии первоначально относилось к «священной власти» (по-гречески *hieros* = священный, *arkhe* = власть), к классу священников, которые в мире находились на уровень выше обычных смертных и выступали как посредники между Богом и людьми. Иерархия, с ее строгим порядком старшинства, простиралась и над

головами человеческих существ, на иерархию ангелов, которым Данте приписывал движущую силу небесных сфер.

В настоящее время иерархия лучше известна в своем более земном значении как система людей или вещей, упорядоченных друг над другом. Часто это понятие используют, чтобы характеризовать системы с особым типом структуры, состоящей из подсистем, а те имеют подсистемы на более низком уровне, и т.д. Множество таких иерархических организаций есть в человеческом обществе, царстве животных, а также в мире атомов. А лингвист может попытаться постичь грамматику языка в терминах уровней, согласно которым он организован.

Изучение галактик начал Вильям Гершель (William Herschel). В возрасте девятнадцати лет он эмигрировал из Германии в Англию и там зарабатывал себе на жизнь как музыкант. Он начал заниматься астрономией, когда ему было 35 лет, после того, как какая-то книга вызвала у него желание «увидеть небеса и планеты» собственными глазами. Гершель стал мастером по созданию телескопов и использовал свои инструменты, самые крупные в мире в то время, для тщательного просмотра неба. У самой большой его трубы было зеркало диаметром 120 см. Этот гигант можно было использовать только с помощью нескольких помощников, и работа была связана с риском. Несколько рабочих пострадали от несчастных случаев.

В 1781 году Гершель открыл объект, который сначала посчитал кометой. Финский астроном Андерс Лекселл (Anders Lexell), сделавший свою карьеру в Турку и Санкт-Петербурге, показал, что орбита этого объекта была почти круговой, значит, это не комета, а планета. Огромное событие для астрономии – была открыта первая планета с древних времен! Назвать ее было не легко, но, в конце концов, было принято название Уран. Это достижение привело Гершеля на должность придворного астронома.

Шарль Мессье послал Гершелю копию своего каталога туманностей. Это подвигло Гершеля начать новый обзор неба, который проводился с использованием суточного вращения Земли: телескоп находился в фиксированном положении, а Гершель смотрел, как в поле зрения перед ним проходит полоса неба со звездами, скоплениями и туманностями. Работая вместе со своей сестрой Каролиной, он открыл таким образом 2500 новых туманностей и звездных скоплений. Гершеля инициировали создание каталогов данных, охватывающих все небо, такие работы продолжаются и в современной астрономии.

*Вильям
Гершель
1738-1822*

*Андерс
Лекселл
1740-1784*

*Каролина
Гершель
1750-1848*

Сын Вильяма Гершеля Джон тоже стал выдающимся исследователем неба. Чтобы составить карту неба он использовал не только вращение Земли, но и ее сферическую форму. А именно, он привез один из телескопов отца в Южную Африку, на Мыс Доброй Надежды, где мог изучать южное небесное полушарие. Там он открыл

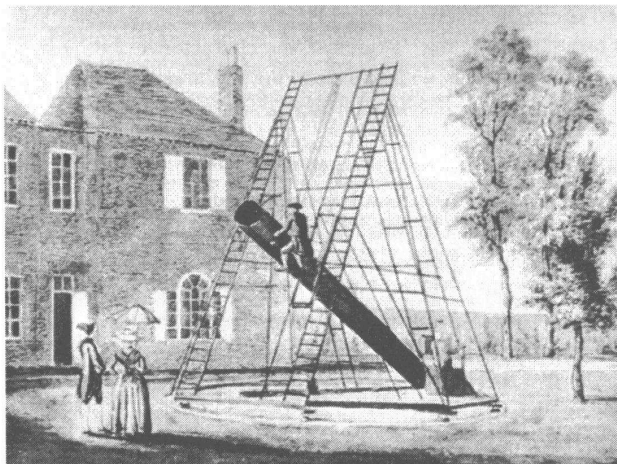


Рис. 4.5. 47-сантиметровый телескоп Вильяма Гершеля, который он использовал для систематического обзора неба. Его преданной и умелой помощницей была его сестра Каролина. В своем дневнике она писала о практических проблемах: «Мой брат начал серию «охватов», когда инструмент еще был в не очень законченном состоянии, ... каждую минуту я боялась треска или падения, потому что знала, что он поднимается на высоту в пятнадцать футов или больше на временной поперечине, вместо безопасной галереи ..., и однажды ночью, при очень сильном ветре, он едва успел добраться до земли, перед тем, как весь аппарат обрушился. Позвали рабочих, чтобы помочь вынуть зеркало, которое, к счастью, не пострадало, но на следующий день плотникам было много работы».

1700 новых галактик и скоплений.

Джон Гершель энергично экспериментировал с новым искусством получения снимков по методу Дагерра. Действительно, в 1838 году он первым использовал слово «фотография». Он первым предложил каждый день фотографировать Солнце, чтобы регистрировать положение и размеры его пятен. Однако во времена жизни Гершеля чувствительность фотографических пластинок были слишком низкой, чтобы делать снимки туманностей. Это стало

*Джон
Гершель
1792-1871*

возможным только с появлением сухих пластинок с бромистым серебром. В 1880 году Генри Дрейперу (Henry Draper) удалось сфотографировать туманность в Орионе. После этого фотографирование туманностей развивалось стремительно, и за несколько десятилетий это выявило огромный мир внегалактического пространства.

Эдвард Харрисон писал, что Джона Гершеля, как и многих, занимала загадка темного ночного неба. Гершель наметил совершенно новое решение, которое было заново открыто в первые годы XX века. В частном письме он писал:

... легко представить себе строение буквально бесконечной вселенной, что допускает любое число таких направлений проникновения, где не встречается ни одной звезды. Учитывая, что она состоит из систем, подразделяющихся согласно такому закону, что каждый более высокий порядок тел в ней находится намного дальше от центра, чем тела следующего более низкого порядка, – это было бы возможно.

Ясно, что Гершель имел в виду некоторый тип иерархической системы. В другом тексте он приводит в качестве примера спутники планет солнечной системы и большие расстояния между звездами и утверждает, что «принцип подчиненного группирования» принимает «характер и важность космического закона». Этот принцип привел его в восторг: «Наряду с тем, что он дает еще одно, наиболее поразительное указание на единство плана, которым пронизана вселенная, он может привести нас к пониманию, что если другие системы все-таки существуют в необъятности пространства, то они могут быть отделены от нашей настолько огромными интервалами, что будут казаться тусклыми туманными пятнышками или вообще ускользнуть от нашего взгляда». Он говорит здесь о следующем более высоком порядке тел, из-за которого даже ближайшие имели бы очень слабый вид на небе.

Интересно также, что он не принял объяснения, что ослабление света космической средой может сделать небо темным. Джон Гершель правильно рассуждал, что поглощающая среда сама нагревается и излучает, и «в любой момент отдает столько же тепла из каждой точки, сколько получает».

4.8. Два новых мира Фурнье д'Альбе

После вековой спячки, хотя и несколько оживленной Джоном Гершелем, в идею иерархической структуры вселенной вдохнул жизнь основавшийся в Лондоне популяризатор науки и изобретатель Эдмон Фурнье д'Альбе (Edmund Fournier d'Albe). Он написал книгу об электричестве и магнетизме, которая предназначалась для широкой публики, но которую ведущие научные журналы хвалили как «лучшее возможное введение в современное понимание электричества». В 1910-ых годах он работал ассистентом профессора физики в университете Бирмингема. Он вошел также в историю телевидения, передав в 1923 году первую телевизионную картинку из Лондона – портрет короля Георга V. В 1912 году он изобрел оптофон, позволявший слепым узнавать и локализовать свет с помощью ушей. Оптофон создает разные тона в зависимости от количества света, падающего на селеновые ячейки. Через два года он усовершенствовал свой аппарат так, что можно было медленно читать обычный текст. Любопытное совпадение, что давнему стороннику самоподобия и иерархии Сведенборгу приписывают изобретение слуховой трубы.

В 1907 году Фурнье д'Альбе опубликовал небольшую, но замечательную книгу *Два новых мира*, в которой мы находим первое математическое описание возможного иерархического распределения звезд. В мире Фурнье звезды распределены в бесконечном пространстве, но масса внутри любой сферы возрастает прямо пропорционально ее радиусу. Напомним, что при однородном распределении масса должна возрастать как куб радиуса. Таким образом, в мире Фурнье $M(R) \sim R$, тогда как в однородной вселенной $M(R) \sim R^3$. В современных терминах показатель степени зависимости масса-радиус называется фрактальной размерностью, так что крупномасштабная структура вселенной Фурнье имеет фрактальную размерность $D = 1$, а однородное распределение вещества соответствует $D = 3$, что мы подробно рассмотрим в следующей главе.

Почему Фурнье придумал такую необычную модель? В действительности его книга касается и микроскопического Инфра-Мира, и крупномасштабного Супра-Мира, и он предположил, что «на определенном измеримом малом масштабе есть вселенная, скроенная по образцу, не очень отличающемуся от нашего, и другая на соответственно более крупном масштабе». Его приводила в волнение мысль, что такая вселенная могла бы решить два основных парадокса бесконечного пространства, а именно парадоксы сверкающего неба и бесконечной гравитации.

Эдмон
Фурнье
д'Альбе
1868-1933

Иногда книгу Фурнье называют научной фантастикой, и, конечно, он смело рассуждает о существовании жизни в Инфра- и Супра-Мирах и допускает, что будет очень трудно когда-либо наблюдать чрезвычайно далекие элементы Супра-Мира, не говоря об обитателях Инфра-Мира. Но эти идеи вытекают из его вполне здоровой

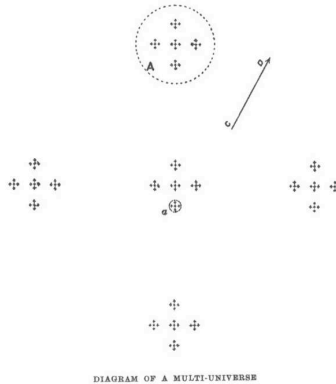


Рис. 4.6. Иерархическая модель, как ее изобразил Фурнье в своей книге

философии: «Почему мы должны ставить себе границу до того, как ее поставит для нас Природа?» Два года раньше японский физик Хантаро Нагаока (Hantaro Nagaoka) предположил, что атомы похожи на миниатюрные планетные системы, в которых отрицательно заряженные электроны вращаются вокруг положительно заряженных ядер. Позже открытие квантовых законов показало, что в случае планетарной модели атома Бора эта простая картинка повторяющихся иерархических элементов имеет существенные ограничения.

Глава книги Фурнье, посвященная крупномасштабному миру, содержит много интересных догадок, которые мы хотели бы описать подробнее. Он четко определяет, на каких предположениях основывается парадокс темного неба:

- *светоносный эфир пронизывает все пространство*
- *число темных тел сравнительно мало*
- *звезды распределены равномерно [в бесконечном пространстве]*
- *светящиеся звезды существуют вечно*

Сегодня первое предположение выразили бы, сказав, что свет распространяется по пустому пространству. Фурнье указывает, что если звезды были созданы какое-то конечное время назад, то тогда мы не могли бы видеть дальше расстояния, которое свет прошел после момента создания, т.е. скорость света, умноженная на возраст вселенной. Так, если творение произошло 100 000 лет назад, то, используя пример Фурнье, небо в настоящее время освещается только звездами, которые находятся самое большее на расстоянии в 100 000 световых лет от нас. Это решает парадокс темного ночного неба, как мы помним из Гл. 3. Однако Фурнье предпочитает вечную вселенную, согласно своей «коренной гипотезе», что

...наш мир – это хороший средний пример вселенной, как она всегда существовала и всегда будет существовать... Я склонен думать, что то место, в котором я нахожусь, и тот момент, когда я пишу, столь же значительны, священны и важны, как и все, которые у меня когда-либо были или когда-либо будут. Может быть изменение, улучшение, прогресс или спад, но я думаю, что основные элементы всего этого постоянны и не сводятся только к Здесь и Сейчас.

Фурнье считал само собой разумеющимся, что существует множество «темных звезд» вперемешку со светящимися звездами. Они могут образовать непрозрачный экран для далеких звезд. Он также высказывается по поводу возможного существования некой субстанции в пространстве, которая могла бы поглощать свет (в настоящее время межзвездная пыль является фактом, а в то время доказательств поглощения было недостаточно). Фурнье, как и Джон Гершель до него, указывает, что поглощающая среда, улавливая свет, нагревалась бы, а затем сама излучала бы тепло «на наши обреченные головы». Фурнье признает, что такая же проблема может быть и для темных звезд, собирающих световые лучи, хотя он думал, что если темные звезды численно намного превосходят светящиеся, то освещенность и температура бесконечной вселенной была бы вполне комфортной.

4.9. Гравитационный потенциал в модели Фурнье

Но Фурнье не ставит себе цель сохранить бесконечную вселенную, равномерно заполненную звездами. Он хочет

распространить на большие масштабы иерархическую систему, которая, казалось, так хорошо работает при движении внутрь атома. Тогда видимый звездный мир, Млечный Путь, был бы всего лишь одним элементом в более высоком иерархическом уровне, другие члены которого, как вычислил Фурнье, были бы недоступны имеющимся наблюдательным возможностям. Но можно ли делать какие-то заключения о структуре сверхсистем без прямых оптических наблюдений? Да, отвечает он, а ключом является гравитация.

Интересен факт, что звезды имеют сравнительно малые скорости, намного меньше, чем скорость света. Из этого Фурнье делает вывод, что звезды, «падающие» на наш уровень иерархии с больших расстояний, не достигли высоких скоростей, поскольку по направлению к нам снаружи плотность стремительно падает. Если более точно, он указывает, что гравитационный потенциал на поверхности сферы звезд был бы одинаков, независимо от того, как велика «мировая сфера», если *...масса, заключенная внутри мировой сферы, растет пропорционально радиусу, а не объему.*

К его удовлетворению, такая иерархия решала парадокс сверкающего неба Ольберса и позволяла понять наблюдаемые малые скорости звезд. Кстати, вопрос о малых локальных скоростях уже затрагивал Джордано Бруно, когда размышлял о бесконечном распределении вещества. В качестве объяснения он предложил ограниченный диапазон для сил гравитации (Гл.3): «Так как силовые сферы и взаимные расстояния между небесными телами конечны, то и их движения конечны».

4.10. Карл Шарлье решает парадоксы бесконечной Вселенной

В своей небольшой книге Фурнье писал, что «мы вступаем на целинное поле, где, я верю, будет процветать наука будущего». И действительно, его пионерская работа вскоре нашла горячего последователя в стране, которая всегда была источником свежих идей о распределении вещества в космосе. Концепцию космической иерархии исследовал дальше шведский астроном Карл Шарлье (Carl Charlier) в своей статье «Как можно построить бесконечный мир», опубликованной в 1908 году. После нескольких недель увлеченного изучения книги Фурнье, он разработал более общую математическую модель таких распределений звезд, которые также решают парадокс Ольберса и загадку Зеелигера о бесконечной гравитации.

Специальностью Шарлье было применение статистических методов к изучению Млечного Пути. Его интерес к космологии начался с тех лет, когда он работал наблюдателем в обсерватории Уппсала. В некрологе, посвященном Шарлье, Карл Лундмарк написал, что «в период работы в Уппсала Шарлье жил среди близких по духу



Рис. 4.7. Карл Вильгельм Людвиг Шарлье открыл новые перспективы для бесконечной вселенной, когда он привнес в астрономию иерархическую модель Фурнье д'Альбе.

друзей, которых все знали как «вердандистов» по названию общества, образованного для сохранения и развития свободы мысли и ее проявлений. Это общество продвигало либеральные и радикальные идеи, и там многие ведущие политики Швеции получили свои первые впечатления об общественной жизни... Шарлье не принимал какого-либо активного участия в политической жизни Швеции, но он был верен идеалам своей юности и всегда сохранял непредвзятое отношение к продвижению новых идей и идеалов».

Шарлье написал свою первую статью о размере вселенной в Уппсала в 1896 году, за год до того, как он принял пост директора обсерватории Лунд. Статья, написанная по-немецки, называлась «Является ли мир конечным или бесконечным в пространстве и времени». Его вывод состоял в том, что звездный мир конечен в пространстве, но бесконечен во времени. Основным доводом для

предпочтения бесконечного времени было явное нарушение закона сохранения материи, если существовал какой-то первый момент. Кроме того, Шарлье считал, что бесконечная продолжительность существования не содержит логических парадоксов, в отличие от того, что доказывал Кант. И даже если бесконечное время трудно осознать, то первый момент концептуально еще более озадачивающая вещь, рассуждал Шарлье.

Его основными доводами в пользу отрицания бесконечной вселенной, заполненной небесными телами, были парадоксы Ольберса и Зеелигера. Статья последнего о гравитации была только что опубликована. В то время Шарлье был, безусловно, против Островной Вселенной – звездных систем за пределами нашего Млечного пути, придерживаясь мнения большинства. Он заканчивает статью вопросом «Существует ли какая-то возможность, чтобы считать, что мир имеет бесконечную протяженность в пространстве? Если мы оставим в стороне бесплодные рассуждения о невидимых Млечных Путиях и других подобных вещах и будем настаивать на имеющихся в настоящее время научных результатах, то ответ на этот вопрос должен быть «Нет».

Любопытно, что Шарлье упоминает в своей статье 1896 года, что первоначально он думал, что туманности – это в основном системы, подобные Млечному Пути, на очень далеких расстояниях. Но к его собственному удивлению, он был вынужден изменить мнение, поскольку новые исследования вроде бы были в пользу того, что туманности находятся внутри Млечного пути, среди звезд. Он ссылается на симметричное распределение туманностей относительно Млечного Пути. Он также говорит, что многие туманности оказались связанными со звездами нашей звездной системы (теперь мы знаем, что это действительно так для «настоящих» туманностей из газа и пыли).

Критерии Шарлье для бесконечных миров

Классическая статья Шарлье 1908 года начиналась с замечания, которое показывает, что его внутреннее чувство не вполне было в согласии с теми выводами, которые ему пришлось сделать: «В то время я не видел никакой возможности проигнорировать аргументы против бесконечной протяженности мира, несмотря на то, что такая бесконечность мира (материи) казалась мне почти очевидной с философской точки зрения». Не удивительно, что он был взволнован, когда книга Фурнье открыла перспективы для бесконечной вселенной.

Фурнье д'Альбе включил в свою книгу одну единственную диаграмму, на которой был представлен пример того, как может существовать бесконечный ряд последовательных вселенных. Этот пример был очень аккуратным и простым и не предназначался для того, чтобы быть реальным планом Супра-Мира. Пять членов или галактик образуют один элемент иерархического уровня. Затем пять таких элементов объединяются и образуют элемент следующего уровня, и так далее. Фурнье отметил, что в таких иерархических мирах средняя плотность вещества уменьшается по мере того, как мы поднимаемся по уровням вверх. Это уменьшение делает возможным построение бесконечного мира, в котором полное количество вещества бесконечно, но средняя плотность вещества равна нулю, и который не страдает ни от парадокса сверкающего неба, ни от парадокса бесконечной гравитации. Важный вклад Шарлье состоял в подробном исследовании того, какого рода иерархии являются такими привлекательными.

Шарлье нашел критерий, которому должна удовлетворять иерархия, чтобы она решала оба парадокса. Решающим фактором является то, как быстро падает плотность от одного уровня к другому, а это зависит от отношения размеров последовательных элементов и от числа нижних элементов, образующих верхний элемент. Критерий Шарлье прост: *размер элемента верхнего уровня больше или равен размеру элемента нижнего уровня, умноженного на число нижних элементов, образующих более высокие элементы.*

В 1922 году Шарлье переработал и дополнил свою старую статью и исправил ошибку в полученном критерии, чтобы спасти мир от сверкающего неба: в приведенной выше формулировке нужно говорить «умноженному на *квадратный корень* из числа нижних элементов, образующих более высокие элементы». Как независимо заметил Франц Селети, этого достаточно, чтобы решить парадокс Ольберса и проблему бесконечной силы гравитации. Однако первоначальный критерий Шарлье необходим, чтобы разности гравитационного потенциала и скорости небесных тел оставались конечными. Обозначив для каждого уровня иерархии i размеры (радиусы) через R_i и R_{i+1} , а число элементов через N_i и N_{i+1} , первый критерий Шарлье есть $R_{i+1} / R_i \geq N_{i+1}$. Вторым критерий есть $R_{i+1} / R_i \geq \sqrt{N_{i+1}}$.

Обратите внимание, что иерархия Шарлье бесконечна. Если после какого-то уровня иерархия заканчивается и начинается однородность, то все парадоксы снова появляются!

4.11. На пути к иерархическим мирам без центра

Ни Фурнье д'Альбе, ни Шарлье не рассматривали вопрос, есть ли в их моделях центральная точка. Однако позиция Фурнье состояла в том, что в нашем окружении (и в моменте, в котором мы живем) нет ничего исключительного. Это означает, что Фурнье, видимо, думал, что в его модели нет центра, как и в мире, который он пытался представить.

В действительности, австрийский ученый Франц Селети (Franz Selety), по-видимому, первым заявил, что иерархический мир может существовать без центра. Селети (его фамилия до 1918 года была Ейтелес (Jeiteles)) получил свою докторскую степень в Университете Вены в конце 1915 года за диссертацию по феноменологическим основам психологии. Интересно, ссылался ли Франц Кафка на того же человека в своем дневнике, когда он писал в Праге 19 ноября 1915 года: «На лекции Мишны в Старой Новой Синагоге. Домой с Д-ром Jeiteles. Большой интерес к противоречивым вопросам.»

В статье в журнале *Annalen der Physik* 1922 года, в которой есть ссылки и на Фурнье д'Альбе и на Шарлье, Селети писал, что обычно считается, будто следующие предположения не могут быть верными одновременно:

- *бесконечное пространство*
- *бесконечная полная масса*
- *масса, заполняющая пространство так, что локально плотность повсюду конечна*
- *нулевая средняя плотность массы во всем мире*
- *отсутствие уникальной центральной точки или центральной области мира*

Селети доказывает, что в действительности можно создать иерархические миры, которые одновременно удовлетворяют всем этим условиям, и, что особенно важно, двум последним. Нулевая плотность означает предел, к которому уменьшается средняя плотность внутри любой сферы по мере того, как размер сферы увеличивается.

Как он пытался построить иерархию без центра? Глядя на «Диаграмму мультивселенной» Фурнье (Рис. 4.6), можно сначала описать путь, который естественно ведет к бесконечной иерархии, обладающей привилегированной точкой. Начнем с центрального

элемента, который содержит пять подэлементов и имеет очевидный центр. Теперь построим более высокий иерархический уровень так, чтобы вся показанная фигура являлась центральным элементом следующей фигуры большего размера, а ее центр оставался на плоскости неподвижным. Продолжим таким же образом без конца. Ясно, что в результате получается бесконечная иерархия с хорошо определенной центральной точкой, вокруг которой она была построена. Но Селети указывает, что есть бесконечно много других способов построить иерархию, начав с той же пятиэлементной структуры.

Сначала можно поместить центральный элемент не в центр более высокого элемента, а сделать его одним из четырех угловых элементов. Например, можно сделать цикл по часовой стрелке от одного угла к другому, строя все более и более высокие иерархические уровни. Таким образом, средняя точка будет вращаться по спирали от исходного центра, и в получающейся бесконечной иерархии не будет единого центра. Селети замечает, что в общем случае такие способы построения, ведущие к отсутствию единого центра массы, намного более вероятны, чем пути, которые ограничивают центр какой-то конечной областью вокруг исходной средней точки. По-видимому, он считал это намеком на то, что в Природе тоже такие безцентровые иерархии могут быть правилом, а не исключением.

Есть все-таки что-то искусственное в структурах, построенных вокруг одного элемента, и Бенуа Мендельброт недавно заметил, что такие конструкции еще несут в себе «память» о средней точке и не ведут к по-настоящему бесцентровой вселенной, в отличие от истинных стохастических фрактальных структур, не имеющих центра.

Таким образом, Селети, по-видимому, был уверен, что мир без центра и с нулевой средней плотностью может существовать, и он осознавал его необычные свойства. Кроме прочего, Селети отмечает интуитивное заблуждение (которое все еще широко распространено в наше время), что если средняя плотность равна нулю, то тогда где-то «в бесконечности» локальная плотность должна быть равна нулю, чтобы в бесконечности было пустое пространство. Например, Зеелигер писал, что невозможно представить бесконечное пространство, заполненное бесконечно редким веществом.

Любопытно, что Эйнштейн вел с Селети переписку, в которой он защищал свою однородную космологическую модель, не принимая иерархической системы, поскольку он думал, что ее нельзя привести в соответствие с принципом Маха. Отвечая на критику Эйнштейна

(которую он не принял), Селети еще раз подчеркнул, что он имел в виду иерархические миры, имеющие бесконечную массу, нулевую плотность и не содержащие центральной точки.

4.12. План Лундмарка изучения пространственного распределения туманностей

Статьи Шарлье 1896, 1908 и 1922 годов охватывают крайне интересный период в астрономии, когда в центре внимания была истинная природа туманностей. В 1908 году Шарлье думал, что Млечный Путь является одним элементом в иерархии, но что другие похожие млечные пути очень далеко. Согласно своему первому критерию он предположил, что число элементов равно одному миллиону, и сделал оценку, что ближайший элемент должен быть очень маленьким и совершенно ненаблюдаемым на небе (его звездная величина равнялась бы 37 – в тысячу раз слабее, чем может наблюдать Космический Телескоп имени Хаббла!). Но уже в 1922 году он поместил туманность Андромеды на тот же иерархический уровень, что и Млечный Путь. Он произвел вычисления, касающиеся более высокой системы, считая Млечный Путь одним членом. Получилось, что ближайшая туманность должна иметь угловой диаметр в несколько градусов, а самая далекая – несколько минут дуги. С ближайшей туманностью он отождествил Андромеду и предсказал, что где-то в ближайшем будущем можно будет составить полную карту всей более высокой системы (в которой, как он думал, намного меньше членов, чем звезд в Млечном Пути).

*Кнут
Лундмарк
1889-1958*

Эта картина привела в восторг Кнута Лундмарка, преемника Карла Шарлье на должности профессора в Университете Лунд. В 1920-ых годах он применил модель Шарлье к данным по галактикам и пришел к выводу, что «три системы различных порядков, которые мы в настоящее время знаем – звезды, галактические и метagalacticкие системы – расположены таким образом, что они удовлетворяют вышеупомянутому найденному условию». Он ссылается на более поздний критерий Шарлье «с квадратным корнем». Выражаясь современными терминами, Лундмарк произвел первую грубую оценку фрактальной размерности распределения галактик, получив значение, равное приблизительно 2. Однако данные были еще очень разбросанными.

Мечтой Лундмарка было составить большую базу данных, содержащую всю имеющуюся информацию об отдельных галактиках. Эти данные использовались бы для изучения свойств галактик и особенно их расположения в пространстве. Образуют ли они более высокую ступень иерархии – Супер Млечный Путь из млечных путей? К сожалению, амбициозный «Общий Каталог Лунда» – тысячи галак-



Рис. 4.8. Кнут Лундмарк: «Безусловно, мы можем ожидать обнаружения очень сложной структуры в несомненно гигантской всемирной системе, образованной спиральными туманностями» (из его докторской диссертации, написанной в 1919 году).

тик, описанные на отдельных карточках, – так и не был завершен, и после смерти его инициатора вся работа по этой базе данных прекратилась. Коробки с «локальной вселенной» были забыты, покрылись пылью, и судьба их неизвестна, как пишет составитель биографии Лундмарка Анита Сундман. (Anita Sundman).

Лундмарк был предшественником знаменитых составителей современных каталогов, таких как де Вокулер и Патюрель. Его идея о большом каталоге галактик была здоровой, но в то время она, похоже, не вызвала большого энтузиазма среди других астрономов, а у него не было ресурсов организовать великий план, работа над которым продолжалась тридцать лет. Или, как подозревает Сундман, Лундмарк, будучи перфекционистом, просто не мог остановиться в какой-то точке и перестать пополнять непрерывно поступающие данные, чтобы начать публикацию по крайней мере каких-то частей каталога. Нельзя произвести полную инвентаризацию галактик! А может быть, Лундмарк хотел достичь границы Супер Млечного Пути? Эта

гипотетическая сущность, как ее представлял Шарлье, содержала около миллиона галактик – все-таки гигантское число!

Работа Лундмарка создает впечатление беспокойной души, которая щедро делила свое время между разнообразными занятиями наукой, преподаванием и популяризацией, чтением лекций по астрономии и написанием многочисленных популярных статей и книг. Героем его детства и источником вдохновения позже в его жизни был Камиль Фламмарин (Camille Flammarion), французский писатель, писавший об астрономии, как о науке вечности и бесконечности. Шагнув одним из первых в мир галактик, Лундмарк чувствовал себя неуютно в появившейся позже космологии с ее первичным взрывом какое-то ограниченное время назад. Как мог большой взрыв породить иерархическую систему? И почему у времени должно быть начало? Для него бесконечность и вечность были как далекий слабый свет, который манит космолога и освещает его путь.

В настоящее время, почти через пятьдесят лет после того, как в обсерватории Лунд в коробку были положены последние карточки с галактиками, Жорж Патюрель – «гуру каталогов галактик» - поддерживает в Лионской обсерватории огромную базу данных LEDA, теперь, естественно, на компьютерной основе, которая содержит данные о примерно одном миллионе галактик. LEDA – это первая современная база галактических данных, и это намного больше, чем просто длинный список галактик. Это универсальный инструмент для астрономов, исследующих локальную галактическую вселенную. И действительно, из сокровищницы LEDA возникает образ системы туманностей, названной в 1950-ые годы ее первооткрывателем Жераром де Вокулером Локальной Сверхгалактикой, о которой позже Патюрель и другие предположили, что это только часть еще более крупной Гипергалактики. Мечта, которую Кнут Лундмарк преследовал все свою жизнь, наконец, воплотилась в реальность!

После Шарлье и Лундмарка иерархическому распределению галактик уделялось мало внимания, до появления работ Бенуа Мандельброта и Жерара де Вокулера в 1960-ых и 1970-ых годах. Затем, в более близкое время, когда глубокие обзоры космического пространства выявили большие неоднородные структуры галактик, которые проанализировал на фрактальность Лучиано Пиетронеро. А между тем новые прозрения здесь, на Земле, подготовили путь для такого понимания космической материи, которое превосходит старые простые иерархии.

Глава 5

Закон Хаббла как новое космологическое явление

5.1. Дискуссия о природе туманностей

После того, как в 1715 году Эдмунд Галлей (Edmond Halley) составил первый список «Туманностей или светлых пятен среди неподвижных звезд», содержащий шесть объектов, прошло два века, прежде чем выяснилось, являются ли туманности далекими галактиками или туманными компонентами нашего Млечного пути, отличными от звезд. Для этого потребовались телескопы большего размера, изобретение фотографии и спектроскопии и полная энтузиазма работа нескольких поколений астрономов.

После прорыва, в 1920 году, быстро пришло понимание, что человек вступил в новый неизведанный мир крупных масштабов, с его собственными фундаментальными элементами и структурами, и новыми неизвестными законами природы. Действительно, одним из величайших открытий прошлого века было универсальное красное смещение света далеких галактик. В 1929 году Эдвин Хаббл (Edwin Hubble) показал, что красное смещение увеличивается с расстоянием. Скромный сдвиг линий на изображениях спектров галактик – красное смещение – должно означать что-то величественное. В современной космологии красное смещение обычно объясняют расширением вселенной – загадочный процесс космологической физики.

Около 1900 года большинство астрономов думали, что туманности находятся внутри Млечного Пути. Этот взгляд основывался не на измерениях расстояний до туманностей, что было еще недоступно, а на наблюдениях распределения туманностей на небесной сфере. Когда астрономы нанесли на карту неба положения туманностей, они обнаружили, что туманности, особенно с видимой спиральной структурой, имеют любопытное распределение. Они были видны по всему небу, за исключением полосы Млечного Пути, которую они предпочитали избегать. Почему?

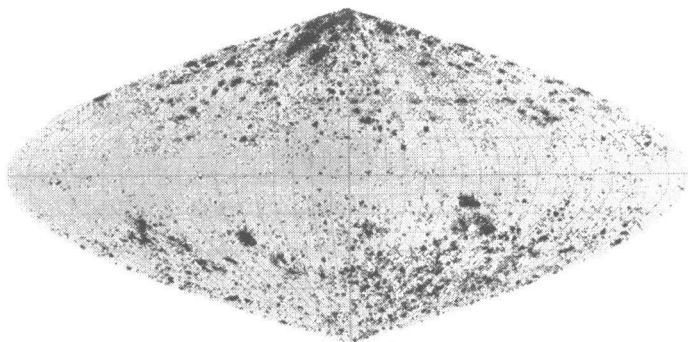


Рис. 5.1. Распределение 11475 спиральных туманностей на карте неба, выполненной Карлом Шарлье (Carl Charlier) в начале XX века. Вдоль экватора сквозь пыльный Млечный Путь видны всего несколько туманностей. Шарлье писал: «Примечательным свойством изображения является то, что туманности кажутся собранными в облака... Такая «облачность» галактик может быть реальным явлением или может быть обусловлена темной материей в космосе».

Так как туманности лежат симметрично относительно Млечного Пути, они должны иметь к нему отношение: вероятно, они являются подсистемами Млечного Пути, а не далекими Островными Вселенными. Таким был общий аргумент. Но современному астроному та же самая карта говорит совсем другое.

Межзвездное пространство не пустое, а содержит много пыли. Компактные пылевые облака образуют коконы вокруг звезд-младенцев, а между звездами простирается более разреженная пыльная среда. Космическая пыль очень мелкая, она скорее похожа на дым, состоящий из частиц размером около 0.0001 мм. Трудно увидеть то, что находится за толстым облаком космического дыма. Это происходит, когда мы смотрим на ленту Млечного Пути: приходящий к нам свет проходит большой путь внутри диска, состоящего из звезд, газа и пылевых облаков, громоздящихся один за другим, поэтому далекие объекты позади диска становятся невидимыми. Вооружившись этими знаниями, можно буквально увидеть тень от пыли в расположении туманностей – это и есть *зона избегания* туманностей на небе, которая теперь становится естественной вещью в плоском и пыльном Млечном Пути, в котором мы живем.

В 1910-ые годы мнения об Островных Вселенных начали разделяться. Но только измерения расстояний могли бы решить, находятся ли туманности за пределами Млечного пути. Итак, как же измерить расстояние до туманного пятна? Можно попытаться увидеть отдельные звезды, если таковые имеются, а затем измерить расстояние до них.

5.2. Лундмарк измеряет расстояние до туманности Андромеды

Если туманности являются другими Млечными Путиями, то они состоят из звезд, которые, вероятно, похожи на «наши» звезды. Если звезды определенного типа имеют одинаковую яркость в Млечном Пути, то такие звезды должны иметь ту же яркость и «там» тоже. Зная эту яркость, затем, по измеренному световому потоку, можно рассчитать расстояние до звезды. Именно так рассуждал Кнут Лундмарк, когда он измерял расстояние до Туманности Андромеды в 1919 году. Относительно большой размер этой туманности на небе (около градуса дуги) делает ее естественным кандидатом в ближайшие Островные Вселенные. Правда, двум его старшим коллегам в Швеции удалось, как они думали, измерить его параллакс, помещающий его на короткое расстояние в 7 парсек, или, самое большее, на 20 парсек, но Лундмарк пошел своим путем.

Он знал, что американские астрономы обнаружили в Андромеде в течение нескольких лет десять новых звезд, которые достигли примерно одинаковой яркости. Так как они должны лежать на одинаковом расстоянии от нас, постоянная видимая яркость означает также, что истинная яркость постоянна от одной новой звезды к другой.

Лундмарк знал только то, что яркость постоянна, но какова ее величина? К счастью, несколько новых звезд наблюдались также в Млечном Пути. Расстояние до них было оценено методом, который работает в ближнем космосе. Таким образом, Лундмарк смог вывести их среднюю яркость, которую затем использовал для определения расстояния до новых звезд Андромеды, что составило примерно 200000 парсек. Это отнесло Андромеду далеко за пределы Млечного Пути: это действительно другая Островная Вселенная, или, как мы научились говорить, галактика. Алан Сендидж подвел такой итог этой истории: «Что такое галактики? До 1900 года этого не знал никто. Очень мало людей знало в 1920 году. Все астрономы узнали после

1924 года». Среди этих немногих был Кнут Лундмарк. Так что же произошло в 1924 году?

5.3. Хаббл открывает цефеиды в Андромеде

Малое Магелланово Облако – это туманное пятно света на южном небесном полушарии в созвездии Тукана. Эта слабая галактика стала трамплином в небо, когда в 1912 году Генриетта Левитт (Henrietta S. Leavitt) опубликовала свою замечательную работу по находящимся в ней звездам-цефеидам. Цефеиды были известны в Млечном Пути как регулярные переменные звезды с периодами изменения от одного дня до нескольких недель. Левитт обнаружила, что существует тесная связь между длиной периода и светимостью цефеид. Цефеиды являются пульсирующими звездами, и чем они больше, тем медленнее они пульсируют. Каждый видел своими глазами хотя бы одну цефеиду – это Полярная звезда, которая пульсирует с периодом в четыре дня.

После открытия Левитт осознали, что соотношение период-светимость можно использовать для определения расстояния до любой цефеиды, для которой измерены длительность периода и поток света на Земле. Действительно, сначала нужно откалибровать это соотношение, т.е. найти связь между периодом и *абсолютной* яркостью или светимостью звезды. Калибровку можно выполнить, используя цефеиды Млечного Пути (хотя это нелегко – калибровка цефеид все еще обеспечивает астрономов работой).

В 1917 году недалеко от Лос Анжелоса в обсерватории Маунт Вильсон начал работать крупнейший телескоп того времени. Размер его светособирающего зеркала – 2.5 метра – делал его идеальным для изучения слабых туманностей, и эту работу проделал Эдвин Хаббл (Edwin Hubble). Он поступил на работу в обсерваторию в 1919 году, после участия в военных действиях на Западном фронте, где он был ранен. Хаббл изучал юриспруденцию и занимался боксом в Оксфорде, в Англии, работал адвокатом в Кентукки, а защитил диссертацию по астрономии в университете Чикаго. У него было ощущение, что эти спиральные туманности – Островные Вселенные, и он попытался найти на их фотографиях звезды, чтобы оценить расстояние.

Только большой телескоп может выделить звезды среди каши из миллиардов солнц, составляющих спиральную туманность. Но нужно также быть уверенным, что слабая точка света – это звезда, и

Генриетта
Левитт
1868-1921

Эдвин Хаббл
1889-1953

знать, что это за звезда. Если свет переменный, то, скорее всего, это звезда того или иного типа переменности.

Первоначально осуществляя поиск новых звезд, Хаббл в 1923 году обнаружил в туманности Андромеды переменную звезду, которая была цефеидой. С помощью этой и девяти других цефеид он вычислил, что расстояние до туманности составляет примерно 285000 парсек. Это бесспорно подтвердило то большое расстояние, которое Лундмарк получил с помощью новых. Хаббл официально доложил о наблюдениях цефеид в первый день 1925 года на научном собрании в Вашингтоне.

5.4. Разнообразие морфологии галактик

Во внегалактическом пространстве глазам человека открылся «зоопарк», непохожий на что-либо наблюдавшееся прежде. Кроме того, опытные созерцатели фотографий неба открыли, что существует лишь небольшое количество видов галактик, которые, надо надеяться, отражают физические процессы в этом новом мире. Действительно, распознавание категорий объектов было целью естественных наук со времен Аристотеля. Похожие галактики широко разбросаны во всем пространстве. Их похожесть – это очень важный знак: они были образованы похожим образом при похожих условиях. Если галактики можно разделить на небольшое число классов, то имеет смысл предположить, что галактики были произведены несколькими определенными процессами, происходящими во вселенной повсюду.

В 1926 году Хаббл предложил простую последовательность классов галактик, которая почти не изменилась, пройдя проверку временем:

- * Эллиптические галактики
- * Спиральные галактики
- * Иррегулярные галактики

Эллиптические галактики состоят из старых звезд и содержат мало газа и пыли. Спиральные галактик содержат и старые и молодые звезды, причем последние образуют бросающиеся в глаза спиральные рукава. Здесь много газа и пыли. Иррегулярные галактики покрыты большим количеством газа и пыли и в них образуется много молодых звезд.



Рис. 5.2. Обитатели галактической вселенной в скоплении Девы. Хаббл писал в своей книге «Мир туманностей», что история астрономии – это история удаляющегося горизонта. Граница наблюдаемой Вселенной удалялась последовательными волнами, когда астрономы измерили расстояние до Луны, до звезд и до галактик.

Можно считать, что видимая галактика образована из одной или нескольких геометрических форм, определяемых миллиардами звезд, двигающихся по сложным орбитам вокруг ее центра: сфера или эллипсоид, диск и система спиралей. С этой точки зрения эллиптические галактики довольно близки по форме к идеальным эллипсоидам. Спиральные галактики состоят из диска, образуемого спиральными рукавами и эллипсоидальным утолщением. Так называемые линзовидные галактики состоят из диска без спиральных рукавов. Некоторые иррегулярные галактики имеют также признаки базовой структуры. Но у галактик есть и невидимая часть – массивные темные гало, о которых более подробно речь пойдет ниже. Мы не знаем их форму, но это могут быть сферы или эллипсоиды.

Лундмарк опубликовал систему галактических классов в том же году, что и Хаббл. В чем-то их классификации были довольно похожи, в чем-то отличались. Схожесть заставила Хаббла подумать, что его схема была скопирована, и он публично напал на шведского астронома. Раздражение Хаббла многое говорит о соперничестве в погоне за новыми знаниями в новом мире галактик.

Мы хотим особо отметить, что шестьдесят лет спустя один из нас (П.Т.) смог показать, что Лундмарк работал уже несколько лет над своими классами туманностей, независимо от Хаббла. В завещании

Кнут Лундмарк оставил свою обширную коллекцию старой астрономической литературы и статей обсерватории Туорла. Ее основатель Юрио Вайсала (Yrjö Väisälä) был его близким другом. Среди этих статей есть написанный от руки каталог туманностей, подготовленный Лундмарком в 1922 году, когда он посещал Ликскую обсерваторию в Калифорнии. Корни его системы классификации найдены в этом документе. Дополнительную информацию о работе Лундмарка можно найти в статье П.Т. «Неопубликованная классификация туманностей на пластинках Кроссли 1922 года Кнута Лундмарка», Журнал истории астрономии, т. 20, с. 165 (1989).

*Юрио
Вайсала
1889-1971*

Наша родная галактика – Млечный Путь.

Спиральные галактики вращаются, как можно догадаться по их виду, похожему на водоворот. В 1927 году голландский астроном Ян Оорт (Jaap Oort) показал, что наш Млечный Путь тоже вращается вокруг точки, лежащей в направлении на созвездие Стрельца. Расстояние от нашего Солнца до этого центра, заслоненного толстой стеной пыли, составляет 8000 парсек. Вращаясь на этом расстоянии со скоростью 220 км/сек, мы совершаем один полный оборот за 200 миллионов лет. Скорости и размеры вращения говорят нам, что масса средней галактики составляет около ста миллиардов солнечных масс. Приведенная оценка массы подсказывает, что нормальная галактика содержит сотню миллиардов звезд, газовые облака, пыль и темную материю (природа которой остается неизвестной), т.о. :

*Ян Оорт
1900-1992*

$$\begin{aligned} \text{типичная галактика} &= 100\,000\,000\,000 \text{ звезд} \\ &+ \text{газ} + \text{пыль} + \text{темное вещество} \end{aligned}$$

Было установлено, хотя это и нелегко из-за нашего внутреннего местонахождения, что вращающийся Млечный Путь есть спиральная галактика, как и наша соседка Андромеда. Солнце находится на внутреннем крае Местного спирального рукава, который содержит такие знакомые звезды, как голубой Сириус в созвездии Большого Пса, красную Бетельгейзе в Орионе, и звезды, образующие букву “W” созвездия Кассиопеи.

5.5. Спектры – «отпечатки пальцев» звездного вещества

Ньютон увидел, что при прохождении через призму солнечный свет раскладывается на спектр различных цветов. Джозеф

Фраунгофер (Joseph Fraunhofer), одиннадцатый сын в бедной семье и искусный создатель оптических инструментов, обнаружил, что кроме цветов в спектрах есть многочисленные узкие области совсем без света. Каждая такая *абсорбционная линия* соответствует определенной длине волны – по-видимому, свет с этой длиной волны чем-то поглощается.

Джозеф
Фраунгофер
1787-1826

Примерно в 1860 году Роберт Банзен (Robert Bunsen) и Густав Кирхгоф (Gustav Kirchhoff) поняли, что спектральные линии являются отпечатками пальцев знакомых химических элементов. Если выпаривать какой-то элемент на жарком огне, он начинает излучать, и с помощью спектроскопа можно увидеть линии, характерные именно для этого элемента и всегда имеющие одни и те же длины волн. Таким образом, появилась возможность получать информацию о химическом составе далеких звезд. Действительно, свет, излучаемый звездами, несет с собой информацию о химическом составе их вещества. Так началась астрофизика.

Роберт
Банзен
1811-1899

Густав
Кирхгоф
1824-1887

Среди тысяч раскаленных шаров, видимых невооруженным глазом, и миллиардов, доступных телескопу, некоторые очень массивные и яркие, а некоторые – карлики по сравнению с Солнцем. Некоторые имеют голубой цвет (что говорит о высокой температуре на поверхности), другие – красные (более холодные). Измерение потоков и цвета, изучение спектров и другие исследования звезд дают информацию об их светимости, температуре, массе, размере и химическом составе. Звезды разные, но их свойства не бессистемны: при исследовании светимостей, масс и спектров большого числа звезд появляется регулярность. Поразительный пример этого виден на *диаграмме Герцишпрунга-Рассела*, являющейся самым важным инструментом в руках астрономов.

Эйнар
Герцишпрунг
1873-1967

Генри
Рассел
1877-1957

Один из способов построить диаграмму HR – это использовать температуру и светимость. Сразу видно, что большая часть звезд лежит в узкой полосе от холодных слабых звезд до горячих ярких. Эта полоса называется *главной последовательностью*. Звезды имеются еще в двух других областях: красные гиганты над главной последовательностью и белые карлики под ней. Чтобы понять, почему диаграмма HR имеет такой вид, какой она имеет, потребовались многочисленные наблюдения и теоретические исследования структуры, источника энергии и эволюции звезд.

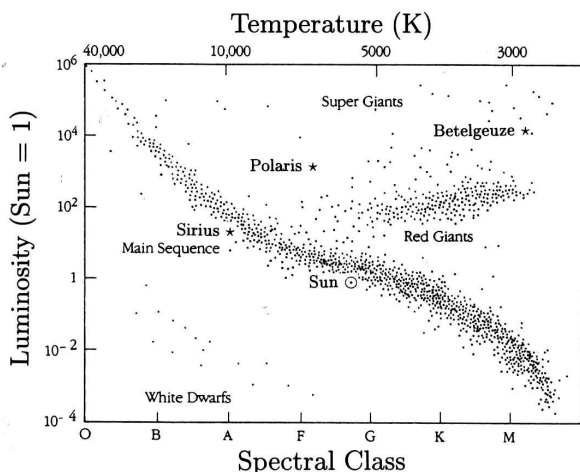


Рис. 5.3. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела для звезд. По горизонтальной оси отложена температура поверхности, а по вертикальной – светимость в единицах мощности излучения Солнца – звезды Главной Последовательности. Указаны также некоторые другие яркие небесные светила.

5.6. Эффект Доплера и движение звезд

В 1842 году Кристиан Доплер (Christian Doppler) из Австрии открыл, что когда тело, издающее звук, удаляется, то звук имеет более низкий тон, т.е. звуковые волны становятся длиннее. Он предположил, что этот эффект появляется при движении любых волн, включая свет. В случае света, относительный сдвиг $\Delta\lambda/\lambda$, вызываемый в длине волны λ эффектом Доплера, есть просто отношение между скоростью тела v и скоростью света c :

*Кристиан
Доплер
1803-1853*

*Доплеровский сдвиг = скорость тела, деленная на скорость света,
или $\Delta\lambda/\lambda = v/c$.*

Эффект Доплера стал богатым источником информации о космосе, когда астрономы начали применять его для измерения движения звезд. Так же, как спектр Солнца, свет от звезд помечен абсорбционными линиями. Можно измерить даже маленькие смещения в их длине волны и вывести с помощью формулы Доплера движение звезды.

Строго говоря, вышеприведенная формула Доплера содержит только радиальную компоненту скорости v , т.е. компоненту скорости в направлении луча зрения от нашего глаза на звезду. Кроме того, эта формула верна только для скоростей, намного меньших, чем скорость света

Сэр Вильям Хиггинс, состоятельный Британский любитель астрономии в еще романтический «век науки» первым использовал эффект Доплера в астрономии: он построил свой собственный спектроскоп, присоединил его к телескопу и в 1868 году направил его на Сириус – самую яркую звезду на небе. Сдвиг линии указал, что Сириус удаляется от нас со скоростью 50 км/сек. Но как мы узнаем, что сдвиг линий в спектрах звезд вызван эффектом Доплера? Действительно ли звезды движутся?

«Неподвижные» звезды не прибиты гвоздиком к небесному своду или какому-то абсолютному пространству. Длительные наблюдения показали, что близкие звезды медленно, но верно смещаются на небе относительно других, более далеких звезд. Движение ясно видно в двойных звездах, которые вращаются относительно друг друга. Радиальные скорости звезд, полученные по эффекту Доплера, уменьшаются и увеличиваются, как и ожидается для орбитальных движений.

5.7. Открытие космологического красного смещения

В 1912 году Весто Слайфер (Vesto Slipher) впервые измерил смещение спектральной линии спиральной туманности. Сдвиг был в синюю сторону (т.е. к более коротким, или более синим, длинам волн) и показал удивительно высокую скорость приближения. Как часто бывает в науке, открытие скорости в 300 км/сек для туманности Андромеды было побочным продуктом в работе по обнаружению вращения туманностей. Такую задачу поставил Слайферу его руководитель в обсерватории Флагстафф Персиваль Лоуэлл (Percival Lowell), астроном-планетолог, которого интересовала теория, согласно которой спиральные туманности являются стадией в образовании планетных систем.

Скорость в 300 км/сек была очень высокой по сравнению со скоростями, обычно измеряемыми для звезд. Теперь нам известно, что синее смещение туманности Андромеды отражает в большой мере наше собственное движение, а именно то, что вращение Млечного

*Весто
Слайфер
1875-1969*

*Персиваль
Лоуэлл
1855-1916*

Пути несет Солнце со скоростью около 220 км/сек как раз в направлении Андромеды.

К 1917 году Слайферу удалось измерить в общей сложности 25 радиальных скоростей от слабых туманностей, при этом каждая потребовала экспозиций в десятки часов (по сравнению с десятками минутами или даже меньше на современных телескопах). Смещения линий были в основном красными, т.е. в сторону более длинных длин волн, что соответствует большим скоростям удаления, достигающим 1100 км/сек. Еще один аспект появился, когда в 1919 году Харлоу Шепли (Harlow Shepley) заметил, что более слабые туманности имеют тенденцию иметь большие красные смещения, «... что говорит о взаимосвязи между скоростью и расстоянием или, возможно, массой».

Кнут Лундмарк близко подошел к открытию линейной связи между красным смещением и расстоянием еще до Хаббла. В 1924 году он представил диаграмму, на которой было различимо соотношение расстояние - красное смещение. Однако вместо того, чтобы удовлетвориться линейным соотношением, он добавил в свою формулу еще и отрицательный квадратичный член, так что на малых расстояниях красное смещение сначала возрастает, а затем на больших расстояниях дополнительный член заставляет кривую красного смещения понижаться. У Лундмарка в руках был шанс открыть новый закон, если бы он просто откинул этот дополнительный квадратичный член. Лундмарк использовал диаметр галактики как индикатор расстояния до нее: меньший угол означает большее расстояние. Но угловой размер, без какой-либо другой поддержки, является плохим индикатором расстояния. Именно поэтому он не смог ясно увидеть линейное соотношение между красным смещением и расстоянием.

Когда Хаббл проводил свои исследования в 1929 году, он использовал в качестве индикатора расстояния ярчайшие звезды в галактиках. Хотя позже выяснилось, что эти «звезды» были газовыми облаками, возбуждаемыми излучением молодых гигантских звезд, тем не менее, их яркость дала более хорошее *относительное* расстояние, чем диаметры галактик. Это выглядело как убывающий разброс на графике «расстояние – красное смещение», и Хаббл пришел к выводу, что то, что он увидел на диаграмме, описывается линейным законом – красное смещение пропорционально расстоянию.

На рис. 5.4 показана современная диаграмма Хаббла, на которой красное смещение и расстояние возрастают логарифмически. Она содержит три класса индикаторов расстояний, покрывающих диапазон расстояний от 1 Мрс до 500 Мпк (мы обсудим измерение

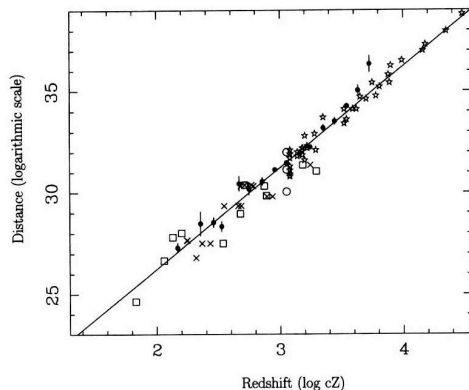


Рис. 5.4. Закон Хаббла (расстояние – красное смещение), по галактикам, которые были измерены разными способами (переменные звезды цефеиды, метод Тулли-Фишера для вращающихся галактик, и сверхновые типа SNIa).

расстояний далее). Наклон прямой линии ($= 5$) – это то, что ожидается, если верен линейный закон Хаббла.

5.8. Закон Хаббла – новое физическое явление

«Счастливые двадцатые» стали невероятным десятилетием для науки, когда было показано, что микромир управляется странными законами квантовой механики, и когда в макромире была открыта галактическая вселенная. Когда человек вступил в недоступный до этого мир галактик, немедленно было найдено новое физическое явление – космологическое красное смещение. По определению, красное смещение z равно относительному смещению длин волн в спектре удаленной галактики

$$z = (\lambda' - \lambda) / \lambda$$

где λ' - наблюдаемая длина волны, λ - излучаемая далеким источником длина волны. Таким образом, красное смещение полностью определяется из наблюдений без обращения к теории.

Замечательное эмпирическое свойство космологического красного смещения, которое называется *законом Хаббла*, состоит в

том, что его значение не скачет случайным образом от одной галактики к другой, но оно пропорционально расстоянию до галактик:

$$\text{КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ} = \text{константа} \times \text{РАССТОЯНИЕ},$$

$$\text{или} \quad z = (H/c) \times R.$$

где константа H называется постоянной Хаббла, c – скорость света.

Хотя несколько близких галактик имеют спектры, сдвинутые в синюю сторону, это редкие исключения. Все другие галактики по всему небу имеют в своих спектрах сдвиг в красную сторону. В ближнем космосе красное смещение малó. Так, свет от галактики в скоплении Дева, ближайшему к нам крупному скоплению галактик, сдвинут в красную сторону так, что его красное смещение $z = 0.003$. Это означает, что для света, принятого от рассматриваемой галактики длины волн всех спектральных линий в 1.003 раз больше, чем длины волн тех же линий в лаборатории. Самое большое наблюдаемое красное смещение достигает величины, близкой к 7. Большие красные смещения производят драматический эффект на спектры. Они преобразуют излучаемый ультрафиолетовый свет (который был бы задержан озоновым слоем нашей атмосферы) в видимые лучи, позволяя нам видеть на земле спектральные линии, которые в противном случае мы могли бы наблюдать только с помощью космического телескопа.

Чрезвычайно важно делать различие между наблюдаемым законом Хаббла и его теоретическими интерпретациями. В статье 1929 года Хаббл писал, что интерпретация наблюдаемого смещения спектров остается открытым вопросом. Первое естественное предположение – что красное смещение вызвано эффектом Доплера, когда галактики удаляются от нас. Если это так, то красное смещение есть просто скорость этого удаления, деленная на скорость света. Хаббл и Хьюматсон (Humason) осторожно написали в своей статье 1931 года, что «термин ‘скорость’ будет пока что использоваться в смысле ‘видимая’ скорость, без какого-либо предубеждения по поводу ее окончательного смысла».

Практика выражать красное смещение как видимую скорость в настоящее время используется, когда астрономы обсуждают сравнительно близкий космос. Например, скопление в Деве имеет красное смещение в 1000 км/сек. Можно также переписать закон Хаббла $z = (H/c) R$, в виде, учитывающем доплеровскую

интерпретацию красного смещения, когда скорость удаления объекта дается выражением $v = z \cdot c$, так, что комбинация обеих формул дает

скорость удаления = постоянная Хаббла \times расстояние

$$\text{или} \quad v = H \times R \quad .$$

где H – постоянная Хаббла, знаменитая тем, что измерение ее величины до сих пор является остро обсуждаемой темой в астрономической литературе. Еще в 1920-ые годы в воздухе витали теоретические ожидания закона Хаббла, основанные на решениях уравнений Эйнштейна, и вскоре закон красного смещения стали рассматривать в свете модели расширяющейся вселенной. Расширение вселенной – такое объяснение дает современная космология, принятое подавляющим большинством астрономов.

Но открыл ли Хаббл расширение Вселенной? Возможно, вы читали, в популярной литературе, что «в 1929 году Эдвин Хаббл выполнил эпохальное наблюдение, показав, что далекие галактик быстро удаляются от нас». Но, строго говоря, это утверждение неверно, поскольку Хаббл никогда не видел движущихся галактик, и он был готов к различным интерпретациям своего закона. Астрономы наблюдают нечто более глубокое. Они смотрят на спектры галактик и видят знакомые спектральные линии в других местах на спектрограмме, т.е. на других длинах волн. По сравнению со спектральной линией, излучаемой тем же атомом на Земле, обычно эти линии находятся на «неправильных» местах, сдвинутые в сторону большей длины волны, в красную сторону. Вывод о движении галактик – это уже интерпретация наблюдаемого смещения спектральных линий.

Примечательно то, что красное смещение имеет одно и то же значение, независимо от частоты спектральной линии, в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах, т.е. космологическое красное смещение действует универсально на фотоны всех частот. Современная физика знает два экспериментально проверенных механизма, которые дают красные смещения, независимые от длины волны:

- *Эффект Доплера*, обусловленный взаимной скоростью источника света и наблюдателя, движущегося в пространстве. Например, длина волны спектральной линии, излученной с поверхности Солнца, различна в разных частях солнечного диска. Смещение линий изменяется от красного в +20 км/сек до синего в –

20 км/сек, в точном соответствии с тем, что ожидается от солнечного вращения, определяемого по пятнам на Солнце.

- *Эффект Эйнштейна или гравитационное красное смещение* появляется, когда свет излучается атомом, находящимся ближе к гравитирующей массе, чем наблюдатель. Гравитационное красное смещение определяется разностью гравитационных потенциалов между точками излучения и приема фотонов. Прекрасным примером являются спектральные линии, излучаемые с солнечного диска. Они имеют «лишнее» красное смещение, равное 10^{-6} . Эта видимая скорость в +300 м/сек есть мера гравитационного потенциала Солнца: его массы и размера. Солнце не убегает от нас с такой скоростью!

В действительности, интерпретация гравитационного красного смещения зависит от теории гравитации, о которой речь пойдет в главе 8. В общей теории относительности красное смещение есть результат действия искривленного пространства-времени и может также быть выведено из принципа эквивалентности. В полевой теории гравитации оно вызвано смещением атомных уровней энергии, когда атом взаимодействует с внешним гравитационным полем.

Кроме указанных выше экспериментально проверенных механизмов красного смещения существует также теоретически предсказываемое, но все еще не проверенное экспериментом, явление, сопровождающее расширение пространства:

- *эффект Леметра или эффект расширения пространства*, приводящий к растяжению длины волны фотона, движущегося в расширяющейся Вселенной. Это широко принятое объяснение космологического красного смещения является следствием общей теории относительности. Этот эффект принципиально отличается от эффекта Доплера, который относится к движению тел в пространстве, а не к расширению самого пространства.

Таким образом, в природе могут действовать по крайней мере три механизма красного смещения. Наблюдаемое красное смещение содержит вклад от каждого из них, так что полное красное смещение дается выражением $(1+Z_{obs}) = (1+Z_{exp}) (1+Z_{Dop}) (1+Z_{grav})$. Считается, что на больших красных смещениях эффект расширения пространства доминирует над доплеровским красным смещением, возникающим из-за движения нашего Млечного Пути и галактических потоков. Гравитационное красное смещение обычно считается слишком малым, чтобы его можно было обнаружить в спектрах галактик.

Немного истории: красное смещение и эффект де Ситтера

В 1917 году Альберт Эйнштейн вывел из своих уравнений общей теории относительности космологическое решение: он нашел сферическую статическую вселенную, конечную, но не имеющую границы. Довольно быстро голландский астроном Виллем де Ситтер (Willem de Sitter) опубликовал другое решение, приводящее к не менее странному миру. Де Ситтер рассмотрел, что произошло бы, если бы вселенная содержала так мало массы, что в первом приближении ее плотность можно было считать нулевой (для науки это типично – вы начинаете с упрощения, для того, чтобы предсказать хоть что-то). Он добавил к уравнениям Эйнштейна космологическую постоянную, или вакуум, как мы можем теперь сказать, как сделал Эйнштейн со своей вселенной. Проверая, какие явления могли бы произойти в этой пустой вселенной, де Ситтер обнаружил неожиданную вещь. Свет, получаемый наблюдателями, имел бы сдвиг спектральных линий в красную сторону, и красное смещение было бы больше для света, приходящего от более удаленных областей.

Феномен красного смещения де Ситтера не вызывался эффектом Доплера от удаляющихся звезд. Это свойство пространства-времени, которое появляется, когда его помещают в условия пустой вселенной с космологической постоянной. Примечательно, что де Ситтер первым предложил в 1917 году, когда галактики были еще не известны, что нужно попытаться найти соотношение красное смещение - расстояние для очень далеких небесных тел. Это предсказание было сделано для статической вселенной. Даже Фридману, который пять лет спустя продемонстрировал возможность расширяющейся вселенной, не удалось указать феномен красного смещения как свойства его собственной модели. Хотя, Дмитрий Иваненко рассказывал Артуру Чернину, что Фридман на семинаре в 1924 году обсуждал большие красные смещения, открытые Весто Слайфером, и считал их прямым доказательством расширяющейся вселенной.

В своей статье 1929 года, Эдвин Хаббл сделал вывод, что он, по-видимому, обнаружил эффект де Ситтера (т.е. влияние космологической постоянной), а не расширение вселенной. Поразительно также читать книгу Артура Эддингтона *«Расширяющаяся Вселенная»*. Эта прекрасная популярная книга, написанная пионером современной астрофизики, пронизана идеей важности космологической постоянной. Эддингтон был взволнован только что открытым законом Хаббла и думал, что расширение вселенной приводится в движение космическим отталкиванием (ему

не нравилось альтернативное объяснение Леметра, который предложил «теорию фейерверков», предшественницу теории большого взрыва, и в которой расширение началось с мощного выброса из первичного атома).

Похоже, что с недавними наблюдениями далеких сверхновых нечто вроде эффекта де Ситтера вернулось через 80 лет!

5.9. Измерение расстояний с помощью закона Хаббла

Красное смещение было первым, неожиданным открытием в девственном лесу внегалактической вселенной. Общепринятым его объяснением является расширение пространства. Но, независимо от любой его интерпретации, точный закон Хаббла (красное смещение пропорционально расстоянию) служит ныне мощным инструментом для изучения трехмерных космических структур. Для решения этой задачи астрономы упорно работают на своих телескопах, измеряя красное смещение тысяч галактик. Шаг за шагом они проникают все глубже в пространство, составляя космические карты для областей, «чтобы смело пойти туда, куда никто еще не ступал».

И зрелища, которые открываются за пределами нашей родной Локальной Группы в ближайшем Сверхскоплении в созвездии Девы, приводят их в волнение. Длинные нитеобразные структуры, великие стены, состоящие из галактик, и гигантские пустоты образуют удивительный пейзаж наших космических окрестностей. Среди этой безмолвной и чужестранной территории человек неожиданно осознает, что составитель карты – закон Хаббла – здесь вообще не должен работать! Нигде нет ни равнин, ни однородности, которая, как мы считаем, порождает линейный закон красного смещения – нашего индикатора расстояния. У спокойного космографа свои секреты...

Эдвин Хаббл открыл свой закон, используя 24 галактики. Самые далекие были членами скопления в Деве, на расстоянии около 20 Мпк (или в 25 раз дальше, чем до нашей ближайшей соседки Андромеды). Что мы знаем о законе Хаббла сегодня, почти 70 лет спустя?

После «ярчайших звезд» Хаббла было открыто много новых стандартных свечей (или способов определения космических расстояний). У Хаббла был коллега, наблюдатель Милтон Хьюмасон (Milton Humason), легендарный астроном, который начал свою карьеру

*Милтон
Хьюмасон
1891-1972*

погонщиком мула в Маунт Вильсон, где располагался самый большой в мире телескоп. Они обнаружили, что самые яркие члены галактичес-

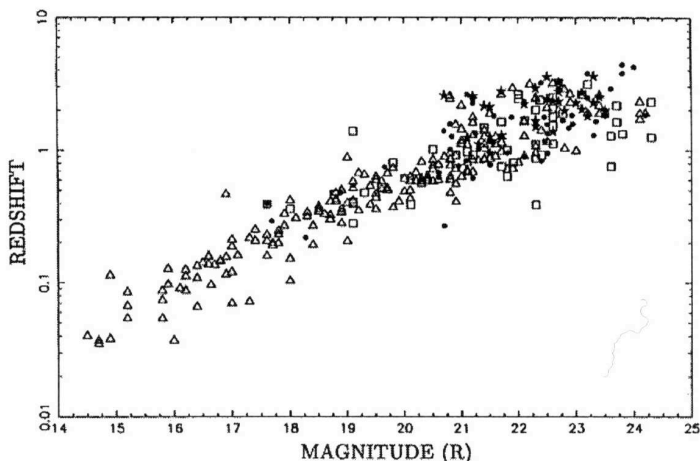


Рис. 5.5. Диаграмма Хаббла для гигантских эллиптических галактик, которые являются также двойными радиоисточниками, наподобие Лебедя А. Закон Хаббла виден до $Z \approx 3$, тогда как в статье Хаббла об открытии самым большим красным смещением было $\approx 0.003!$ (Диаграмма Т.Пурсимо (Т. Pursimo))

ких скоплений — это явно очень похожие галактики, почти «близнецы». Поскольку они являются очень мощными источниками света (содержат много звезд), их можно видеть на больших расстояниях. Современные исследования на более крупных телескопах и с более чувствительными приемниками подтвердили, что тесная связь между красным смещением и расстоянием продолжается по крайней мере до красного смещения ≈ 1 , которое означает расстояние в триста раз больше, чем в исследовании, приведшем к открытию Хаббла. Сверхновые, радиогалактики и квазары дают доказательство в пользу закона Хаббла на еще больших масштабах.

Закон Хаббла предлагает астрономам мощный метод измерения расстояний до галактик, поскольку для большинства галактик измерить красное смещение намного легче, чем что-либо другое. Тогда расстояние есть красное смещение, умноженное на скорость света и деленное на постоянную Хаббла ($R = Zc/H$). И даже если мы не уверены в ее значении, таким образом всегда можно вывести по крайней мере *относительное* расстояние (например, то, что расстояние до одной галактики в два раза больше, чем до другой).

Красное смещение, взятое отдельно, дает хорошее относительное измерение расстояний. Но астрономы часто хотят знать абсолютное расстояние в стандартных единицах длины (таких как мегапарсеки). Для этого нужно точно знать значение постоянной Хаббла H , которая, так сказать, фиксирует космологическую шкалу расстояний. Она также необходима для вычисления возраста вселенной в модели Большого Взрыва. Не удивительно, что измерение ее точного значения является для астрономов великим делом.

Первую оценку постоянной Хаббла получил в 1927 году бельгийский астроном Жорж Леметр (Georges Lemaître), который был католическим священником. Он определил ее даже до того, как был открыт закон Хаббла. Как это возможно? В тот год Леметр опубликовал статью, в которой он, независимо от Фридмана, показал, что уравнения Эйнштейна для вселенной, однородно заполненной веществом, допускают решение в виде расширяющегося пространства. В этой статье был также получен закон, связывающий красное смещение с масштабным множителем в момент излучения света (эффект Леметра). Еще он предсказал, что в расширяющейся вселенной красное смещение должно на небольших расстояниях расти прямо пропорционально расстоянию.

*Жорж
Леметр
1894-1966*

У Леметра в распоряжении были красные смещения и видимые величины для нескольких десятков близких галактик. По их величинам он оценил, что среднее расстояние до них составляет 0.95 миллионов парсек. Сопоставив это число с их средней лучевой скоростью (по красному смещению) 600 км/сек, он получил 625 км/сек/Мпк для отношения между скоростью и расстоянием. Соответствующее время Хаббла для вселенной Леметра получилось около 2 миллиардов лет.

Когда в 1929 году Хаббл написал свою историческую статью о законе красного смещения, он, по-видимому, не знал о работе Леметра и предсказанном линейном соотношении «красное смещение – расстояние». Написанная по-французски, она была опубликована в не слишком широко читаемом журнале. Но важно также отметить, что в 1928 году Говард Робертсон (Howard Robertson) опубликовал примечательную статью, в которой он предсказал линейный закон и вывел значение «постоянной Хаббла». В письме к нам Алан Сэндидж (Allan Sandage) вспоминает: «В 1951 году Робертсон был моим профессором математической физики в Калифорнийском технологическом институте, и я познакомился с ним довольно близко. Он сказал мне, что он обсуждал эту статью с Хабблом в 1927 или 1928

году, включая его значение расширения со скоростью ≈ 530 км/сек/Мпк».

5.10. Вездесущий байес Малмквиста

Расстояния до близких звезд можно измерить по их параллактическим углам, отражающим годичное движение Земли вокруг Солнца. Но это такие крошечные колебания на небе, что для далеких звезд и других галактик нужно придумывать другие способы. Цепочка таких методов, начиная с Солнца, связывающая близкие и далекие звезды в нашем Млечном Пути, перепрыгивающая на ближайшие галактики и тянущаяся ко все более и более удаленным объектам, имеет образное название: *лестница космических расстояний*.

Эту лестницу не нарисовал заранее в кабинете какой-нибудь умный астроном. Это результат бесконечных лет упорной работы, чтобы воспользоваться тем, что природа случайно предложила в качестве измерительных приборов вселенной. Действительно, одно дело – уловить слабое изображение далекой галактики на фотоснимке, и совсем другое, почти невозможное дело – измерить расстояние до нее. Разница в получаемых значениях константы Хаббла, порой невероятно большая, показывает как трудно искусство измерения расстояний.

Расстояния до далеких галактик оценивают в основном по видимой яркости (потоку получаемого света) или угловому размеру. Предположим, что каким-то чудом мы перенесли галактику Андромеды на расстояние, в десять раз большее, чем ее действительное расстояние. Ясно, что после такого переноса она будет на небе видна (но уже не для невооруженного глаза!) слабее и меньше. Ее новая яркость (поток) составляет всего 1/100 от старой галактики Андромеды, поскольку в прозрачном пространстве поток света падает как квадрат расстояния.

Если бы все галактики были идентичными близнецами Андромеды, то можно было бы измерять расстояние до них простым сравнением их вида с изображениями Андромеды. Естественной единицей расстояния было бы расстояние до Андромеды, которое обитатели такой монотонной галактической вселенной называли бы наверно «андрометром».

Мир идентичных галактик слишком хорош, чтобы быть правдой. Их истинные светимости очень меняются от одной галактики к другой. Использование галактики Андромеды в качестве

измерительной рейки для других галактик часто приводило бы к невероятно большим ошибкам в получаемых расстояниях. Только посмотрите на снимок Андромеды вместе с ее спутником М32 – округлым пятном сразу справа от центра Андромеды на Рис. 3.1. (М32 открыл в 1749 году Гийом Ле Жантиль (Guillaume Le Gentil).) Обе эти галактики находятся примерно на одинаковом расстоянии. На основе существенно более маленького размера карликовой эллиптической галактики М32 астроном, верящий в мир близнецов Андромеды, поместил бы ее где-нибудь раз в 20 дальше, чем Андромеда.

Если бы у галактик были ярлыки с надписью большими буквами «моя светимость составляет 3 галактики Андромеды» или «я вмещаю 100 миллиардов солнц», то можно было бы измерять расстояния так же легко, как в мире андромед. Конечно, такие полезные ярлыки – всего лишь мечта, и астрономам приходится делать это нелегким способом.

После больших усилий, лестница расстояний позволила астрономам измерить с некоторой точностью расстояния до галактик, которые находятся за галактикой Андромеды, хотя и ближе, чем, скажем, тысяча «андрометров». Коротко говоря, это проблема отождествления галактик, имеющих почти равные светимости. Например, среди спиральных галактик галактики с более развитыми спиральными рукавами являются также более массивными и яркими. Этот морфологический метод, придуманный Сиднеем ван ден Бергом (Sidney van den Bergh), можно сравнить проверкой фотографий в паспорте, чтобы решить, являются ли обладатели маленькими или большими парнями. Широко используемая в настоящее время классификация Тулли-Фишера (названная по имени Брента Тулли (Brent Tully) и Ричарда Фишера (Richard Fisher)) основана на том факте, что более яркие спиральные галактики вращаются быстрее, чем менее яркие.

Предположим теперь, что у астронома есть некоторые такие средства распознавания галактик с похожими истинными светимостями. Тогда он может вычислить относительные расстояния до таких галактик. Но он обычно хочет знать больше, ему нужно расстояние в парсеках. Если астроному повезет, то может существовать одна галактика, самая близкая, для которой он может выполнить такое измерение расстояния. Эта галактика называется *калибратором*. Например, в волшебном мире близнецов Андромеды калибратором была бы Андромеда, и на самом деле расстояние до нее известно в парсеках по измерениям ее звезд-цефеид:

расстояние до Андромеды = 670 000 парсек

Так, в мире андромед, все расстояния, легко измеримые в «андрометрах», также можно было бы выразить в парсеках или километрах. В нашем реальном мире Жорж Патюсель разработал специальный индикатор расстояния – метод галактик-двойников, при котором среди богатого разнообразия галактических форм специально ищут «двойников» близких калибраторов.

Практически трудно собрать галактики в классы одинаковой светимости. В результате, некоторые расстояния получаются слишком большими, а другие слишком маленькими, и астроном рад, если, измеряя расстояние до одной галактики, достигает скромной точности в 25%. Но более опасными, чем такие «плюс» или «минус» ошибки, являются систематические ошибки, которые всегда дают слишком короткую оценку расстояния из-за так называемого «систематического смещения Малмквиста».

У наблюдательных данных – нашей бесценной и тонкой связи с миром большого и малого – есть свои Сциллы и Харибды, всегда готовые сбить исследователя с пути. Систематическое смещение Малмквиста является великолепным представителем селекционных эффектов, которые постоянно скрывают истину о вселенной и затрудняют работу астронома. Можно даже сказать (немного преувеличивая), что космология – это всего лишь изучение эффектов селекции! В том же стиле сэра Артура Эддингтона однажды сравнил космологов с детективами, выясняющими, что произошло на месте преступления. Никакие настоящие свидетели-очевидцы никогда не расскажут, что действительно случилось в глубинах пространства и времени. Действительно, с чем астроному Шерлоку Шолмсу приходится работать – это немногим больше, чем следы на фотопластинках, оставленные фотонами, пришедшими к нам из определенного направления. По этим скудным уликам он должен построить вселенную, ее компоненты и физические явления, в ней происходящие.

Принимаемый свет от далеких небесных тел ослаблен самим расстоянием, а также лежащей на пути космической пылью. С очень больших расстояний – из галактик, видимых на глубоких пластинках Космического телескопа им. Хаббла, – число приходящих фотонов равно одной миллионной доле фотонов от самых слабых звезд, видимых невооруженным глазом. Свечка на Луне была бы ярче. Таким образом, астроном, пытаясь увидеть, что происходит очень далеко, может видеть по существу только очень яркие объекты.

Гуннар Малмквист (Gunnar Malmquist) был учеником Карла Шарлье в Лунде, а позже профессором астрономии в Уппсале. Он попытался определить среднюю светимость звезд *в пространстве*, принадлежащих определенному спектральному классу. Это не то же самое, что средняя светимость этих же звезд наблюдаемых *на небе*. На больших расстояниях, откуда видны только самые яркие звезды, менее яркие звезды будут пропущены. Следовательно, средняя светимость звезд на небе больше, чем истинная средняя светимость в пространстве. В 1920 году Малмквист вывел знаменитую формулу, дающую эту разницу в светимостях. Средняя абсолютная светимость «в пространстве» и «на небе» отличаются на величину $1.382 \times \sigma^2$, где σ есть дисперсия распределения абсолютной величины какого-то звездного класса, в предположении, что оно нормально (Гауссово). Эта формула также предполагает, что звезды рассеяны в пространстве равномерно. Для фрактального распределения она принимает вид $0.461D\sigma^2$.

Теорию Малмквиста можно применить и к галактикам. Когда астроном измеряет расстояния до галактик, он может выбрать свои галактики только на небе, но не в пространстве, поскольку его способность перемещаться между галактиками весьма ограничена. Кроме того, он не может видеть очень слабые галактики. Таким образом, стандартные свечи, которых астроном может достичь на больших расстояниях, в среднем больше и ярче, чем близкие калибровочные галактики. Это расхождение является систематическим смещением (байесом) Малмквиста.

Байес Малмквиста имеет тенденцию незаметно вкрадываться в астрономические данные. Если астроном забудет об этом искажении, то он получит слишком маленькие расстояния до далеких галактик и определит слишком большое значение постоянной Хаббла, и, следовательно, слишком малый возраст для расширяющейся вселенной. И это действительно произошло в астрономии.

5.11. Чему же равна постоянная Хаббла: 100, 72 или 50?

Измерить красное смещение не трудно, хотя для этого требуется большой телескоп, оснащенный современным спектрографом. Однако, измеренное красное смещение нужно «очистить» от некосмологических составляющих, вызванных движением нашего Млечного Пути и движением измеряемой галактики.

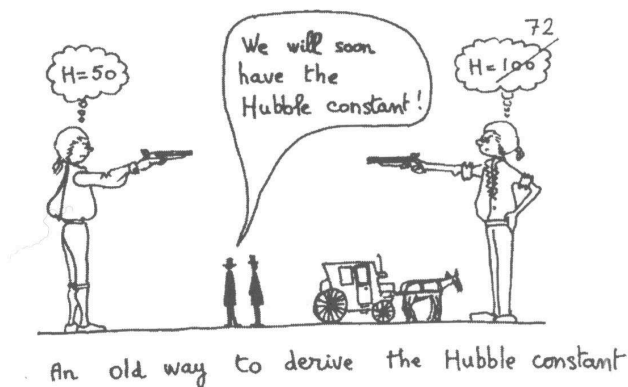


Рис. 5.6. В 1983 году Жорж Патюрель изобразил дуэль по поводу значения постоянной Хаббла. К 2001 году верхнее значение снизилось до 72. Надпись на рисунке: *Старый способ получить константу Хаббла. 1-ый дуэлянт: $H = 50$, 2-ой дуэлянт: $H = \cancel{100}$ 72. Секундант: Скоро у нас будет константа Хаббла!*

Блуждания отдельных галактик и крупномасштабные галактические потоки определить трудно, и они всегда вызывают ошибку в измерении константы Хаббла. Однако если мы достигаем очень далеких галактик, тогда такие «пекулярные скорости» (порядка 100 км/сек) становятся вполне сравнимы с космологической частью красного смещения. К сожалению, это преобладание красного смещения более чем компенсируется возрастающей ошибкой самого расстояния.

Действительно, именно ошибки в измерении расстояния служат причиной знаменитой неточности и споров о значении постоянной Хаббла. В настоящее время все согласны, что значение Леметра $625 \text{ км сек}^{-1}/\text{Мпк}$ слишком велико, как и значение, полученное Хабблом $526 \text{ км сек}^{-1}/\text{Мпк}$. Завышенная оценка H была вызвана в основном заниженной оценкой расстояний.

В 1970-ых и 80-ых годах дебаты о внегалактических расстояниях превратились в борьбу между двумя партиями, которые представляли тяжеловесы в галактическом мире – Алан Сэндидж и Жерар де Вокулер. Они вывели, что округленно константа Хаббла равна соответственно 50 и 100 (мы часто опускаем громоздкие единицы). В настоящее время Сэндидж и его давний Европейский союзник Густав Тамманн (Gustav Tammann) остаются верны своим 50-60, а более молодое поколение астрономов отдадут предпочтение зна-



Рис. 5.7. Джеффри Бербидж (Geoffrey Burbidge) и Алан Сэндидж (Allan Sandage) (справа) в конце 1950-ых годов. Бербидж является одним из создателей теории, описывающей, как внутри звезд образуются химические элементы. Многие годы он обсуждает наблюдения, которые не очень соответствуют стандартным взглядам в космологии. Сэндидж является отцом современной практической космологии, широко известным по обширной и тщательной работе, касающейся лестницы космических расстояний и константы Хаббла. Они также известны как редакторы престижного журнала *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*.

чениям от примерно 70 до 80. Но тенденция направлена к более низкому значению и более старой вселенной, как это и было давным-давно получено последним из великих «одиноких» наблюдателей Аланом Сэндиджем.

Каково же все-таки значение постоянной Хаббла?

Вопрос измерения константы Хаббла затрагивает одного из нас (П.Т.), кто попытался вступить в схватку с зловредным отклонением Малмквиста. Загадки лестницы космических расстояний привели его к сотрудничеству с исследовательскими группами в обсерваториях Парижа и Лиона. Эти французские группы, выросшие вокруг Люсетт Боттинелли (Lucette Bottinelli), Люсьен Гугенхейм (Lucienne Gouguenheim) и Жоржа Патюреля (Georges Patureau), (и Жилия

Теро (Gilles Theureau), принадлежащего к более молодому поколению), собрали уникально большую выборку галактик, которая называется KLUN (Kinematics of the Local Universe – Кинематика Локальной Вселенной). Она содержит 6600 спиральных галактик, расстояния до которых определены методом вращающихся галактик Тулли-Фишера. Ожидается, что ее будущий преемник “KLUN+” будет содержать 20 000 галактик, жаждущих быть использованными для еще более глубокого исследования галактической вселенной.

Сбор такого большого числа галактик требует от команды большой работы, преданности, многих лет планирования, создания баз данных, медленнодвигающихся наблюдений на больших радиотелескопах, бесконечных ночей измерения красного смещения и под северным и под южным небом. Но затем рождается нечто уникальное. Перед вами на тарелочке кусок Вселенной.

Одним из мотивов для таких усилий было измерение постоянной Хаббла особым способом, использующим так называемые нормализованные расстояния. Этот метод придумали для того, чтобы преодолеть систематическое отклонение Малмквиста. Анализ данных KLUN привел к $H = 55$. Это значение, с его предельными ошибками ± 5 , равно значению, полученному Аланом Сэндиджем, который использовал другие выборки и методы, но всегда помнил об опасном отклонении.

В 2001 году группа астрономов, работающих на космическом телескопе им. Хаббла, опубликовала свое измерение H . Оно оказалось равным 72 ± 5 , снова напомнив, что спор еще не закончен и в лестнице космических расстояний все еще есть неопределенность. Хотя вполне возможно, что высокое значение снова отражает другой каприз д-ра Малмквиста, теперь уже с самими цефеидами. Разумно допустить, что константа Хаббла может лежать где-то между 50 и 70.

Недавно Роджер Кейрел (Roger Cayrel) и другие сообщили о новом типе определения возраста вселенной. Эта международная группа применила метод радиоактивного датирования к старым звездам Млечного Пути, впервые обнаружив и измерив уран за пределами Солнечной Системы. Самая последняя новость из этого проекта, в котором использовался мощный ESO Very Large Telescope (VLT) (Очень Большой Телескоп Южной Европейской Обсерватории), – это то, что возраст звезды равен 14 миллиардов лет. Естественно, что вселенная должна быть все-таки старше. Если этот результат действительно правильный, то он бросает тень на модели большого взрыва с $H = 72$, которые моложе, чем измеренная звезда. Но ускорен-

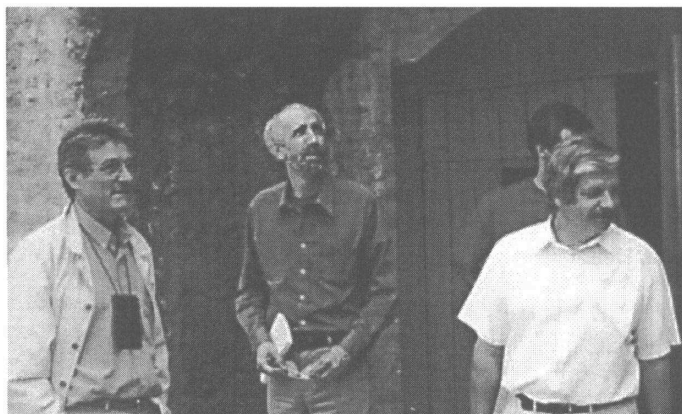


Рис. 5.8. Жорж Патюрель, Бэрри Мадоре (Barry Madore) и Пекка Теерикорпи в Лионе в 1999 году – члены жюри по докторской диссертации о значении постоянной Хаббла. Мадоре работает в Ключевом Проекте космического телескопа им. Хаббла по измерению константы Хаббла.

ная вселенная с $H = 62$ предоставила бы достаточное время жизни – 16 миллиардов лет, – чтобы Млечный Путь был таким старым.

5.12. Загадочное «спокойствие» закона Хаббла

Но насколько точен закон Хаббла, т.е. красное смещение, в качестве индикатора расстояния? Само красное смещение можно измерить очень точно, так что ошибка в полученном расстоянии зависит в основном от того, насколько тесна связь между красным смещением и расстоянием. Та компонента красного смещения, которая ответственна за расширение, была бы прямо пропорциональна расстоянию, если бы галактики – и наш Млечный Путь, и другие, – покоились относительно расширяющегося пространства. Но нельзя считать, что галактики «прибиты» к пространству, даже в пространстве расширяющегося большого взрыва.

Как мы упоминал выше, у галактик есть свое собственное движение, по-видимому, вызванное гравитационным притяжением ее близких соседей и более далекими массивными галактическими концентрациями, такими как богатые скопления Эйбла. Но в царстве галактик богачи редки, и в пространстве между скоплениями закон

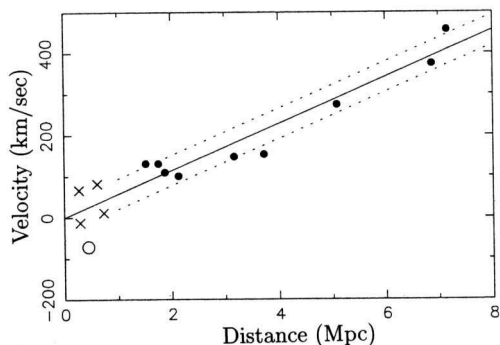


Рис. 5.9. Закон Хаббла в окрестностях Локальной Группы по современным данным о расстояниях, полученным по цефеидам. Закон начинается сразу за границей Локальной Группы, на расстоянии в 1.5 Мпк. Его разброс примечательно мал, меньше, чем 40 км/сек (По исследованию Т. Экхольма (Т. Ekholm), Ю. Барышева, П. Теерикорпи, М. Хански и Ж. Патюреля).

Хаббла удивительно точен. Астрономы говорят, что поток Хаббла очень «спокойный» с небольшим разбросом, вызванным собственными движениями галактик. Замечательная линейность и гладкость соотношения «расстояние - красное смещение» позволяет астроному составлять для внегалактического пространства даже более хорошие карты, чем для звездного мира нашего Млечного Пути!

Если бы мы могли совершенно точно измерить расстояния для выборки галактик, то их диаграмма Хаббла прямо говорила бы нам, насколько точно красные смещения обозначают расстояния. Тогда любой разброс от тонкой линии, представляющей закон Хаббла, вызван собственными движениями галактик. Галактические потоки добавляют к красному смещению расширения настоящие доплеровские смещения. К счастью, на расстояниях за Локальным Сверхскоплением, получающиеся ошибки в расстоянии по красному смещению намного меньше, чем размер изучаемых крупных структур. Наблюдаемое красное смещение содержит космологическую и доплеровскую части: $1 + Z_{\text{obs}} = (1 + Z_{\text{exp}})(1 + Z_{\text{Dop}})$, так, что движение со скоростью в 300 км/сек дает в определении расстояния ошибку в 5 Мпк. В реальной жизни трудно разделить неизвестные отклонения от красного смещения расширения и ошибок расстояния. Чистота закона

Хаббла лучше всего изучена близко к Локальной Группе, где можно использовать точный индикатор расстояния по цефеидам.

Еще в 1957 году де Вокулер по скудным галактическим данным, имевшимся в то время, сделал вывод, что в локальной галактической вселенной отклонения от регулярного потока Хаббла (отдельно от потокового движения к скоплению в Деве) малы, с разбросом менее чем 100 км/сек. В 1970-ых годах в своей знаменитой серии статей «Шаги к постоянной Хаббла», Алан Сэндидж и Густав Тамманн указали, что разброс даже меньше, чем 60 км/сек. В другом контексте Сэндидж предсказал, что чем лучше мы измеряем расстояния, тем меньше становится разброс. Это предсказание было проверено с использованием галактик с расстояниями, полученными по цефеидам (см. Рис. 5.9). И действительно, теперь разброс локального потока Хаббла упал до рекордного значения < 40 км/сек! Недавно Игорь Караченцев и Дмитрий Макаров, астрономы из Специальной астрофизической обсерватории РАН, представили доказательство в пользу даже еще более гладкого потока.

Известно, что линейный закон Хаббла в модели Большого Взрыва является следствием однородности. Это приводит к загадке, сформулированной Аланом Сэндиджем: поскольку локальное распределение галактик в пространстве очень неоднородно, как тогда может локальный закон Хаббла быть таким гладким? Почему наше ближайшее окружение вокруг Локальной Группы расширяется с тем же темпом, что и более крупные объемы?

Фабио Говернато (Fabio Governato) и другие показали, используя моделирование для N тел в рамках моделей CDM, что разброс скорости в окрестностях Локальной Группы должен быть в пределах от 150 до 700 км/сек. Другим проблематичным моментом является скорость в 400 км/сек относительно космического излучения. Когда из нее вычли вращение Солнца вокруг центра Млечного Пути, то оказалось, что Локальная Группа имеет скорость 600 км/сек внутри расширяющейся вселенной, и странно думать, что его ближайшая окрестность тоже расширяется равномерно. Еще Иоганн Ламберт размышлял о том, какова наша скорость относительно абсолютного (Ньютоновского) пространства, когда мы принимаем участие в разных вращениях вокруг различных центров в его иерархическом мире. Теперь мы действительно знаем нашу скорость, но нам все еще не известны все те системы, гравитирующие массы которых придали нам эту скорость.

Проблема «слишком хорошего» закона Хаббла имеет свою историю. В 1972 году Сэндидж, Тамманн и Эдуардо Харди (Eduardo Hardy) были очень озадачены линейностью закона Хаббла среди очень неравномерного распределения галактик. Они предположили, что либо средняя плотность вещества очень низка, либо существует доминирующий плавно распределенный темный субстрат. Интересна оценка этой ситуации Стивеном Вайнбергом (Steven Weinberg) в книге *Первые три минуты*, когда он описывает, как Хаббл открыл свой закон в локальной, комковатой вселенной: «На самом деле мы не ожидали какого-то четкого соотношения пропорциональности между скоростью и расстоянием для этих 18 галактик – все они слишком близки, ни одна не находится дальше скопления в Деве».

В лекции, прочитанной в Монреале в 1989 году, Джеймс Пиблс рассмотрел космологическое значение ближнего пространства. Проверив диаграмму Хаббла для галактик в пределах 10 Мпк, он задавал вопрос, почему все они так хорошо следуют чисто хаббловскому потоку. Его волновал факт, что «это почти однородное расширение находится в поразительном контрасте с чрезвычайно комковатым пространственным распределением».

Странно, что закон Хаббла, такой универсальный и знакомый в свете нашей космологии, должен создавать такую проблему – скорее можно было бы ожидать, что его отсутствие где-нибудь могло бы быть источником беспокойства, а не эта блестящая достоверность. Но явления даже локальной вселенной далеки от полного понимания: только вспомните о темном веществе и темной энергии!

5.13. Красное смещение квазаров как индикатор расстояния

Многообещающим способом изучать структуры на очень крупных масштабах является использование обзоров красных смещений квазаров, которые видны очень далеко. Конечно, карты, выполненные с использованием квазаров, говорят нам о крупномасштабной вселенной только в том случае, если красные смещения квазаров – хорошие индикаторы расстояния. А так ли это?

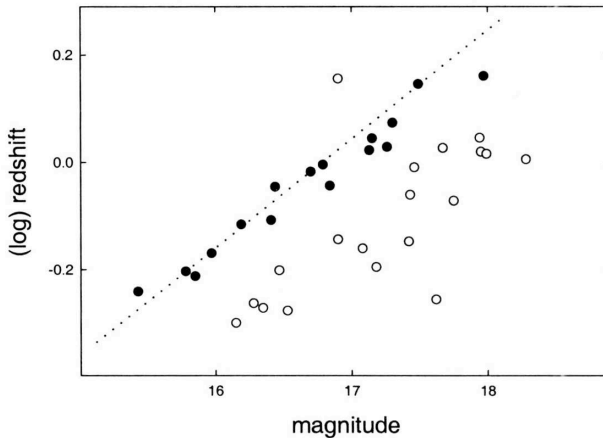


Рис. 5.10. Один из способов проверки, является ли красное смещение квазаров индикатором расстояния, – это изучение их диаграммы Хаббла. Здесь мы показываем график «зв. величина - красное смещение» для радиогромких квазаров, за исключением тех, чья светимость очень переменна. Звездные величины были исправлены за экстинкцию Млечного Пути. Обратите внимание на полосу квазаров с ожидаемым наклоном 0,2, охватывающую яркий край населения квазаров. Эти квазары хорошо отделяются от остальных объектов. То, что такую структуру можно увидеть на диаграмме Хаббла, наводит на мысль, что красное смещение является индикатором расстояния для квазаров. Есть надежда, что в будущем их можно будет использовать для проверки модели мира, как это делается с использованием сверхновых.

Астрономов всегда поражал большой разброс на диаграмме Хаббла для квазаров. Иногда это рассматривали как указание на то, что красные смещения квазаров включают в себя большие некосмологические компоненты (например, аномальные красные смещения). Но чаще его объясняли как отражение огромного разнообразия светимостей: есть очень яркие квазары, а есть совсем слабые, и все, что между ними. Так что в целом квазары – далеко не «стандартные свечи». Это проблематично, потому что для некоторых классов галактик вид тесной связи в диаграмме Хаббла рассматривался как свидетельство в пользу и закона Хаббла, и стандартной свечи. А для квазаров нет «звезд-цефеид» или других способов, которые можно было бы использовать для измерения расстояния до них, независимо от красного смещения.

Ажит Кембхави (Ajit Kembhavi) и Джайант Нарликар (Jayant Narlikar) писали в 1999 году в своей книге о квазарах: «Конечно, можно привести довод, что разброс возрастает из-за разницы в светимости от одного квазара к другому. В этом случае нужно попытаться отождествить «стандартную свечу» класса квазаров... Идентификация такого класса для галактик (то есть самого яркого члена скопления) привело Алана Эндиджа и его сотрудников к соотношению Хаббла. Для квазаров это упражнение было далеко не столь успешным».

Случилось так, что один из нас (П.Т.) натолкнулся на доказательство отдельного класса оптически самых ярких (радиогромких) квазаров на диаграмме Хаббла, а значит, и на доказательство космологического красного смещения. Как ни странно, это исследование очень далеких объектов корнями уходит в близкое запыленное окно нашего Млечного Пути – оно началось с вопроса, как использовать квазары в качестве индикаторов присутствия пыли, и привело к исправлению их звездных величин от потускнения, вызванного этой самой пылью. После того, как из данных, исправленных за экстинкцию, возник (впервые в 1981 году) отдельный класс, дальнейшая мотивация состояла в идее, что класс светимости может отражать особый класс хозяйских галактик. Идея эта получила поддержку из последних открытий космического телескопа им. Хаббла. Оказалось, что все галактики содержат сверхмассивные объекты в их ядрах, а массы этих энергетических машин пропорциональны массам хозяйских галактик. Эти хозяйские галактики могут представлять стадию в эволюционной классификации квазаров Бориса Комберга из Астрокосмического Центра в Москве, который представляет себе разные поколения хозяев, возникающие от слияния галактик, содержащих сверхмассивные объекты.

Предложенный класс квазаров может содержаться в каком-то подклассе самых ярких галактик скопления, о которых известно, что они имеют очень узкое распределение светимости (и массы). Кстати, реальность отдельного класса поддерживается также наблюдением, что его мощные члены-квазары выделяются из толпы: они более спокойны (оптически менее переменны), и как радиосточники они являются самыми крупными и симметричными).

Если эта гипотеза верна, то она имеет немедленное физическое следствие: для того, чтобы из наблюдений следовал такой класс, красное смещение должно быть индикатором расстояния также и для квазаров, по крайней мере, для радиогромких. Правда,

большинство квазаров являются радиотихими, без каких-либо подобных признаков подклассов. Но на малых красных смещениях бывают случаи, когда квазар находится в скоплении галактик и имеет одинаковое с ним красное смещение. По нашему мнению, естественно предположить, что в целом квазары подчиняются закону Хаббла. Конечно, если бы пространственные карты, построенные по квазарам, показывали только очень размытые структуры или вообще их отсутствие, то, возможно, пришлось бы проверить, не виновато ли в этом некосмологическая часть красного смещения – в каком-то смысле эти карты проверяли бы также реальность аномальных красных смещений!

Есть шутка, что космолог похож на человека, который ищет потерянный ключ в освещенном месте под фонарем. Когда его спросили, почему он ищет именно здесь, он ответил, что, конечно, потому, что здесь светло... Да, свет важен, даже при всех раздражающих эффектах селекции, ограничивающих наш взгляд. Слабый поток фотонов – наш единственный мостик к далекой галактике – может нести драматическую информацию в едва различимом виде, о чем свидетельствует и красное смещение.

Загадочная ровность закона Хаббла, его малый разброс за пределами скоплений галактик являются также благом для астронома, который пытается построить карту галактической вселенной. Удивительные результаты первых обзоров красных смещений доказали, что они вполне окупают затраты времени и усилий на то, чтобы ночь за ночью накапливать слабый свет от множества галактик. Когда астрономы вступили в трехмерную эпоху, стало, наконец, возможным открытие истинной природы распределения галактик. Но как далеко простираются структуры, которые мы обнаружили в наших внегалактических окрестностях? На этот вопрос можно ответить, если красные смещения квазаров являются хорошими индикаторами расстояний.

5.14. Аномальные красные смещения – исключение из правила?

В 1966 году в Паломарской обсерватории Хальтон Арп (Halton Arp) изучал снимки галактик в своем широко-известном *Атласе Печулярных Галактик*. Он случайно заметил, что радиоисточники, и среди них квазары, имеют тенденцию располагаться близко или на одной линии с некоторыми галактиками этого каталога. Не могут ли

квazarы, имеющие большое красное смещение, быть ассоциированы с галактиками, красное смещение у которых существенно меньше? Если это так, то это было бы ужасным нарушением закона Хаббла: квазары имели бы большую лишнюю компоненту в своих красных смещениях, в добавок к космологическому. Это возможное лишнее смещение линий стали называть *аномальным красным смещением*.

В том же году Фред Хойл и Джеффри Бербидж предположили, что квазары – это, возможно, объекты, выброшенные из довольно близких галактик. И нужно было показать, что необходимая для этого огромная энергия уже не актуальна: если бы эти чудища находились ближе, чем определяется по красному смещению, то их мощность тоже уменьшилась бы.

С 1966 года Арп нашел много интересных случаев, когда квазары с большим красным смещением располагаются на небе очень близко к галактикам с большим красным смещением. Нужно подчеркнуть, что не существует легкого, независимого от красного смещения, способа определить расстояние до квазаров. Чтобы уверенно сказать, что квазар находится на том же расстоянии, что и галактика, нужно увидеть физическую связь между ними. Арп указал много пар «галактика-квазар», в которых такая связь, похоже, существует в виде светящегося «моста» или «хвоста».

В 1966 году Бербидж вычислил вероятности. Количество известных случаев, когда квазар находится близко (менее 3 минут дуги) к яркой галактике, было равно 46. Ожидаемо ли это из одной только случайности, или такое число пар означает какую-то связь? Можно вычислить ожидаемое число случайных ассоциаций, если известно, сколько на небе галактик и сколько квазаров. Итак, очертим круг с радиусом в 3 минуты дуги вокруг каждой исследуемой галактики. Затем, закрыв глаза, нанесем случайным образом все «квазары», какие есть на небесном своде. Сколько квазаров должно оказаться внутри какого-нибудь круга радиусом в 3 мин. дуги? Ответ равен 1!

Бербидж сделал вывод (как в недавнем обзоре 2001 года), что квазары имеют собственную компоненту красного смещения плюс космологическую. Чтобы объяснить происхождение аномального красного смещения Арп, Нарликар, Хойл и Бербидж представили теории, основанные на идее, что квазары выбрасываются из ядер галактик и состоят из нового, только что образованного вещества. Для этого потребовалась бы новая, нестандартная физика, которую трудно проверить, и поэтому она не привлекла большого внимания.

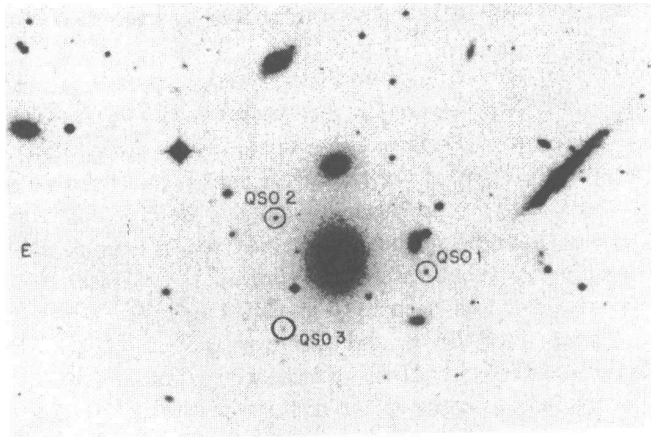


Рис. 5.11. Пример ассоциации «квazar-галактика» Арпа. Три квазара (обведенные на снимке кружками) находятся в пределах 1 минуты дуги от центра эллиптической галактики NGC3842, которая имеет красное смещение $Z = 0.02$, соответствующее скорости удаления в 6000 км/сек. Красные смещения квазаров 1, 2 и 3 равны соответственно 0.34, 0.95 и 2.21.

5.15. Все ли эмпирические свойства красного смещения известны?

Еще один странный эффект красного смещения появился на небе – это периодические красные смещения. В 1976 году Вильям Тифт (William Tift) исследовал двойные галактики. Он нашел совершенно неожиданную вещь: оказалось, что разница красных смещений двух галактик-членов встречается преимущественно с шагом в 72 км/час (если красное смещение выражать как скорость). О подобном «квантовании» красных смещений галактик в скоплениях сообщили также Брюс Гатри (Bruce Guthrie) и Вильям Напье (William Napier), которые проанализировали Местное Сверхскопление, используя сотни галактик с точно измеренными красными смещениями. После того, как они вычли из красного смещения вращение нашего Млечного Пути, красные смещения галактик показали периодичность 36 км/сек – половину первоначального периода Тифта.

Если эффект Тифта реальный, то это трудно понять. Оставив в стороне неизвестное происхождение квантования, существует проблема «доплеровского сглаживания»: реальные движения галактик должны смыть любые пики в красных смещениях. Кажется, что галактики «прибиты гвоздями» к своим местам в такой странной вселенной, и движения двойных галактик вокруг друг друга довольно медленны.

Эхо на эту экзотическую идею откликнулось с севера. В 1990 году финский физик Ари Лехто (Ari Lehto) представил общую формулу квантования физических величин, не зная об астрономических исследованиях Тифта. Он был изумлен, когда обнаружил, что его формула хорошо описывает периоды красных смещений, которые наблюдал Тифт. Если энергия фотонов квантована, как предполагает Лехто, то квантованы и частоты, а, следовательно, и красные смещения света должны встречаться на выделенных значениях. Лехто искал общее правило для свойств «большого» и «малого». Он исследовал, как пространство и время встречаются в физических величинах, появляющихся в Природе, и обнаружил, что отношения величин, включающих длины или энергии, можно просто выразить как $2^{n/3}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). Кажется, что «естественные» отношения строятся на основании числа 2. Он интерпретировал это как явление, аналогичное тому, что называется удвоением периода в хаотических системах, что связывает предмет с фрактальностью. Теория масштабной относительности, созданная Л. Ноттале (L.Nottale) на основе фрактального пространства-времени, тоже приводит к квантованным красным смещениям.

Очаровательная идея, но она пока находится в стадии зародыша. Астрономы довольно скептически относятся к явлениям, обсуждаемым Арпом и Тифтом. Например, периоды красного смещения изучались до сих пор только небольших числом «одиноких волков», а это требует сложного анализа данных по красным смещениям. И их несовместимость с нашим обычным взглядом на космологию скорее отталкивает, чем привлекает. Но можно также сказать, что исследование и проверка нашего понятия красного смещения – одного из ключевых космических наблюдений – это часть космологии. Поэтому естественно обращать внимание на все его свойства, включая очень слабые явления, которые, если они реальные, ускользнули бы от обнаружения без специальных исследований. Пристальное рассмотрение исключений может пролить новый свет на физику, описывающую правило.

В Главе 13 мы рассматриваем возможность того, что эффект Арпа говорит скорее о темной массе в гало галактик, а не о самом

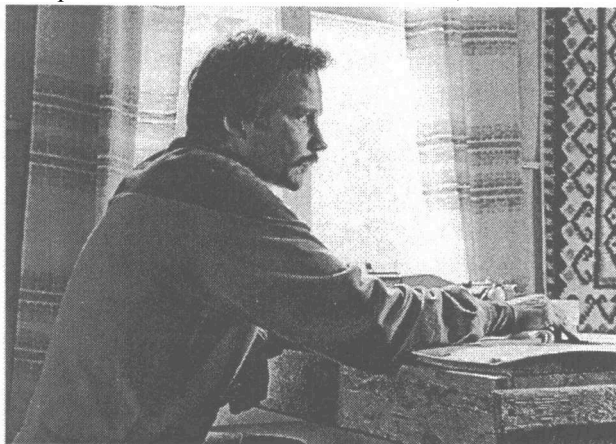


Рис. 5.12. Тойво Яаккола в своем доме недалеко от Полярного круга. Его космологические взгляды привели его к сомнению в стандартной интерпретации космологического красного смещения и к изучению его свойств на различных масштабах. Для этого оригинального мыслителя космология была как воздух, которым мы дышим, без которого нельзя жить, хотя немногие из нас задумывались об этом.

красном смещении. Если это так, то это не умаляет важности эффекта, а показывает, как редкие явления, игнорируемые почти всеми, могут стать ключевыми в науке.

Финский астроном Тойво Яаккола (Toivo Jaakkola), был одним из пионеров такого рода феноменологических исследований (т. е. таких, которые вдохновляется общими теоретическими идеями, не имея точной законченной теории). Он попытался обнаружить влияние вещества на красное смещение в разной окружающей среде. Так, он использовал спиральные галактики, чтобы посмотреть, будет ли свет, излучаемый дальним краем, иметь большее красное смещение, чем свет от ближнего края. Это могло бы быть вызвано каким-либо взаимодействием, когда фотоны проходят длинный путь близко к массивной и далекой галактике.

Яаккола пришел к выводу, что есть доказательства таких изменений красного смещения. Однако, эти маленькие эффекты, если они существуют, трудно обнаружить по имеющимся наблюдениям. Безвременная кончина Тойво Яакколы оборвала его новый анализ

красного смещения краев галактик. В письме к одному из авторов за несколько дней до ухода, он выражал уверенность, что результат будет убедительным. Этот скромный и душевный человек был страстным охотником за сокровищами всю свою жизнь. Он верил, что увидел проблеск истины, скрытой глубоко в астрономических наблюдениях.

Глава 6

Красота космических фракталов

6.1. Мандельброт открывает фрактальную геометрию природы

Фрактальная Геометрия Природы – фундаментальный труд Бенуа Мандельброта, ставший одним из главных достижений математических и естественных наук XX века. Мандельброт неожиданно открыл универсальную гармонию там, где другие видели только хаос.

Бенуа Мандельброт родился в Варшаве, в литовской семье, в то десятилетие, когда была открыта галактическая вселенная. Его семья эмигрировала во Францию, где Шолем Мандельбройт (Szolem Mandelbrojt), младший брат отца Бенуа, был профессором математики. Дядя был членом-основателем знаменитого клуба математиков, писавших под именем «Николя Бурбаки», которые хотели представить всю математику в едином виде. У племянника тоже был талант к абстрактному мышлению, но в отличие от Бурбаки, его влекло к геометрии, которую многие в то время считали старомодной и даже «мертвой». И он помог геометрии восстать от долгой спячки.

Мандельброт вспоминает, как в юности он все время искал способы использовать свой математический дар при решении реальных конкретных проблем в природе. «Мои надежды были совершенно романтическими: быть первым среди тех, кто найдет порядок там, где все остальные видят только хаос». Карьера Мандельброта как математика тоже не шла по прямой. Он описывает ее как фрактальную орбиту.

Мандельброт говорит, что его многосторонние научные интересы были «дикой игрой», которая начала окупаться в начале 1960-х годов. Он убедился, что установил новый аспект природы. Он открыл математические объекты – фракталы, которые позволили ему изучать сложные природные явления, которые прежде считались неподдающимися трактовке. После освобождения Парижа в 1944 году, Мандельброт поступил в ведущую научную школу *École Polytechnique*. В 1952 году в Университете Парижа он защитил

докторскую диссертацию по теории связи и информации. С тех пор он изучал такие разные области, как термодинамика, экономика и геофизика. За свою длинную карьеру в фирме IBM Мандельброт стал пионером компьютерной графики. В настоящее время он профессор математики в Йельском Университете США.

Проблемки странных сущностей, связанных с фракталами, появлялись в работах более ранних выдающихся математиков. Так, Анри Пуанкаре думал, что такие объекты могут иметь место в теоретической физике (и, следовательно, где-нибудь в природе). Но только Мандельброт, в результате своих далеких экскурсий в разные области, осознал глубинную «регулярность в нерегулярном».

Бенуа Мандельброт спрашивает, почему евклидова геометрия часто производит впечатление «скучной» или «сухой». И объясняет причину. В реальной жизни есть много вещей, которые Евклид описать не может. «Облака это не сферы. Горы – не конусы. Береговые линии – не окружности. Стволы деревьев – не цилиндры, а кора не гладкая. Молнии двигаются не по прямой линии».

Ричард Бентли – это тот самый человек, который впервые увидел глубокую парадоксальность ньютоновской космологии. Его слова по поводу (только лишь) видимой неровности в природе процитированы в начале 2-ой главы книги Бенуа Мандельброта *Фрактальная Геометрия Природы*: «Любая красота относительна... Мы не должны ... думать, что ... горы бесформенны, потому что они не являются пирамидами или конусами, а звезды размещены неумело, потому что они все не расположены на одинаковом расстоянии».

И наоборот, можно задать вопрос, почему мы не устаем смотреть на похожие на пену облака, плывущие по небу, пенистые гребни волн в море или пляшущий в камине живой огонь...

Во времена Античности красивые геометрические формы помещали либо в Платоновский мир идей, либо связывали с совершенными небесными структурами или их моделями. Едва ли можно было понять иррегулярный и сложный «подлунный» мир с помощью таких понятий. Позже, когда создание математических моделей стало обычной практикой в физике и космологии, а разница между Землей и Небом размылась, даже сложные явления стали объектом моделирования с помощью простых, регулярных кирпичиков.

Так, многое в поведении газа стало хорошо понятным на основе модели идеального газа, состоящего из жестких сферических молекул, непрерывно сталкивающихся в вакууме и достигающих сос-



Рис. 6.1. Бенуа и Алиетта Мандельброт в Институте Mittag-Leffler Королевской Шведской Академии Наук в один солнечный осенний день 2001 года.

тояния равновесия, соответствующего температуре газа. Плотность идеального газа в сосуде мало отличается от его среднего значения, а вариации можно описать как флуктуации, не зависящие друг от друга. В космологии стало обычным постулировать субстрат, который является однородным на большом масштабе за исключением возможных мелких колебаний. Даже экономика кое-что взяла из простых физических моделей: изменчивость биржевых цен была истолкована как броуновское движение по аналогии с тем, как беспорядочно двигается частица в жидкости, где ее случайным образом бомбардируют окружающие молекулы.

Но более пристальный взгляд на многие физические системы, включая турбулентность, береговые линии, облака даже биржевые цены ... показывает, что их нельзя понять на основе моделей с регулярным поведением, подобных идеальному газу. В действительности, «фрактальная орбита» Мандельброта началась с экономики, когда он увидел, что беспорядочные изменения цен похожи на процесс, получаемый через самоподобие.

6.2. Понятие фрактала в математике

Понятие фрактала охватывает существенный аспект природы, на который прежде не обращали внимания – даже в ее корявых чертах есть скрытые регулярности. Оно означает также, что хаотичные на вид явления могут иметь глубокую структуру. Слово «фрактал» изобрел Мандельброт в 1975 году. Он объясняет, что оно образовано от латинского прилагательного “fractus”, происходящего от глагола «дробить на части» или создавать иррегулярные фрагменты.

Фракталы как математические сущности появились впервые в 1875 году, когда Карл Вейерштрасс (Karl Weierstrass) открыл непрерывную не дифференцируемую функцию. До этого математики думали, что все непрерывные кривые имеют касательную в каждой точке. Это было началом кризиса аналитичности: пришло понимание того, что есть математические вещи, находящиеся за пределами аналитического описания, или кривые, не имеющие касательной в каждой точке. В результате в чистой математике появились новые направления, такие как теория множеств, топология и теория размерности. Решающую роль в дальнейшем исследовании новой математики неаналитических объектов сыграл ряд математиков, среди них Пуанкаре, Кантор и Менгер.

Георг Кантор (Georg Cantor) родился в Санкт-Петербурге, но в возрасте одиннадцати лет переехал с родителями в Германию. Он был замечательным исследователем бесконечности и создал теорию множеств, которая является одним из краеугольных камней современной математики. В 1877 году он доказал удивительную теорему о том, что бесконечное число точек на отрезке одномерной линии равно (имеет однозначное соответствие) числу точек любого трехмерного куба (в действительности он работал с n -мерным пространством). Это было удивительно даже для самого Кантора, который писал: «Я понимаю это, но я не верю этому!»

Появились ужасные вещи, такие как кривая Вейерштрасса, пыль Кантора, ковер Серпинского и губка Менгера. Эти изобретения необычных неаналитических структур были восприняты математическим сообществом со страхом, и считалось, что лучше всего поместить их в «Галерею Чудовищ». Общее отношение отражено в словах Шарля Эрмита (Charles Hermite) 1893 года: «отвернуться в страхе и ужасе от этой прискорбной чумы функций без производных». Математики имели какие-то границы, которые по общепринятому мнению нельзя пересекать.

*Карл
Вейерштрасс
1815-1897*

*Георг
Кантор
1845-1918*

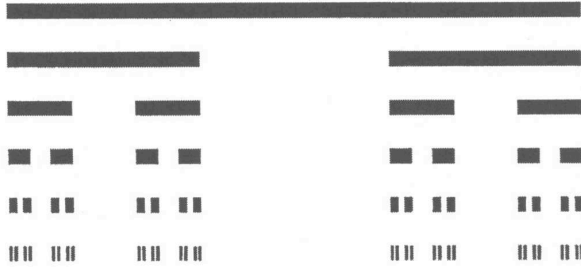


Рис. 6.2. На бесконечном пути к пыли Кантора.

Однако позже Фримэн Дайсон (Freeman Dyson) заметил, что «Природа пошутила над математиками ... Те же патологические структуры, которые математики придумали, чтобы освободиться от натурализма XIX века, оказались свойственны знакомым объектам, окружающим нас со всех сторон». Можно добавить еще один парадокс: эти отвратительные и безобразные диковины, когда-то скрытые от любопытных взглядов, производили, как и фракталы, на человеческий глаз и ум невероятно красивое и чарующее впечатление.

Фракталы, какими они являются в современной математике, имеют много аспектов. Здесь мы не будем глубоко погружаться в математику фрактальных множеств, а лучше выразим суть фракталов в следующих словах: *самоподобие, неаналитичность, иерархия, итерация, случайность, хаос, размерности и степенные законы*.

Фракталы часто определяют просто как системы, части которых похожи на целое. Изучение такой системы с помощью увеличительного стекла покажет новую структуру, которая похожа на то, что можно увидеть невооруженным глазом. Другими словами, просто по размеру какой-то части фрактальной структуры нельзя определить ее реальный размер.

Подобие – это род симметрии и одно из наиболее фундаментальных и плодотворных понятий современной науки. Красота и мощь фракталов, возможно, объясняется тем фактом, что они проливают свет на глубокие симметрии, которые показывают, как работает Природа.

Яркий пример фрактала, простой, но предлагающий обильную пищу для размышления – это кривая Коха. Если она покажется вам непонятной, то вы не одиноки: это одна из тех непрерывных кривых, которые не имеют производной ни в одной точке (она нигде не

дифференцируема), и которую математики XIX века считали отврати-

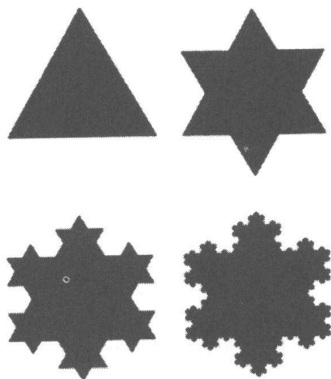


Рис. 6.3. Первые шаги в построении снежинки Коха

тельной. Хельге фон Кох (Helge von Koch), шведский математик, работавший в Стокгольме, создал свою знаменитую кривую в 1904 году, как говорит Мандельброт, «чтобы помочь другим математикам свернуть с тропинки, на которой они застряли».

Построение кривой Коха начинается с равностороннего треугольника. Делим каждую сторону на три равных отрезка и помещаем на центральный отрезок равносторонний треугольник. В результате получается «Звезда Давида». Затем продолжаем то же для каждого из 12 равных отрезков и повторяем вышеописанную операцию. И повторяем это снова и снова...

На каждом шаге длина кривой возрастает на множитель $4/3$. Это показывает, что кривая Коха имеет бесконечную длину, поскольку она образуется, когда число шагов возрастает бесконечно. В то же время она ограничивает конечную площадь! Такая кривая не может быть вполне обычной – только представьте себе бесконечно длинную тонкую нить на плоскости, которая сложным образом изгибается вокруг самой себя, чтобы произвести замкнутую конечную площадь внутри.

6.3. Фрактальная размерность

Несмотря на то, что фрактальные структуры кажутся очень сложными и могут быть очень разнообразными, у них есть одна простая характеристика, которая называется *фрактальная размерность*. Рассмотрим пыль Кантора. Она строится из интервала прямой линии посредством удаления средней трети и бесконечного повторения этой фрагментации (см. Рис. 6.2). Построение выглядит обманчиво просто, но получающееся множество имеет бесконечно богатую структуру. Можно считать, что оно состоит из такого же (бесконечного) числа точек, что и сам исходный интервал, но оно не является набором непрерывных одномерных маленьких сегментов. В то же время эта «пыль» не состоит из четко разнесенных отдельных точек нулевой размерности. Таким образом, его размерность лежит между единицей и нулем! Через год после смерти Георга Кантора немецкий математик Феликс Хаусдорф (Felix Hausdorff) ввел в математику понятие нецелой размерности, которое обобщает знакомые понятия длины, площади и объема, и теперь мы говорим о фрактальной размерности, обычно или D_f размерность Хаусдорфа. По его определению D_f размерность пыли Кантора получается примерно 0.63.

*Феликс
Хаусдорф
1868-1942*

Рассмотрим еще одну регулярную фрактальную структуру в трехмерном пространстве, которая поясняет понятие фрактальной размерности. Это губка Менгера, которая полезна, когда мы позже будем обсуждать пространственное распределение галактик. Ее создатель Карл Менгер (Karl Menger) был австрийским математиком, который эмигрировал в США в 1938 году. Более всего он известен работой над понятием размерности.

На первом шаге создания губки Менгера возьмем куб со стороной, равной единице, с единичной массой и единичной плотностью (см. Рис. 6.4). Разделим каждую грань на девять равных квадратов. На следующем шаге сделаем три отверстия через центральные квадраты граней куба. Затем повторим эту процедуру для всех остальных 20 маленьких кубов. Новая структура содержит в себе тот же объем, но масса уменьшилась на множитель $20/27$. Таким образом, эта операция привела к структуре с тем же самым кубическим контуром, но с меньшей плотностью. Можно продолжить построение губки, повторяя ту же итеративную процедуру, используя на следующем этапе новые кубы меньшего размера. Структура напоминает структуру знакомой губки для ванной, в которой все отверстия соединены. Именно это свойство делает губку такой

полезной: она поглощает много воды в свои отверстия и всю воду легко выжать.

Настоящий фрактал Менгера является результатом бесконечного числа таких шагов, и его трудно представить. Однако

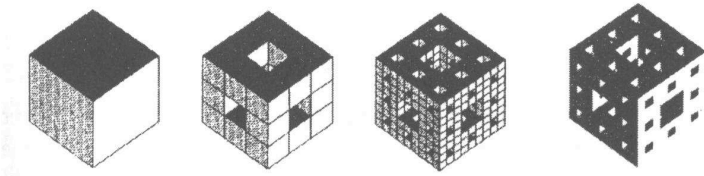


Рис. 6.4. Создание губки Менгера

если мы применим эту модель к каким-то физическим объектам, то Природа накладывает некоторое ограничение на размер самого маленького элемента, а кроме того начальный куб имеет конечный размер. Основные свойства фракталов можно увидеть внутри этих границ.

Например, остановим фрагментацию после n шагов, когда есть 20^n маленьких кубиков. Возьмем один такой элемент и очертим вокруг него сферу. Главным свойством самоподобной фрактальной структуры является то, что число элементов внутри этой сферы возрастает как степень радиуса сферы. Если наблюдатели, сидящие на точках, считают число объектов вокруг них внутри сфер разных радиусов, то они найдут простое соотношение между этим числом и радиусом:

$$\text{число элементов} = \text{константа} \times \text{радиус}^D$$

$$\text{или } N(R) = n \cdot R^D$$

Показатель степени D есть фрактальная размерность кластера. Для губки Менгера фрактальная размерность равна около 2.7. Общая формула фрактальной размерности для регулярной структуры есть

$$D = \log N / \log R .$$

Числа N и R показывают, как строится фрактал: на каждом шаге исходный элемент разбивается на N равных подэлементов, так что отношение их размеров есть число R большее 1. Число D – фрактальная размерность, вполне может быть дробным или даже вещественным числом. Для губки Менгера $N = 20$, а $R = 3$,

следовательно $D = 2.7268\dots$. Для кривой Коха $N = 4$, а $R = 3$. Значит, $D = \log 4 / \log 3 \approx 1.26$. При создании пыли Кантора каждый отрезок делится на три равных части, две из которых оставляются для дальнейшего использования, следовательно, фрактальная размерность $D = \log 2 / \log 3 \approx 0.63$

Пыль Кантора, снежинка Коха и губка Менгера иллюстрируют общую процедуру по созданию регулярного (неслучайного) фрактала: 1) исходный элемент, 2) фрагментация или соединение частей, подчиняющиеся 3) итерационному правилу, 4) самоподобие и 5) степенная зависимость число-радиус.

Для равномерно распределенных точек фрактальная размерность $D = 3$. Грубо говоря, однородное множество точек покорно очерчивает лежащее в основе знакомое пространство. Для общих фрактальных структур, помещенных в трехмерное пространство, фрактальная размерность меньше, чем три. Такая структура больше «заполняет» пространство столь же скучным образом, как равномерное распределение. Когда фрактальная размерность меньше 3, то вышеприведенная формула говорит, что плотность числа точек возрастает, когда рассматриваемый объем уменьшается. Следовательно, на все более мелком масштабе, где понадобится увеличительное стекло, увеличивающаяся плотность допускает появление «новых» точек, образуя богатые структуры там, где однородное распределение не предложило бы никаких сюрпризов.

Фрактальная размерность миров Фурнье-Шарлье. Модель мира Фурнье была фактически первой попыткой физика создать протофрактал. Для регулярных иерархических кластеров, о которых говорили Фурнье и Шарлье, фрактальная размерность получается просто по вышеприведенной формуле, в которой содержится число элементов N в кластере и отношение размера R . Фрактальная размерность есть отношение их логарифмов. Таким образом, сразу видно, что первый критерий Шарлье ($N \leq R$) означает, что фрактальная размерность такой вселенной меньше или равна единице. Этот критерий обеспечивает отсутствие парадокса Ольберса и гравитационного парадокса. Последний может проявляться в двух формах, содержащих либо бесконечные силы, либо бесконечные потенциалы. Второй критерий Шарлье ($\sqrt{N} < R$) означает фрактальную размерность меньше двух. Это решает парадокс Ольберса и сохраняет гравитационные силы конечными, но потенциал может быть

бесконечным, и, следовательно, скорость звезд намного выше, чем наблюдается.

Интересно вычислить фрактальную размерность оригинальной картинке Фурнье (Рис. 4.6). Она дает $N = 5$ и $R = 7$, значит $D = 0.83$. А если мы добавим два элемента в третьем измерении этой фигуры, тогда полученная иерархия имеет как раз критическую размерность единица!

Когда фрактальная размерность меньше двух, тогда небо не покрыто полностью звездными дисками. Здесь можно найти интересную связь с дождевыми облаками. Существует теорема о проекции фрактала в трехмерном пространстве на плоскость: если фрактальная размерность больше или равна 2, то размерность проекции в точности равна 2. На плоскости размерность 2 означает, что точки покрывают плоскость равномерно, без дыр. Типичная фрактальная размерность облаков, состоящих из капель воды, равна примерно 2.5. Таким образом, облака могут отбрасывать тени на землю без дыр.

Креативность фракталов. Понятие фрактала как бы высвободило огромную энергию для создания иерархических объектов, очень разнообразных по форме. Креативность фракталов, как называет это Мандельброт, подчеркнута уже в названии его первой книги *Фракталы: форма, случайность и размерность*. В отличие от простых иерархий, которые преподносят мало сюрпризов, фракталы открыли дверь в тайный сад, населенный бесконечным количеством форм.

Сложные фрактальные формы можно создать по удивительно простым рецептам. Самый знаменитый фрактал – множество Мандельброта – создается на комплексной плоскости простым математическим процессом (итерация $z \rightarrow z^2 + c$), которая определяет процедуру, в которой результат вычисления является входом для следующего вычисления. Начиная с одной точки на плоскости и беря разные значения c , получаем разные бесконечные ряды чисел, которые, согласно некоторому правилу, будут определять множество точек.

Граница получающегося изображения содержит бесконечно мелкие детали. Глядя на любую одну структуру через микроскоп, можно обнаружить новые очаровательные детали меньшего размера. Они являются не точными копиями, а вариациями той же темы. Множество Мандельброта назвали самым сложным объектом из когда-либо виденных. Его бесконечно богатая структура бросает

математикам вызов. Сам Мандельброт предположил, что граница его множества имеет фрактальную размерность два. Это доказал примерно в 1990 году Мицухиро Шишикура (Mitsuhiro Shishikura), математик из Киото. Множество Мандельброта нельзя было бы увидеть без компьютера, поскольку для создания даже грубого его изображения требуются миллионы вычислений.

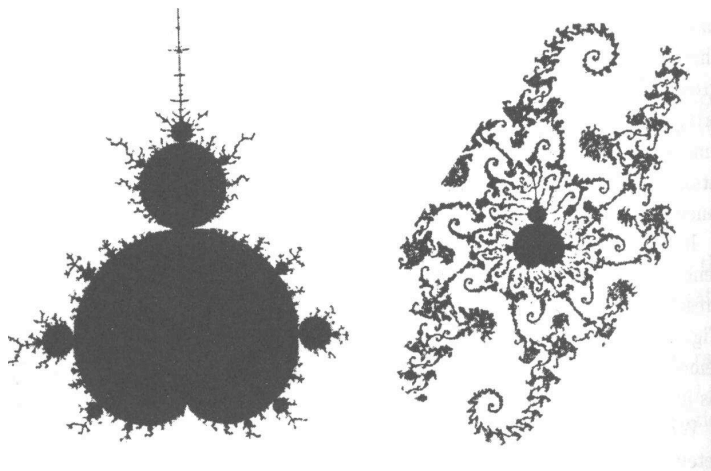


Рис. 6.5. Фрактал Мандельброта – это, по словам его первооткрывателя, «удивительная комбинация предельной простоты и потрясающей сложности». Узор справа – это сильно увеличенная крошечная деталь разбитой на бесконечное число кусочков границы левого изображения. Внутри него можно узнать исходное изображение.

6.4. Стохастические фрактальные структуры

Выше мы рассматривали регулярные фракталы, которые основываются на регулярных итерационных правилах и на точном самоподобии, т.е. подэлементы являются точными копиями элементов на предыдущем уровне иерархии. Они важны для математического изучения свойств фрактала, но, конечно, они слишком жесткие в качестве моделей для естественных процессов.

Случайные фрактальные структуры свободны от строгой регулярности. Их построение более гибко, с использованием правил итерации, которые включают случайные законы для выбора значения параметров фрагментации или соединения частей. Например, пыль

Кантора можно рандомизовать, бросая кости на каждом шаге построения, и таким образом выбирая случайно, какой отрезок линии отбросить. Важным особым примером случайной структуры является равномерное пуассоновское распределение точек. Оно имеет $D = 3$ и представляет то, что называется однородным распределением дискретных объектов в природе (молекулы, галактики...).

Хороший пример случайных фракталов предлагает знаменитое броуновское движение, названное так по имени шотландского ботаника Роберта Броуна (Robert Brown), который открыл его в 1827 году, когда смотрел через микроскоп на частицы пыльцы, плавающие в воде. Эти маленькие частицы совершали стремительные прыжки в разных случайных направлениях. Но почти век прошел, прежде чем это явление было объяснено. Частицу время от времени толкают окружающие ее молекулы. В результате частица движется хаотически.

Самым удивительным свойством броуновского движения является его самоподобие. Если взять увеличение микроскопа в десять раз больше, то снова мы увидим совершенно похожее хаотическое движение, но с прыжками, в десять раз меньше. В действительности броуновское движение «вычерчивает» фрактальную кривую!

Случайные фракталы имеют свойство статистического самоподобия. Это означает, что различные шаги равны только в среднем. Но как тогда вычислить фрактальную размерность? Обычно физики измеряют так называемую b -размерность (от “box-counting” – подсчет по ящикам). Они покрывают фрактальную структуру сетью ящиков и считают их количество, занятых какой-то частью структуры. Это повторяют для все более и более мелких ящиков. Когда наносят в логарифмической шкале число занятых ящиков по отношению к размеру ящика, то самоподобие выглядит как прямая линия, а ее наклон дает фрактальную размерность. Для броуновского движения фрактальная размерность равна двум.

Перколяция – процесс, приводящий к фракталам. При конденсации вещества могут образовываться фракталы. Полезно рассмотреть простую модель, описывающую часто встречающийся процесс, так называемую перколяцию (от латинского слова, означающего «просачиваться») – просачивание. Рассмотрим сеть или решетку с крупными ячейками. Каждый узел этой сети может быть светлым (т.е. занятым) или темным (т.е. пустым). Вероятность того, что узел светлый, равна P (меньше 1). Можно сказать, что P – это плотность яркости сети. Если существует непрерывная освещенная дорожка (или

цепочка из светлых соседних узлов) от одного края сети к противоположному краю, тогда говорят, что решетка протекает. Такой процесс происходит в кофеварке, когда вода просачивается сквозь молотый кофе.

Будем случайным образом освещать все больше и больше узлов. Наименьшая плотность яркости (вероятность), при которой бесконечная решетка протекает, называется критической плотностью и порогом просачивания (для плоской решетки это примерно 0.59). В момент порога просачивания освещенные фрактальные кластеры образуют решетку. Для решеток в трехмерном пространстве критическая фрактальная размерность очень близка к 2.

6.5. Отличие фрактальных структур от гладких распределений

Рассмотрим два примера структур, состоящих из точек в пространстве, которые помогают понять разницу между иррегулярными фракталами и гладкими регулярными структурами. Эта картинка пригодится, когда мы позже будем описывать галактическую вселенную. На левом верхнем графике Рисунка 6.6 показано распределение точек, состоящих из постоянной фоновой плотности плюс повышенная плотность в центре. Не считая мелкой зернистости, структура кажется довольно регулярной и ее можно охарактеризовать несколькими параметрами: есть хорошо заданное значение плотности фона и можно определить положение структуры (она расположена в центре), у которой есть ширина и некоторая высота (амплитуда), которую можно легко оценить. Можно определить профиль плотности, как показано на правом верхнем графике. Этот профиль хорошо аппроксимируется гладкой кривой, в данном случае, это гауссов «колокол» плюс константа. Если мы исследуем динамическую эволюцию этой структуры, учитывая взаимодействия между ее точками, то можно положиться на обычную аналитическую математику. С этой точки зрения структура в основном описывается тремя элементами: положением, размером и амплитудой. Типичным результатом такого исследования является понимание движения и деформации структуры. Это традиционный подход к изучению структур, основанный на предположении о регулярности, который безоговорочно принимался в статистической физике до появления самоорганизованных критических явлений несколько десятилетий назад.

На левом нижнем графике Рисунка 6.6 мы вместо этого показываем очень иррегулярную структуру, для которой все понятия, использованные для характеристики предыдущей структуры, теряют смысл. Фоновой плотности нет, есть структуры в нескольких зонах и на различных масштабах, но невозможно приписать им конкретный размер или амплитуду. Эта ситуация проиллюстрирована также про-

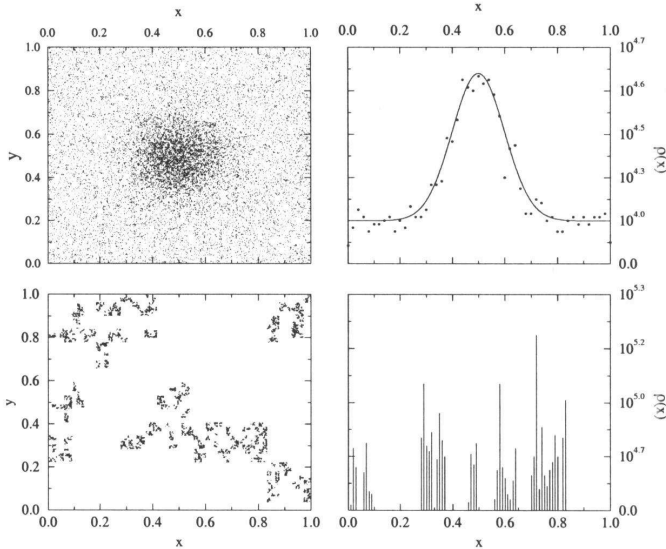


Рис. 6.6. Сравнение регулярных и фрактальных структур, представленное Франческо Силос Лабини (Francesco Sylos Labini). Вверху: простой регулярный кластер на однородном фоне и его профиль плотности; внизу: сложное фрактальное распределение точек на плоскости. В этом случае профиль плотности разный для разных выбранных масштабов, в которых вычисляется плотность.

филем плотности (внизу справа), который крайне нерегулярен на любом масштабе. Чтобы дать осмысленную характеристику свойств этой структуры, нужно посмотреть на нее с другой точки зрения. У этой структуры – простого случайного фрактала – тоже есть своя регулярность, но она скрыта в самоподобии.

Простой фрактал характеризуется одной фрактальной размерностью. Но для многих вещей в природе это слишком грубое описание. И, словно простой фрактал был недостаточно утончен для скромного воображения, которым обладает большинство из нас, сейчас мы сталкиваемся с *мультифракталом*. Мультифракталы

появились как новое понятие в 1969 году в ходе изучения Мандельбротом турбулентных явлений. Позже их применили, чтобы понять изменчивость биржевых цен и распределение положений и светимостей галактик.

Мультифрактальность является также шагом к более реалистичному природному фракталу. Например, галактики не являются математическими точками и, следовательно, они далеко не идентичны. В галактическом населении существует широкое распределение светимости и массы, а мультифрактал является математическим инструментом для изучения таких сложных систем. В случае простого фрактала мы говорим о свойствах множества точек и нам нужна только одна фрактальная размерность. В сложном случае, когда свойства фрактала могут быть разными для галактик с разными светимостями, мы, для того, чтобы охарактеризовать систему, т.е. мультифрактал, должны ввести непрерывное множество фрактальных размерностей.

6.6. Фрактальное пространство-время Ноттала

Лоран Нотталь (Laurent Nottale), французский астроном, работающий в Медонской обсерватории, высказал смелые догадки о фрактальности в высшей субстанции современной физики – самом пространстве-времени. Классически, координаты, описывающие пространство-время, считались непрерывными и дифференцируемыми. В замечательной серии статей Нотталь предположил, что это не так, и что существуют такие масштабы пространства и времени, на которых нужно учитывать недифференцируемость пространства-времени. Более того, он продемонстрировал, что *непрерывное, но недифференцируемое пространство-время с необходимостью фрактально*. Фрактальность предполагает структуры на всех масштабах или в широком диапазоне масштабов, и Нотталь обобщил принцип относительности так, что *законы природы должны быть верны в любой системе координат, независимо от ее состояний движения и масштаба*. Состояние масштаба связано с пространственным и временным разрешением, которым описывается данная физическая система. Он назвал получившуюся теорию *Теорией Масштабной Относительности*.

Хотя теория Ноттала пока развивается и еще не является широко принятой частью физики, новый формализм уже предложил

много волнующих идей и предсказаний. Это касается в частности граничных областей современной физики, т.е. мелких масштабов длины и времени (микромир, элементарные частицы), крупных пространственных масштабов (космология) и длительных масштабов времени. Предел длительных временных масштабов связан с хаотическими явлениями, в которых через некоторое время система



Рис. 6.7. Лоран Нотгаль сфотографирован во время неформальной космологической встречи, организованной Жоржем Патюрелем в апреле 2000 года в Лионской обсерватории. В теплой атмосфере французской весны, дискуссии касались различных аспектов космологии и фракталов.

скрывается в непредсказуемости, и информация о ее начальных условиях полностью теряется.

В микромире теория масштабной относительности проливает свет на квантовые явления, о которых теперь говорится, как о различных проявлениях фрактальности пространства-времени. Фактически, понимание квантовой механики (мелких пространственных и временных масштабов) было исходным мотивом теории масштабной относительности. Затем она была распространена на макроскопические хаотические явления, которые можно описать в терминах недетерминистической квантовоподобной теории, верной на очень больших временных масштабах.

Что касается астрономических наблюдений, то, возможно, самым интересным предсказанием теории масштабной

относительности Нотталь является универсальная структура всех «солнечных» систем. При помощи своего уравнения для плотности вероятности планетных орбит вокруг звезды, Нотталь, по-видимому, подошел к старой аналогии, которая усматривает подобие между нашей солнечной системой и атомом, в котором электроны вращаются вокруг ядра. Но теперь аналогия более глубокая, и подкреплена математически и физически: она исходит из предположения, что хаотические планетные орбиты на очень длительных временных масштабах имеют предпочтительные размеры, корень чего кроется во фрактальном пространстве-времени и обобщенном уравнении движения Ньютона, которое принимает вид квантового уравнения Шредингера. В одном из своих писем Нотталь отмечает: «В действительности мое заявление состоит в том, что существуют структуры – «квантования» – в фазовом пространстве..., что структуры положения хорошо известны, даже если они пока неправильно понимаются, это то, что мы называем галактиками, группами, и т.д., но что существуют также соответствующие структуры скорости, которые являются ни чем иным как ... эффектами Тиффта-Гатри-Напье (Tifft-Guthrie-Napier): но проблема состоит в том, что нынешняя космология работает только с половиной информации, и отбрасывает самую важную часть, поскольку основное квантование выражается в терминах скорости».

Как и в обычных теориях, Нотталь предполагает, что планеты образованы аккрецией планетезималей. Но орбиты этих маленьких строительных кирпичиков заполняют плоскость планет не случайным образом, а их распределение вероятности задается обобщенным уравнением Шредингера. Нотталь представил доказательство из нашей собственной и других планетных систем, что планеты, вращающиеся вокруг звезд, по-видимому, следуют предсказаниям в статистическом смысле. Предсказанное распределение орбит довольно простое и зависит только от массы центральной звезды и универсальной константы. Предпочтительный радиус орбиты пропорционален $(mass / M_{sun}) \times n^2$, где n есть целое число. Нотталь предполагает, что квантование красных смещений Тиффта (Гл.5) также можно объяснить его теорией. Упомянутая константа содержит скорость 144 км/сек, кратные и дольные единицы которой, как говорят, появляются во внегалактических системах. Формула Ноттала задает положение пиков распределения вероятности – для индивидуальных планет нет предсказания, что они точно следуют этому закону. Десятки экзопланет уже обнаружены. С увеличением

статистики от будущих открытий других внесолнечных планетных систем, будет возможно проверить, согласуется ли эта новая глубокая физическая идея с наблюдениями.

Действительно, мы вступили в эпоху, когда другие планетные системы стали объектом наблюдательного исследования. Начиная с гипотезы Сведенборга «Об универсальном солнечном и планетном хаосе и его разделении на планеты и спутники», были общие теоретические идеи, указывающие на универсальность планетных систем вокруг звезд. В 1990-ых годах их поддержали наблюдения пылевых «протопланетных» дисков вокруг молодых звезд. А в последние годы астрономы смогли если не прямо увидеть, то «почувствовать» планеты, вращающиеся вокруг их главных звезд (которые заставляют их слегка дрожать, как предсказывается законами Ньютона). По крошечным движениям звезды можно вычислить период орбиты, ее размер и массу невидимой планеты.

В своей классической книге «Вселенная, жизнь, разум», опубликованной в 1966 году, Иосиф Шкловский и Карл Саган обсуждали то, что они называли «предположением о заурядности» – идею, что то, что нас окружает, более или менее типично для других областей вселенной. Например, предположение о том, что Солнце – средняя звезда, позволяет получить реалистическую картину межзвездных расстояний, даже без современной астрофизики. Иногда рискованно использовать принцип заурядности – мы не можем с уверенностью сказать, что существуют другие цивилизации или даже простая жизнь вокруг других солнц. Единственная клетка земного организма – это такое сложное чудо, что мы просто не знаем, как далеко мы могли бы найти другую, рожденную независимо от происхождения нашей жизни (вот почему так важны все дискуссии о возможной инопланетной жизни на близком Марсе). Но, по-видимому, одно замечательное предсказание заурядности, подкрепленное нашими общими знаниями о небесных телах, оказалось правильным: планетные системы широко распространены в космосе!

6.7. Фракталы в природе и искусстве

Чудесным образом абстрактная математика всегда умудряется найти соответствие с реальными природными явлениями. Целые числа, иррациональные числа, комплексные числа, n -мерные пространства, искривленные геометрии – все эти математические

*Иосиф
Шкловский
1911-1985*

*Карл Саган
1934-1996*

понятия лежат в основе важных физических теорий. А теперь к их компании присоединились сущности, имеющие фрактальные размерности. Во избежание недоразумений необходимо различать фрактальные структуры двух категорий:

- *идеальные, математические структуры, и*
- *природные, физические структуры.*

Идеальные фракталы существуют в двух видах – регулярные и случайные. Это математические объекты с бесконечным числом элементов и итераций. Природные фракталы появляются в структурах и процессах окружающего мира и обычно занимают конечный объем с конечным числом элементов. Физические фрактальные структуры имеют минимальный и максимальный масштабы, внутри которых можно говорить о самоподобии и применять идеальные фракталы как математические модели явлений. Наиболее распространены в физике стохастические фрактальные модели.

Много красивых фракталов встречается в диффузных процессах. Знакомыми примерами является рост кристаллов и снежинок. Еще один повседневный фрактал появляется, когда сливки, наливаемые в кофе, образуют узор, который называется «тягучие пальцы». В книге «Снежинки и виды мира» (которая есть, к сожалению, только на финском языке) ее автор Раймо Лехти (Raimo Lehti) прослеживает историю изучения снежинки. Происхождение ее симметричной, с кружевным краем, фракталообразной структуры, которая демонстрирует так много вариаций на одну тему, озадачивало мыслителей, начиная от Кеплера и Декарта до Ньютона и многих других. В настоящее время это популярный пример природного фрактала. Но, конечно же, сказать так – не значит *объяснить*, почему снежинка такая, какая она есть.

Лехти указывает, что невозможно было понять снежинку, когда не было знаний о фундаментальных физических явлениях, на которых основан рост снежинки. Только после появления теории молекул воды и кристаллов льда и других – предметов рассмотрения XX века – стало можно, используя итеративные методы и фракталы, пытаться описать рождение и узоры реальных снежинок. Тем не менее, евклидова геометрия все еще активно используется, поскольку зародышем внешнего вида является регулярная симметрия невидимых молекул воды, которой достаточно, чтобы объяснить простой рост кристалла в таких идеальных условиях, когда доминирующей силой является поверхностное натяжение. Но именно рассеяние тепла

создает ячеистые, похожие на иголки фрактальные структуры в течение одного часа, пока снежинка падает с неба.

Фракталы – это мощные инструменты в физике, химии, теории вычислительных систем, географии, экономике и даже в музыке и искусстве. В последние годы ведущие журналы научных достижений *Nature* и *Science* были ареной новых дебатов о фрактальности – по вопросу, управляется ли живой мир законами, основанными на фрактальной геометрии! Хотя фракталы можно применять к столь многочисленным явлениям, следует сказать, по словам самого Мандельброта, что фракталы – не панацея. Сложные явления продолжают оставаться сложными. Но, по крайней мере, теперь у нас есть новый инструмент для изучения шероховатой поверхности реальности и измерения ее скрытого порядка.

Многие узнают о фракталах по привлекательным, непостижимо загадочным картинкам, созданным с помощью математических методов и компьютеров. Действительно, фрактальная геометрия многое говорит глазу, как и старые регулярные формы евклидовой геометрии. Простые математические формулы, определяющие фрактал, оживают, когда им придают визуальное представление. Фрактальные графики, созданные с помощью компьютеров, представляют математические фрактальные формы.

Так как художники являются профессионалами и в том, что видно в Природе, и в том, что нарисовано, можно посмотреть на их творения с фрактальной точки зрения. Природа богата фрактальностью, и не удивительно, что художник-реалист может уловить ее, как Леонардо да Винчи в его подробных изображениях турбуленции или Айвазовский в его захватывающих дух морских пейзажах. Но при более пристальном взгляде и «абстрактное» искусство, которое намеренно дистанцируется от нашего конкретного опыта, содержит элементы фрактальности, и снова это не очень неожиданно, поскольку абстрактные художники работают с геометрическими формами и цветами и экспериментируют с процессами, которые имеют свое подобие в Природе.

В самом деле, удивительно читать в сочинении студента абстрактного искусства, которое написал Жан-Кларанс Ламбер (Jean-Clarence Lambert) в 1975 году, когда современное понятие фрактала где-то только что появилось: «Кажется, что ... им [абстрактным художникам] удалось схватить на полотне что-то из самого космоса. Они показывают, хотя это и не нарисовано явно, галактики из межзвездного пространства и игривые тени красивой листвы, тонкую

игру облаков и безмолвный восход солнца в пустынном небе, покачивание камыша в реке, маленькие завихрения воды; ...» Многие из этих вещей являются примерами природных фракталов.

Джексон Поллок (Jackson Pollock) родился через два года после Василия Кандинского, русского основателя абстрактного искусства, начавшегося с его знаменитых «Композиций». Поллока считают первым спонтанным художником в абстрактном искусстве,

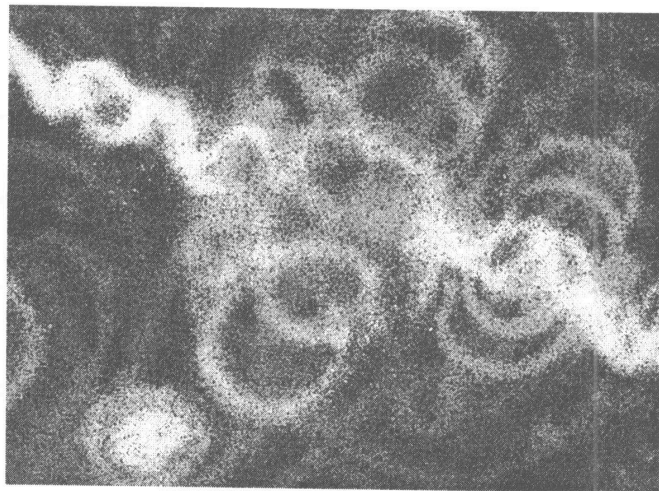


Рис. 6.8. «Танец плазмы» Стивена Гудфеллоу (Stephen Goodfellow) показывает взгляд художника на происхождение сложных структур во вселенной. Плазма, горячий намагниченный газ, естественно создает фракталы. Цветной оригинал картины находится в обсерватории Туорла.

который в своей работе использовал «случайность». Он отказался от мольберта, клал холст горизонтально на пол и позволял струе краски капать с кисти или чего-то другого на холст, пока он произвольно вокруг него двигался. Поэтому полотна Поллока состоят из пересекающихся траекторий, похожих на что-то хаотичное.

В чем секрет очарования Джексона Поллока? В 1999 году в журнале *Nature* сообщалось об интересном исследовании трех физиков. Они проделали фрактальный анализ капельной живописи Поллока, вычисляя фрактальную размерность узоров на полотне. Это было сделано с помощью метода подсчета по квадратам. Исследуемая картина (или скорее ее черно-белая фотография) покрывалась сетью одинаковых квадратов и считалось количество квадратов, в которых

была часть узора. Это было повторено для четырех разных размеров квадратов. Если бы узор Поллока состоял из простых, нефрактальных кривых, то тогда число квадратов, пересеченных кривыми, увеличивалось бы просто как $1/\text{размер}$ по мере уменьшения размера квадрата. Но это число увеличивалось быстрее, и это означает, что узор имеет фрактальную размерность.

В действительности это исследование выявило две фрактальные размерности, одну для коротких отрезков на полотне (менее нескольких сантиметров), а другую для длинных. На разных картинах для коротких отрезков размерность всегда была меньше, чем для длинных, где она могла быть почти равна 2. Так, картина *Голубые столбы*, которую Австралийская Национальная Галерея приобрела в 1973 году за сенсационную цену в 2 миллиона долларов, имеет фрактальные размерности 1.72 и 1.96. Аналитики пришли к выводу, что две фрактальные размерности отражают два типа движений, примененных в технике Поллока: движения капающей краски (дающие мелкие структуры) и его стремительные движения вокруг холста (крупные структуры). Оба процесса могут дать хаос и фрактальность своего типа узора.

Фракталы появляются на Земле поистине повсюду. Бенуа Мандельброт любит рассказывать, как в средневековом соборе его внимание привлекает архитектура, отражающая самоподобие. Иногда он может увидеть фракталы под собственными ногами, на декорированном полу церкви, иногда он поднимает глаза к росписи на стенах. Человеческий ум и рука могут создавать фракталы, но с особой мощью и тонкостью это делает всеобъемлющая Природой. И не только здесь, в подлунном мире, но и в царстве небесных тел.

6.8. Порядок и хаос в Солнечной Системе

История успеха фрактальной геометрии показывает, что это новое понятие является не только временно модным, но порождает новый уровень постижения Природы. Появилась возможность количественно изучать явления, которые до этого считались слишком сложными и иррегулярными для методов точной науки, и, следовательно, не представляющими какого-то интереса для науки. Фракталы быстро завоевывают пространство Солнечной системы, межзвездное вещество и темное массивное гало Млечного Пути.

Хаотическое поведение многих динамических систем, управляемое регулярными силами, было открыто примерно в то же время, что и фрактальная геометрия. На самом деле, фракталы и хаос тесно связаны. Иногда фракталы можно рассматривать как моментальные снимки хаотического движения, как в турбулентной воде – вечном и глубоком изображении хаоса. В общем, фракталы скрыты в математике бесконечности, описывающей хаотические системы, невидимые глазу. Новая теория хаоса стремительно развивается и находит все больше и больше применений в науке.

Две тысячи лет гармоничное движение небесных сфер служило великим проявлением строгого порядка в Природе. После того, как Коперник реконструировал планетные сферы, Кеплер открыл эллиптические орбиты, а великая идея Ньютона поставила всю физику на основу закона всемирного тяготения, и стройность движения Солнечной системы стала новым триумфом науки, стало возможным предсказывать движения небесных тел из естественных законов. В настоящее время орбитальные исследовательские спутники уверенно запускают к планетам, астероидам и кометам – их точные траектории, рассчитанные по законам Ньютона, приводят их точно к цели. Это, как кажется, подтверждает знаменитое заявление Лапласа о часовом механизме вселенной, в которой все будущее можно точно вычислить.

Однако выяснилось, что в той же Солнечной системе обнаруживаются явления, далекие от порядка – хаос, иррегулярность, непредсказуемое движение. Это неожиданное рождение хаоса из порядка развеяло мечту Лапласа. Математические исследования в области хаоса начались, когда Анри Пуанкаре поставил вопрос о стабильности Солнечной Системы. Он открыл хаос в орбитальном движении трех тел, вызываемый их взаимной силой гравитации. Точно предсказать их будущие траектории невозможно.

В своей книге *Новые методы в небесной механике*, вышедшей в 1892 году, Пуанкаре описывает сложную математику траекторий трех тел: «...эти пересечения образуют сеть, паутину или решетку с бесконечно мелкими ячейками. Ни одна из двух кривых, может быть, никогда не пересекает себя еще раз, а отклоняется от себя очень сложным образом, чтобы пересечь все ячейки решетки бесконечное число раз. ... Сложность этой формы, которую я даже не пытаюсь проиллюстрировать, должна поражать. Ничто не может дать нам лучшего представления о сложности задачи трех тел». Фактически здесь прочитывается попытка нарисовать картину фрактальной структуры странного аттрактора – когда вы приводите три частицы в

движение, практически нельзя узнать, по какой из бесконечно плотно перемешанных орбит ваша система начнет эволюционировать.

Открытие Пуанкаре было результатом нескольких лет упорной работы, которую отчасти стимулировала существенная премия, установленная королем Швеции и Норвегии Оскаром II, которую должны были дать первому, кто получит общее решение задачи n тел. Сама задача осталась нерешенной, но было добыто другое математическое сокровище... Главным инициатором этого состязания был Госта Миттаг-Леффлер (Gösta Mittag-Leffler), выдающийся шведский математик и главный редактор журнала *Acta Mathematica*. Он четыре года был профессором университета в Хельсинки, перед тем как возглавил кафедру математики в университете Стокгольма. В настоящее время в бывшей резиденции Миттага-Леффлера в Дьюрсхольме, на тихой окраине Стокгольма, размещается исследовательский институт математики, носящий его имя.

Есть запутанная история о том, как Пуанкаре выиграл состязание в 1889 году. Пуанкаре нашел ошибку в статье, которая принесла ему премию, но только после того, как он подал ее. Несколько месяцев дальнейшей интенсивной работы привели его к правильному решению. Именно это дальнейшее углубление в предмет привело его к самому открытию хаоса, которое он просмотрел в его победившем сочинении о трех телах.

Ньютон горевал (или радовался), что единственной проблемой, от которой у него когда-либо болела голова, было вычисление орбиты Луны. Действительно, наш верный спутник притягивает не только Земля, но и Солнце, делая его членом системы из трех тел. К счастью, это не самая большая неприятность – в конце концов, мы можем с полной уверенностью узнавать в календаре дату следующего полнолуния.

Наша Солнечная Система содержит намного больше трех объектов (Солнце, девять больших планет, десять их спутников, тысячи астероидов и других мелочей). Это заставляет подозревать, что вокруг нашей родной звезды должен быть какой-то хаос, непредсказуемый. Тогда где же этот хаос прячется?

Один из современных разделов небесной механики полностью посвящен исследованию хаоса в Солнечной системе. Обычно утверждают, что гравитирующая система хаотична, если орбиты первоначально довольно близко расположенных масс все больше расходятся друг от друга, так что на практике невозможно предсказать

*Госта
Миттаг-
Леффлер
1846-1927*

их положение через какое-то время. В Солнечной системе хаос проявляется в виде беспорядочных изменений орбиты, например, резко может измениться ее эллиптичность. Известно, что малые тела, такие как огромное число астероидов, населяющих астероидный пояс между орбитами Марса и Юпитера, показывают хаотическое поведение. Признаком этого является отсутствие астероидов на некоторых орбитах пояса. Эти «промежутки Кирквуда» были вымыты хаотическим изменением орбит, приводя к удлинненным траекториям, пересекающим орбиты внутренних планет. В таких беспорядочных

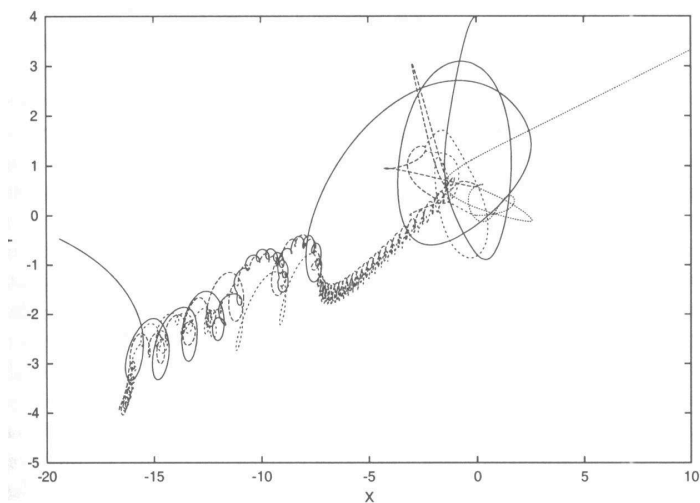


Рис. 6.11. Хаотические траектории четырех гравитирующих тел, начавших движение около точки $(0,0)$. Через несколько оборотов происходит сильное взаимодействие, которое выбрасывает одно тело вправо, а пару и одиночное тело влево. Одиночное тело присоединяется к паре, похищает из нее один спутник, и все три летят, вращаясь друг вокруг друга, дальше влево. Затем тело, которое сначала было одиночным, выбрасывается из системы трех тел, а пара вновь объединяется. Такую историю дал компьютерный эксперимент, выполненный Сеппо Микколой (Seppo Mikkola) в обсерватории Туорла. В общем случае конечные результаты таких экспериментов совершенно непредсказуемы, очень сильно зависят от исходной конфигурации и скоростей.

странствиях астероиды могут сталкиваться друг с другом, производя много мелких кусочков. Так теория хаоса объясняет метеориты, падающие на Землю.

Орбиты планет в принципе тоже хаотичны, но чтобы случилось что-то радикальное, нужно очень много времени. Например, вычисления показывают, что Меркурию за тысячу миллиардов лет может быть суждено близко столкнуться с Венерой или погрузиться в Солнце. Конечно, это будущее так далеко, что Меркурий должен больше беспокоиться о том, что Солнце начнет раздуваться в красных гигант через каких-то пять миллиардов лет.

Ядра галактик, как правило, содержат компактные сверхмассивные объекты, возможно, черные дыры, а в каких-то из них может быть даже два или три таких объекта, вращающихся друг вокруг друга. В каких-то ситуациях один или два из них могут быть выброшены в межгалактическое пространство, как предсказывает Теория Рогатки, которую создали Уильям Саслоу (William Saslow), Маури Валтонен (Mauri Valtonen) и Сверре Аарсет (Sverre Aarseth). В последние годы ее особенно развивала группа Валтонена в обсерватории Туорла в Финляндии, как альтернативный способ понять двойные радиоисточники, выбрасываемые из активных галактических ядер. Этот процесс существенно хаотичен по природе. Пример приведен на Рисунке 6.11 – только представьте себе, что «частицы» в этом эксперименте четырех тел имеют массы в миллионы солнц.

6.9. Фракталы, хаос и странные аттракторы

Математика и физика XX века открыли удивительную вещь: даже очень простые физические системы, подчиняющиеся строгим правилам, могут показывать иррегулярные, непредсказуемые движения. Как мы упоминали выше, первый пример обнаружил в физике трех гравитирующих тел Анри Пуанкаре, которого теперь называют основателем теории динамических систем.

Вообще говоря, любая система, подчиняющаяся детерминированным правилам, называется динамической системой. «Детерминированный» означает, что эволюция системы строго определяется физическими причинами и законами, действующими на ее компоненты. Совершенное знание всех этих законов и состояния системы во всех его деталях в какой-то один момент позволяет узнать – по крайней мере, в принципе – ее состояние в любое более позднее время.

Открытие хаотического поведения означает, что даже такая система может быть непредсказуемой на длительный период, хотя на короткий срок ее поведение предсказуемо. Другими словами, для

динамической системы существует «горизонт предсказуемости». Необходимым условием хаотического поведения является нелинейность системы, которая означает, что изменение в состоянии системы зависит от ее текущего состояния. Многие, если не все, реальные физические явления описываются нелинейными динамическими системами, которые являются хаотическими.

Например, $y = kx + b$ является детерминистическим законом, для которого $dy/dx = k$ не зависит от x . Но квадратичный закон $y = kx^2 + b$ нелинеен; его производная $dy/dx = 2kx$ зависит от значения x . Этот квадратичный закон является основным примером простой динамической системы, способной порождать сложное хаотическое поведение. Здесь мы можем только упомянуть, что, исследуя простой «квадратичный итератор» $x_{n+1} = ax_n(1-x_n)$, Митчел Фейгенбаум (Mitchell Feigenbaum) открыл универсальный путь от порядка к хаосу, управляемый «удвоением периода» и константой Фейгенбаума 4,6692...

В 1960-ых годах Эдвард Лоренц (Edward Lorenz), метеоролог из Массачусетского Технологического Института, открыл удивительный факт, касающийся детерминистической математической модели, используемой для длительных предсказаний погоды с помощью компьютера. Она непредсказуема! Это эпохальное открытие распахнуло дверь хаосу к регулярным динамическим системам. По сути, он обнаружил «эффект чувствительности», т.е. тот факт, что маленькая ошибка во входном сигнале распространяется с возрастающей амплитудой в конечный результат вычислений и полностью скрывает исходный истинный сигнал.

Хаотические системы характеризуются крайней чувствительностью вычислений к начальным значениям. Популярной иллюстрацией хаоса является «эффект бабочки»: если предсказатель погоды проигнорирует в своих вычислениях трепет крыльев бабочки, то его долгосрочный прогноз рано или поздно не оправдается... Если более точно, говорят, что горизонт предсказуемости прогноза погоды равен трем неделям. Дальше «бабка» из поговорки успешно соперничает с метеорологами и их суперкомпьютерами.

Нам больше нравится приведенное выше выражение об эффекте бабочки, чем то, что часто называют эффектом торнадо: взмах крыльев бабочки в Европе может вызвать торнадо в Техасе. Здесь придается слишком большое значение одному маленькому событию среди практически бесконечного числа других маленьких

событий – это «могло бы» вызвать торнадо, но вероятность предельно мала, и мы так и не узнаем, действительно ли это произошло.

Чтобы описать возможные состояния динамической системы, математики ввели понятие *аттрактора*. Это множество точек (каждая точка фактически описывает состояние системы в целом), которое система занимает за время своей полной динамической эволюции. Например, если система строго периодична, как маятник без трения или планета, вращающаяся вокруг звезды, «она притягивается» в регулярную последовательность состояний и этот «притягиватель» (аттрактор) имеет довольно простую структуру. Но если в систему добавляются подходящие силы, то ее временная эволюция может стать предельно сложной – в частности, она никогда не вернется к предыдущему состоянию (в противном случае, она все начала бы сначала и стала периодической). Ее орбита переходов из одного состояния в другое никогда не пересекает себя, а заполняет допустимое пространство сложным образом. На самом деле этот запутанный узор имеет фрактальную структуру и называется теперь хаотическим или странным аттрактором. Термин «странный аттрактор» впервые появился в 1971 году в статье «Природа турбулентности» Дэвида Руэлла (David Ruelle) и Флорис Такен (Floris Taken). «Хаос» – в современном смысле – появился через двадцать лет после открытия Лоренца, в статье Тьен-Йен Ли (Tien-Yien Li) и Джеймса Йорка (James Yorke).

Странные аттракторы и фракталы тесно связаны. Как геометрический узор странный аттрактор является фракталом, а как динамический объект он хаотичен. Можно сказать, что хаос – это процесс, а фрактал – это геометрия хаоса. Для сравнения, простая геометрия является признаком динамической системы с регулярным поведением. Например, эллиптические орбиты Кеплера соответствуют регулярному движению планеты вокруг Солнца.

Интересно, что у понятий хаоса, странных аттракторов и фракталов все еще нет окончательного математического определения, и полное математическое понимание этих объектов представляет собой вызов будущей науке.

6.10. Маятник как пример связи хаоса и фракталов

Хаос – это не только вопрос точности практических вычислений, но у него есть и существенно более глубокое значение,

связанное с фундаментальной непредсказуемостью физических систем. По причине бесконечно плотного распределения чисел на вещественной числовой оси, не существует «точного» начального значения, которое можно было бы приписать положению или скорости частицы. Следовательно, на бесконечном пути к недостижимому точному начальному значению, соответствующие конечные результаты вычислений могут сильно флуктуировать, так что не существует схождения к какому-то определенному состоянию. Тем не менее, хаос – это не просто «состояние беспорядка»: в конце концов, эволюция физической системы управляется определенными законами – частица в хаотической системе не «испытывает» ничего загадочного, а только воздействие обычных сил.

Когда система стартует из *точно* известного начального состояния, должно существовать определенное конечное состояние. В действительности в 1906-9 гг. финский математик Карл Сундман (Karl Sundman) (1873-1949) доказал *существование* общего математического решения движения трех тел. Следовательно, вычисленный конечный результат для такой системы, хотя на вид и «хаотичный», в действительности обнаруживает сложный порядок, фрактальность. По сути, определенное ощущение фрактала содержится в словах физика Джозефа Форда (Joseph Ford) о загадке хаоса: «Это парадокс, скрытый внутри загадки, покрытый тайной».

Связь между хаосом и фракталами трудно показать, не вдаваясь в математические детали, но можно проиллюстрировать простой игрушкой, которая называется сферический маятник. Маятник подвешивается так, что он может свободно качаться в любом направлении, а на конце у него металлический отвес. Прямо под ним находится квадрат из четырех магнитов, раскрашенных зеленым, красным, желтым и фиолетовым цветом. Толкните маятник немного в сторону, и пусть он качается. Какой магнит захватит отвес? Если начальная точка близка к любому магниту, тогда этот магнит, в конце концов, отвес и захватит. Однако, если маятник отпустить близко от двух перпендикулярных прямых линий, относительно которых магниты находятся симметрично в квадрантах, то финальный магнит предсказать все труднее.

Можно решить произвести повторные эксперименты, отмечая каждый раз начальное положение отвеса и цвет захватывающего магнита. Если рисовать каждое начальное положение цветом соответствующего конечного состояния, то область вокруг красного магнита будет покрыта красным цветом – отвес, который

первоначально находится близко к красному магниту всегда, в конце концов, останавливается над ним. То же справедливо для областей вокруг других магнитов – каждая будет закрашена цветом их магнита. Но вблизи от перпендикулярных граничных линий появляется довольно сложная смесь областей разного цвета. Небольшое смещение приводит вас в другой цвет, т.е. если вы держите и отпускаете маятник, его конечная остановка будет резко меняться с одного цвета на другой. А если вы будете использовать все более и более острый карандаш, чтобы отмечать начальные точки, то появляются все более и более мелкие цветовые структуры. В этих пограничных областях исход эксперимента практически непредсказуем. Там бесконечная последовательность цветовых узоров является фракталом, геометрией хаоса!

6.11. Фрактальные ландшафты планет

Луна была первым небесным телом, на которое Галилей обратил свой первый телескоп. В *Небесном Вестнике* 1610 года он описывает наблюдения, показывающие, что Луна – это не совершенно гладкая сфера, а изрезанная поверхность, с горами, впадинами и глубокими долинами, а также с обширными более гладкими областями. У изрезанности Земли обнаружился неожиданный соперник в мире небесном, мире, который всегда считался прибежищем регулярности.

На самом деле, Анаксагор, давний сторонник предположения о заурядности Земли, думал, что он видит на поверхности Луны горы и долины. На его «земное» отношение к небесным телам очень повлияло падение метеорита, он считал, что этот камень упал с небесного тела, на котором было «землетрясение». Теперь мы знаем, что испещренный вид Луны был вызван ударами тысяч больших метеоритов. Эта бомбардировка была особенно жаркой, когда молодая Солнечная Система содержала много осколков, оставшихся после аккреции планет из протопланетного диска вокруг Солнца. Для Анаксагора метеорит был важным посланием с другого небесного тела. Мы живо вспоминаем это теперь, когда считается, что двухкилограммовый ALH 84001, найденный в Антарктике в 1984 году, был выброшен с Марса около 16 миллионов лет назад в результате соударения. Около 13000 лет назад его орбита привела его к падению на Землю. Конечно, это знаменитый камень, который, возможно, несет

на себе следы прошлой марсианской жизни. А всего 200 лет назад возможность падения камней с неба горячо обсуждалась многими учеными!

Первым появлением природного фрактала в географии, до того, как были придуманы фракталы, было измерение длины береговой линии британским физиком Льюисом Ричардсоном (Lewis Richardson). Он заметил, что полная длина зависит от размера измерительной рейки, и открыл, что эта зависимость является четким степенным законом. У него не было объяснения для этого. В действительности эти измерения были опубликованы только после его смерти.

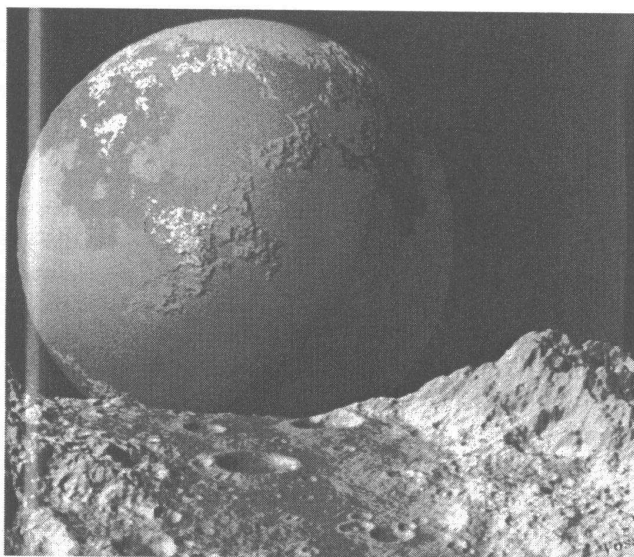


Рис. 6.9. «Сувенир из космической миссии, которой никогда не было» – так называет эту впечатляющую картинку Бенуа Мандельброт. На горизонте фрактального пейзажа, похожего на лунный, восходит неизвестная планета, с ее континентами, обозначенными береговыми линиями универсального фрактала. Существуют ли другие глаза, кроме наших, глядящие на космические фракталы, другие умы, задающиеся вопросом об их значении? Поставить этот вопрос так естественно после столь давней традиции размышлений о множественности обитаемых миров. Но только в наши дни это стало предметом научных исследований

*Льюис
Ричардсон
1881-1953*

Мандельброт поставил легендарный вопрос «Какова длина берега Британии?» и ответил, используя результат Ричардсона, что длина имеет фрактальную размерность $D = 1.25$. Наша интуиция сказала бы, что береговая линия на самом деле является линией, т.е. размерность равна единице. В действительности ее размерность больше единицы. Образно говоря, береговая линия линией больше не является, хотя она еще не лента на двумерной плоскости. После того, как Мандельброт открыл дорогу фракталам, появилось много других приложений в науках о Земле, среди них облака, горные пейзажи и турбулентные атмосферные потоки.

Льюис Ричардсон сделал намного больше, чем просто измерил береговую линию. Этот пионер численного предсказания погоды так-

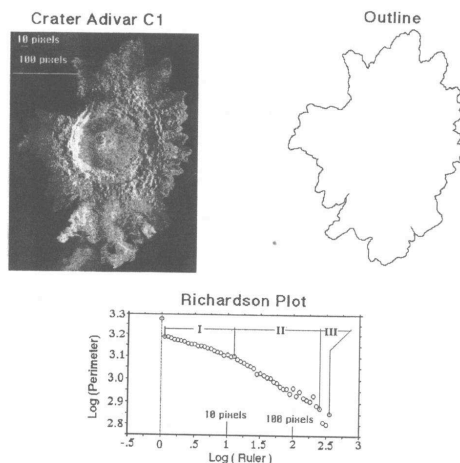


Рис. 6.10. Изображение кратера Адивар на поверхности Венеры и анализ фрактальных свойств его контура извержения (Й. Райтала, Университет Оулу).

же проложил путь теоретическим исследованиям турбулентности – опять же теме, тесно связанной с хаосом и фракталами. Турбулентность в газах и жидкостях характеризуется непредсказуемыми флуктуациями плотности и скорости в каскаде завихрений. Знаменитая линия Ричардсона уловила кое-что из сложной физики тем же образом, что рисунки «турбулентности» Леонардо да Винчи открыли нам глаза на пузырящиеся иерархии водоворотов: «Большие завитки имеют маленькие завитки, которые

питаются их скоростью; а маленькие завитки имеют еще меньшие завитки, и так далее до вязкости».

Когда разбивается твердое тело, поверхность получающегося разлома является фрактальной структурой, похожей на изрезанный горный пейзаж. И поверхности разлома, и горные пейзажи имеют фрактальную размерность около 2.3. Они больше не являются классическими поверхностями с $D = 2$, как мог бы подсказать нам наш здравый смысл. Теперь, когда известно, что изрезанность Земли подчиняется фрактальному закону, уже не удивительно слышать, что где-то еще в Солнечной Системе также обнаружили фрактальные структуры, например, в кратерах на Луне, на планетах и в кольцах Сатурна.

Контуры извержений кратеров на Венере изучала группа астрономов во главе с Йоуко Райтала (Jouko Raitala) из университета Оулу в Финляндии. Следуя классическому методу, они измерили длину контуров рейками различного размера. На рисунке 6.10 показан полученный «График Ричардсона» для огромного кратера Адивар, имеющего диаметр 31 км. Эта диаграмма показывает, как и похожие графики для других кратеров, что есть две области масштабов с различными фрактальными размерностями. На малых масштабах $D \approx 1.09$, а на больших масштабах размерность равна ≈ 1.25 . Фрактальные размерности, возможно, говорят нам о различных геологических или ударных процессах. Как фрактальная размерность является отличительным признаком Джексона Поллока в его живописи действия, так и различные процессы в Природе оставляют свою подпись в структурах, которые они порождают.

6.12. Межзвездные облака, молекулярные комплексы и области звездообразования

Было оценено, что в нашем Млечном Пути каждый год рождается около десяти новых звезд. Откуда они появляются? Между звездами имеется много газа и пыли с химическим составом, довольно похожим на состав звезд. Механизм был уже описан Ньютоном в его письме к Бентли: облака имеют тенденцию к сжатию под действием собственной гравитации.

Однако межзвездное облако устроено далеко не просто. Это смесь из газа и пыли, которая имеет температуру, может вращаться, пронизано магнитными полями, заполнена космическими лучами, и

подвергается ударным волнам, приходящим от взрывов сверхновых. У него даже есть внутренняя фрактальная структура. На сжатие в плотные облака влияют многие факторы, затрудняющие построение теоретической последовательности того, что происходит до рождения звезды. Также нелегко увидеть различные фазы эволюции. Сжатие из газового облака в молодую звезду занимает от 100 000 до 1 миллиона лет. Это слишком медленный процесс, чтобы даже поколения астрономов проследили его от начала до конца.

Тем не менее, астрономы считают, что в целом контуры рождения звезд понятны. Вначале есть гигантское облако молекулярного газа и пыли, одно из многих, окружающих диск Млечного Пути. В облаке содержатся более плотные области, стремя-



Рис. 6.12. Большая Туманность в созвездии Ориона. Это скопление газа и пыли, которое можно увидеть невооруженным глазом, является местом, где рождаются новые звезды. Видны сложные структуры, типичные для многих таких облаков в Млечном Пути.

щиеся сжаться под действием собственной гравитации. Сжимающееся облако разогревается высвобождающейся гравитационной энергией, и

звезды начинают светиться еще до того, как становятся настоящими звездами. Такая *протозвезда* является сильным источником инфракрасного излучения, поступающего от нагретой пыли, окружающей ее.

Чем настоящая звезда отличается от протозвезды? Когда температура внутри сжимающейся протозвезды достигает примерно десяти миллионов градусов, загорается новый источник энергии и предотвращает дальнейшее сжатие: главный химический элемент звезд – водород – начинает превращаться в гелий посредством реакции ядерного синтеза. Теперь можно говорить о настоящей звезде, светящейся благодаря высвобождающейся энергии синтеза, и надолго находящейся в равновесии, что мы и наблюдаем в нашем собственном Солнце.

Пример природного фрактала: межзвездные облака.

В Космологических Письмах, где Иоганн Ламберт описывал, как лента Млечного Пути навела его на мысль о гигантской солнечной системе, он также заметил, что граница его очень неравномерна, ширина на небе меняется от 3 до 25 градусов, он как бы состоит из кусочков, некоторые из которых, по-видимому, были выброшены из главного тела. Ламберт задавал вопрос, что на самом деле означает эта неравномерность – гармонию или порядок? И он пришел к выводу, что она отражает существование подсистем в Млечном Пути. Действительно, возможно, древние были не так далеки от истины, когда они назвали молочную ленту в ночном небе Космической Рекой с ее зазубренной береговой линией и водоворотами.

На фотографиях, снятых оптическими телескопами, и на картах, полученных с помощью радиотелескопов или космических инфракрасных обсерваторий, газ и пыль Млечного Пути показывают явную облачную структуру. Очень давно было принято рисовать межзвездное вещество в терминах «стандартных» облаков, размером в несколько парсеков и довольно похожих друг на друга. Теперь мы знаем, что такой упрощенной картине не хватает существенных свойств. Существенным свойством космических облаков является то, что их края очень извилисты, и когда их изучают с большим разрешением, то опять обнаруживают довольно похожие структуры. При более пристальном рассмотрении первоначально рассматриваемые стандартные облака превращаются в более мелкие комки.

Другими словами, вид межзвездных облаков напоминает фракталы, что было подтверждено детальными исследованиями,

которые в основном касались фрактальной размерности периметра облаков. Чтобы измерить эту размерность, нужно ответить на вопрос: как длина периметра зависит от наблюдаемой области облака?

Сначала нужно объяснить, что имеется в виду под периметром фрактального объекта, поскольку (вспомним снежинку Коха) действительная длина кривой может приближаться к бесконечности. Возьмем мерную рейку длиной ϵ и будем аппроксимировать контур объекта многоугольником со стороной ϵ . Тогда его «эпсилон-периметр» равен полной длине сторон многоугольника. Длина, определенная таким образом, будет зависеть от мерной рейки ϵ , как заметил Ричардсон для береговой линии.

Имеется простое соотношение между эпсилон-периметром и площадью (измеренной в единицах ϵ^2) фрактальных объектов различ-

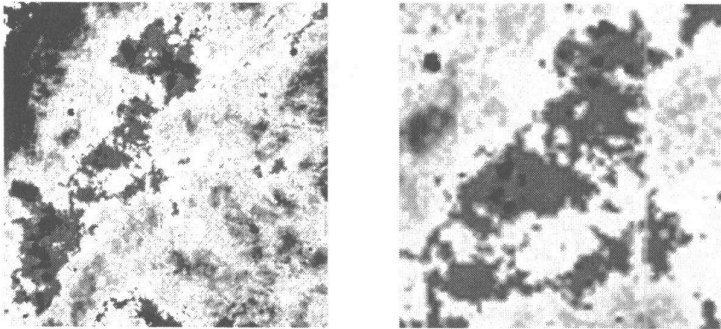


Рис. 6.13. Два изображения межзвездной пыльной среды в нашем Млечном Пути, в направлении на созвездие Тельца. Площадь левого снимка 30×30 градусов. На правом снимке, после увеличения в три раза, в небесных «береговых линиях» появляются новые детали. Снимок был получен на инфракрасном спутнике IRAS на длине волны $100 \mu\text{m}$.

ного размера:

$$\text{Периметр} = \text{константа} \times \text{площадь}^{D/2}$$

Фрактальная размерность D периметра является индикатором того, насколько сложен контур объекта. Если объект гладкий и регулярный, как, скажем, круг или квадрат, тогда $D = 1$, и площадь растет как квадрат периметра. Если периметр искривляется от нормальной линии, то его фрактальная размерность находится где-то между 1 и 2, и эпсилон-мерная рейка «обнаруживает» все более мелкие детали, когда размер фрактального объекта возрастает.

Темные облака, молекулярные комплексы, перистые волокна. По-видимому, первым астрономом, который предпринял такое исследование периметров межзвездных облаков, был канадец Мартин Бич (Martin Beech). В 1986 году он проанализировал темные, т.е. пылевые, облака, которые видны на небе, потому что они заслоняют находящиеся за ними звезды. Он обнаружил четкое соотношение между их периметрами и площадями. Оно отклоняется от того, что ожидается для регулярных краев (т.е. $D=1$), и подсказывает, что фрактальная размерность равна примерно 1.4.

После такого результата для темных облаков астрономы исследовали таким же образом другие типы межзвездных облаков, которые включали инфракрасные «перистые» облака (впервые обнару-

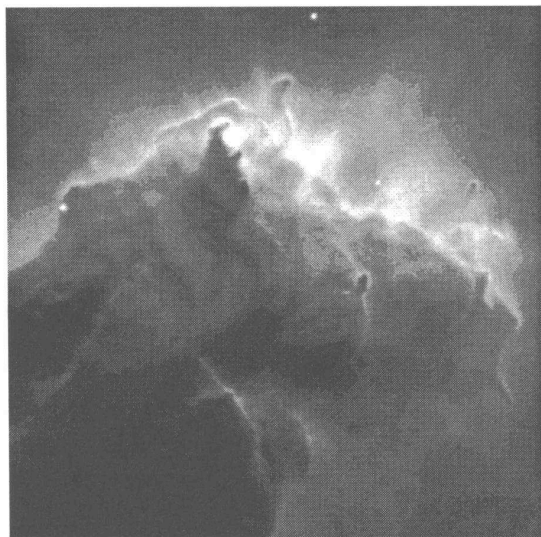


Рис. 6.14. Туманность Орел в созвездии Змеи. На этом снимке с космического телескопа им. Хаббла видны несколько глобул, содержащих эмбрионы звезд.

женные космической обсерваторией IRAS), молекулярные облака и облака водорода. Неожиданным оказалось то, что все типы облаков показали похожую фрактальность, с размерностью периметра около 1.2 – 1.4. Самоподобие наблюдается в очень широком диапазоне

размеров, от малых размеров в 0,0001 пс до больших облаков с диаметрами в 100 пс.

Межзвездные облака во многих отношениях чрезвычайно отличаются от клочков, плавающих в нашей атмосфере. Тем не менее, называть их земным словом «облако» кажется вполне подходящим, так как наши облака тоже показывают фрактальную структуру. В 1982 году Шаун Лавджой (Shaun Lovejoy), в те времена аспирант Мандельброта, измерил по картинкам с радара и спутника, что контуры дождевых облаков имеют фрактальную размерность $D \approx 1.35$, что очень похоже на их в 30 000 миллиардов раз больших родственников в межзвездном пространстве.

Эта размерность относится к периметру облаков, который измерить легко. Более фундаментальной величиной была бы фрактальная размерность самих облаков, говорящая, как они сложены из подъединиц, и как они заполняют пространство. К сожалению, астрономы не умеют составлять точные трехмерные карты пространственного расположения межзвездных облаков. Однако существует теорема фрактальной геометрии, которая может быть полезной.

Когда мы берем срез фрактального объекта с размерностью D , которая больше или равна 2, то размерность получающейся кривой равна $D - 1$. Хотя наблюдения облаков дают не такие срезы, а проекции всего облака на плоскость неба, можно предположить, что размерность D самого облака примерно равна размерности периметра плюс один. На самом деле этому есть некоторые экспериментальные доказательства. Например, Бич исследовал мятые листы бумаги – предметы, столь знакомые любому писателю. Они являются фракталами с размерностью D около 2.4. Тени, отбрасываемые такими бумажными шариками на экран, имеют контур, который характеризуется размерностью периметра ≈ 1.4 . Этот восхитительный эксперимент заставил Бича сделать вывод, что фрактальная размерность межзвездных облаков может быть равна около 2.4. Скомканный бумажный шарик является грубой картинкой облаков, которые совсем не являются однородными структурами, заполняющими пространство. Недавно Брюс Эльмегрин (Bruce Elmegreen) и Эдит Фальгарон (Edith Falgarone) показали, изучая действительные распределения размеров и масс межзвездных облаков, что их фрактальная размерность равна примерно 2.3, что согласуется с тем, что можно было угадать по контурам облаков.

Пока остается предметом догадок, почему разные типы межзвездных и даже земных облаков имеют такие похожие формы. Принято считать, что это имеет какое-то отношение к турбулентности, что опять показывает связь между хаосом и фракталами. Еще один тип модели для создания фрактальных межзвездных облаков из маленьких комков разработал Петр Тараканов из Санкт-Петербургского университета. Он рассмотрел процесс, в котором маленькие облака выбрасываются из звезд вместе со «звездным ветром» и собираются в большие структуры, которые оказываются фракталами с размерностью 2.35!

6.13. Гало галактик – фрактальность темной материи?

Напомним, что галактики окружены массивными гало из темного вещества, что обнаруживается по быстрому вращению краев спиральных галактик и по отклонению света, приходящего от более далеких объектов. Но структура и состав темных гало и даже их размер остаются загадкой.

Очень интересную фрактальную модель массивного гало галактик создали Даниель Пфеннигер (Daniel Pfenniger) из Женевской обсерватории и Франсуаза Комб (Françoise Combes) из Парижской обсерватории. Они предположили, что темное вещество, окружающее спиральные галактики, состоит из барионов в виде холодного молекулярного водорода. Конечно, это не препятствует существованию других форм небарионного вещества. Согласно их модели, холодный газ образует фрактальную структуру с размерностью $D \approx 1.6$. Мельчайшие фрагменты в этой структуре, называемые «клубпускулы», имели бы массу, сравнимую с массой Юпитера, но по размеру достигали бы Солнечной системы.

Фрактальные гало должны уплощаться, как наблюдаемые газовые диски спиральных галактик. Напомним, что согласно теории нуклеосинтеза большого взрыва, 90% барионного вещества является темным, и мы не знаем его состава. Холодный газ, кометы, астероиды и юпитеры остаются возможными кандидатами в такое темное вещество теперь, когда компактные звезды, вроде белых и коричневых карликов, были исключены экспериментами с микролинзированием.

По причине того, что газ холодный, и из-за его фрактальности, его было бы трудно обнаружить иначе, чем через его гравитационное воздействие. Фрактальность гарантирует, что большая часть газа

скрыта в маленьких компактных облаках, покрывающих небольшую часть неба.

Если эта гипотеза верна, то она приводит к новому пониманию того, как галактики образуются и эволюционируют. Например, частью этой картины является то, что темное вещество непрерывно поставляет свежий газ для образования звезд в галактиках, и то, что существует постепенная эволюция от одного галактического типа к другому ($Sc \rightarrow Sb \rightarrow Sa$). Общепринято, что различные спиральные типы определились давно, еще на их протогалактической стадии.

Недавнее космологическое компьютерное моделирование того, как образовались галактики, дает новое понимание структур массивных гало галактик, состоящих из какого-то вида холодного темного вещества. Вычисления для N тел с высоким разрешением, использующие 3 миллиона гравитирующих «частиц темного вещества», показывают, что получающиеся гало вокруг галактик настоящей эпохи построены из иерархически организованных подэле-

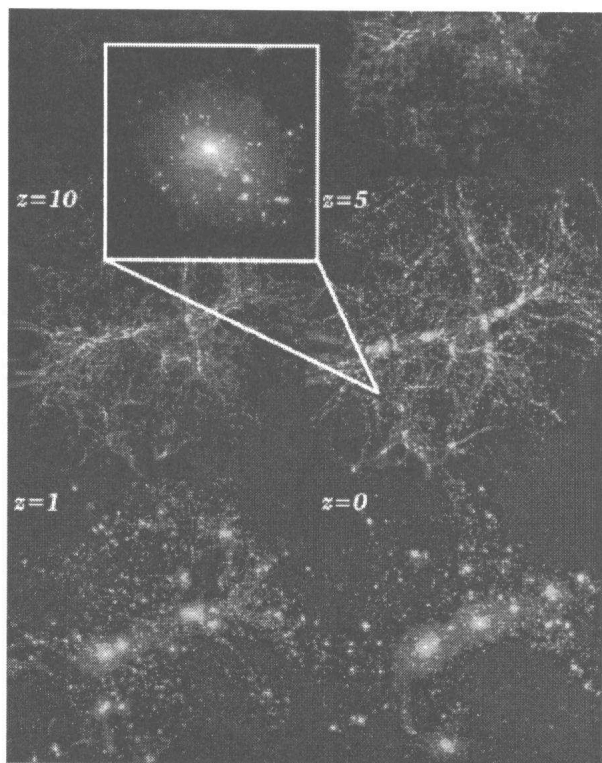


Рис. 6.15. Иерархическое образование искусственной «Локальной Группы», состоящей из двух главных галактик («млечный путь» и «андромеда»), окруженных фрактальными гало. Компьютерное моделирование для N тел с высоким разрешением, выполненное Беном Муром (Ben Moore) и др., показывает, как первичные зародыши из холодного темного вещества эволюционируют в структуры, похожие на Локальную Группу.

ментов (см. Рис. 6.15). Такие вычисления очень трудны даже для суперкомпьютеров, и невозможно было достичь иерархических уровней ниже минимальной массы в один миллион масс Солнца. Моделирование более мелких деталей темных массивных гало требует более мощных компьютеров.

6.14. Фрактальность межгалактической среды

Следующим естественным шагом было бы спросить, являются ли межгалактические газовые облака тоже фрактальными. Но перед этим желательно узнать, есть ли вообще какой-нибудь газ в пространстве между галактиками. Однако наши знания о межгалактической среде и различных ее формах пока так малы, что не идут в сравнение с богатым материалом по межзвездным облакам в нашем Млечном Пути. Тем не менее, один тип межгалактических газовых облаков обнаруживается по его признакам в спектрах очень далеких квазаров. Более 200 таких спектров, показывают так называемые абсорбционные линии нейтрального водорода Лайман-альфа, которые возникают на различных красных смещениях между нами и квазарами. Эти линии могут быть такими многочисленными и плотными в одном спектре, что говорят о «лесе Лайман-альфа». Возможно, что эти газовые облака (которые мы видим такими, какими они были миллиарды лет назад) остались после того, как образовались галактики, или какие-то из них с тех пор коллапсировали и образовали галактики.

Виталий Герасимович Горбацкий, профессор астрономии из Санкт-Петербургского университета, проанализировал, как распределены ширины спектральных линий леса Лайман-альфа. Ему удалось показать, что эти облака составлены фрактальным образом из неких элементарных «облачков», так что фрактальная размерность равна примерно 2.5. Ошибка этого определения пока велика, и очень может быть, что истинное значение несколько меньше, ближе к значению для межзвездных и атмосферных облаков.

Наша Галактика полна явлениями, которые показывают и строгий порядок, и бурлящий хаос, и сложные фракталы. Солнечная и другие планетные системы являются прототипами порядка, но они также генераторы хаоса, особенно среди роя их малых обитателей. Пространство между звездами – это океан газа и пыли, из которых рождаются звезды и их планеты, а когда они умирают, то обогащают его элементами, произведенными за время их жизни. Острова плотных молекулярных облаков, коконы будущих звездных ядерных реакторов, сами являются «химическими заводами», где образуются сложные молекулы. Это происходит при условии, когда турбулентность, самогравитация и иерархическая фрагментация действуют слаженно.

А теперь пойдём дальше, оставив позади бурный Млечный Путь, с его миллиардами звезд, в спокойной глубине

внегалактического мира с его мириадами галактик. Оказывается, галактики тоже образуют скопления...

Глава 7

Релятивистская и квантовая физика

7.1. Гамов-Иваненко-Ландау о классификации физических теорий

Физика XX века радикально изменила наш взгляд на космос. Неожиданные лабораторные эксперименты и открытия в обсерваториях завели классическую физику в тупик. Сбивающая с толку скорость света, которая всегда одна и та же во всех инерциальных системах отсчета, дискретные спектральные линии светящихся газов и непонятные лишние сорок секунд дуги в движении Меркурия окончательно преобразили физику. Появились новые теории, странные концепции, такие как относительность, кванты, кипящий вакуум, искривленное пространство...

Дорога от ясной на вид, но слишком простой механической вселенной Лапласа к странному, но более близкому к истине квантово-релятивистскому миру пролегла через парадоксы к новым понятиям, которые трудны для человеческого воображения. Глубочайшие потрясения произошли с микромиром и классическим понятием частицы. Фундаментальные физические силы теперь понимают как процессы обмена «носителями силы» - квантами поля. Взаимодействия между этими силами являются причиной многообразных материальных структур, которые мы видим в разных условиях плазмы, газа, жидкости и твердого вещества.

В 1927 году молодые российские физики Гамов, Иваненко и Ландау в статье «Мировые постоянные и предельный переход», опубликованной в Журнале Российского Физико-Химического Общества, по существу построили план развития физики на 100 лет вперед. Они предложили классификацию физических теорий на основе комбинаций трех фундаментальных постоянных G , h , c , составляющих планковскую систему единиц. Фактически это то, что теперь называется «кубом физических теорий» и является самым простым и эффективным способом обозреть главные достижения физики 20 века и понять цель физики 21 века.

Идея классификации Гамова-Иваненко-Ландау основана на рассмотрении предельного перехода, когда три фундаментальные постоянные G , h , и $1/c$ поочередно устремляются к нулю. Тогда каждая фундаментальная теория характеризуется своим набором фундаментальных постоянных.

Классическая механика Ньютона соответствует случаю, когда $G=0$, $h=0$ и $1/c=0$. Например, выражение для силы $F = ma$ не содержит фундаментальных постоянных.

Теория гравитации Ньютона или G-теория соответствует случаю $h=0$, $1/c=0$. Примером является закон всемирного тяготения в виде $F=GmM/R^2$, где существенную роль играет постоянная тяготения G .

Специальная теория относительности или c-теория получается в пределе, когда $G=0$, $h=0$. В этом случае в релятивистские формулы входит одна фундаментальная постоянная c - скорость света в вакууме. Например, знаменитое выражение для энергии соответствующей массе покоя частицы $E = mc^2$.

Квантовая механика или h-теория соответствует пределу $G=0$, $1/c = 0$, когда в формулы входит одна фундаментальная постоянная h - постоянная Планка. Примером является соотношение неопределенности $\Delta p \Delta x > h$.

Нерелятивистская квантовая гравитация или Gh-теория в случае предельного перехода $1/c = 0$. Удивительным образом эта теория остается неразработанной в современной физике, хотя первые эксперименты по квантованию свободного падения нейтронов уже проводятся.

Релятивистская квантовая теория поля или hc-теория в пределе $G=0$. Примером является выражение для комптоновской длины волны электрона $\lambda = h / mc$ или для постоянной тонкой структуры $\alpha = e^2 / hc$.

Релятивистская теория гравитации или Gc-теория соответствует случаю $h=0$. Примерами являются общая теория относительности Эйнштейна и полевая теория гравитации Тирринга-Фейнмана. В выражение для гравитационного радиуса тела $R = GM / c^2$ входят две фундаментальные постоянные G и c .

Релятивистская квантовая теория гравитации или Ghc-теория, когда все три константы входят в формулы, описывающие физические явления. Эта теория еще не построена и является целью современной физики.

Рассмотрим историю становления основных идей некоторых из этих теорий, которые сыграли важную роль в космологической физике 20-го века.

7.2. Скорость света и ее свойства

В теории относительности главнейшую роль играет фундаментальная константа природы – скорость света в вакууме. Это максимальная скорость распространения любого воздействия или информации. И она имеет одно и то же значение для любого наблюдателя, независимо от движения:

$$c = 299\,792.5 \text{ км/сек}$$

Для всех типов взаимодействий $v \leq c$. В своей статье 1905 года Пуанкаре подчеркивал, что и гравитационное воздействие должно распространяться со скоростью света: частицы света (фотоны) и частицы гравитации (гравитоны) движутся со скоростью $v = c$.

Скорость света огромна по сравнению со знакомыми движениями на Земле. Она была впервые измерена в космических условиях, где даже свету нужно заметное время, чтобы преодолеть большие расстояния. Работавший в Парижской обсерватории датский астроном Оле Ремер (Ole Rømer) изучал ближайший спутник Юпитера Ио в качестве часов, которые можно было использовать на море для определения географической долготы, как предлагал Галилей. Но этот хронометр оказался не таким точным, как ожидалось. Иногда он спешил, иногда отставал.

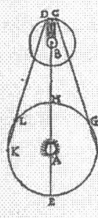
*Оле Ремер
1644-1710*

Ремер был уверен, что это колебание примерно в 22 минуты вызвано ограниченной скоростью света. В 1676 году он опубликовал доклад, который, в сущности, был первым измерением скорости света. Фактически в его докладе не было явного вычисления этой скорости, это было скорее описание того, как он определил видимое колебание в движении Ио, и в нем была выражена убежденность, что причиной является ограниченная скорость света. Вариация в 22 минуты – это время, за которое свет пересекает орбиту Земли. В современных единицах это соответствовало бы скорости около 227 000 км/сек (ошибка вызвана трудностями измерения времени движения Ио).

Этот вывод не вызвал энтузиазма, так как общепринято считалось, что лучи света двигаются мгновенно – исключением являл-

DEMONSTRATION TOUCHANT LE mouvement de la lumiere trouvé par M. Römer de l'Academie Royale des Sciences.

Il y a long-temps que les Philosophes sont en peine de décider par quelque experience, si l'action de la lumiere se porte dans un instant à quelque distance que ce soit, ou si elle demande du temps. Mr Römer de l'Academie Royale des Sciences s'est avisé d'un-moyen tiré des observations du premier satellite de Jupiter, par lequel il démontre que pour une distance d'environ 1000 lieues, telle qu'est à peu près la grandeur du diamètre de la terre, la lumiere n'a pas besoin d'une seconde de temps.



Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier Satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour en sortir en D, & soit E F G H K L la Terre placée à diverses distances de Jupiter.

Or supposé que la terre estant en L vers la seconde Quadrature de Jupiter, ait veu le premier Satellite, lors de son émerision de l'ombre en D; & qu'en suite environ 42. heures & demie a.

Terre, il s'enfuit que si pour la valeur de chaque diamètre de la Terre, il falloit une seconde de temps, la lumiere employeroit 3; min. pour chacun des intervalles GF, KL, ce qui causeroit une différécce de près d'un demy quart d'heure entre deux revolutions du premier Satellite, dont l'une seroit est observée en FG, & l'autre en KL, au lieu qu'on n'y remarque aucune difference sensible.

Il ne s'enfuit pas pourtant que la lumiere ne demande aucun temps : car apres avoir examiné la chose de plus près, il a trouvé que ce qui n'étoit pas sensible en deux revolutions, devenoit tres-considerable à l'égard de plusieurs prises ensemble, & que par exemple 40 revolutions observées du costé F, estoient sensiblement plus courtes, que 40. autres observées de l'autre côté en quelque endroit du Zodiaque que Jupiter se soit rencontré; & ce à raison de 12. pour tout l'intervalle H E, qui est le double de eclay qu'il y a d'icy au soleil.

La necessité de cette nouvelle Equation du retardement de la lumiere, est établie par toutes les observations qui ont été faites à l'Academie Royale, & à l'Observatoire depuis 8. ans, & nouvellement elle a été confirmée par l'Encretion du premier Satellite observée à Paris le 9. Novembre dernier à 7. h. 35. 45. du soir, 10. minutes plus tard

Рис. 7.1. Отрывок доклада Оле Ремера во Французскую Академию, в котором он сообщал об обнаружении большой, но ограниченной скорости света.

ся Ньютон, который в своей книге Principia десять лет спустя заявил, что скорость света ограничена, как было измерено астрономами. В Париже ситуация осложнялась тем, что руководитель Ремера Дживанни Кассини (Giovanni Cassini) ранее предложил похожую интерпретацию особенностей Ио, но отказался от нее, видимо, посчитав слишком умозрительной. Его молодой коллега дал этому объяснению крылья и поднял его на уровень проверяемой научной гипотезы. Доклад Ремера был опубликован после успешного предсказания, что затмение Ио произойдет на 10 минут позже. Это великое наблюдение было и космологическим – эффект возникает из-за движения Земли по орбите вокруг Солнца.

7.3. Теория относительности Пуанкаре-Эйнштейна

На заре XX века несколько блестящих умов осознали, что существует разница между знакомой физикой медленно движущихся тел и физикой на очень высоких скоростях. В работах Пуанкаре и Эйнштейна была развита новая теория, которая объединила

простран-

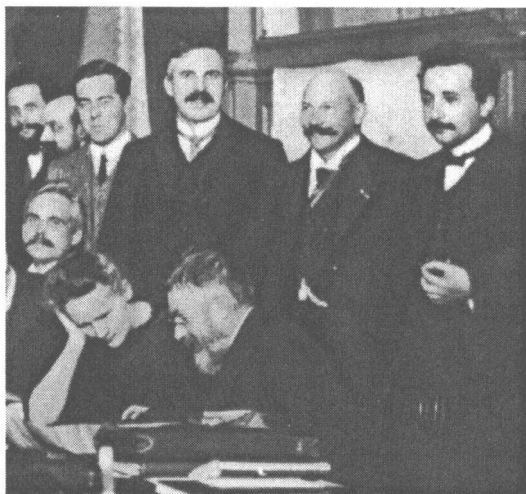


Рис. 7.2. Основатели новой физики на Сольвеевской конференции в 1911 году. За столом рядом с Анри Пуанкаре сидит Мария Кюри. За ними стоит Альберт Эйнштейн и, слева от него, Джеймс Джинс и Эрнест Резерфорд (фрагмент фотографии конференции).

ство и время в пространство-время.

Анри Пуанкаре (Henri Poincaré) ввел в физику Принцип Относительности. В лекции, прочитанной в 1904 году в Сен-Луисе и озаглавленной «Принципы математической физики», он подчеркнул необходимость основывать физику на

*Анри
Пуанкаре
1854-1912*

«принципе относительности, согласно которому законы физических явлений должны быть одинаковыми и для неподвижного наблюдателя, и для наблюдателя, равномерно движущегося мимо него; так что у нас нет и не может быть никаких способов узнать, совершаем мы такое перемещение или нет», и развивать

«совершенно новую механику, главной особенностью которой был бы факт, что никакая скорость не может превышать скорость света ... данный наблюдатель использует не те часы, что у неподвижного наблюдателя, а в действительности часы, которые показывают «местное время».

Таким образом, принцип относительности движения, предельность скорости света и отличие хода времени покоящихся и движущихся часов были ясно сформулированы Пуанкаре в его работах.

Пуанкаре говорил, что кризис старой физики произошел тогда, когда физики начали проводить точные измерения в новых условиях. Его вдохновила попытка Альберта Майкельсона (Albert Michelson) и Эдварда Морли (Edward Morley) в 1887 году измерить скорость Земли относительно эфира (мы движемся по орбите вокруг Солнца со скоростью 30 км/сек). Физики предположили, что существует уникальная система координат, называемая эфиром, относительно которой скорость света имеет свое измеренное значение. Классическая физика гласит, что в этом случае можно измерить нашу скорость относительно эфира. Но Майкельсон и Морли показали, что это не так.

Принцип относительности означает, что если опыт проводится в закрытой комнате, мы не можем определить, находится ли эта комната в состоянии покоя или движется с равномерной скоростью в каком-то направлении. Это было ясно еще Галилею, но Пуанкаре имел в виду не только механические тесты, вроде падения мяча, но и электромагнитные явления. Эта глубокая идея, которая вдохновила и Эйнштейна, освободила физику, так сказать, от пут абсолютного пространства и времени и открыла дорогу для новых очень плодотворных теорий физической реальности. В этом можно усмотреть аналогию с принципом отсутствия центра, который сделал все точки вселенной эквивалентными и привел к современной космологии.

В 1905 году Анри Пуанкаре подал в печать две статьи: одну, датированную 5 июня, в журнал *Comptes Rendues de l'Academie des Sciences* (Доклады французской Академии Наук), а вторую, датированную 23 июля, в журнал *Rendiconti del Circolo Matematica di Palermo* (Доклады математического общества Палермо) под общим заглавием «О динамике электрона». В этих работах он дал полную математическую формулировку новой релятивистской механики и использовал четырехмерное пространство-время, называемое теперь пространством Минковского. Для нового свойства физической реальности, связывающего пространство и время в единое пространство-время, он предложил новое название *лоренц-инвариантность*.

Альберт
Майкельсон
1852-1931

Альберт
Эйнштейн
1879-1955

В то же лето, 30 июня Альберт Эйнштейн, тогда молодой неизвестный физик, подал в печать в журнал *Annalen der Physik* (Анналы физики) свою статью «Об электродинамике движущихся тел». В этой знаменитой работе он также пришел, хотя и другим путем, к физическим основам новой механики и ясно заявил, что эфир больше не нужен. Способ представления Эйнштейна получил больше внимания среди физиков, и обычно говорят о Специальной теории относительности Эйнштейна. Удивительно, как эти два великих физика одновременно пришли к новым идеям о пространстве и времени – опытный Пуанкаре, который работал во всех областях физики и математики, и новичок Эйнштейн, чье имя станет символом науки XX века.

7.4. Свойства релятивистского пространства-времени

В XVII веке Рене Декарт осознал, что физику следует основывать на инерциальном движении. Понятие об инерциальной системе координат возникает из замечательного свойства свободной частицы: она сохраняет свое равномерное движение по прямой линии. «Свободная» означает отсутствие силы или точную компенсацию всех сил. «Совершенное» круговое движение не является свободным, и старые попытки основать научную механику на круговом движении были обречены на неудачу.

Динамика – это наука о силах, в ней требуется равномерно движущаяся сцена, относительно которой видно, что происходит, когда силы отсутствуют и когда они действуют. Это инерциальная система координат. Можно играть в бильярд и на земле, и в самолете, если самолет летит прямо и с постоянной скоростью. Однако игра будет испорчена, если пилот сделает резкий поворот, и система отсчета игры уже не будет инерциальной. Принцип относительности означает, что во всех инерциальных системах отсчета физические законы одни и те же и нельзя выбрать какую-то одну систему в качестве единственно истинной.

В физике Ньютона пространство, время и частицы определяли простую модель для понимания физической реальности. Пространство было Евклидовым. Время текло равномерно. Пространство и время неизменны при измерении твердыми линейками и надежными хронометрами, движущимися в каждой инерциальной системе отсчета. Такая модель пространства и времени, в которой оба элемента имеют

своего рода абсолютную реальность, является хорошей сценой для явлений, происходящих во многих физических экспериментах и в нашей повседневной жизни. Этот взгляд преобладал в физике до появления теории относительности.

Абсолютное пространство и время исчезли, но нас не бросили свободными и дикими в пустоте. Теория относительности определяет единую концепцию пространства-времени вместо отдельных ньютоновских пространства и времени. В повседневной жизни, где скорости намного меньше, чем скорость света, естественно разделять взгляд Ньютона. Действительно, скорость самолета в 300 м/сек – очень мала, всего одна миллионная доля скорости света!

Мир Ньютона тоже можно считать пространством-временем. Но релятивистское пространство-время другое: например, частица не может повсюду свободно странствовать в пространстве и времени, потому что ее скорость не превышает c . Нельзя произвольно изменить расстояние (в пространстве) до частицы за произвольный интервал (во времени). Барьер скорости отражает тонкую связь между пространством и временем – это упомянутая выше инвариантность Лоренца.

Для дальнейшего понимания пространства-времени, напомним, что скорость света неизменна при измерении любым наблюдателем: человек, находящийся в состоянии покоя относительно горящей лампы измеряет ту же скорость света, излучаемого лампой, что и другой человек, который с высокой скоростью удаляется от лампы. Луч света проходит мимо каждого из них с одной и той же скоростью. Если пространство и время не зависят друг от друга, это непостижимо. Вывод теории относительности состоит в том, что измерения пространства (расстояния) и времени взаимосвязаны.

Одним из основателей пространства-времени был Герман Минковский, который родился в России, а позже преподавал математику в Цюрихе (Эйнштейн был одним из его учеников). В 1902 году он принял кафедру в университете Геттингена. В своей знаменитой лекции 1908 года Минковский объявил, что «отныне пространство само по себе и время само по себе обречены исчезнуть во мгле и только некое объединение обоих сохранит за собой независимую реальность». Только такое объединенное пространство и время позволяют понять эксперименты, которые физики выполняют каждый день. Даже ваш домашний телевизор сделан согласно требованиям теории относительности: электроны луча, рисующего изображения, перемещаются почти со скоростью света.

Путешествие в будущее с билетом в один конец. Одним из знаменитых свойств нового пространства-времени является то, что у наблюдателей, движущихся с разными скоростями относительно неподвижного в рассматриваемой системе отсчета наблюдателя, часы будут показывать разное время. Часы, которые несет двигающийся человек, измеряют более короткое время между двумя событиями, чем такие же часы, которые держит неподвижный наблюдатель. Это замедление времени, которое экспериментально проверено в случае времени жизни нестабильных частиц, движущихся с разными скоростями, позволяет мечтать о своего рода путешествии во времени.

Представьте, что вы совершите путешествие с высокой скоростью на близкую звезду. Когда вы возвращаетесь обратно, ваши часы, календарь и седые волосы говорят, что путешествие заняло, скажем, 20 лет. Однако на Земле с вашего отъезда прошло 25 лет, и ваш брат-близнец отметил на 5 дней рождений больше, чем вы на борту ракеты. В этом смысле теория относительности делает возможным путешествие в будущее, вернее, замедляет ваше время относительно времени, отсчитываемого на Земле.

Парадокс близнецов появился, когда заметили, что путешествующий в пространстве может считать, что он находится в покое, а Земля удаляется с высокой скоростью (или приближается при возвращении домой). Следовательно, относительно близнеца на ракете, близнец на Земле движется и должен стареть медленнее, чем астронавт, что совершенно противоречит первому выводу! Решение этой загадки обычно основано на том наблюдении, что, в конечном счете, люди делают не одно и то же. Астронавт делает поворот на 180 градусов, а его брат на Земле остается в покое.

Энергия массы покоя: $E = mc^2$. Эта формула Эйнштейна, связывающая энергию и массу материального тела, стала знакомым, впечатляющим и даже загадочным символом науки. Она дает максимальную энергию, которую можно извлечь из тела, находящегося в состоянии покоя. Так как квадрат скорости света очень велик, то и энергия огромна. Энергия одного грамма любого вещества могла бы обогревать дом в холодную северную погоду тысячу лет. В повседневной жизни с ее неторопливым движением и слабыми силами эта энергия находится в скрытом состоянии в массе покоя и не проявляется.

Энергию массы покоя можно извлечь только в условиях, когда взаимодействия между частицами очень сильны. Например, в ядерном

оружии и, что более приятно, внутри Солнца, высвобождается часть (в действительности меньше 1 процента) Эйнштейновской энергии.

Теория относительности делит все частицы в природе на два класса в зависимости от того, является их масса покоя нулевой или нет. Безмассовые частицы всегда движутся со скоростью света и их нельзя остановить. Примером является сам свет – фотон. Другой класс частиц, с ненулевой массой покоя, может только “мечтать” о скорости света. Когда скорость такого кусочка вещества заставляют приближаться к скорости света, его полная энергия возрастает до бесконечности, и достигнуть барьера скорости невозможно.

7.5. Свет, электричество и магнетизм

Свет окружает нас везде. Он льется от Солнца, от костра в лесу и от светлячков летней ночью. Даже в темноте все предметы светятся в инфракрасном свете. Как говорит само название, он светлый, легкий, на строгом физическом языке свет не имеет массы покоя. Отмеряя своей постоянной скоростью пространство-время, свет является релятивистским явлением, которое мы можем видеть собственными глазами. Из глубин теории относительности возникают другие вещи, которых на первых взгляд нельзя заподозрить в том, что они являются близкими родственниками света. Это электричество – древний «эффект янтаря» и магнетизм, также известный с древних времен.

Слова «электричество» и «электрон» происходят от греческого слова, означающего янтарь, который притягивает кусочки бумаги, если потереть его о мех. Формула для силы Кулона между двумя зарядами Q_1 и Q_2 равна $F_{el} = Q_1 Q_2 / r^2$. Она удивительно похожа на закон гравитации Ньютона $F_N = GmM/r^2$. Кроме того, оба взаимодействия распространяются со скоростью света. По объяснениям современной физики эти факты вызваны тем, что носители обеих сил имеют нулевую массу покоя.

В 1785 году Шарль Кулон (Charles Coulomb) открыл, что сила электричества, как и гравитация, подчиняется «закону обратных квадратов». Сила между двумя заряженными частицами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Долгое время догадывались, что между электричеством и магнетизмом существует связь. А в 1820 году Ганс Эрстед (Hans Ørsted) открыл, что электрический ток (движущиеся заряды) порождает магнитное поле.

Шарль Кулон
1736-1806

Ганс Эрстед
1770-1851

Майкл Фарадей
1791-1867

Концепция поля для описания сил возникла в физике, когда Майкл Фарадей (Michael Faraday) ввел понятие силовых линий и в своих экспериментах сделал магнитное поле видимым. Поле выполняет важную функцию: оно переносит силу сквозь пространство, заменяя загадочное дальнее действие.

*Джеймс
Максвелл
1831-1879*

А в 1865 году Джеймс Максвелл (James Maxwell) сжал все эмпирические знания об электричестве и магнетизме в короткие математические законы. Он объединил электрические и магнитные явления в одну физическую общность – электромагнитное поле. Теория Максвелла включает также и свет, который является электромагнитной волной, распространяющейся с предельной скоростью. Свет можно представить как очень близкие пульсации электромагнитного поля. Это поле есть материальный агент, который переносит энергию и момент от одного тела к другому телу, обеспечивая «близкое действие», т.е. осуществление взаимодействия в точке нахождения тела.

Любопытно, что первой релятивистской теорией был электромагнетизм Максвелла – он был создан задолго до самой теории относительности! Действительно, изобретая свои знаменитые уравнения, Максвелл не знал, что в них скрыто сокровище: теория относительности. Теперь мы понимаем, что так и должно было быть, потому что электромагнетизм и свет – релятивистские явления. Только в 1887 году Вольдемар Фогт (Woldemar Voigt) и позже Хендрик Лоренц (Hendrik Lorentz) осознали, что уравнения Максвелла имеют свойства симметрии, отличные от уравнений Ньютона, образуя, таким образом, основу для теории относительности. В настоящее время любой студент-физик свободно обращается с тем, что называется преобразованиями Лоренца в теории относительности.

*Вольдемар
Фогт
1850-1919*

*Хендрик
Лоренц
1853-1928*

7.6. Принцип наименьшего действия, симметрии и законы сохранения

Классические законы движения можно вывести из одного универсального принципа, называемого принципом наименьшего действия. Действие – это величина, которая характеризует, сколько работы может совершить физическая система за какой-то интервал времени. Замечательное свойство этой теории, которая так хорошо описывает мир, состоит в том, что частица всегда «выбирает» такой путь, для которого действие минимально. Система развивается таким

образом, что потребление энергии и времени самое экономное. «Природа ничего не делает зря» – всегда говорили во времена античности. Принцип наименьшего действия так глубоко укоренен в природе, что он также остался краеугольным камнем релятивистской и квантовой физики.

Эмми Нетер
1882-1935

Симметрия пространства и времени является простым, но глубоким свойством природы. В 1918 году Эмми Нетер (Emmy Noether) доказала, что законы сохранения являются прямым следствием симметрии пространства и времени. В доказательстве этой теоремы она исследовала величину действия. Инвариантность действия при перемещении физической системы в пространстве и времени является самой сердцевиной законов сохранения. Это было одним из величайших достижений физики XX века.

Сохранение энергии соответствует однородности времени (любой момент времени так же хорош, как любой другой), а сохранение импульса и момента вращения связано с однородностью и изотропностью пространства (любое место и направление так же хороши, как и все остальные). Изотропия и однородность являются основными свойствами симметрии Евклидова пространства. Изотропия означает симметрию во всех направлениях: вращение вокруг любой фиксированной точки ничего не изменяет. Однородность – это симметрия всех точек: перемещение из одной точки в другую ничего не изменяют. Если пространство и время рассматривать отдельно, то в специальной теории относительности у них те же свойства симметрии, что и в классической динамике. Изотропия и однородность гарантируют сохранение энергии E и импульса \mathbf{p} , а те объединены в одну четырехмерную сущность – вектор энергии-импульса $\mathbf{P} = (E, \mathbf{p})$. Теорема Нетер содержит даже еще более глубокие вещи: плоское пространство Минковского является причиной сохранения тензора энергии-импульса T^{ik} физической системы.

7.7. Постоянная Планка и квантовая физика

Эйнштейн считал XVII век счастливым детством науки, а другие говорили, что в XIX веке наука, наконец, достигла совершеннолетия. В оптимистичную эпоху паровозов и электрического света казалось, что все явления материального мира можно понять на основе классических частиц, перемещающихся в

абсолютном пространстве и взаимодействующих посредством гравитации и электромагнетизма. Мир казался человеку совершенно понятным.

Однако на горизонте виднелись «два темных облака». Одно из них – то, что эксперименты по обнаружению эфира провалились. Это привело к теории относительности. Второе – это отсутствие объяснения теплового излучения от нагретых тел, так называемое чернотельное излучение. Теоретически излучение должно увеличиваться на коротких длинах волн («ультрафиолетовая катастрофа»), когда на самом деле интенсивность падает после некоторого максимума.

Макс Планк
1858-1947

В 1900 году Макс Планк (Max Planck) объявил, что излучение нагретых тел можно объяснить концепцией дискретных энергетических состояний, или *квантов*. Энергия является не континуумом, который можно разделить на произвольно тонкие слои. Скорее, она обладает зернистой структурой, состоящей из маленьких пакетов энергии («quantum» означает «количество»). Это было началом квантовой физики.

Планк связал энергию кванта со свойством испускаемого электромагнитного излучения: энергия кванта пропорциональна *частоте* излучения. Константа пропорциональности – очень маленькое число в обычных единицах, у него 27 нулей после запятой:

$$\text{постоянная Планка} = h = 6.626 \cdot 10^{-27} \text{ эрг сек}$$

Значение этой фундаментальной константы природы первым определил сам Планк в своей эпохальной статье, сразу после новых точных измерений спектра теплового излучения двумя командами немецких физиков.

Следующий шаг к квантовой природе микромира сделал в 1905 году Эйнштейн. В его статье о «возникновении и преобразовании света», которая принесла ему Нобелевскую премию в 1921 году, объяснялись все основные свойства фотоэлектрического эффекта, когда свет, падающий на определенную металлическую поверхность, выбивает электроны. Эйнштейн сделал вывод, что свет ведет себя так, как будто он состоит из отдельных порций излучения – фотонов, в частности, и при распространении света вдали от его источника.

Другой экспериментальный факт, распахнувший двери квантовой физике состоял в том, что спектр, излученный атомами водорода, является дискретным, т.е. содержит тонкие спектральные

Йоганн
Бальмер
1825-1989

Нильс Бор
1885-1962

линий, соответствующие различным частотам света. В 1885 году швейцарский учитель математики Иоганн Бальмер (Johann Balmer) обнаружил, что частоты спектральных линий водорода имеют не случайные значения, а следуют математическому правилу, основанному на целых числах. Закон Бальмера оставался загадкой до 1913 года, когда датчанин Нильс Бор (Niels Bohr) предложил свою «планетарную модель» атома: электроны вращаются вокруг ядра, как планеты вокруг Солнца. Спектральные линии образуются, когда электроны перепрыгивают между орбитами (энергетическими уровнями), поглощая или излучая фотоны. Эта модель выглядит красиво и просто, но она ужасно неклассическая! Согласно классической физике, ускоренно движущиеся по круговым орбитам заряженные электроны должны излучать электромагнитные волны и, теряя энергию, постепенно падали бы на центр по спирали. Что-то должно удерживать электроны на их орбитах. А для того, чтобы производить наблюдаемые спектральные линии, орбиты могут иметь только определенные размеры. Эти размеры, т.е. структура атома, определяются квантовыми законами. Атом – это нечто по-настоящему квантовое.

Для ньютоновской механики и релятивистской электродинамики такие явления были непонятны. Только квантовой теории, объединившей волновые и корпускулярные свойства вещества и света, удалось это объяснить. Ниже мы сделаем небольшое погружение в эти странные воды размышлений о квантовой природе.

Луи
де Бройль
1892-1987

7.8. Принцип неопределенности Гейзенберга

В 1923 году французский князь и физик Луи де Бройль (Louis de Broglie) обобщил идею Эйнштейна о двоякой природе света на все материальные частицы. Волна является свойством не только света! И у обычных частиц есть волновая сторона. Свет является одновременно волной, имеющей длину волны λ и частоту f , и частицей с энергией $E = hf$ или импульсом $p = E/c$. Де Бройль ввел тесную связь между длиной волны λ и импульсом p любой материальной частицы: $\lambda = c/f = h/p$. Такие вещественные волны объясняют, почему электроны могут двигаться только по определенным орбитам: орбита может существовать, только если она содержит целое число вещественных волн электрона

Что мы обычно имеем в виду, когда хотим описать обычную частицу? Ее положение в пространстве, ее скорость и массу. Квантовые явления заставляют нас понять, что такая классическая частица – это слишком идеализированная картина реальности, слишком тесная «математическая маска» для реальной сущности.

В классической физике, а также в теории относительности движение частиц вполне «обычно», т.е. они двигаются по четким траекториям, и измерения в принципе могут быть сколь угодно точными. Эти предположения долгое время считались очевидными. Но не в квантовой физике!

Принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что *нельзя измерить одновременно точное положение частицы и ее скорость*. Произведение ошибок измерения всегда не меньше, чем постоянная Планка. Чем лучше вы измеряете положение частицы, тем менее точно вы знаете ее скорость, и наоборот. Более точно, существует импульс частицы, который при медленном движении равен скорости, умноженной на массу $p = mv$. Принцип неопределенности имеет два вида: для положения и импульса

$$\Delta x \cdot \Delta p > h,$$

и для энергии и времени

$$\Delta E \cdot \Delta t > h,$$

где Δx и Δp – ошибки положения и импульса частицы, ΔE – это точность, с которой можно измерить энергию системы за интервал времени Δt .

Это вызывается не каким-то дефектом измерительной аппаратуры. Просто интуитивное понятие «классической» частицы больше не является адекватным представлением объектов микромира. На малых пространственных масштабах появляются новые законы.

Старая физика оперировала со свободной частицей, движущейся с постоянной, точно известной скоростью. Но принцип неопределенности гласит, что если мы знаем скорость частицы точно, то мы ничего не знаем о ее положении – она везде и нигде в бесконечной вселенной! Классическая частица просто не может существовать в квантовом мире. Это драматическое изменение в нашем взгляде на мир.

В классические времена необходимость в квантах не ощущалась. Новые свойства появляются только тогда, когда человек исследует очень маленькие масштабы, намного меньше, чем микробы и клетки, которые видны в микроскоп с XVII века. Поскольку постоянная Планка так мала, квантовая неопределенность не

Вернер
Гейзенберг
1901-1976

вмешивается в повседневные дела. Хотя мы можем счастливо жить, не зная о квантах, законы квантовой физики определяют поведение многих вещей вокруг нас. Мы можем сидеть и смотреть на нашу сверкающую звезду, бесконечно задаваясь вопросом, как она светит. Нравится нам это или нет, но квантовая физика необходима, чтобы понять, что происходит на Солнце.

7.9. В погоне за истинным атомом

Физика основывается на экспериментах, которые являются способом исследовать мир посредством активного воздействия на него, создавая особые условия, чтобы увидеть в чистой форме явления, предсказанные физическими теориями. Ребенок узнает об окружающих вещах, трогая и играя ими. Вечно любопытный физик узнает о мире, играя концепциями своей теории и наблюдая за явлениями, появляющимися в его экспериментах.

Однако таким образом можно изучить только крохотную часть вселенной. Нельзя двигать звезды или сталкивать галактики. Но астрономы могут планировать свои наблюдения, чтобы проверить теории о звездах и галактиках. Примерно так же физик исследует мир малых масштабов, недостижимый прямым вмешательством. Большие ускорители создают высокие энергии в очень маленьких объемах, и физики наблюдают, что происходит в таком диковинном микромире. Так они проникли в закрытые до этого миры и на каждом шагу открывали новые частицы, которые в то время казались первичными неделимыми долями вещества.

В 1896 году Анри Беккерель (Henri Becquerel) обнаружил, что соли урана испускают проникающее излучение. Затем, терпеливо обрабатывая тонну урановой руды, называемую уранитом, в своей очень скромной лаборатории в Париже, Мария и Пьер Кюри открыли новый сильно излучающий элемент радий. Эта радиоактивность (слово придумала Мария Кюри) дала новый ключ к атомному ядру, так как что-то выбрасывалось из ядра, в действительности три типа лучей, названных альфа-, бета- и гамма-лучами. Позже оказалось, что альфа-лучи являются ядрами гелия, бета-лучи – это потоки электронов, а гамма-лучи – очень энергичные фотоны.

В 1910 году знаменитый эксперимент Эрнеста Резерфорда по рассеянию альфа-лучей показал, что атомы имеют очень маленькое ядро, окруженное роем электронов. Эрнест Резерфорд (Ernest

*Анри
Беккерель
1852-1908*

*Пьер Кюри
1859-1906*

Rutherford) (1870-1937), профессор Кембриджского университета, работал в той же Кавендишской лаборатории, где Джозеф Томсон (Joseph Thomson) (1856-1940) открыл в 1897 году, что электроны являются частью катодных лучей. В 1920 году Резерфорд и другие обнаружили, что иногда альфа-лучи поглощаются ядром и это приводит к тому, что атом «выплевывает» ядро водорода. Они осознали, что ядро водорода является одним из фундаментальных кирпичиков вещества. Ему дали название «протон».

В 1930-ые годы был обнаружен четвертый тип радиоактивности. Это была электрически нейтральная частица, отличавшаяся от отрицательно заряженного электрона и положительного протона. В 1932 году Джеймс Чадвик (James Chadwick) определил ее массу, которая оказалась очень близка к массе протона. Из-за того, что у нее отсутствовал заряд, ее назвали «нейтроном».

Джеймс
Чадвик
1891-1974

Ядра различных элементов состоят из разного числа протонов и нейтронов. Каждый элемент характеризуется полным числом протонов – *зарядовым числом*, и суммой протонов и нейтронов – *массовым числом*. Зарядовое число – это основной идентификатор элемента, задающий также количество электронов вокруг ядра. Так, для ядра гелия используется обозначение ${}^2\text{He}^4$. Примечательно, что хотя мы знаем, что на квантовом уровне атомы не являются четко очерченными миниатюрными «солнечными системами», мы можем охарактеризовать их целым числом их «планет». Здесь был Пифагор!

Энрико
Ферми
1901-1954

Хорошим примером того особого пути, каким развивается физика частиц, является открытие *нейтрино*. В 1934 году итальянский физик Энрико Ферми (Enrico Fermi) объяснил отклонение бета-лучей как результат *слабого взаимодействия*. Он понял, что нужна новая частица, чтобы объяснить загадочное нарушение сохранения энергии и импульса, которые наблюдаются в реакции, когда нейтрон распадается на протон плюс электрон плюс «что-то еще». У *нейтрино* очень маленькая масса покоя и нет заряда.

Микромир богат различными типами частиц, которые можно описать набором свойств: масса, электрический заряд, спин и время жизни. Для каждой частицы существует соответствующий класс *античастиц*. Частица и античастица имеют противоположный заряд, но одинаковую массу. Некоторые из этих существостей создают более или менее постоянное вещество вокруг нас. Другие лишь на короткое время посещают нашу реальность и быстро распадаются на более устойчивые формы.

Таблица 7.1 Элементарные частицы в конце XX века. Это основные составляющие Природы с точки зрения современной квантовой теории поля. Протоны, нейтроны и другие *барионы* больше не являются элементарными, а состоят из кварков и глюонов. Обратите внимание, что масса покоя выражена в единицах энергии, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ эрг}$.

частица				масса покоя	заряд	спин
Фермионы	<i>лептоны</i>	электрон	e	0.511 MeV	-1	1/2
		мюон	μ	0.106 GeV	-1	1/2
		тау	T	1.78 GeV	-1	1/2
		e-нейтрино	N	< 2.5 eV	0	1/2
		μ -нейтрино	ν_μ	< 2.5 eV	0	1/2
		τ -нейтрино	ν_τ	< 2.5 eV	0	1/2
	<i>кварки</i>	up	u	6 MeV	2/3	1/2
		down	d	10 MeV	-1/3	1/2
		странность	s	0.25 GeV	-1/3	1/2
		очарование	c	1.2 GeV	2/3	1/2
		bottom	b	4.3 GeV	-1/3	1/2
top		t	174 GeV	2/3	1/2	
Бозоны	скаляр	Хиггс	H	<220 GeV	0	0
	вектор	фотон	γ	0	0	1
		W бозон	W^\pm	80 GeV	± 1	1
		Z бозон	Z^0	91 GeV	0	1
		глюон	g	0	0	1
тензор	гравитон	g	0	0	2	

Внутри протонов скрыты кварки. Какое-то время протоны и электроны считались истинными неделимыми частицами. Но природа снова оказалась устроенной более глубоко, чем представлял человек. Протон потерял свой статус «первичной частицы». Он состоит из *кварков*. Кварки были открыты не так, как открывают какой-то новый вид насекомых в джунглях – микромир намного менее гостеприимен для подобных экспедиций! В действительности никто никогда не видел свободных кварков. Кварки были впервые предложены в 1960-ые годы Мюрреем Гелл-Манном (Murray Gell-Mann) и, независимо, Георгом Цвейгом (George Zweig) как удобный математический инструмент для выполнения вычислений в сложной физике элементарных частиц. Может, это тоже реальные физические частицы? Да, но это было принято лишь позже, когда существование

маленьких заряженных крупниц наблюдалось в высокоэнергичных экспериментах, когда протон бомбили лучом электронов. Это напоминает то, как новую планетарную модель Коперника сначала считали всего лишь еще одним способом расчета положений планет. В действительности кварки сначала тоже вызвали большое недоверие. Например, статью Цвейга о новой теории не приняли к публикации.

Интересно, что кварки имеют дробный электрический заряд ($+2/3$, $-1/3$ заряда протона). В настоящее время открыты шесть типов кварков (см. Таблицу 5.1). Еще одно новое свойство кварков состоит в том, что они не могут существовать в изоляции, но как бы связаны вместе резинкой – притягивающая сила между ними *возрастает*, когда расстояние увеличивается! Они не только расплывчаты, но больше и не истинно индивидуальны.

Тогда как у электрона есть электрический заряд, у каждого кварка кроме электрического заряда есть так называемый цветовой заряд. Носители цветовых сил между кварками называются глюонами. В настоящее время протон и нейтрон больше не являются элементарными частицами – они состоят из кварков, крепко связанных глюонами. Протон состоит из трех кварков (два up-кварка, один down-кварк). Нейтрон содержит один up-кварк и два down-кварка.

Частицы, называемые лептонами (электрон и т.д. в Таблице 5.1) не состоят из кварков. Кварки и *not-so-shy* («без комплексов») лептоны являются в каком-то смысле родоначальниками в мире элементарных частиц. Насколько сейчас известно, они не имеют подструктуры и составляют все вещество. Третья категория частиц – бозоны – служат для переноса взаимодействий между другими частицами.

7.10. Квантовая природа фундаментальных сил

Современная физика гласит, что все физические явления можно считать результатом действия четырех фундаментальных взаимодействий между элементарными частицами: *сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное*.

Они перечислены в порядке убывания силы и, следовательно, в порядке убывания важности в микромире. Сильное взаимодействие появляется только на очень маленьких расстояниях внутри атомного ядра и исчезает снаружи. Оно связывает протоны и нейтроны, образующие ядро и является намного более сильным, чем

электрическое отталкивание между протонами. Гравитация – самое слабое взаимодействие, обычно для элементарных частиц она не имеет значения. Но, в отличие от других взаимодействий, сила гравитации возрастает с ростом числа частиц и, в конечном итоге, становится доминирующей в астрономическом мире.

Таблица 7.2 Фундаментальные силы природы

Взаимодействие	Относительная сила	Радиус Действия	Явление
Сильное	2000	10^{-13} см	Атомное ядро
Слабое	10^{-8}	10^{-15} см	Распад нейтрона
Электромагнитное	1	Бесконечность	Атомы, молекулы, твердые тела
Гравитационное	10^{-43}	Бесконечность	Звезды, галактики, вселенная

Концепция поля – это ключ к теории фундаментальных взаимодействий, поскольку поле является переносчиком взаимодействий. Новая теория *квантового релятивистского поля* объединяет квантовые и релятивистские свойства вещества, включая излучение, для того чтобы описать физические взаимодействия во всей их полноте. Эта теория объясняет в терминах квантов те процессы, которые обуславливают наблюдаемые физические силы.

Стандартная модель элементарных частиц включает теории электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий. Они называются соответственно квантовой электродинамикой (QED), электрослабой моделью Вейнберга-Салама-Глешоу и квантовой хромодинамикой (QCD). Последний термин напоминает нам, что цвет (по-гречески «хрома») является новым типом заряда в сильных взаимодействиях.

Элементарные частицы являются квантами поля – фермионами (с полуцелым спином) и бозонами (с целым спином) полями. В микромире фермионы представляют «материю», тогда как

бозоны отвечают за «силы» между крупинками вещества. Таким образом, взаимодействия можно считать обменом квантами поля, носителями силы.

В стандартной модели элементарных частиц слабое и электромагнитное взаимодействия описываются как независимые сущности. Однако за последние несколько десятилетий появились новые теории, которые объединяют эти взаимодействия. Например, в Теории Большого Объединения (GUT) существует одно квантовое поле, которое при низких энергиях проявляется как трехглавый орел, служа источником трех фундаментальных взаимодействий.

На следующем, более радикальном шаге пытаются рассматривать материю и взаимодействия как две стороны одного, еще более фундаментального поля. Суперсимметричные теории объединяют фермионы и бозоны в одну «суперсущность».

7.11. «Шуба» виртуальных частиц и кипящий вакуум

Стандартная модель элементарных частиц сложна, но мы предлагаем беглое знакомство с тем, как в ней понимается взаимодействие между частицами. Возьмем два электрических заряда (например, электрона), находящихся в состоянии покоя. Они ощущают электростатическую силу между собой. Что переносит эту силу? Как одно тело узнает о втором, отделенным пустым пространством?

Классическая теория гласит, что электрон окружен электромагнитным полем, которое воздействует на второй электрон. Вместо этого квантовая электродинамика говорит, что электрическая сила передается через взаимный обмен фотонами (квантами света). Тогда почему электрон находится в состоянии покоя и при этом не наблюдается испускания электромагнитных волн (или фотонов) от него? Существуют фотоны, которыми обмениваются электроны в состоянии покоя, но они «виртуальные». Это означает, что их нельзя измерить напрямую: Принцип Неопределенности скрывает их от нашего взгляда. Виртуальные фотоны объясняют чисто статическое взаимодействие между двумя зарядами, когда нет ускорения и, следовательно, нет излучения реальных фотонов.

Виртуальные фотоны придумал Ричард Фейнман (Richard Feynman). Он наиболее известен по своей работе над квантовой теорией электромагнитного поля. Его «Лекции по физике» – легендарные учебники. Каждый физик нашего поколения наслаждался

*Ричард
Фейнман
1918-1988*

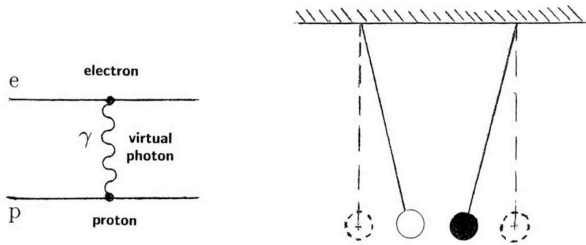


Рис. 7.3. Диаграмма Фейнмана, объясняющая электрическую силу Кулона $F = Q_1 Q_2 / R^2$ между двумя заряженными частицами. Виртуальные фотоны являются причиной «дальнодействия», отклоняющего висящие заряды. Ричард Фейнман получил Нобелевскую премию в 1965 году за развитие квантовой электродинамики.

их ясностью и энтузиазмом, по мере того как они вели читателя к более глубокому пониманию физики. «Поэты говорят, что наука портит красоту звезд – простых шаров из атомов газа. Ничто не является «простым». Я тоже могу смотреть на звезды безлюдной ночью и чувствовать их. Но больше или меньше я вижу? ... Что такое этот узор? Каков его смысл? И почему? Тайна не пострадает, если мы немного о ней узнаем. Ибо истина намного прекрасней, чем представляли себе художники прошлого!»

Виртуальные фотоны и другие виртуальные частицы образуют «фейнмановскую шубу» вокруг электрона. Электрон постоянно испускает их во всех направлениях, а также поглощает другие, приходящие из окружения. Несмотря на это, энергия или масса электрона не меняются так, чтобы это можно было измерить. Почему?

Виртуальные фотоны существуют лишь постольку, поскольку принцип неопределенности позволяет им существовать, не будучи обнаруженными. Чем менее энергичен виртуальный фотон, тем более длительное время он может существовать и тем дальше он может перемещаться от электрона. Так как ни одна частица не может иметь энергию меньше, чем ее энергия массы покоя, то диапазон силы, переносимый виртуальной (массивной) частицей не может быть произвольно большим.

Но фотоны лишены массы покоя. Это означает, что электрон может послать такие виртуальные фотоны с нулевой энергией на бесконечные расстояния. Вот почему электрическая сила имеет

бесконечный радиус действия и зависимость, обратно пропорциональную квадрату расстояния, в форме эмпирического закона Кулона. Фейнмановская шуба из виртуальных частиц имеет толщину $R \approx c\Delta t = ch/\Delta E$, где время жизни виртуальной частицы Δt получается из принципа неопределенности: $\Delta E \cdot \Delta t > h$. Таким образом, при $\Delta E \rightarrow 0$ радиус действия электрической силы стремится к бесконечности. Однако, сильное взаимодействие сильно только внутри атомного ядра. Обусловленное квантами, имеющими ненулевую массу покоя, его действие ограничено расстояниями менее 10^{-13} см.

Действительно, *виртуальные частицы* являются, наверно, самыми удивительными обитателями «там, внизу». Даже пустое пространство заполнено виртуальными частицами, но их непосредственное наблюдение запрещено принципом неопределенности. Пустое пространство, виртуальные частицы – может, это снова фантазии физиков? Отнюдь нет. Существует много наблюдаемых последствий существования виртуальных частиц, хотя сами виновники этого остаются за пределами видимости. Пустое пространство может даже быть новым источником энергии, которую можно извлечь из флуктуаций вакуума. Датский физик Хендрик Казимир (Hendrik Casimir) предложил эксперимент, чтобы показать реальность квантовых флуктуаций вакуума. Если взять две параллельные металлических пластины, то между ними вакуум меняется, что проявляется как сила,двигающая пластины ближе друг к другу. Этот эксперимент был впервые успешно выполнен в 1958 году.

Вниз по спирали в микромир? Современная физика открыла несколько фундаментальных ограничений природы, которые определяют структуру физической реальности. Скорость света оказалась самой большой скоростью, с которой могут передаваться энергия или информация. Классические частицы с определенными положениями и скоростями, наши знакомые друзья из теории Ньютона, больше не существуют в странном квантовом микромире, который начал нас окружать. Даже вакуум, который прежде считали пустым пространством, теперь пузырящийся океан из виртуальных частиц, которые постоянно появляются и исчезают.

Оказалось, что «неделимый» атом состоит из протонов, нейтронов и электронов. Затем полвека ушло на то, чтобы обнаружить, что протон, буквально означающий «первый элемент», сам состоит из новых атомов – кварков. Возникает вопрос, был ли это последний шаг в глубины материи? Не могут ли кварки иметь внутренних

составляющих? Инструмент нового поколения для физиков, занимающихся элементарными частицами, – Большой адронный коллайдер CERN – будет закончен в 2005 году. Возможно, он извлечет на поверхность новую информацию об этих причудливых видах обитателей виртуального мира.

Появление квантовых законов показывает, что мы не можем думать о микромире в тех же терминах, что и о макромире, положив своего рода предел между нами и миром на очень малых масштабах. Кажущаяся последней преграда в микромир встречается на размере, который называется длиной Планка, около 10^{-33} см, где само пространство становится квантовой структурой, пока еще непонятной для современных физиков. Здесь «начинается геометрия», по выражению Сведенборга, чья интуиция не допускала структурированного мира ниже определенного уровня. Любопытно отметить, что отношение размеров Земли и атомного ядра близко к отношению размера ядра к длине Планка. Один огромный шаг ведет нас вниз в квантовый мир, а второй ставит перед порогом совершенно неизведанного.

Из земной в космическую лабораторию. При всей своей экзотичности квантовая теория поля очень успешно предсказывает явления, которые физики наблюдают на ускорителях и астрофизики в высокоэнергичных космических лучах. Физики уверены в истинности квантовой теории поля, и есть искренняя надежда, что все силы природы можно описать одной объединенной теорией. В пределах возможностей современной физики это относится к области теории, время которой, по словам физика Абдуса Салама (Abdus Salam), еще не пришло.

Тесты Теории Великого Объединения и Теории Суперсимметрии требуют предельно энергичных частиц, для того, чтобы проникать все глубже и глубже в микромир. Однако, похоже, что экспериментальная физика частиц достигла своего естественного предела в производстве высокоэнергичных частиц в земных лабораториях. Великое многообразие масштабов, существующее в астрономическом мире, обуславливает необыкновенные явления и объекты, которые обладают почти неограниченными энергиями. Поэтому началась новая эпоха физики, когда астрономическая вселенная стала частью физической лаборатории. В настоящее время физические эксперименты достигли космических масштабов. Есть надежда, что это даст возможность понять физику фундаментальных

сил, включая гравитацию – силу, которая создает структуру крупномасштабной вселенной.

Глава 8

Гравитация и космология

8.1. Природа гравитационного взаимодействия

Карандаш падает на пол – самое знакомое и в то же время очень загадочное явление! На Земле всегда присутствует гравитация. Но ее подлинным домом является космос. Действительно, закон гравитации Ньютона был открыт с помощью планет, а первым успехом теории Эйнштейна было объяснение того, почему самая внутренняя планета Меркурий не остается на замкнутом эллипсе. В микромире гравитация между элементарными частицами намного слабее, чем другие силы. Только в небесных телах содержится такое огромное число атомов, что гравитация становится силой номер один, которая связывает космическое вещество, создавая планеты, звезды и галактики. А облако гравитирующих частиц – это намного более богатая система, чем просто хаотический рой соударяющихся пинг-понговых шариков – это система, в которой каждая частица в каждый момент времени сталкивается не только с ближайшим соседом, но и со всеми остальными частицами системы.

Но что такое, в конце концов, гравитация, этот неутомимый архитектор? Похожа ли она на другие квантовые силы природы, или, может, это и не сила вовсе, а свойство пространства-времени? Ожидается, что природа гравитационного взаимодействия скоро будет выяснена из наблюдений астрономических объектов с сильными гравитационными полями, таких как взрывающиеся сверхновые, компактные объекты в двойных звездных системах и активные ядра галактик. Похоже, что физика гравитации окажется глубже, чем до сих пор предполагали.

Что вызывает притяжение двух масс? Почему в действительности падает яблоко? Ньютон отмалчивался на тему, поднятую этим простым на вид вопросом. Однако в письме к Ричарду Бентли читаем:

То, что гравитация является врожденным, внутренним и существенным свойством материи, так что одно тело может действовать на другое на расстоянии через вакуум, без посредства

чего-либо еще, что могло бы передавать его действие и силу от одного к другому, – это для меня такой великий абсурд, что я думаю, ни один человек, способный размышлять над философскими вопросами, никогда с этим не согласится. Гравитация должна быть обусловлена некоторым постоянно действующим агентом в соответствии с некоторым законом, однако, является ли этот агент материальным или нет, я оставляю на рассмотрение моим читателям.

Это письмо показывает, что Ньютон не считал гравитацию «чистым» действием на расстоянии. Должен быть какой-то агент или носитель гравитационной силы, природу которого он оставил открытой.

Теория гравитации Ньютона дает хорошее описание движения планет вокруг Солнца. Однако в ней нет переносчика силы гравитации от одного тела к другому. Согласно ньютоновской теории гравитационное воздействие передается мгновенно, т.е. с бесконечной скоростью. Так, что когда ель сбрасывает одну хвоинку, изменение гравитации ощущается сразу всеми галактиками во вселенной. Такая быстрота нарушает теорию относительности.

Общая теория относительности была первой релятивистской теорией гравитации, созданной Альбертом Эйнштейном в 1910-ые годы. С тех пор многие физики считают гравитацию эффектом геометрии пространства. Ньютоновское яблоко падает, потому что пространство вокруг массивной Земли искривлено. Гравитации уже не нужно действовать на расстоянии, и она переносится в виде локальных возмущений геометрии со скоростью света. Теория Эйнштейна объясняет, почему в движениях планет и двойных нейтронных звезд имеются маленькие отклонения от предсказаний Ньютона. Однако в теории Эйнштейна нет квантовых эффектов.

Другая теория гравитации была сформулирована в 1960-е годы Вальтером Тиррингом и Ричардом Фейнманом. Эта «полевая» теория гравитации базируется на релятивистских и квантовых принципах, что позволяет описывать гравитационное взаимодействие аналогично другим фундаментальным силам микромира. Полевая теория трактует гравитацию как силу, вызываемую обменом квантами, или гравитонами, являющимися переносчиками гравитационного взаимодействия. Согласно полевому подходу ньютоновское яблоко падает потому, что между яблоком и Землей существует обмен гравитонами. Гравитоны играют роль ньютоновских «секретных агентов», они движутся со скоростью света.

8.2. Гравитационная постоянная и закон Ньютона

Будущие теории гравитации всегда будут содержать константу G , определяющую силу притяжения в законе Ньютона

$$F = GmM / r^2$$

между двумя массами в обычных космических условиях слабой гравитации. Гравитационная постоянная G довольно мала, так что вещи в нашем непосредственном окружении, например, туфли или холодильники, оказывают лишь крошечное воздействие друг на друга. Вот почему больше века прошло после выхода книги Ньютона *Principia*, прежде чем его закон гравитации был подтвержден лабораторно, и измерено значение G : в 1798 году Генри Кавендиш (Henry Cavendish) «взвесил Землю». Этот состоятельный частный экспериментатор использовал прибор с крутильными весам, сконструированный Джоном Мичелом (John Michel) (которому, кстати, первому пришла мысль о сильно гравитирующих объектах – таких, что даже свет не может от них оторваться, называемых теперь черными дырами). Современные измерения дают такое значение гравитационной постоянной:

Генри
Кавендиш
1731-1810

$$G = 6.67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{г сек}^2$$

Лабораторные измерения, Солнечная система и двойные нейтронные звезды показывают, что константа G является универсальной для различных небесных тел. Она не может изменяться быстрее, чем всего на 1% за 10 млрд. лет, иначе это заметили бы астрономы, изучающие движение и эволюцию звезд.

На языке физики, сила гравитации Ньютона – это обычная сила, воздействие которой ощущается в инерциальной системе отсчета. Но что такое сама инерция? Она появляется во втором законе механики Ньютона, где сила, необходимая для ускорения тела относительно инерциальной системы отсчета, пропорциональна «инертной массе». В 1872 году Эрнст Мах (Ernst Mach) выдвинул идею, что инертность тела определяется всем остальным веществом вселенной. Этот *Принцип Маха* пытается связать локальное свойство инертности массы с глобальным распределением вещества во вселенной. Но и в наше время происхождение инерции все еще остается большой тайной природы.

Эрнст
Мах
1838-1916

Загадка равенства инертной и гравитационной масс. Четыре века назад было сделано открытие, которое, по сути дела, означает, что тяжелый жернов и крошечное горчичное зернышко падают с одинаковым ускорением. Если их одновременно уронить с наклонной Пизанской башни (помещенной в вакуум...), то оба они ударятся о землю в один и тот же момент. Это открытие, часто приписываемое Галилею, предвосхитило конец физики Аристотеля и проложило дорогу современному пониманию гравитации.

*Симон
Стевинус
1548-1620*

В действительности этот важный эксперимент выполнил Симон Стевинус (Simon Stevinus). В 1586 году этот датско-бельгийский математик сделал доклад о том, что тела разных масс падают с одинаковым ускорением. Современным примером являются улыбающиеся космонавты, парящие в невесомости на своих космических кораблях. Эта «невесомость» вызвана не слабой силой гравитации (расстояние от спутника до центра Земли лишь немного больше, чем Земной радиус). Причина в том, что у них одинаковое с космическим кораблем ускорение в гравитационном поле нашей планеты.

Тот факт, что сила гравитации одинаково ускоряет различные массы, имеет чрезвычайно далекое следствие: инертная масса m_i во втором законе механики равна гравитационной массе m_g , которая появляется в ньютоновском законе гравитации – такие разные вещи, и все-таки они идентичны:

$$m_i = m_g$$

В случае падения тел под действием силы гравитации силой в законе движения $F = m_i a$ теперь является гравитация $F = Gm_g M/R^2$. Приравнивая эти два выражения для силы и учитывая, что гравитационная и инертная массы равны (так что они сокращаются) получаем, что ускорение не зависит от массы падающего тела: $a = GM/R^2$, где M – это масса Земли, а R – расстояние от центра Земли до тела. Строго говоря, надо различать пассивную гравитационную массу m (относящуюся к пробному, телу движущемуся в заданном гравитационном поле) и активную гравитационную массу M (являющуюся источником гравитационного поля).

*Лоран
Этвеш
1848-1919*

*Роберт
Дике
1916-1997*

Закон равенства инертной и гравитационной масс был проверен с помощью точных крутильных весов в экспериментах, использующих суточное вращение Земли, движущейся по орбите вокруг Солнца. Сначала венгерский барон Лоран Этвеш (Logand Eötvös), затем Роберт Дике (Robert Dicke) в Принстоне и Владимир

Брагинский в Москве провели такой эксперимент, прикрепив два шара из разных материалов (например, один из дерева, другой из платины) на концы перекладины, подвешенной на тонкой проволоке. Если бы ускорения шаров в гравитационном поле Солнца были различны, то перекладина крутильных весов стала бы совершать суточные колебания. Оказывается, что гравитация сообщает одинаковое ускорение и дереву и платине, с точностью до 12 знаков, т. е. 1 к 10^{12} .

Последние измерения равенства инертной и гравитационной масс, выполненные с помощью уголковых отражателей, доставленных на Луну и использующих систему Луна-Земля-Солнце, дают точность еще в десять раз выше. Согласно современной теории равенство инертной и гравитационной масс есть следствие принципа наименьшего действия, в котором обе эти массы равны массе покоя тела.

8.3. Релятивистская гравитация начинается в Солнечной системе

Астрономические наблюдения движения планет в Солнечной системе первыми вызвали подозрения, что великолепная теория гравитации Ньютона – это не последнее слово в физике гравитационного взаимодействия. Теория Ньютона хорошо работает только в случае слабых гравитационных полей и медленных движений тел. Гравитационное поле считается слабым, если оно разгоняет тело до скорости, которая намного меньше, чем скорость света, или если потенциальная энергия гравитационного взаимодействия $E_{pot} = -GM/R$ намного меньше (по абсолютной величине), чем его энергия массы покоя $E_0 = m_0c^2$, т.е. $|E_{pot}| \ll E_0$.

Гравитационное поле Солнечной системы с большой точностью можно считать слабым, однако, существует несколько малых, но измеримых эффектов, которые нельзя объяснить теорией Ньютона:

- *Лишние 43 сек. дуги опережения в перигелии орбиты Меркурия*
- *Отклонение света далеких звезд Солнцем*
- *Гравитационное смещение спектральных линий*
- *Запаздывание радиосигналов, проходящих мимо Солнца*

Двигаясь по самой близкой к Солнцу орбите (поэтому его трудно увидеть с Земли), Меркурий испытывает такое гравитационное воздействие со стороны Солнца, что это потребовало ревизии теории гравитации. Один из первооткрывателей Нептуна Урбен Ле Веррье

*Урбен
Ле Веррье
1811-1877*

(Urbain Le Verrier) обнаружил, что Меркурий движется по своей орбите не совсем так, как ожидалось. Орбита как бы представляет собой медленно вращающийся эллипс. За один век ближайшая к Солнцу точка (точка *перигелия*) смещается вперед на угол $575''$ относительно инерциальной системы отсчета, определенной по далеким звездам. Ньютоновские силы гравитации от других планет несут ответственность за $532''$ этого смещения. Оставшиеся 43 сек. дуги были глубокой тайной до тех пор, пока не появилась релятивистская теория гравитации.

Солнечная гравитация отклоняет луч света от звезды, проходящий мимо края Солнца. По предсказанию релятивистской теории угол отклонения должен быть равен 1.75 сек. дуги, тогда как ньютоновская теория предсказывала ровно в два раза меньшее значение. Так как звезды видны близко к Солнцу только во время затмения, этот тест выполнить нелегко. Впервые отклонение было обнаружено в 1919 году британскими экспедициями в Бразилию и на португальский остров у западного побережья Африки, организованные Артуром Эддингтоном. В то время были известны только два соперника общей теории относительности – ньютоновская теория и так называемая скалярная теория. Релятивистская скалярная теория поля финского физика Гуннара Нордстрема (Gunnad Nordström) предсказывала нулевое отклонение света, т. е. отсутствие взаимодействия между светом и скалярным полем (скаляры, векторы и тензоры – основные объекты релятивистской физики). Ньютоновская теория предсказывала отклонение, равное только половине значения, даваемого общей теорией относительности. Таким образом, была найдена возможность проверки истинности этих теорий в Солнечной системе, в том же близком космосе, где начиналась классическая физика.

Новость о результатах наблюдений, состоявшая в том, что измеренный угол отклонения составлял 1.7 сек. дуги, была воспринята физиками как триумф общей теории относительности. Это также сделало широко известным имя Эйнштейна.

Смещение спектральных линий в гравитационном поле Земли было впервые измерено Робертом Паундом (Robert Pound) и Гленом Ребкой (Glen Rebka) в 1959 году на 24-метровой башне Гарвардского университета. Как сообщалось в их статье «Видимый вес фотонов», эффект был проверен с точностью до 1 процента. Более высокой точности достичь трудно из-за того, что смещения длины волны очень мало, около 2.5×10^{-15} в слабом гравитационном поле Земли.

Гуннар
Нордстрем
1881-1923

Малое запаздывание радиосигналов ($\sim 10^{-5}$ сек), проходящих близко к Солнцу, было обнаружено Ирвином Шапиро (Irwin Shapiro) в 1968 году в радарном эксперименте, использующем в качестве рефлекторов Меркурий и Венеру.

Объяснение наблюдаемых отклонений от предсказаний ньютоновской теории гравитации потребовало развития новой физики гравитационного взаимодействия. Среди многообразия возможных теорий можно выделить два альтернативных подхода – радикально новую трактовку гравитации как эффекта искривления пространства и рассмотрение гравитации как обычного тензорного физического поля в пространстве Минковского. Оба подхода приводят к одинаковым предсказаниям в слабом поле, но принципиально отличаются в случае сильных полей.

8.4. Общая относительность как геометрическая теория гравитации

Геометрия искривленных пространств. Математическим аппаратом общей теории относительности является аналитическая геометрия искривленных пространств, разработанная в XIX веке Гауссом, Лобачевским и Риманом. Неевклидова геометрия появилась после того, как математики в течение двух тысячелетий пытались вывести пятый постулат Евклида из четырех других, но все потерпели неудачу. Этот постулат о параллельных прямых формулируется следующим образом:

Через заданную точку на плоскости можно провести только одну линию, параллельную заданной линии на той же плоскости.

Параллельность означает, что две линии на одной плоскости нигде не пересекаются. Сначала загадочная важность пятого постулата может ускользнуть от взгляда, и он может даже показаться почти мучительно очевидным и неинтересным для «евклидова» ума. Тот факт, что Евклид включил постулат о параллельных в систему исходных аксиомы геометрии, свидетельствует о величии Евклида как математика.

В 1829 году русский математик Николай Лобачевский, профессор и ректор Казанского университета, построил логически последовательную геометрическую систему, в которой постулат Евклида о параллельных прямых был заменен другим

*Николай
Лобачевский
1793-1856*

предположением, далеко не столь очевидным. Постулат Лобачевского звучал так:

Через заданную точку на плоскости можно провести бесконечное число прямых, которые не пересекаются с заданной прямой на этой плоскости.

Лобачевский назвал свою революционную геометрию «пангеометрией» (от греческого «пан», означающего «все») и придерживался той философии, что любая область математики, как бы абстрактна она ни была, в конце концов, найдет применение в каких-то явлениях физической реальности. Но общественная реальность была еще не готова к этим (и, возможно, некоторым более опасным) идеям, и он был освобожден от должности главы университета без дальнейших объяснений.

То же математическое открытие совершил независимо в 1832 году Янош Бояи (Janos Bolyai), молодой венгерский армейский офицер, результат которого был опубликован в приложении к книге его отца. Когда книга Лобачевского по геометрии была переведена на немецкий язык в 1840 году, Бояи был расстроен, потому что он потерял приоритет. Больше он не публиковал никаких работ по математике.

Насколько известно историкам математики, немецкий математик и физик Карл Фридрих Гаусс (Carl Friedrich Gauss) был первым человеком, который поверил в независимость постулата о параллельных прямых. Гаусс подошел к этому вопросу с помощью алгебры и дифференциального исчисления и развил новую математическую дисциплину – дифференциальную геометрию.

Дифференциальная геометрия началась как изучение искривленных поверхностей, помещенных в трехмерное евклидово пространство. Самым простым примером искривленного пространства является поверхность сферы в обычном трехмерном объемлющем пространстве. В 1827 году Гаусс показал, как можно использовать измерения углов и расстояний на поверхности для получения радиуса кривизны сферы во вложенном пространстве. Сумма внутренних углов треугольника на сферической поверхности больше, чем евклидово значение 180° (известное для треугольников на плоскости) на величину, которая зависит от площади треугольника и радиуса кривизны сферы. Сумма углов равна $A + B + C = 180^\circ + S/R$, где S – это площадь треугольника, а R – радиус сферы. Гаусс ввел общее понятие кривизны пространства K , которая для сферы равна просто $K = 1/R^2$, и теперь R называется радиусом кривизны.

Янош
Бояи
1802-1860

Карл
Фридрих
Гаусс
1777-1855

Есть история, что Гаусс проверил этот метод, измерив радиус Земли. Используя три места, образующие треугольник с площадью в 2700 км^2 , он измерил, что сумма углов была 180° плюс 14 сек. дуги. Тогда по его формуле получалось, что радиус кривизны равен 6400 км. Это было типично для Гаусса, который всегда пытался связать теорию и практическую физику. Физики и астрономы сейчас пользуются гауссовой системой единиц: *сантиметр, грамм, секунда*. Гаусс также первым построил электромагнитный телеграф в 1833 году. Линия связала физический институт и астрономическую обсерваторию (главой которой он был) в Геттингене. Этому новому применению электричества суждено было вскоре заменить систему оптического телеграфа, о котором Александр Дюма так интересно рассказал в одном эпизоде «Графа Монте Кристо».

Дифференциальная геометрия поверхностей была расширена на n -мерные искривленные пространства в 1854 году Бернардом Риманом (Bernhard Riemann), учеником Гаусса. Наиболее симметричными пространствами Римана являются пространства с постоянной кривизной. Свойства таких пространств не зависят от положения или направления, т.е. они однородны и изотропны. Существует только три типа таких пространств, соответствующих трем возможным значениям кривизны: *сферическое* с $K > 0$, *евклидово* с $K = 0$ и *гиперболическое* с $K < 0$. Пространство Лобачевского с его бесконечным числом параллельных прямых является гиперболическим. Если предположить, что нет вообще никаких параллельных прямых, тогда получается сферическое пространство – прототип первой современной модели мира, построенной Эйнштейном.

Самое впечатляющее свойство искривленных пространств состоит в том, что в таком пространстве фигуры разного размера теряют свое подобие. Например, треугольники разных площадей на сфере имеют разные суммы их углов. Подобие существует только в Евклидовом пространстве.

Общая теория относительности. В 1915 году Альберт Эйнштейн сделал, «вероятно, самое великое научное открытие» (по словам Поля Дирака) – он нашел новые уравнения для описания гравитации, согласно которым физическое пространство-время искривляется массами, погруженными в него. Искривленное пространство-время больше не является плоским пространством Минковского

*Бернард
Риман
1826-1866*

специальной теории относительности. В теории Эйнштейна величина кривизны зависит от присутствия вещества определенным образом:

$$\text{КРИВИЗНА} = \text{константа} \times \text{ЭНЕРГИЯ-ИМПУЛЬС ВЕЩЕСТВА}$$

В простейшем случае энергия-импульс является, по сути, плотностью вещества. Простая на вид формула скрывает глубокий факт, что кривизна и энергия-импульс являются *тензорами* – не обычными числами, а матрицами 4×4 . Вместо одного имеется десять независимых уравнений. Математически уравнения Эйнштейна записываются в виде:

$$\mathfrak{R} = (8\pi G/c^4) T_m$$

Тензор Эйнштейна \mathfrak{R} описывает кривизну пространства-времени, обусловленную плотностью энергии-импульса вещества T_m . Это уравнение было в то же время независимо выведено Давидом Гильбертом (David Hilbert) из принципа наименьшего действия. Величины \mathfrak{R} и T_m являются тензорами в искривленном пространстве.

Давид
Гильберт
1862-1943

Идея о гравитации как геометрии пришла Эйнштейну, когда он размышлял над смыслом того, что жернов и горчичное зерно падают с одинаковым ускорением. Из этого эмпирического факта Эйнштейн сделал общее заключение, которое он назвал «принципом эквивалентности». По сути дела он утверждает, что все эффекты (однородного) гравитационного поля можно воспроизвести в ускоренной системе отсчета. Внутри взлетающей ракеты, закрыв глаза, нельзя просто решить, набирает ли скорость ракета или в месте запуска каким-то волшебным образом вдруг включилась гравитация.

Гравитацию можно не только «создать» в подходящем образом ускоренной системе отсчета, но ее можно также убрать, по крайней мере, локально, в системе отсчета, которая свободно падает в этом гравитационном поле. В знаменитом «лифте Эйнштейна», оборвавшемся с верхушки Эйфелевой башни, все физические процессы происходят в точности так, как в инерциальной системе отсчета *без* гравитации. Тот факт, что силу гравитации можно таким образом убрать, тогда как другие – нет, привел Эйнштейна к радикальной идее трактовать гравитацию как нечто, отличное от обычной силы, а именно, как инерциальное движение в искривленном пространстве.

Исторически принцип эквивалентности сыграл ключевую роль в рождении общей теории относительности. Однако, Владимир Фок, всемирно известный физик из Санкт-Петербургского университе-

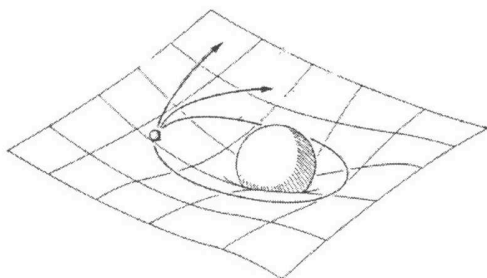


Рис. 8.1. Аналогия с резиновой мембраной для геометрического понимания гравитации. В тексте мы упоминаем, что эта аналогия вводит в заблуждение, потому что в ней требуется внешняя сила, которая и производит объясняемый эффект.

та, многократно подчеркивал, что истинной основой общей теории относительности является предположение, что пространство вокруг массивных тел неевклидово.

Что вызывает гравитацию согласно общей теории относительности?

На этот непростой вопрос часто отвечают аналогией с резиновой мембраной, искривленной под действием тяжелого шара. Натянутая резиновая пленка представляет собой плоское пространство. Если на нее положить свинцовый шарик, мембрана изгибается и вокруг шарика образуется воронка. Теперь легкий близкий объект, например деревянный шарик, устремится к воронке, так как пространство (резиновая мембрана) искривлено. Но такое объяснение геометрической гравитации является ограниченным, потому что оно основано на внешней силе, которая и является причиной того, почему первоначально находящееся в покое тело приходит в движение.

«Кратчайшую траекторию» в искривленном пространстве называют «геодезической линией». Она имеет экстремальную длину между двумя точками в пространстве-времени. Следовательно, движение частиц в искривленном пространстве-времени описывается как *свободное движение* вдоль геодезических линий. Это приводит к исключительно важному заключению: то, что называется гравитацией, в действительности является не силой, а естественным свободным движением частицы в искривленном пространстве. Другие силы, такие как электрическая сила, проявляются как отклонение от свободного (инерциального) движения.

Например, если частица остается в состоянии покоя рядом с массой, то, чтобы удержать ее от падения, должна быть какая-то обычная действующая на нее сила. Уберите ее, и состояние частицы перейдет в естественное свободное движение, ведущее ее к массе.

Таким образом, уравнения Эйнштейна говорят, как масса искривляет пространство и как частица движется в нем. Две пробные (т.е. с бесконечно малыми массами) частицы с крошечными (по сравнению с источником гравитации), но различными массами пространство не искривляют: они двигаются по одному пути на искривленном ландшафте. Так геометрическая гравитация объясняет, почему жернов и горчичное зерно падают с одинаковым ускорением. Однако задача о двух гравитирующих телах сравнимой массы не имеет общего аналитического решения из-за сложности уравнений Эйнштейна.

8.5. Черные дыры, машины времени и Большой Взрыв

Успех в объяснении релятивистских гравитационных эффектов в Солнечной системе и двойных нейтронных звездах сделал общую теорию относительности (ОТО) стандартным инструментом для изучения и того, что происходит в сильных гравитационных полях, которые существуют рядом с предельно компактными небесными телами. В таких ситуациях ОТО предсказывает необыкновенные вещи, привлекающие физиков и вдохновляющие научную фантастику: черные дыры и машину времени.

Представьте, что Солнце сжалось до радиуса в 3 километра. Тогда его свет был бы заперт его гравитацией, так как скорость убегания с его поверхности превышала бы скорость света, и это был бы объект, называемый черной дырой. Этот критический радиус называется гравитационным радиусом тела или радиусом Шварцшильда черной дыры и дается выражением

$$R_g = 2GM / c^2$$

На поверхности такого объекта была бы бесконечная сила гравитации, и тогда никакие другие физические силы не смогут противостоять бесконечной геометрической гравитации, и все вещество, попадающее на критическое расстояние от центра, неизбежно коллапсирует в центральную точку – сингулярность. Таким образом, вещество, достигшее радиуса Шварцшильда, бесследно

исчезает из нашей вселенной, безвозвратно унося с собой всю информацию о структуре этого вещества, поскольку черная дыра характеризуется только полной массой и моментом вращения. Поэтому радиус Шварцшильда называется также горизонтом событий, за которым происходит потеря информации о веществе.

Мы встречались с «парадоксом близнецов» в специальной теории относительности. Там можно путешествовать в будущее неускоряющегося дома посредством высокоскоростных перемещений. Доказательство основано на установленных законах специальной теории относительности и не касается путешествий в прошлое. Для таких путешествий в будущее честный туристический агент может продать билет только в один конец.

Общая теория относительности обещает намного больше – настоящему странную вещь – машину времени. Некоторые решения уравнений Эйнштейна называются «кротовыми норами». Такие пространственно-временные туннели в принципе позволяют организовать путешествия и в прошлое, и в будущее. К сожалению, открытие таких туристических маршрутов потребовало бы неевклидова пространства со сложной топологией, которое достижимо только в негостеприимных окрестностях черных дыр.

Другое удивительное применение общая теория относительности нашла в космологии, где она открыла дверь самосогласованным моделям мира, свободным от парадоксов ньютоновской модели. Начало новой космологии было положено в 1917 году, когда Эйнштейн нашел решение своих уравнений для мира, равномерно заполненного веществом. Эйнштейн добавил свою знаменитую космологическую постоянную в уравнения общей теории относительности для получения статического мира. Геометрия вселенной Эйнштейна была геометрией сферического пространства, имеющего ограниченный объем (так же как сфера имеет ограниченную площадь в объемлющем трехмерном пространстве).

В 1922 году Александр Фридман нашел новый тип космологической модели, в которой допускалось, что пространство сжимается или расширяется. Такие расширяющиеся модели являются теперь основой космологии Большого Взрыва. Общая теория относительности гласит, что такие вселенные, в которых все вещество распределено однородно, родились из загадочной сингулярности, где были созданы вещество, пространство и время. В сингулярности нарушаются все законы физики.

8.6. Парадоксы геометрического подхода

В геометрическом описании гравитации важная роль отводится принципу эквивалентности. Однако, при всей своей простоте и привлекательности принцип эквивалентности приводит к ряду парадоксов, которые обсуждаются уже на протяжении многих десятков лет.

Особенно наглядным является парадокс свободно падающей заряженной частицы. Действительно, из электродинамики известно, что заряд e , движущийся с ускорением a , теряет энергию на излучение согласно простому выражению

$$P = (2/3) e^2 a^2 / c^3 \text{ (эрг/сек)} .$$

Тогда возникает следующий парадокс. Если заряд покоится в лаборатории на Земле, то согласно принципу эквивалентности наличие гравитационного поля Земли эквивалентно тому, что лаборатория движется с ускорением свободного падения g , но тогда, согласно приведенной выше формуле, покоящийся на Земле заряд должен излучать энергию со скоростью $P = (2/3) e^2 g^2 / c^3$ (эрг/сек), что является абсурдным утверждением. Аналогично возникает парадокс для свободно падающего заряда: если свободно падающая система отсчета эквивалентна инерциальной, т.е. движущейся без ускорения, то падающий на Землю заряд не будет излучать, что опять является абсурдным утверждением. Подобные парадоксы возникают также и при рассмотрении гравитационного излучения для тела, свободно падающего на гравитирующий центр, например, движущегося по круговой орбите вокруг центральной гравитирующей массы. Если движение в гравитационном поле эквивалентно свободному инерциальному движению, то тело не может терять энергию на излучение.

Понятия силы, работы и энергии тесно взаимосвязаны для всех сил в физике. Однако в общей теории относительности нет «силы гравитации», поскольку согласно принципу эквивалентности движение под действием гравитации эквивалентно свободному движению. Еще в 1917 году Виллем де Ситтер (Willem de Sitter) подчеркивал в одной из первых статей по общей теории относительности, что геометрическая гравитация означает устранение силы гравитации из физики, и «следовательно, гравитация, строго говоря, в новой теории «силой» не является».

Поэтому в общей теории относительности не только сила, но и энергия (работа, производимая силой) теряет для гравитации свой обычный физический смысл. Это привело к длительной дискуссии об «энергии гравитационного поля»: в рамках ОТО невозможно определить понятие плотности энергии гравитационного поля вокруг какого-то тела. Это свойство геометрической теории гравитации находится в противоречии с хорошо определяемой плотностью энергии всех других фундаментальных физических полей. Так в рамках электродинамики в каждой точке пространства вокруг электрического заряда существует вполне определенная плотность энергии электрического поля.

Причина этого отличия ОТО от других теорий фундаментальных взаимодействий связана с тем, что все физические теории используют плоское пространство Минковского, тогда как в ОТО пространство искривлено. Еще в начале прошлого века Эмми Нетер показала, что законы сохранения энергии и импульса следуют из максимальной симметрии плоского пространства Минковского. Если гравитация искривляет пространство, то нет и закона сохранения для полной энергии вещества и гравитации. На формальном языке математики это выражается в том, что плотность энергии-импульса гравитационного поля не является тензором, а только «псевдотензором». Подробно это описано в книге Ландау и Лифшица «Классическая теория поля», которую часто считают лучшим изложением общей теории относительности. Невозможность определения плотности энергии гравитационного поля в ОТО – это прямое следствие искривленного пространства.

Идея о том, что сила гравитации совершенно отличается от других сил, является революционной. А революции сопровождаются жертвами, как всем слишком хорошо известно из истории. В ОТО жертвой стало понятие энергии гравитационного поля. Поиск квантовой гравитации сделал этот факт актуальным. Квантование других полей (электромагнитного, слабого, сильного) приводит к квантам энергии, и если в теории нет понятия энергии, то возникает вопрос: как квантовать то, что не определено?

В «Лекциях по гравитации» Фейнман отметил, что если общая теория относительности остается без квантования, то это приведет к нарушению принципа неопределенности. Парадоксальность ситуации состоит в том, что в природе на самом фундаментальном уровне бок о бок живут размытые квантовые частицы и четкие классические траектории (геодезические линии). Квантованию *геометрической*

гравитации мешают глубокие причины. Приходится сталкиваться с квантовой структурой пространства и времени, с которыми физики раньше не имели дела. Поэтому до сих пор не существует квантовой геометрической теории гравитации, хотя сделано много попыток продвинуться в этом направлении.

8.7. Полевой подход к описанию гравитации

Понимание других взаимодействий потребовало только квантования материи, оставив нетронутыми пространство и время. Можно ли прийти к квантовой гравитации этим знакомым путем? Можно ли описать гравитационное взаимодействие как материальное поле в пространстве Минковского аналогично тому, как это делается в случае других фундаментальных взаимодействий?

Этот важный вопрос обсуждался Биркгофом, Мошинским, Тиррингом и Фейнманом, а в последнее время получил новый стимул из экспериментов со сверх-холодными нейтронами, которые наводят на мысль о глубоком концептуальном сходстве между электромагнитным и гравитационным полями. Валерий Несвижевский и его коллеги из Института Ланжевена в Гренобле (Франция) в 2002 году впервые продемонстрировали, что гравитационное поле Земли порождает квантовые состояния в свободно падающих медленных нейтронах, «танцующих» на отражающей поверхности. Эксперимент, потребовавший около двадцати лет подготовки, показал, что в гравитационном поле разрешены не все траектории, а только те, которые совместимы с предсказаниями квантовой механики. Вспомним, как подобное случилось – на существенно более малом масштабе – с электронами, вращающимися вокруг атомного ядра под действием притягивающей электрической силы. В этом смысле квантующее статическое гравитационное и электрическое поля концептуально одинаковы и действуют как обычные физические силы.

Идея описания гравитации как релятивистской силы, аналогично электромагнитной силе, принадлежит Анри Пуанкаре. В 1905 году он отмечал, что все силы в природе, включая гравитацию, должны быть проявлениями релятивистских полей и должны распространяться со скоростями, меньше или равными скорости света. В общем случае теорию гравитации можно построить на основе объектов разного типа, формально говоря, из скалярного, векторного и тензорного полей. Например, электромагнетизм описывается векторным полем. Теория Нордстрема была скалярной теорией.

Однако ни скалярное, ни векторное поля не могут описать наблюдаемые релятивистские эффекты гравитации.

Уникальным свойством гравитационного взаимодействия является его универсальность – сила гравитации действует на все виды вещества, чувствуя массу и движение (энергию-импульс). Как можно трактовать такую универсальную силу как поле?

Ключом является то, что, как показал в 1943 году известный математик Джордж Биркгоф (George David Birkhoff), гравитацию можно адекватно описать *тензорным полем*. Тогда все особые свойства гравитации, включая ее универсальность, появляются естественным образом. В частности, из этой универсальности и принципа наименьшего действия следует, что инертная и гравитационная массы равны. Как последователь Пуанкаре в классической динамике, Биркгоф также писал конструктивные статьи по хаотическим процессам. Любопытно, что он сделал фундаментальный вклад и в теорию гравитации, и в теорию хаоса, которые так тесно связаны с космическими фракталами.

*Джордж
Биркгоф
1884-1944*

В «Лекциях по гравитации», прочитанных Ричардом Фейнманом в Калифорнийском Технологическом Институте в 1962 году, был сформулирован взгляд на физику гравитации, который идейно отличается от геометрической картины. Фейнмановский полевой подход рассматривает гравитацию как физическое взаимодействие, описываемое в терминах теории квантованных полей, которая так прекрасно работает для других фундаментальных сил природы. Пространство-время является постоянной сценой, на которой разворачивается действие тензорного гравитационного поля, а гравитоны – всего лишь кванты этого поля, безмассовые частицы с энергией $E=hc/\lambda$.

Так же, как закон Кулона для силы между заряженными частицами соответствует тому, что кванты электромагнитного поля имеют нулевую массу покоя (фотоны), сила гравитации в законе Ньютона имеет ту же форму закона обратных квадратов, поскольку гравитоны имеют нулевую массу покоя. Таким образом, скорость распространения гравитационного взаимодействия (и, в частности, гравитационных волн) равна скорости света.

Плоское пространство Минковского обладает максимальной симметрией и, как гласит теорема Нетер, обеспечивает законы сохранения энергии-импульса для гравитационного поля. Фейнман подчеркивал, что «геометрическая интерпретация в действительности не является необходимой или существенной для физики», хотя он

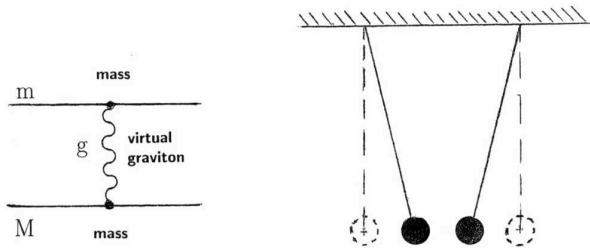


Рис. 8.2. Что вызывает гравитацию, согласно Фейнмановскому полевому подходу? Как и в случае других фундаментальных сил, гравитация переносится квантами гравитационного поля, или гравитонами, порождающими гравитационную силу Ньютона $F_N = GmM/R^2$.

удивлялся, почему теория поля имеет также глубокий геометрический смысл, который «нелегко объяснить – это просто чудесно».

В своих лекциях Фейнман пытался показать, что полевым подход, хотя и полезен с педагогической точки зрения, приведет к теории, которая идентична общей теории относительности. Эти две теории действительно имеют одинаковые предсказания для классических релятивистских гравитационных эффектов в слабом поле. Однако в случае сильных гравитационных полей предсказания этих теорий радикально расходятся. Это ясно уже из того, что полевое описание гравитации дает последовательное понимание физики гравитации, на основе понятий силы, энергии и квантов, отсутствующих в геометрическом подходе. Кроме того, плоское пространство Минковского имеет тривиальную топологическую структуру, и в полевой теории в принципе не может быть черных дыр, горизонтов и сингулярностей.

Наблюдаемые релятивистские эффекты в полевой теории гравитации. Расчет классических эффектов, наблюдаемых в Солнечной системе, а также применения полевой теории гравитации к слабым и сильным гравитационным полям астрофизических объектов были рассмотрены в серии статей Владимира Соколова из Специальной астрофизической обсерватории РАН совместно с одним из авторов этой книги (Ю.Б.). Интересно, что полевая теория гравитации в условиях слабого гравитационного поля приводит к тем же уравнениям, что и общая теория относительности. Но физическая

интерпретация входящих в уравнения величин принципиально отличается от геометрической.

Ученик Биркгофа Маркош Мошинский, который родился в России в 1921 году и в раннем возрасте уехал в Мексику, показал в 1950 году, что в рамках полевого подхода расчет взаимодействия света с гравитационным полем приводит к тому же значению для угла отклонения, что и общая теория относительности. Однако теперь причиной искривления светового луча является то, что гравитационное поле вокруг Солнца действует как своего рода линза.

Полевая теория гравитации объясняет все реально наблюдаемые релятивистские эффекты слабого гравитационного поля – отклонение света, запаздывание радиосигналов, смещение перигелия, прецессия Тирринга, Вейля и Шиффа, излучение тензорных гравитационных волн. Любопытно, что смещение перигелия орбиты Меркурия можно рассматривать как измерение энергии гравитационного поля вокруг Солнца. Эта энергия дает вклад равный 16% от наблюдаемой величины смещения.

Важно отметить, что даже в слабом поле, есть эффекты которые могут различить полевой и геометрический подходы, например, поступательное движение вращающихся тел и излучение скалярных гравитационных волн при сферических пульсациях тел. Возможно появления квантовых эффектов в Gh секторе в слабых гравитационных полях, а также отклонение от ньютоновского закона для притяжения между частицами, произведение масс которых менее $(10^{-5})^2 \text{ г}^2$.

В полевой теории ньютоновская сила гравитации F_N имеет другую интерпретацию. В приближении слабого поля притягивающая сила, действующая на массу m в потенциале Φ_N , есть результат противоборства между двумя процессами, в которых существуют два типа виртуальных гравитонов: гравитоны со спином 2, обеспечивающие силу притяжения $F_2 = -(3/2) m \nabla \Phi_N$, и гравитоны со спином 0, обеспечивающие силу отталкивания $F_0 = + (1/2) m \nabla \Phi_N$. Так что именно сумма сил притяжения и отталкивания равна наблюдаемой ньютоновской силе $F_N = F_2 + F_0 = - m \nabla \Phi_N$. Полевой подход позволяет также формулировать постановки новых экспериментов в гравитационной физике, выходящих за рамки геометрической теории.

В экстремальных условиях очень сильной гравитации полевой подход радикально отличается от геометрического. Например, в полевой теории гравитации черные дыры и сингулярности не существуют, а компактные релятивистские объекты имеют реальную

поверхность и внутреннюю структуру. Важным следствием полевой гравитации является существование нового типа гравитационных волн, называемых скалярными волнами. В ближайшем будущем наблюдения в гравитационно-волновых обсерваториях смогут проверить эти предсказания и тем самым решить вопрос о природе гравитации – геометрия или поле?

8.8. Релятивистская астрофизика – наблюдения сильной гравитации

Релятивистская астрофизика – это новое захватывающее направление астрономии, исследующее небесные тела, в которых релятивистские гравитационные эффекты намного сильнее, чем в Солнечной системе. Такие релятивистские явления, как прецессия вращающихся компактных звезд и качание дисков вокруг них, идентичны для геометрической и полевой теорий гравитации, но есть другие явления, наблюдения которых могут служить тестами этих теорий.

Самые многообещающие наблюдательные данные о свойствах сильных гравитационных полей могут быть получены при изучении следующих астрофизических объектов и явлений:

- * *орбитальное движение пульсаров в двойных системах*
- * *гравитационное и гамма излучение, генерируемое релятивистским коллапсом*
- * *высокоэнергичное излучение от рентгеновских двойных звездных систем и активных ядер галактик*

При этом наиболее перспективными для развития гравитационной физики являются следующие методы наблюдений:

- * *детектирование гравитационных волн от взрывов массивных сверхновых*
- * *рентгеновская спектроскопия сверхмассивных объектов в галактических ядрах*
- * *радио наблюдения центральных компактных релятивистских объектов в ядрах галактик с высоким угловым разрешением*

Конечно, в современной астрофизике важную роль играют и многие другие методы наблюдений, которые необходимы для продвижения в понимании природы гравитации. А сейчас мы рассмотрим те наблюдения, которые уже дали некоторые поразительные результаты.

8.9. Компактные релятивистские объекты в рентгеновских двойных системах

Когда вы смотрите на ночное небо, то вряд ли подозреваете, что многие из звезд в действительности двойные, с двумя компонентами, вращающимися друг вокруг друга. Но для астрономов, которые могут изучать звезды с помощью своих телескопов и спектрометров, двойные звезды, несомненно, очень реальны – они являются для нас практически единственным источником информации о массах звезд! Кроме того, они играют решающую роль в охоте за черными дырами.

Многие двойные звезды содержат невидимый компактный массивный объект и нормальную звезду. Эти системы обнаруживаются благодаря сильному рентгеновскому излучению от *аккреционного диска*, вращающегося вокруг темного тела. Диск образуется, когда компактное тело притягивает газ со звезды-компаньона. Газовый диск так разогревается от сильной гравитации центрального объекта, что начинает излучать рентгеновские фотоны.

Как астрономы изучают двойные рентгеновские звезды? Например, двойная звезда в созвездии Лебедя состоит из обычной звезды примерно 20 солнечных масс и компаньона, покрытого плотными газовыми облаками, излучающими рентгеновские лучи (отсюда и обозначение Лебедь X-1). Его нельзя наблюдать прямо, но обращение этих звезд друг вокруг друга обнаруживается по спектральным линиям, периодически сдвигающимся из-за эффекта Доплера. По этим наблюдениям можно вывести массы звезд, используя старую добрую ньютоновскую механику, так как звезды движутся довольно медленно, не релятивистски.

Можно ли доказать, что компактный объект является черной дырой? Наблюдения рентгеновских двойных установили, что существуют темные компактные объекты с массами, превышающими 3 солнечных массы. Это больше, чем предел Оппергеймера-Волкова для компактных звезд в общей теории относительности, согласно которой такие компактные объекты должны быть черными дырами. В

нашем Млечном Пути было обнаружено более десятка таких кандидатов в черные дыры, имеющих массы компактных объектов в диапазоне от 4 до 12 солнечных масс. В других галактиках было найдено несколько компактных релятивистских звезд до 100 масс Солнца. Похоже, темные компактные объекты существуют, но являются ли они действительно черными дырами? Кандидаты не всегда становятся депутатами.

В 1974 году Стивен Хокинг и Кип Торн (Kip Thorne), оба широко известные своими работами по теории черных дыр, поспорили, содержит ли Лебедь X-1 черную дыру или нет? Если в этой двойной системе есть черная дыра, то побеждает Торн. В 1990 году Хокинг наконец признал его победу, на том основании, что масса компактного объекта оказалась больше 3 масс Солнца. Однако, строго говоря, Хокинг поторопился закрывать этот спор! Дело в том, что даже если компактная звезда имеет большую массу, это не обязательно черная дыра. Измерить массу – это только половина дела.

Чтобы показать, что этот объект является черной дырой, а не темной звездой, нужно ясно доказать, что он является «дверью в одну сторону», не имеет твердой поверхности (как мог бы засвидетельствовать падающий наблюдатель...) и безвозвратно поглощает окружающее вещество, другими словами, у него есть горизонт событий. Самый прямой способ доказать, что такие особенности существуют – это наблюдать процесс образования горизонта событий черной дыры. Этого с нетерпением ожидают от новых гравитационных обсерваторий. Согласно современной теории коллапса, приводящего к черной дыре, должен быть короткий единичный импульс гравитационной волны (около одной миллисекунды). В случае темной звезды (которая образуется в полевой теории) гравитационный сигнал должен состоять из многих импульсов и продолжаться длительное время, сравнимое с продолжительностью ожидаемого нейтринного сигнала (около одной секунды).

8.10. Двойной пульсар – идеальная гравитационная лаборатория

Большой радиотелескоп в Аресибо с параболической антенной в 300 м позволяет астрономам измерять с высокой точностью время прихода слабых импульсов от далеких пульсаров – быстро вращающихся нейтронных звезд с сильным магнитным полем.

Особенно интересны пульсары, находящиеся в паре с другой компактной звезды в двойной системе, которые обеспечивают условия для проверки гравитационных теорий, недостижимые в Солнечной системе.

Знаменитый пульсар PSR1913+16 в двойной системе (открытие которого принесло Нобелевскую премию Расселу Халсу (Russel Hulse) и Джозефу Тейлору (Joseph Taylor) в 1993 году) состоит из двух нейтронных звезд, каждая с массой Солнца, движущихся по орбите относительно друг друга с высокой скоростью, около 500 км/сек. Релятивистские гравитационные эффекты, известные нам в окрестности Солнца, теперь измерены с намного более высокой точностью в орбитальном движении этой двойной системы. Маленькое смещение перигелия Меркурия (43 сек. дуги за столетие) здесь становится четырьмя градусами в год!

Удивительно точные наблюдения на телескопе Аресибо выявили, что размер орбиты этой двойной системы медленно уменьшается со временем. Причиной этого является гравитационное излучение, генерируемое огромным ускорением в орбитальном движении нейтронных звезд. Скорость убывания орбитального периода хорошо согласуется с общей теорией относительности. Однако наблюдения показали, что сжатие орбиты происходит немного быстрее, чем ожидалось. Двойная система теряет энергию на излучение гравитационных волн на 1% больше, чем предсказывает общая теория относительности. Будущие наблюдения смогут измерить величину избытка с большой точностью. Кстати, полевая теория гравитации предсказывает избыток в 0.7% в виде скалярных гравитационных волн. Часть наблюдаемого избытка можно также объяснить дифференциальным вращением Галактики, но плохо известное расстояние до пульсара (имеющиеся оценки дают величину расстояния от 3 до 8 кпс) не позволяет точно оценить этот источник ошибок. И здесь проявилась эта вечная проблема астрономических расстояний! Мы с нетерпением ожидаем измерения точного расстояния до пульсара PSR 1913+16 в ближайшем десятилетии, когда будет запущен астрометрический спутник GAIA.

8.11. Гравитационно-волновые обсерватории в действии

В своей статье по специальной теории относительности в 1905 году Анри Пуанкаре заметил, что если гравитация является

релятивистским явлением, как электромагнетизм, тогда должны существовать гравитационные волны, перемещающиеся со скоростью света. Десять лет спустя Эйнштейн показал, что общая теория относительности предсказывает такие колебания пространства, распространяющиеся со скоростью c .

Создать электромагнитные волны легко. Колебания электрона приводят к изменениям электрического поля вокруг него, которые и будут распространяться в пространстве в виде электромагнитных волн. Точно так же легко создать гравитационные волны. Ускорьте массивное тело, и оно будет излучать волны в виде возмущений гравитационного поля. Проблема состоит в том, что эти волны очень слабые. Только мощные космические явления, такие как взрывающиеся звезды, могут произвести такую большую энергию гравитационных волн, что их обнаружение становится возможным.

Идея об обнаружении гравитационных волн с помощью больших массивных цилиндров была предложена в 1960 году Джозефом Вебером (Joseph Weber), который долгие годы был одиноким и упорным пионером поиска гравитационных волн. Предложенный им способ очень прост в принципе. Гравитационная волна изменяет расстояние между любыми двумя материальными точками, через которые она проходит, заставляя металлический стержень вибрировать или звенеть, как колокольчик. На практике ожидаемые сдвиги так малы (скажем, 10^{-13} см), что даже очень маленькие помехи (например, далекое движение транспорта) легко скрывает крошечный сигнал. Безразмерная амплитуда гравитационной волны равна $h = \Delta l/L$, где Δl – это изменение длины L антенны под действием волны. Сигнал h , обнаруженный на Земле, зависит от расстояния r , излученной энергии E_{gw} , частоты волны ν_0 и продолжительности сигнала τ_g так, что

$$h = 1.4 \times 10^{-20} (1 \text{ Mpc}/r) (E_{gw}/1 M_{\odot} c^2)^{1/2} (1 \text{ kHz}/\nu_0) (1 \text{ sec}/\tau_g)^{1/2} .$$

В настоящее время появляется новое поколение гравитационных антенн двух типов. Антенны первого типа являются металлическими стержнями, сделанными из алюминия или ниобия. Они похожи на оригинальный детектор Вебера, который «замораживают» до чрезвычайно низкой температуры, порядка 1 градуса Кельвина. На период в несколько недель температуру можно понизить до нескольких тысячных долей градуса Кельвина. Высокочувствительные стержневые детекторы *Allegro* в штате

Джозеф
Вебер
1919-2000

Луизиана и *Explorer* в Женеве представляют собой полутонный металлический цилиндр, помещенный в криостат.



Рис. 8.3. Вид сверху гравитационной обсерватории LIGO в Ливингстоне. Антенна обсерватории состоит из двух длинных вакуумных труб (слева и сверху на снимке), каждая протяженностью более четырех километров от центральной угловой станции, где расположен лазер.

В другом типе антенн лазер измеряет расстояние между подвешенными пробными массам (зеркалами). Антенна LIGO (Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory – Лазерная интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория) в США состоит из двух детекторов подобного рода, разнесенных на 1000 км – истинная гравитационная волна, свободно проходящая через Землю, будет воздействовать на обе антенны сразу. Лазеры измеряют сдвиг зеркал, приведенных в движение гравитационными волнами. Похожая гравитационная обсерватория VIRGO уже начала работать в Италии.

Последние исследования квантово-полевой теории предсказывают много новых частиц, пока не наблюдавшихся в лаборатории. В частности, гравитационное взаимодействие может передаваться двумя типами частиц (полей): тензорными частицами, соответствующими обычным гравитационным волнам, и скалярными частицами, которые переносят силу отталкивания. Орбитальное движение в компактных двойных звездных системах порождает в основном обычные тензорные волны, предсказанные и общей теорией относительности, и полевой теорией гравитации. В этом случае

скалярные волны являются только маленькой добавкой к излучению, пропорциональной квадрату эксцентриситета орбиты, как это и наблюдается в двойной системе с пульсаром PSR 1913+16. Однако для сферически пульсирующих звезд общая теория относительности запрещает гравитационное излучение, тогда как полевая гравитация предсказывает мощное излучение скалярных волн. Новые антенны чувствительны и к тензорным, и к скалярным волнам, и могут перевернуть наше понимание гравитации.

Нужны очень чувствительные инструменты. За 40 лет истории поиска гравитационных волн было только две *возможных* записи, которые могут быть связаны с гравитационными волнами. Эти события были взрывами сверхновых SN1987A и SN1993J. На новых детекторах ожидают увидеть сигналы от взрывов сверхновых, которые происходят примерно раз в сутки в объеме, захватывающем близкие скопления галактик, такие как Дева.

8.12. Обнаружены ли гравитационные волны?

В 1987 году спутник нашей Галактики – Большое Магелланово Облако – стал местом появления сверхновой, которая получила название SN1987A. Находясь на расстоянии в 50 кпс, этот взрыв звезды был ближайшей сверхновой современности. Из всех имеющихся в мире гравитационных детекторов в это время работала только одна гравитационная антенна *Geograv* в Риме, построенная под руководством Эдоардо Амальди (Edoardo Amaldi), ученика Энрико Ферми. Эта антенна представляла собой алюминиевый стержень массой 2300 кг, работающий при комнатной температуре с разрешением по времени равным 1 сек. Удивительно то, что запись на выходе детектора содержала сильный сигнал (на уровне 3 сигма) одновременно с приходом нейтрино на подземную нейтринную обсерваторию Монблан. Нейтрино генерируются, когда взрывается сверхновая, и их приход на Землю ожидается вместе с гравитационным импульсом.

Но было в этом сигнале нечто странное. Если бы это был короткий (миллисекунды) импульс гравитационного излучения, тогда масса взорвавшейся звезды должна была быть фантастически большой – более 1000 масс Солнца. На старых астрономических снимках Большого Магелланова Облака видно, что в месте взрыва была звезда с массой около 20 солнечных масс. Это расхождение привело

астрономов к осторожному суждению о сигнале в Geograv, как о случайном, необъяснимом событии, не связанным со взрывом сверхновой...

Затем, в 1993 году в галактике M81 на расстоянии в 3 Мпк вспыхнула сверхновая – следующая ближайшая сверхновая после SN1987A. В то время работали два стержневых детектора Allegro и Explorer при низкой температуре в несколько Кельвинов. В шумах на выходе этих антенн снова был обнаружен сигнал, однако его величина (при расчете для короткого импульса) опять потребовала, чтобы взорвавшаяся звезда была целых 1000 масс Солнца. Были эти случаи с двумя самыми яркими за последние двадцать лет сверхновыми простым совпадением, или эти сигналы говорят что-то о физике гравитации?

На конференции по гравитационным волнам, состоявшейся в 1994 году во Фраскати (Италия), один из нас (Ю.Б.) обсуждал с Джозефом Вебером событие, зарегистрированное группой Амальди на антенне Geograv. Вебер высказал мнение, что в общей теории относительности есть две главных проблемы: теоретическое предсказание сингулярности и неспособность объяснить сигнал от SN1987A.

Давайте поиграем с нестандартным взглядом на взрывы сверхновых. Возможно, что импульс гравитационного излучения от коллапсирующей массивной звезды представлял собой протяженный осциллирующий сигнал с длительностью в одну секунду, а не миллисекунду, и был сравним с продолжительностью сигнала от нейтрино. Тогда записи на Geograv, Allegro и Explorer могут быть истинными обнаружениями гравитационных волн от SN1987A и SN1993J. Взрывающаяся звезда в 20 масс Солнца потеряла бы на гравитационные волны 10% своей массы, что достаточно, чтобы объяснить наблюдаемые сигналы. Частотная полоса длинного осциллирующего сигнала ($\tau = 1$ сек) примерно в 1000 раз уже, чем для короткого сигнала ($\tau = 0.001$ сек.). Это уменьшает требуемую массу с $1000 M_{\odot}$ для короткого сигнала до примерно $1 M_{\odot}$ для длинного сигнала и физически объясняется наличием роста амплитуды сигнала, находящегося в резонансе с антенной.

В 2002 году римской группой под руководством Гвидо Пицеллы, были опубликованы результаты обработки данных, полученных с детекторов Explorer & Nautilus в 1998 и 2001 годах. Анализ совпадений сигналов на выходе обоих детекторов показал наличие сигналов, появляющихся около 1 раза в сутки. С учетом

фиксированной ориентации этих гравитационных антенн можно сделать вывод о том, что в случае тензорных гравитационных волн их источники должны располагаться в плоскости Галактики, а в случае скалярных волн – источники должны находиться в плоскости Сверхгалактики.

Будущие наблюдения смогут выявить форму гравитационного импульса при взрыве сверхновой и тем самым решить, является ли это последним «вздохом» умирающей звезды (при ее исчезновении в черной дыре) или это «крик» новорожденной нейтронной звезды.

8.13. Активность ядер галактик и сверхэнергии во Вселенной

Помимо рентгеновских двойных, содержащих релятивистские звезды с массами в диапазоне от 1 до 100 солнц, и более массивных компактных рентгеновских объектов до 1000 солнечных масс, есть свидетельства, что в ядрах галактик скрываются намного более массивные релятивистские объекты.

Ближайшим галактическим ядром является центр нашего Млечного Пути, в направлении на созвездие Стрельца. На расстоянии около 8 кпс он скрыт за толстым слоем пыли. Но тщательные исследования этой области пространства и в наземных, и в космических обсерваториях выявили чрезвычайно интересные явления внутри нескольких парсек от центра. Звездные движения выдали присутствие темного компактного массивного объекта с массой около 2.6 млн. солнечных масс. Теперь он считается лучшим кандидатом в сверхмассивные черные дыры. Совпадая с компактным радиоисточником Стрелец А, этот сверхмассивный объект окружен скоплением звезд, кольцом пыли и горячим газом.

Многие астрофизические явления, такие как релятивистские потоки вещества или излучение горячего газа, связаны с центральной массой. Они могут быть проявлениями эффектов сильной гравитации и даже горизонта событий черной дыры, и, следовательно, могут позволить проверку этого предсказания общей теории относительности.

Галактики были открыты на крупнейших телескопах своего времени. С тех пор астрономическое оборудование ушло далеко вперед как по размеру, так и по методике. Тогда как век назад самый большой телескоп имел диаметр 1.5 м, в настоящее время десятки телескопов имеют светособирающие зеркала с диаметрами более 4 м.

Фотографические пластинки сменили чувствительные электронные детекторы. Но астрономы борются не только за большее количество фотонов, они хотят также получать более резкие изображения. Постоянно бурлящая атмосфера беспорядочно преломляет световые лучи и растягивает точки звезд в пятна размером в секунду дуги или больше. Например, далекие галактики нельзя хорошо исследовать через атмосферу Земли. Вот почему Космический Телескоп имени Хаббла, летающий вокруг Земли по орбите на высоте 600 км, был таким большим шагом вперед. За пределами атмосферы он может делать более резкие изображения, чем обычные телескопы.

В космос выходят не только для того, чтобы охотиться за более хорошими картинками. Атмосфера прозрачна только для тех фотонов, у которых длина волны находится в узком оптическом и радио «окне». Открытие новых окон прозрачности впускает неожиданные сообщения, так как фотоны разных энергий рождаются при разных космических явлениях. Через оптическое окно видно в основном звездный свет (галактики). Много событий с высокой энергией было обнаружено в радиодиапазоне. Инфракрасные фотоны являются в основном тепловым излучением от космической пыли, а в микроволнах до нас доходит фоновое космическое излучение. Загадочные гамма-вспышки, которые происходят в далеких галактиках, являются самыми мощными взрывами во вселенной.

В 1933 году радиоинженер Карл Янский (Karl Jansky), работавший на телефонную компанию Белл, исследовал причину помех в радиотелефонной связи через Атлантический океан. Этот пионер радиоастрономии обнаружил, что неизвестные радиоисточники повторяют вращение неба, открыв тем самым начало радиоастрономии. Первые радиотелескопы имели плохое угловое разрешение: точечный радиоисточник виден на радиокартинке как размытое пятно, покрывающее на небе не одну секунду дуги (как в оптике), а минуты дуги.

В 1951 году, произошло примечательное событие. Грэхэм Смит (Graham Smith), работавший в Кембриджском университете, локализовал яркий радиоисточник в созвездии Лебедя с упомянутой точностью в минуту дуги. Он попросил Вальтера Бааде из Паломарской обсерватории сделать снимок в этом направлении на новом 5-метровом телескопе. Бааде с удивлением увидел на снимке то, что походило на столкновение между двумя галактиками. И что неожиданно, красное смещение было таким большим (0.06), что

*Карл
Янский
1905-1950*

расстояние должно было быть примерно 300 Мегапарсек (в 500 раз дальше, чем Андромеда). Несмотря на большое расстояние до него,

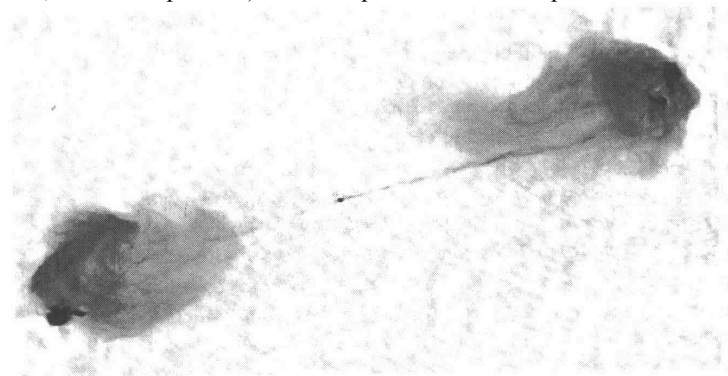


Рис. 8.4. Классический двойной радиоисточник Лебедь А в направлении на созвездие Лебедя. VLA радио изображение показывает тонкие струи, соединяющие активное ядро материнской галактики с горячими точками во внешних протяженных радиокомпонентах.

«Лебедь А» – второй по величине радиоисточник на небе (самый сильный источник, после Солнца, – Кассиопея А, остаток старого взрыва сверхновой). Так были открыты радиогалактики, демонстрирующие бурные процессы, происходящие в мире галактик.

В конце 1950-ых годов Виктор Амбарцумян выдвинул другую удивительную гипотезу для объяснения такого интенсивного явления, как радиогалактика. Армянский астроном говорил, что энергия генерируется в активном ядре галактики. И действительно астрономы открыли истечение энергии в виде узких струй из ядер галактик. Так Лебедь А – классический двойной радиоисточник – на его радиоизображении (см. рисунок 8.6.) производит явное впечатление, что два излучающих облака были выброшены в противоположных направлениях из одной точки. Узкие струи начинаются из ядра материнской галактики, как два канала, которые питают высокоэнергичными частицами два огромных радиооблака. Двойной радиоисточник может иметь размер в 1 млн. парсек – в десятки раз больше, чем породившая его галактика. Без радиоокна мы бы не подозревали о таком великом явлении!

Современные большие радиотелескопы, такие как Американская система VLA (Very Large Array) и Российский радиотелескоп ПАТАН-600, имеют много подвижных антенн. Можно также объединить несколько удаленных радиотелескопов в одну

*Виктор
Амбарцумян
1908-1996*

систему и достичь очень высокого углового разрешения (*Very Long Baseline Interferometer* (VLBI) – Интерферометр со сверхдлинной базой). VLBI может изучать структуры, которые имеют угловые размеры в одну тысячную долю секунды дуги

Часто в центре двойного источника находится не галактика, а нечто звездообразное, что, тем не менее, звездой не является. Это квазары – квазизвездные объекты, впервые открытые как «радиозвезды» в 1960 году Аланом Сэндиджем (Allan Sandage) и Томасом Мэтьюсом (Thomas Matthews). Спектры квазаров показали, что они являются внегалактическими объектами. Маартен Шмидт (Maarten Schmidt) изучал «звезду», совпадающую с точечным радиоисточником под названием 3C273, и обнаружил в ее спектре сильные эмиссионные линии – похожие странные линии были ранее найдены Сэндиджем в звезде, совпадающей с другим радиоисточником 3C48. Загадка эмиссионных линий источника 3C273 была решена, когда Шмидт понял, что это знакомые признаки водорода, хотя и сдвинутые на 16% в красную сторону. Закон Хаббла гласит, что 3C273 находится далеко за пределами Млечного Пути и звездой не является.

Что приводило и приводит в недоумение в этих компактных телах, так это их огромная светимость: они могут излучать в сотни раз больше света, чем целая галактика! Энергия должна поступать из очень маленького объема, потому что за несколько дней яркость квазара может возрасти вдвое. Такая скорость требует, чтобы квазар был маленьким, примерно размера Солнечной системы. Наблюдения показывают, что квазары находятся в центрах галактик, хотя их ослепительная яркость почти заслоняет свет хозяйских галактик. Имея размеры в одну миллионную часть хозяйской галактики, эти объекты с массой в миллион солнечных масс вполне заслуживают названия активных галактических ядер.

Самый последний каталог квазаров содержит десятки тысяч объектов. Так что квазары, слишком слабые, чтобы увидеть их невооруженным глазом, покрывают небо плотнее, чем видимые звезды. Полное число квазаров превышает миллионы. Однако это малая величина по сравнению со 100 млрд. слабых галактик во всем объеме Метагалактики, около 100 млн. которых приходится на один квадратный градус на небе.

8.14. Наблюдения компактных сверхмассивных объектов в ядрах галактик

Наличие в ядрах галактик компактных сверхмассивных объектов оказалось общим свойством галактик. Благодаря высокому разрешению Космического телескопа имени Хаббла, астрономы смогли измерить движения звезд в самых центрах многих галактик. Чтобы объяснить их наблюдаемые скорости, нужно допустить, что и эллиптические и спиральные галактики скрывают в центре очень компактные сверхмассивные объекты, ускоряющие звезды. Эти гигантские образования, достигающие миллиардов солнечных масс, считаются теперь важными структурными компонентами галактик. Они являются кандидатами в черные дыры.

Когда хозяйская галактика питает свой центральный сверхмассивный компактный объект газом и звездами, то он становится очень эффективной энергетической машиной, которая является нам в виде активного галактического ядра, такого как квазар. Его мощность соответствует превращению массы покоя Солнца в фотоны за год, что впечатляюще эквивалентно свету, излученному тысячей обычных галактик (в каждой из которых сотни миллиардов звезд...). Квазары показывают быструю переменность излучения, что возможно, только если у них маленькие размеры. Ярче тысячи галактик, имея миллионы солнечных масс внутри объема, меньшего, чем Солнечная система, квазары изумляют даже привыкших к большим числам астрономов.

Думают даже, что некоторые ядра содержат два или больше сверхмассивных объекта, танцующих друг вокруг друга. Почему в галактическом ядре ожидается больше, чем одна сверхмасса? Галактики образуют группы и скопления, внутри которых они двигаются. Случайно галактики подходят близко друг к другу и в результате таких квази-столкновений галактики имеют тенденцию в конце концов сливаться. При слиянии образуется галактика нового поколения, которая затем переносит в свое ядро сверхмассивные объекты своих родителей. Таким образом, несколько супермасс в галактических ядрах должны быть общим явлением.

Поскольку такие объекты имеют размеры, сравнимые с радиусом Шварцшильда, это многообещающие кандидаты в черные дыры. При массе в один миллиард солнечных масс, их радиусы составляли бы 3 миллиарда километров – примерно расстояние от Солнца до Урана. Однако, как и в случае с кандидатами в черные дыры звездных масс, нужна независимая информация о природе их

поверхностей и других свойствах, прежде чем можно будет сказать, что это настоящие черные дыры.

Приближение к горизонту событий... Наблюдения аккреционных дисков позволяют изучить область, близкую к предполагаемому горизонту событий. Космические обсерватории регистрируют временную переменность излучения, приходящего из внутренних частей дисков. Чтобы оценить, насколько близко к центру возникает это излучение, можно использовать причинную связь. Этот размер меньше, чем время, необходимое для того, чтобы интенсивность возросла вдвое, умноженное на скорость света, так как части, разнесенные более широко, не могли бы «идти в ногу». Чтобы достичь внутреннего края аккреционного диска – ближайшей стабильной орбиты вокруг черной дыры на трех Шварцшильдовских радиусах – нужно иметь возможность измерять временные интервалы $\tau = r_g/c$, т.е. короче 10 секунд для 1 млн. солнечных масс.

Чтобы увидеть горизонт черной дыры в центре Млечного Пути, астрономы предложили наблюдения, которые будут доступны в ближайшем будущем. Нужно построить радиокарту радиоисточника Стрелец А методом построения изображений VLBI на субмиллиметровых длинах волн с угловым разрешением около одной микросекунды дуги. Для массы $M_{bh} = 2.6 \cdot 10^6 M_{sun}$ гравитационный радиус черной дыры равен $r_g = 2GM/c^2 = 7.8 \cdot 10^{11}$ см, что соответствует 10 радиусам Солнца (около 1/10 радиуса орбиты Меркурия). На расстоянии 8 кпс угловой размер радиуса Шварцшильда равен $(r_g/d) = 6$ микросекунд дуги = $6 \cdot 10^{-6}$ секунд дуги.

Для субмиллиметровых длин волн окружающий газ прозрачен, и можно увидеть излучающий газ вплоть до горизонта событий черной дыры. Вычисления, сделанные Хейно Фальке (Heino Falcke), Фульвио Мелиа (Fulvio Melia) и Эриком Аголом (Eric Agol) продемонстрировали, что можно будет увидеть «тень» горизонта черной дыры на фоне светящегося газа. Это действительно должно быть черное пятно в центре радиоизображения. Предсказано, что угловой размер тени будет около пяти гравитационных радиусов. Это превышает радиус черной дыры просто из-за сильного релятивистского искривления света.

Такой эксперимент может быть использован для проверки различных теорий гравитации и альтернативных моделей природы темной массы в центре нашей галактики. Например, астрономы предположили, что такой компактный объект может состоять из фермионов, или бозонов, или холодного темного вещества. В общей

теории относительности радиусы, а значит и тени таких масс должны быть больше, чем гравитационный радиус. Однако в полевой теории гравитации для темной звезды ожидается, что ее тень будет меньше, чем для черной дыры той же массы, потому что теперь радиус может составлять всего $1/4$ радиуса черной дыры (но не меньше).

Проблема адвекции. Когда в окрестностях черной дыры есть газ (например, от звезды-компаньона), то всегда должен быть аккреционный диск и сильное рентгеновское излучение. Существует особый класс двойных систем, называемых рентгеновскими новыми, в которых больший компонент является темным компактным объектом с массой в десять солнечных, а меньший, вращающийся вокруг главного, – обычная светящая звезда, примерно похожая на Солнце. В этих системах за сильными рентгеновскими вспышками идут спокойные периоды. Если во время слабой фазы излучение приходит из аккреционного диска, тогда его слабость трудно понять, если только энергия не уходит в черную дыру! Теория *адвекции*, предложенная Рамешем Нараяном (Ramesh Narayan) и его группой из Астрофизического Центра в Кембридже (в США), пытается описать, как это происходит. Если коротко, то в ней предполагается, что тепловую энергию протонов нельзя передать (более легким) электронам, от которых приходит наблюдаемое рентгеновское излучение. Так что большая часть энергии, переносимая протонами, не излучается, а поглощается черной дырой. Этот парадокс – почему система с черной дырой НЕ излучает – таким образом привел бы к доказательству наличия «двери в одну сторону», горизонта событий.

Однако для механизма адвекции необходимо иметь условия для раздельного падения электронов и протонов на черную дыру. Здесь, однако, возникает трудная проблема, поскольку все реальные астрофизические объекты имеют магнитные поля, значит и в аккреционном диске есть магнитное поле. Геннадий Бисноватый-Коган из Астрокосмического Центра в Москве и Ричард Ловелас (Richard Lovelace) из Корнельского Университета показали, что эффективность излучения любого потока горячего газа с магнитным полем не может быть меньше, чем одна четвертая от значения, предсказанного теорией обычного аккреционного диска. Поэтому для понимания спокойной фазы рентгеновских новых нужны, кажется, другие объяснения, чем адвекция. Действительно, Стенли Робертсон (Stanley Robertson) и Деррил Лейтер (Darryl Leiter) предположили, что у этих объектов есть поверхность и магнитные поля, что объясняет

наблюдаемые свойства кандидатов в черные дыры, которые в таком случае не имеют горизонта событий.

Профили рентгеновских линий. Сейфертовская галактика MCG-6-30-15 играет важную роль в наблюдениях сильных гравитационных полей, близких к предполагаемому горизонту сверхмассивного объекта. Европейский рентгеновский спутник XMM-Newton (“ММ” означает multiple mirror – многозеркальный), благодаря своему высокому спектральному разрешению, измерил профили спектральных линий железа, возникающих на внутреннем крае аккреционного диска вокруг сверхмассивного объекта в ядре этой активной галактики. Чтобы объяснить наблюдаемую форму линии железа, внутренний край аккреционного диска должен лежать на неожиданно близком расстоянии равном $0.6 R_g$ от центрального объекта.

Это впечатляющее наблюдение было даже помещено на первую страницу международной газеты *Nelard Tribune* в октябре 2001 года в тот же день, когда результаты были представлены научной общественности. Заголовок был соответствующий: «Яркое свечение может изменить темную репутацию черных дыр». Теоретически, минимальное расстояние, с которого может приходить рентгеновское излучение, равно $3 R_g$ (последняя стабильная орбита вещества вокруг черной дыры). На меньших расстояниях вещество было бы немедленно поглощено без излучения. Тревожит то, что наблюдаемый внутренний край диска находится внутри горизонта событий черной дыры. Для статических черных дыр это невозможно. Но есть лазейка. Чрезвычайно быстро вращающиеся (близко к скорости света) «черные дыры Керра» могут иметь радиус $0.5 R_g$.

Но все-таки возникает еще одна проблема. Концентрация рентгеновского излучения на таком маленьком радиусе слишком велика, чтобы ее можно было объяснить любой моделью аккреционного диска. Как такая большая энергия генерируется так близко к горизонту даже для чрезвычайно быстро вращающейся черной дыры? Как бы ни решалась эта головоломка, в настоящее время астрономы уже стучатся в дверь, ведущую внутрь сверхмассивных компактных объектов.

Быстрая переменность квазаров как проба гравитации.

Есть знаменитый переменный квазар OJ287 – слабый звездообразный объект 15-ой звездной величины в созвездии Рака. Его регулярная переменность с периодом около 12 лет была проверена в 1996 году международными усилиями, которые скоординировал Лео

Такало (Leo Takalo) из обсерватории Туорла. Этот период был выявлен по многолетним архивным данным, которые проанализировал Аймо Силланпаа (Aimo Sillanpää) и его коллеги.

Регулярная переменность света может означать, что активное ядро галактики является двойной системой сверхмассивных объектов. Маури Валтонен (Mauri Valtonen) и Харри Лехто (Harri Lehto) предположили даже, что многолетние наблюдения таких систем можно было бы использовать для тестирования предсказаний общей теории относительности об эволюции орбиты массивной двойной системы.

OJ287 – не единственное активное галактическое ядро с регулярной переменностью. Астрономы из Санкт-Петербурга муж и жена Михаил Бабаджанянц и Елена Болоконь изучают активные галактики с 1960-ых годов. Они нашли еще три объекта, которые становятся ярче примерно каждые десять лет: 3C273 («первый квазар»), 3C120 и 3C390.3. Им принадлежит открытие удивительного эффекта – после уярчения активного объекта в видимом диапазоне появляется радиокомпонент, движущийся со сверхсветовой скоростью. Такие сверхсветовые радиоисточники изучаются уже давно и не противоречат специальной теории относительности, это просто эффект проекции в движении объекта со скоростью, близкой к скорости света под малым углом к лучу зрения. Эффект Бабаджанянца-Белоконь имеет практическое применение для планирования радио наблюдений по известному оптическому поведению активных ядер галактик.

8.15. Космология требует разработки релятивистской и квантовой теории гравитации

Космологическая модель – это по сути одно из решений уравнений гравитационного поля. Так современная модель Фридмана расширяющейся вселенной есть решение уравнений Эйнштейна для мира, однородно заполненного веществом. Поэтому чрезвычайно важно для космологии, чтобы уравнения гравитации были всесторонне исследованы и экспериментально проверены. Кроме того, поскольку ОТО не является квантовой теорией гравитации, то необходимо также исследовать границы применимости ОТО и возможные изменения в уравнениях гравитации, поскольку это может привести к радикально новым космологическим моделям. Жизнеспособная космологическая

модель должна удовлетворять многим требованиям, наиболее важным из которых является то, что она должна основываться на релятивистской и квантовой теории гравитации. Почему это так?

В земных лабораториях считается естественным предполагать, что пространство за пределами Земли является пустым космосом. Физики могут даже забыть, что вокруг лаборатории есть внешняя Вселенная. Для звездных астрономов пустота начинается сразу за пределами Галактики. Но роскошь игнорирования окружающего мира закончилась во внегалактической астрономии: наблюдаемая Вселенная заполнена галактиками, в системе галактик нет окружающего пустого пространства.

Это имеет важное следствие для физики гравитации в космологии. Напомним, что обычные небесные тела (например, галактики) имеют слабое гравитационное поле, т.е. значение энергии гравитационного потенциала намного меньше, чем энергия массы покоя гравитирующего тела. Но представим себе, что галактики заполняют пространство равномерно. Тогда масса всех галактик, содержащихся в сфере вокруг нашего Млечного Пути, возрастает как куб расстояния. Следовательно, потенциальная энергия на некотором расстоянии неизбежно достигнет большого релятивистского значения Mc^2 . Это расстояние определяет сферическую часть вселенной, которую можно считать объектом нового рода, будем называть его *Хабблоидом*, для которого гравитация Ньютона больше не верна. Радиус Хабблоида близок к радиусу Хаббла. Если космическая плотность равна критической плотности вселенной Фридмана, то тогда эти две меры удаленности равны и означают начало «глубокой вселенной».

Для однородного вещества масса внутри радиуса R есть $M(R) \sim R^3$. Следовательно, гравитационный потенциал будет $\Phi_N \sim M/R \sim R^2$. Расстояние, на котором потенциал достигает значения c^2 , есть гравитационный радиус Хабблоида $R_g \sim GM/c^2$. Значит, размер Хабблоида равен его собственному гравитационному радиусу. Таким образом, это релятивистский объект, и именно поэтому нужно основывать однородные космологические модели на релятивистской гравитации. К сожалению, это делает космологическую физику трудной наукой. Как сказал финский космолог Тапани Перко (Tapani Perko), вслед за Ричардом Бентли, «большинство священников и мирян были выдавлены из космологии силой тензорного исчисления».

Но что если масса сферы возрастает не как третья степень радиуса, а медленнее, прямо пропорционально радиусу? Тогда размер

Хаббл-идея растет бесконечно, и для вселенной в целом годилась бы только ньютоновская гравитация. Но любой однородный фон, такой как фотоны, нейтрино или энергия физического вакуума, провалил бы такую классическую модель мира. В любом случае, теория Ньютона не может объяснить релятивистские гравитационные эффекты даже в нашей солнечной системе и не может считаться основой современной космологии.

Общая теория относительности является основным фактором очень успешных моделей Фридмана и триумфа большого взрыва. Однако сам взрыв и эта сингулярность являются загадкой. Необходимость квантовой теории гравитации появляется, когда мы смотрим назад в очень далекое прошлое, когда размер всей вселенной, наблюдаемой в настоящее время, был меньше так называемой длины Планка 10^{-33} см. Эта длина есть часть квантовой Природы, и, значит, общую теорию относительности нужно заменить на квантовую теорию гравитации, прежде чем можно что-то сказать о вещах, более близких к сингулярности. Трудно представить себе более загадочную вещь, чем сингулярность, из которой возникла вся вселенная, и в которой может исчезнуть все вещество. Сингулярности – это неизбежное следствие общей теории относительности. Тем не менее, их реальность – все еще открытый вопрос.

Полевая теория гравитации предсказывает отсутствие сингулярности и отсутствие расширяющегося пространства, в ней бесконечное пространство Минковского заполнено эволюционирующим веществом. Полевой подход к гравитации базируется на релятивистских и квантовых принципах, в рамках этого подхода сделаны предсказания, позволяющие отличить геометрическую теорию от полевой теории гравитации.

Начало XXI века считается «золотым временем» астрофизики. В воздухе носится питаемый новыми технологиями оптимизм, что скоро существование и свойства сингулярности можно будет определить по реальным наблюдениям в обсерваториях. Гравитационные волны, обнаруженные на гравитационных антеннах следующего поколения, в совокупности с изучением света от двойных звезд и квазаров с помощью радио-, оптических и рентгеновских телескопов, сделают нас ближе к загадочной природе гравитации – силы, создающей космический порядок.

Глава 9

Третья научная картина мира

9.1. Космологические модели Эйнштейна-Фридмана

В своих страстных исследованиях природы на больших и малых масштабах XX век произвел модель мира, в которой историю вселенной определяет первичный взрыв. Эта модель опирается на космологический принцип Эйнштейна – идею об однородном распределении вещества, и на решение Фридмана, которое описывает расширение пространства согласно законам общей теории относительности. Успех космологии Большого Взрыва в объяснении важных наблюдений и ее впечатляющий, почти шокирующий взгляд на мир вызывают и к разуму, и к душе современного человека. По словам Стивена Хокинга (Stephen Hawking): *Открытие того, что вселенная расширяется, было одной из величайших интеллектуальных революций двадцатого века.*

Космология большого взрыва является современным «Великим Синтезом», объединившим астрономию и физику. Теперь работа выполняется не одним автором в одной книге, но поколениями ученых в тысячах статей. Как парадигма она и управляет наукой, и вдохновляет ее. А идеи большого взрыва и эволюционирующей вселенной проникли в общество в целом. Кажется, что почти невозможно думать о реальности без загадочного начала.

Кардинальным аспектом космологии большого взрыва является убежденность в том, что огромные космические структуры, которые мы видим вокруг, – это «вторичные эффекты»: результаты эволюции из крошечных первичных пульсаций на фоне основной спокойной однородности.

Случилось так, что университет Санкт-Петербурга, расположенный на прекрасной набережной Невы, сыграл важную роль в создании космологии большого взрыва. Александр Фридман был профессором этого университета, когда нашел свое знаменитое решение уравнений Эйнштейна, описывающее расширяющуюся вселенную. Георгий Гамов, который добавил к расширению горячий

старт, был студентом Фридмана. Гамов научился у него общей теории относительности. В то время Ленинград был *Alma mater* для целого поколения творческих физиков. Упомянем Льва Ландау, Владимира Фока и Виктора Амбарцумяна. После Фридмана и Гамова, Яков Зельдович, также имевший научные корни в «городе белых ночей», основал знаменитую Московскую космологическую школу. Неудивительно, что шутят, будто лучшие москвичи – это ленинградцы, и не только в космологии...

Несколькими годами ранее, в 1917 году, Альберт Эйнштейн применил общую теорию относительности к космологической проблеме. Если распределение вещества однородно, то кривизна пространства везде одна и та же. Эйнштейн потребовал, чтобы космос не изменялся и, что его кривизна остается постоянной во времени. Он показал, что это приводит к статическому сферическому пространству, как если бы вселенная была замкнута в самой себе.

Что заставило Эйнштейна обратиться к большим космологическим масштабам? Если поместить массу в пустое пространство, то эта масса деформирует пространство вокруг себя, и возможные «планеты» ощущают это как гравитацию. На очень больших расстояниях от этой массы пространство деформируется все меньше и меньше, и там «планета», или пробная частица, практически не будет больше чувствовать никакой гравитации. Однако у нее все еще будет собственная масса, и она будет подчиняться закону движения Ньютона (т.е. у нее есть инерция). Откуда появляется эта инерция? Эйнштейн хотел включить в свою теорию гравитации принцип Маха, так чтобы эта инерция вызывалась взаимодействием между частицей и всей массой остальной вселенной. Но если мир – это всего лишь Млечный Путь, окруженный бесконечной пустотой, тогда почему инерция должна быть на очень больших расстояниях? Короче говоря, Эйнштейн думал, что он мог бы избежать этой не приносящей удовлетворения ситуации путем удивительной идеи избавиться от бесконечности и позволить вселенной быть конечной структурой без границ, т.е. сферическим пространством наподобие поверхности сферы в трехмерном пространстве. Карл Шварцшильд (Karl Schwarzschild) размышлял о сферической геометрии мира еще в 1900 году, но Эйнштейн смог поставить эту идею на прочную основу при помощи своего уравнения, связывающего кривизну и массу, содержащуюся во вселенной. Эйнштейна вдохновил принцип Маха, но происхождение инерции и в наши дни все еще остается загадкой.

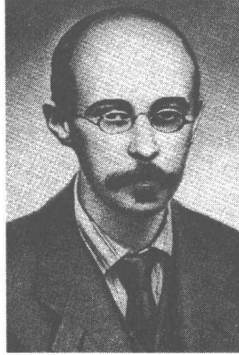


Рис. 9.1. Александр Фридман был математиком, специализировавшимся в теоретической механике и метеорологии, а стал основателем современной космологии.

Так как Эйнштейну потребовалось, чтобы пространство не менялось во времени, он использовал уравнения общей теории относительности более сложного вида, чем первоначально им же рассмотренные. Ему пришлось добавить так называемый лямбда-член, или *космологическую постоянную*, которая уравнивает вселенную, не позволяя ей коллапсировать.

Важный прорыв произошёл в 1922 году. В статье «О кривизне пространства» Александр Фридман нашел другое космологическое решение, в котором пространство расширяется, а кривизна и плотность материи меняются во времени. Для такой вселенной существует момент создания – большое, но конечное время назад.

Первая реакция Эйнштейна на статью Фридмана была не очень обнадеживающей. Он опубликовал короткий критический комментарий из пяти предложений, в которых заявил, что Фридман в действительности доказал, что его статическая модель является единственно возможной! Позже, получив от Фридмана личное письмо, Эйнштейн признал, что его критика была безосновательной – он сам допустил маленькую ошибку в вычислениях и теперь считает «результаты г-на Фридмана правильными и проясняющими».

Моделям Фридмана уже не нужен был лямбда-член. Позже Артур Эддингтон показал, что даже с лямбда-членом вселенная Эйнштейна неустойчива. Использование космологической постоянной для обеспечения статического состояния не даёт равновесия, как это случилось со стоящими иголками Ньютона. Когда Эйнштейн, ввиду

закона Хаббла, согласился, что расширяющиеся модели описывают мир лучше, чем его статическая модель, он с грустью сказал, что лямбда-член «был величайшей ошибкой в моей жизни» (как вспоминает Гамов в своей книге *Моя линия жизни*). Забавно, но сегодня космологическая постоянная Эйнштейна снова находится в центре внимания: некоторые наблюдения показывают, что она все-таки существует. Теперь Λ необходима для того, чтобы объяснить новые наблюдения и излечить некоторые проблемы, с которыми столкнулась космология большого взрыва.

Александр Фридман умер вскоре после того, как были открыты галактики, но до того, как был найден закон Хаббла. Он так и не узнал, насколько важны его исследования для современной космологии. Мы думаем об этом с некоторой ностальгией, потому что часть этой книги была написана в маленьком городке Павловске (под С.-Петербургом), где Фридман возглавлял Геофизическую обсерваторию. За несколько недель до своей безвременной смерти он совершил с научными целями полет на аэростате до рекордной высоты в 7400 метров.

9.2. Закон Хаббла как следствие однородности распределения вещества в пространстве

У обычной карты масштаб постоянный, но чтобы описать расширяющуюся вселенную, нужен изменяющийся масштаб. Вот почему модели Фридмана содержат важную величину, которая называется *масштабный фактор* $S(t)$. Он говорит о том, как возрастает расстояние между двумя галактиками по мере того, как течет время от рождения расширяющейся вселенной. На более ранней космической фазе масштаб был меньше, чем теперь, и галактики были ближе друг к другу.

Расширяющееся пространство оказывает на свет такое действие, что его частота уменьшается, а длина волны увеличивается, т.е. свет сдвигается в красную сторону, и говорят о космологическом красном смещении. Точные вычисления показывают, что длина волны меняется на столько же, на сколько масштабный фактор между моментами излучения и детектирования: когда масштаб вселенной удваивается, удваивается также и длина волны. Это приводит к очень простому соотношению между наблюдаемым красным смещением Z и отношением масштабных факторов. Ж. Леметр (G. Lemaître) впервые

показал, что $S(t_{now})/S(t_{emit}) = Z + 1$, где $S(t_{now})$ означает значение масштабного фактора в настоящую эпоху, $S(t_{emit})$ – это то значение, которое он имел в момент излучения света. Так, красное смещение $Z = 1$ означает, что свет был излучен, когда размер вселенной был равен половине настоящего размера. Космологи используют красное смещение как для обозначения различных прошлых эпох вселенной, так и для обозначения расстояния до галактик, так как за время $t = t_{now} - t_{emit}$ свет пройдет расстояние $r(t) = ct = r(z)$.

Таким образом, красное смещение является мерой расстояния. В терминах красного смещения можно разделить наблюдаемую вселенную на три «слоя»:

- * *Локальная вселенная*, где $Z < 0.1$
- * *Промежуточная вселенная*, где $0.1 < Z < 1$
- * *Далекая вселенная*, где $Z > 1$

Это деление несколько произвольно, но удобно. Говоря об очень больших расстояниях, астрономы обычно имеют в виду красные смещения больше 1. Расстояние, соответствующее красному смещению $Z = 1$, характеризует наблюдаемую часть вселенной, около 5000 мегапарсек. Напомним, что расстояние до ближайшей галактики, Андромеды, равно 0.7 Мрс. Отношение этих размеров велико, но не огромно – примерно как отношение радиуса Земли к размеру типичной деревни.

Однородность порождает закон Хаббла. После того, как был открыт мир галактик, вскоре стало общепринято думать, что человек, наконец, вступил в представительную часть вселенной. Например, закон Хаббла начинается недалеко от Млечного Пути, на расстоянии, всего в два раза большем, чем расстояние до галактики Андромеды. Кроме того, подсчеты галактик, выполненные Хабблом, указывали на однородное распределение галактик, которое интуитивно ожидал Эйнштейн, и которое позже стали называть Космологическим Принципом.

Затем, в 1930-ых годах Ховард Робертсон (Howard Robertson) и Джеффри Уокер (Geoffrey Walker) осознали, что между однородностью и скоростью расширения существует тесная связь. Общие геометрические рассуждения показывают, что если однородная вселенная расширяется, оставаясь однородной, тогда линейное соотношение «скорость-расстояние» будет выполняться для любой пары точек во вселенной:

*Ховард
Робертсон
1903-1861*

*Джеффри
Уокер
1909-2001*

$$\text{СКОРОСТЬ} = \text{константа} \times \text{РАССТОЯНИЕ}$$

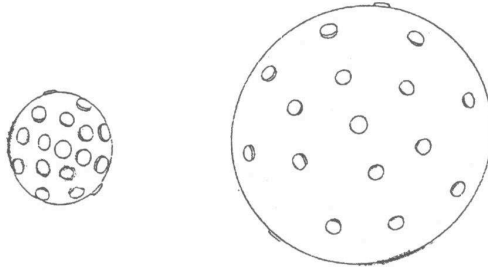


Рис. 9.2. Аналогия расширяющейся вселенной с надуваемым воздушным шаром (по Артуру Эддингтону). Когда радиус шара растет, расстояния между монетами, наклеенными на шар, увеличиваются. Это демонстрирует, как в расширяющейся вселенной возникает закон Хаббла. Монеты представляют нерасширяющиеся галактики, следовательно, расширяется только пространство между монетами.

Это теоретическое соотношение тоже часто называют законом Хаббла, наряду с исходным, наблюдаемым законом «красное смещение - расстояние». Таким образом, в расширяющемся однородном пространстве точное выражение для скорости удаления галактики, находящейся на расстоянии R , имеет вид: $V_{exp} = H \times R$. Однако выражение для красного смещения есть сложная функция расстояния $Z = Z(R)$ и является линейной функцией только для очень маленьких значений: $Z \approx (H/c)R$, при $Z \ll 1$. Из последней формулы можно также вывести приближительное значение для скорости расширения, когда известно красное смещение, т.е. $V_{exp} \approx cZ$.

Связь между предполагаемой однородностью распределения вещества и законом Хаббла была первым большим успехом модели расширяющейся вселенной. Она с необходимостью приводит к началу в прошлом, т.е. к Большому Взрыву, что можно представить в виде логической цепочки:

Однородность → Закон Хаббла → Большой Взрыв

Для расширяющейся вселенной существенно, что растягивается само пространство, и удаление галактик не является простым движением внутри пространства. Это решает геркулесову проблему (возникающую в статическом пространстве) о том, как организовать для каждой галактики необходимую начальную скорость так, чтобы закон Хаббла всегда выполнялся. Об этом законе заботится

разбухающее повсюду пространство, так же как изюминки в поднимающемся пудинге, без всякого усилия с их стороны, равномерно удаляются друг от друга.

Конечно, нужно, чтобы существовал однородный субстрат, приводящий к однородно расширяющемуся пространству. Если не обращать внимания на некоторые проблемы, к которым приводит требование однородности (откуда вселенная «знает», что распределение материи всюду однородно), автоматическое появление закона Хаббла, при однородном расширении пространства имеет несомненную внутреннюю красоту.

9.3. Возраст Вселенной в модели Фридмана

Александр Фридман открыл модель вселенной, в которой какое-то конечное время назад произошел момент творения. Он обсуждал также концепцию периодического мира. Вселенная может расширяться до максимального размера, затем сжаться в нулевой размер, а затем расширяться, и так бесконечно. Хотя он осторожно заметил, что «нашей информации совершенно недостаточно, чтобы произвести числовые вычисления и определить, каким миром является наша вселенная», он дал иллюстративный пример, приводящий к миру с периодом в 10 млрд. лет.

Фридман открыл новое направление в космологии, где возраст вселенной стал измеримым. Если галактика на расстоянии R удаляется от нас со скоростью $V = H \times R$, где H – константа Хаббла, тогда простое правило «время равно расстоянию, деленному на скорость», дает момент, когда все галактики находились рядом. И неважно, для какой галактики вы производите это вычисление, время получается одно и то же. Это *хаббловское время* T_H примерно равно возрасту вселенной Фридмана: $T_H = R/V = 1/H$. Размерность постоянной Хаббла это км сек⁻¹ / Мпк, или 1/сек. Расстояние $cT_H = c/H$ называется *хаббловским расстоянием*. Оно равно примерно 5000 Мпк при $H = 60$ км сек⁻¹ / Мпк.

Если можно таким образом вычислить, когда началась вселенная, нельзя не задать вопрос, а что было до начала? Этот вопрос не нов. Платон писал, что время началось вместе с появлением пространства и материи. В этом смысле мир не был создан во времени, и бессмысленно спрашивать, что было *до этого*.

Современная космология одобряет ответ Платона на вопрос о времени. Существует нулевая точка на оси времени. Ось и время не существуют «до» нуля, который обозначает сингулярность, о которой почти ничего не известно, кроме того, что плотность вселенной там бесконечна. Однако из нулевой точки до настоящего момента можно попытаться описать эволюцию мира теоретической моделью, в которой время отсчитывается почти так же, как в физике вообще. Можно допустить, что если модель удовлетворительно описывает мир от настоящего времени назад до какого-то момента, близкого к нулевой точке, даже если природа этой точки неизвестна, то есть смысл говорить о возрасте вселенной.

Возраст звезд равен возрасту вселенной. Если бы мы стали следить, как меняется формирующаяся звезда, когда из межзвездного облака она сжимается в протозвезду, то сначала странствовали бы по диаграмме Герцшпрунга-Рассела, а затем, когда начались ядерные реакции, в конце концов, обосновались бы на главной последовательности. На этой узкой полосе звезда на какое-то время задерживается, прежде чем разбухает в красный гигант. От чего зависит, как долго звезда будет радоваться спокойной, похожей на солнечную, жизни на фазе главной последовательности? Ответом является масса.

Массы звезд не могут быть произвольно большими или маленькими. Чем меньше звезда, тем ниже температура внутри нее. Если масса протозвезды меньше, чем 0.05 массы Солнца, то температура слишком низка, чтобы зажечь ядерные реакции. Подобные «осечки» называются коричневыми карликами. А для самых больших звезд природа, кажется, положила предел в 100 масс Солнца.

Звезда, похожая на наше Солнце, проводит в этой зрелой фазе своей жизни около 10 млрд. лет. Более массивная, а также более горячая и более яркая звезда быстрее претерпит критические внутренние изменения и продолжительность ее жизни меньше. Грустно, но факт: чем ярче звезда, тем короче ее жизнь! Приведем современные данные о продолжительности жизни звезд (масса и светимость выражены в единицах Солнца, а продолжительность жизни на главной последовательности в миллионах лет):

Масса	светимость	Фаза ГП
30	140 000	4.9
5	630	68
1	0.74	10 000
0.5	0.038	30 000

Ясно, что звезды могут сильно различаться по времени жизни. За исключением самых массивных звезд, имеющих очень короткую фазу главной последовательности (ГП), общая продолжительность жизни (\rightarrow протозвезда \rightarrow звезда ГП \rightarrow красный гигант \rightarrow звездный остаток) почти такая же, как время на главной последовательности. Другие стадии жизни звезды оказываются короче.

Таблица показывает еще две вещи. Во-первых, маленький возраст очень массивных звезд, которые во множестве видны в Млечном Пути, должен убедить без каких-либо других дополнительных доказательств, что рождение звезд еще продолжается. Иначе мы не могли бы увидеть массивные звезды в такой старой вселенной. Во-вторых, продолжительность жизни для звезд меньше Солнца вполне «космологическая». Это дает возможность использовать главную последовательность для определения нижней границы возраста вселенной.

Особенно удобными объектами для определения возраста являются шаровые звездные скопления – плотные звездные системы, которые могут содержать миллионы звезд. Они окружают галактики как остатки тех древних времен, когда образовывалась их хозяйская галактика. У нашего Млечного Пути тоже есть свой рой из более сотни шаровых скоплений.

На диаграмме Герцшпрунга-Рассела для старых шаровых скоплений звезды, которые уже покинули главную последовательность, имеют массы немного меньше, чем масса Солнца. Такие звезды должны были попасть на свою фазу зрелости более 10 млрд. лет назад. Теория звездной эволюции приводит к выводу, что самые старые шаровые скопления нашего Млечного Пути родились 13-18 млрд. лет назад. Это близко к тому, что дают оценки для хаббловского времени. Возраст вселенной согласно принятой сейчас модели составляет 13.7 млрд. лет.

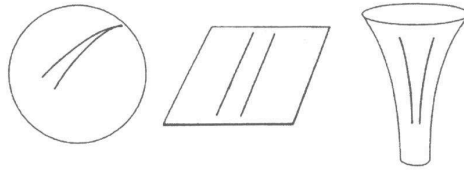


Рис. 9.3. Сферическая, евклидова и гиперболическая геометрии вселенной Фридмана. Эти двумерные аналогии показывают, как параллельные линии пересекаются в сферическом пространстве и расходятся в гиперболическом.

9.4. Геометрия мира и параметр плотности

Алан Сэндидж однажды дал шуточное определение современной космологии, которое трудно сделать короче: «космология это наука о двух числах». Действительно, модели Фридмана можно охарактеризовать всего двумя величинами (забыв на минуту о космологической константе Эйнштейна). Одной величиной является постоянная Хаббла H . Она говорит о том, как быстро масштабный фактор растет со временем (например, в настоящую эпоху). Вторая величина – это параметр плотности Ω (омега), равный отношению плотности массы во вселенной к так называемой «критической» плотности:

$$\Omega = \text{плотность космической массы} / \text{критическая плотность}$$

Параметр плотности $\Omega = \rho/\rho_{crit}$ содержит критическую плотность, которая равна $\rho_{crit} = 3H^2/8\pi G = 0.677 \times 10^{-29} \text{ г/см}^3$ для $H = 60 \text{ км сек}^{-1} / \text{Мпк}$. «Типичная» плотность для вселенной вокруг нас соответствует всего 1/100 грамма вещества в таком большом объеме, какой занимает Земля!

Космологические модели Фридмана допускают только три типа геометрии пространства: сферическая, евклидова и гиперболическая. Эти три однородных пространства имеют положительную, нулевую и отрицательную кривизну соответственно. Значение параметра плотности важно потому, что оно определяет геометрию и будущую судьбу расширяющегося пространства, как показано в таблице.

Геометрия	Кривизна	Плотность	Объем	Эволюция
сферическая	$K > 0$	$\rho > \rho_{\text{crit}}$	конечный	расширение и коллапс
евклидова	$K = 0$	$\rho = \rho_{\text{crit}}$	бесконечный	вечное расширение
гиперболическая	$K < 0$	$\rho < \rho_{\text{crit}}$	бесконечный	вечное расширение

Конечная модель похожа на сферическую вселенную Эйнштейна, но она расширяется. Расширение, в конце концов, остановится и сменится сжатием. Средний случай, для которого плотность вещества равна критической, соответствует бесконечному евклидову пространству. Вечно расширяющиеся пространства с плотностью меньше критической тоже имеют бесконечные (гиперболические) геометрии.

Старое определение Сэндиджа – поиск двух чисел – возможно звучит слишком ограниченно, но в действительности оно касается таких фундаментальных вопросов как: Каков возраст Вселенной? Конечен или бесконечен ее размер? Является пространство евклидовым или нет? Какова плотность космического вещества? Современные модели включают и космологическую постоянную Эйнштейна, но вопросы остаются те же самые.

Космическая плотность вещества во вселенной. Таким образом, существует способ определить геометрию, если вселенная описывается моделью Фридмана. Просто измерьте плотность вещества во всех его видимых и невидимых формах! Легче сказать, чем сделать. В качестве первого шага, исследования количества светящегося вещества в виде звезд в галактиках установили жесткую нижнюю границу на параметр плотности в локальной вселенной:

$$\Omega > \Omega_{\text{lum}} \approx 0.004$$

Если бы галактики были единственным компонентом вселенной, то плотность $\Omega = 0.004$ означала бы, что мы живем в бесконечной вселенной с гиперболически искривленным пространством. Однако астрономы могут получить информацию и о параметре Ω для *полной* плотности, включая темную форму вещества, по множеству космологических наблюдений. В настоящее время популярно считать

Ω близким к единице. Это означает, что мы можем прямо увидеть по свету от звезд только 0.4% от вещества, составляющего вселенную!

9.5. Горячее начало Вселенной в модели Большого Взрыва

Первым, кто рассматривал раннюю вселенную как очень горячее состояние, был Георгий Гамов, первооткрыватель альфа-распада, горячего начала и генетического кода. Этот российский физик родился в Одессе, учился в Санкт-Петербургском (Ленинградском) университете, специализировался в квантовой теории и узнал о космологии расширяющегося пространства от Фридмана. В 1928 году он объяснил, как альфа-частицы могут вырваться из своей тюрьмы – атомного ядра – через квантово-механический «туннельный эффект». Это явление работает и наоборот и практически заставляет Солнце светить! Допустим, что внутри Солнца два протона могут найти друг друга и слиться, но этому мешает электрическое взаимное отталкивание. Даже температура в 15 млн. градусов не дает им достаточно энергии, чтобы преодолеть этот барьер. Но туннельный переход помогает протонам настолько сблизиться, что побеждает сильная ядерная сила и тянет их друг к другу.

В 1933 году Гамов не вернулся в Советский Союз из поездки на конференцию на Запад. Он переехал жить и работать в Америку. В 1948 году он предположил, что начальное состояние вселенной было очень горячим, заполненным тепловым излучением. Расширение вселенной остудило это излучение. Исследовательская группа Гамова предсказала, что в наше время его температура должна быть около 5 градусов выше абсолютного нуля.

Гамов был также широко известен своими популярными книгами о науке. Он создал господина С.Г.Н.Томпкинса, приключения которого сделали общую теорию относительности и квантовую теорию знакомой миллионам читателей. В инициалах героя можно узнать мечту о релятивистской квантовой гравитационной теории...

В 1965 году радиоастрономы Арно Пензиас (Arno Penzias) и Роберт Вильсон (Robert Wilson), работавшие на телефонную компанию Белл, изучали радиосум, затрудняющий связь, как и пионер радиоастрономии Янский за 30 лет до этого. Они пришли к выводу, что этот шум возникает за пределами Млечного Пути.

Излучение носило тепловой характер с температурой около 3 градусов Кельвина.

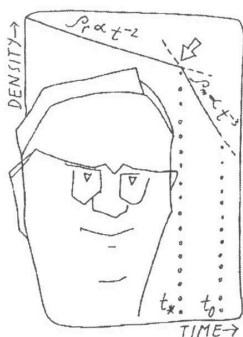


Рис. 9.4. Георгий Антонович Гамов и его вывод температуры космического фонового излучения в представлении А.Чернина

Излучение с такой низкой температурой наиболее интенсивно на микроволнах (длина волны около одного миллиметра). За это открытие *космического фонового излучения* Пензиас и Вильсон в 1978 году были награждены Нобелевской премией по физике.

Естественно, что излучение, открытое Пинзиасом и Вильсоном, посчитали остатком горячего начала, как предсказывала команда Гамова. В настоящее время оно считается лучшим доказательством большого взрыва, и его трудно объяснить чем-либо другим.

Наблюдения космического излучения на спутнике COBE в 1990-ых годах намного улучшили наше знание о его свойствах. Это совершенно тепловое излучение с температурой 2.725 ± 0.001 К. Его интенсивность почти одинакова во всех направлениях, за исключением разницы температуры в 0.0033 К между противоположными сторонами неба, которая отражает движение нашего Солнца в 400 км/сек относительно далеких источников космического излучения.

На угловых размерах более 7 градусов спутник COBE обнаружил небольшие температурные флуктуации, так что температура неба может варьироваться примерно на 0.00003 К в разных направлениях. Обычно считается, что это вызвано первичными зародышами крупномасштабной структуры вселенной.

Оборудование, установленное на баллонах, и наземные наблюдения выявили температурные флуктуации на угловой шкале примерно в один градус. Это позволяет космологам определить, используя Фридмановскую модель, что параметр плотности вселенной близок к единице: $\Omega = 1.01 \pm 0.02$. Маленькие пределы ошибок в полученном параметре плотности примечательны в космологических исследованиях: если они действительно содержат все источники ошибок, включая скрытые систематические ошибки, тогда действительно возмещают приход «точной космологии» (термин, придуманный космологом Майклом Тернером).

Трехградусное свечение – холодный остаток горячего взрыва. На ранних фазах большого взрыва вселенная была заполнена фотонами. Можно предположить, что первоначально этот свет-энергия был создан вместе с пространством и временем, и когда-то давно свет был намного важнее, чем вещество! Энергия отдельных фотонов уменьшается потому, что длина волны растягивается вместе с пространством. Но энергия массы покоя частиц вещества остается одной и той же. Это объясняет, почему излучение теперь содержит намного меньше энергии, чем вещество, хотя фотоны намного, намного более многочисленны, чем протоны и электроны!

Если оглянуться назад по времени, как бы просматривая фильм об эволюции вселенной в обратном порядке, видно, что в прошлом галактики были ближе друг к другу, и плотность вещества была выше, чем сейчас. Но видно, что плотность излучения возрастает все-таки быстрее – было время, когда излучение имело более высокую плотность энергии, чем вещество. Во вселенной доминировало излучение, и оно было намного горячее, чем нынешние 2.7 К. Температура излучения связана с красным смещением соотношением: $T(Z) = T_{\text{now}} \times (1 + Z)$, при этом плотность вещества и плотность излучения как функции красного смещения ведут себя следующим образом: $\rho_{\text{matter}} \sim (1 + Z)^3$, $\rho_{\text{rad}} \sim (1+Z)^4$. Так, галактики на красном смещении $Z = 1$ купаются в температуре в два раза выше, чем теперь, т.е. около 6 К.

На больших красных смещениях (Z около 1500) температура превышает 4000 К, и это означает, что до этой эпохи весь водород был ионизован и вещество представляло горячую плазму из протонов и электронов. В то время не было галактик или звезд. Излучение сильно взаимодействовало с электронами плазмы и это обеспечивало, что

плазма и излучение были в термодинамическом равновесии, придавая излучению совершенно тепловой характер.

По мере расширения температура уменьшалась, и электроны захватывались протонами, образуя обычный водородный газ, который не оказывал излучению большого сопротивления. Нынешнее тепловое свечение – это охлажденные потомки тех фотонов, которые отделились от вещества примерно при $Z = 1500$. Это красное смещение означает также последний видимый барьер. Из времени, предшествующего этой эпохе, мы не можем получать сообщения, переносимые фотонами.

Происхождение легких элементов. Начальные минуты представляют собой самый драматический акт в пьесе под названием Большой Взрыв – тогда были написаны первые части таблицы Менделеева. Этот сценарий был раскрыт в 1950-ые годы усилиями нескольких теоретиков. Их вычисления показали, что в горячей плазме могли образоваться два главных химических элемента вселенной: в результате нуклеосинтеза получилось бы 25% гелия, оставив 75% на водород. Эти цифры близки к тому, что наблюдается в звездах и космическом газе.

Гелий родился примерно через одну минуту после большого взрыва. Тогда вся вселенная на какое-то время была похожа на центр звезды! Ее температура упала до 10^{10} К, и теперь было слишком «холодно», чтобы протоны и нейтроны превращались друг в друга. Их численное отношение было «заморожено» так, что на 15 нейтронов приходилось 100 протонов. Нейтроны объединялись с таким же числом протонов в ядро гелия (два протона + два нейтрона) через тот же ядерный реактор, который управляет Солнцем. Оставшиеся протоны были доступны для создания водорода. Следовательно, ожидаемая массовая доля гелия равна около $30 / (15 + 100) \approx 0.25$. Кроме того, были созданы гелий-3, дейтерий (H^2) и литий-7. Более тяжелые элементы таблицы Менделеева родились позже, внутри звезд и во взрывах сверхновых.

Наблюдения распространенности легких элементов вместе с теорией нуклеосинтеза при большом взрыве все-таки дали еще одну космологическую цифру – параметр плотности барионного вещества (протонов, атомов и другого обычного вещества): $\Omega_{\text{bar}} = 0.060 \pm 0.006$. Так как плотность светящегося вещества равна $\Omega_{\text{lum}} = 0.004$, звезды и космический газ показывают нам всего 10% от всего барионного вещества. Действительно ли масса в 90% от предсказанного

барионного вещества существует и состоит ли оно тоже из 75% водорода и 25% гелия? Пока мы не знаем ответы на эти ключевые вопросы.

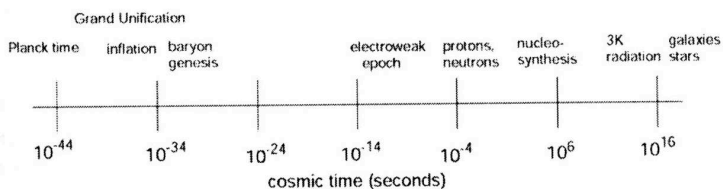


Рис. 9.5. Некоторые вехи в истории вселенной большого взрыва. Особенно важны две эпохи. Первая, на времени 10^{-12} сек разделились электромагнитная сила и слабое ядерное взаимодействие. Вторая, 10^{13} сек \approx 300 000 лет есть эпоха рекомбинации, когда фоновое космическое излучение перестало сильно взаимодействовать с веществом. Она наблюдается теперь как 3-градусное тепловое свечение, равномерно наполняющее вселенную.

9.6. Необходимость инфляции в моделях Фридмана

Вселенные Фридмана не страдают от старых парадоксов вечной бесконечной вселенной. Темное небо отражает редкий лес из галактик, видимых до максимального расстояния, которое в световых годах равно возрасту вселенной. Возраст средней звезды близок к этому, и потому неудивительно, что существует так много звезд, светящих в самом расцвете их жизни. Кроме того, тепловая смерть не актуальна в нашей сравнительно молодой вселенной.

В Главе 3 мы обсуждали парадокс темной ночи, сказав, что в бесконечном пространстве, заполненном звездами, любой луч зрения наталкивается на звезду. Но почему диск далекой звезды должен быть таким же ярким, как солнечный? Действительно, в прозрачном евклидовом пространстве яркость поверхности остается одинаковой независимо от того, с какого расстояния на него смотрят. Но не во вселенной Фридмана! Поверхность быстро тускнеет при взгляде на все более и более далекие диски. Хотя этот эффект работает в прямом смысле, в действительности именно малый возраст вселенной делает небо темным, как думал еще Лорд Кельвин. И ночное небо не полностью темное, а светится суммой света от всех галактик, который дошел до нас сейчас, а был излучен в разное время в прошлом. Этот

космический свет очень тусклый и его трудно обнаружить, но все-таки так реальная вселенная бледно воплощает ослепительное небо Ольберса.

Новые загадки однородного мира Фридмана. Среди всех Фридмановских вселенных модель евклидова пространства (кривизна $K = 0$, а параметр плотности $\Omega = 1$) выделяется особо. Если вселенная была плоской в начале, она будет плоской всегда. Но если параметр плотности в начале отклонился на любую малейшую величину, то до настоящего времени это легкое отклонение выросло чрезвычайно. Это делает странным то, что в настоящее время наблюдаемое значение Ω близко к 1.

Действительно, в этом случае в прошлые моменты времени Ω должно приближаться к критическому значению 1 сколь угодно близко. Для числового примера мы используем результат теории Фридмановских вселенных: параметр плотности Ω связан с масштабным множителем S как $|\Omega - 1| = \text{const} \cdot S^2$. Предположим, что в настоящее время $|\Omega - 1| \approx 1$, т.е. Ω не очень отличается от 1. Когда возраст вселенной составляет одну секунду, ее масштабный множитель в 10^{-8} раз меньше нынешнего. В то время, как показывает вышеприведенная формула, значение Ω должно было быть равным 1 с точностью до 16-го знака после запятой: оно было где-то между 1.0000000000000001 и 0.9999999999999999.

Если пространство первоначально было евклидовым, тогда это не удивительно. Но если пространству не было причин быть евклидовым, тогда зачем параметр Ω был так избыточно хорошо настроен? Это евклидов парадокс или парадокс плоскостности.

Космическое тепловое излучение считается сильным свидетельством в пользу большого взрыва. Однако еще одно свойство – его почти совершенная изотропия (равная интенсивность во всех направлениях) – является трудной проблемой той же космологии. Почему наблюдаемая изотропия так загадочна для фридмановской модели?

Чтобы увидеть суть проблемы, рассмотрим две части вселенной, разделенные расстоянием, большим чем то, которое луч света прошел с момента рождения вселенной. Так как вселенная существовала только конечное время, эти отдаленные части пространства не могли «узнать друг о друге», поскольку скорость света – это максимальная скорость, с которой передается информация. Если мир бесконечен, он должен быть бесконечным сразу после

рождения. Тогда, из-за ограниченной скорости света, существуют области, которые не могли быть причинно связаны за короткое время существования вселенной.

Можно легко указать две таких области на небе. Рассмотрим два любых противоположных направления. Фотоны космического излучения, приходящие из этих направлений, были рождены примерно 15 млрд. лет назад, следовательно, грубо говоря, места их рождения теперь разделены на 30 млрд. световых лет. Когда фотоны родились, размер вселенной был в 1500 раз меньше, чем теперь, значит, между этими местами было расстояние в 20 млн. световых лет. Но в то время вселенной было всего 300 000 лет!

Точные вычисления, основанные на фридмановской модели, показывают, что фотоны космического излучения, приходящие из направлений, разнесенных более чем на 3 градуса (шесть полных лун), вышли из областей, которые никогда не соприкасались. Тогда почему температура по всему небу одинакова с точностью до 10^{-5} ? Это парадокс изотропии.

Приходит инфляция и разрешает парадоксы. Пытаясь понять эти парадоксы, можно спросить, что должно было произойти в ранней вселенной, что не было включено в обычную модель Фридмана. Так, американский физик Алан Гус в 1981 году предложил инфляционную модель. Эту модель развивали также российские физики Алексей Старобинский и Андрей Линде. Инфляционная модель очень ранней вселенной гласит, что космологическая постоянная была сначала ненулевой, а масштабный фактор вселенной экспоненциально увеличивался из-за гравитационного отталкивания вакуума.

Инфляция является привлекательной моделью, потому что она и объясняет взрыв, и предлагает решение загадки изотропии. Можно показать, что до инфляции, когда ранняя вселенная была в зрелом возрасте 10^{-40} секунд, все вещество внутри области размером 10^{-24} см имело достаточно времени, чтобы быть причинно связанным. Затем вселенная начала расширяться со стремительно растущим ускорением: масштабный множитель рос экспоненциально (как e^{Ht}) с характерным временем $1/H=10^{-34}$ сек.

Во время инфляции шкала чрезвычайно увеличилась, более чем в 10^{25} раз от своего начального размера, и причинно связанная область размером в 10^{-24} см достигла размера грейпфрута примерно во время 10^{23} сек. В то время вселенная, наблюдаемая в настоящее время,

была сжата внутри такого объема, где вещество и излучение взаимодействовали, и, таким образом, температура теперь может быть одинаковой по всему небу.

Инфляционная модель объясняет также, почему наблюдаемая вселенная не очень отличается от евклидовой. Фаза инфляционного расширения «выравнивает» пространство, как если бы шар надувался до чрезвычайно большого размера. Получающееся пространство было бы близко к евклидову вплоть до очень больших расстояний.

Возраст инфляционной вселенной. Рассмотрим возраст вселенной с критической плотностью вещества. Когда мы видим галактику с красным смещением Z , возраст вселенной T_{age} в то время, когда свет был излучен, можно вычислить по простой формуле, если известна константа Хаббла H . Текущий возраст инфляционной вселенной равен просто хаббловскому времени $(1/H)$, умноженному на $2/3$. Наблюдения помещают H где-то в пределах $50\text{-}70 \text{ км сек}^{-1}/\text{Мпк}$, так что $T_{\text{age}} = (2/3) \times T_H / (1 + Z)^{3/2}$.

В таблице ниже мы даем «время взгляда назад» T_{back} и «время, прошедшее со времени большого взрыва» T_{age} для нескольких красных смещений, используя $H = 60$. Возрасты даны в миллионах лет.

Z	T_{back}	T_{age}
0	0	11000
1	7100	3900
3	9600	1400
5	10250	750
7	10490	510
10	10700	300

В этой модели текущий возраст вселенной равен 11 млрд. лет. Ясно, что ни одно небесное тело не может быть старше, чем сама вселенная, особенно если вселенная началась с сингулярности большого взрыва, в которой не было даже элементарных частиц, не говоря о звездах или галактиках.

9.7. Необходимость небарионной темной материи

Когда вселенная большого взрыва была моложе 100 000 лет, большую часть плотности энергии несли фотоны. Все обычное вещество было разбито на электроны и протоны, и на эту кашу из

заряженных частиц сильно влияли фотоны, которые быстро рассеивали любую попытку вещества начать формирование плотных сгустков.

Расширяющаяся вселенная остывала, и когда температура достигла 3000 К (при возрасте около 300 000 лет), электроны и протоны смогли объединяться и образовывать нейтральные, неионизованные атомы. Затем вещество начало эволюционировать «само по себе», под действием собственной гравитации в расширяющемся пространстве. Излучение, постепенно остывая, почти не взаимодействовало с веществом.

В терминах красного смещения эта революционная фаза произошла около $Z \approx 1000$. После этого, хотя и до эпохи, когда мы уже можем видеть галактики ($Z \approx 7$), более плотные области первичного газа начали конденсироваться в молодые галактики, производящие звезды. Этот длительный (около 1 млрд. лет) период до того, как появился «первый свет», удачно назвали *темной эпохой*, о котором в настоящее время известно очень мало. В темную эпоху проникнуть трудно, и неизвестно, когда родились первые настоящие галактики.

А что же с более крупными наблюдаемыми образованиями, такими как скопления и волокна? Очень хочется понять, как образовались такие гигантские структуры. Современные модели образования структур начинают с первичных флуктуаций плотности. Можно вычислить, как они вырастают в более крупные сгустки вещества, собранные гравитацией из маленьких зародышей, плавающих в расширяющейся гладкой субстанции. Конечный результат должен походить на галактическую вселенную, какой мы видим ее сейчас. Чтобы объяснить комки галактик, неизбежно потребуется большое количество темного вещества в виде необычной небарионной материи. Самыми популярными моделями являются CDM (Cold Dark Matter – холодное темное вещество) и HDM (Hot Dark Matter – горячее темное вещество). Некоторые модели смешивают холодное и горячее темное вещество в попытках создать более реалистичные структуры. Согласно этим моделям темное вещество должно составлять около 25% полной плотности материи во вселенной. Эта таинственная субстанция будет появляться в нашей истории снова и снова.

Кроме небарионного темного вещества современные модели Фридмана неизбежно должны содержать также загадочную темную энергию или квинтэссенцию. Необходимость включения такой субстанции с отрицательным давлением следует из интерпретации

наблюдаемого соотношения между звездной величиной и красным смещением для далеких сверхновых звезд, а также из наблюдений флуктуаций микроволнового фонового излучения. Доля темной энергии, необходимой для согласования теории с наблюдениями, составляет 70%.

9.8. Триумф модели большого взрыва – главные компоненты и гипотезы

Подводя итог нашей экскурсии по большому взрыву, перечислим здесь основные принципы и главные наблюдения, которые создали триумф этой космологической модели. Двумя фундаментальными предположениями космологии большого взрыва являются:

- * *космологический принцип однородности и*
- * *применимость общей теории относительности ко всей Вселенной.*

Однородное распределение вещества и эйнштейновские уравнения общей теории относительности приводят к фридмановской космологической модели, которая дает следующую интерпретацию ключевым наблюдениям в космологии:

- * *закон Хаббла есть следствие расширения однородной вселенной,*
- * *горячее плотное начало породило космическое тепловое излучение и первичные флуктуации плотности,*
- * *в процессе расширения вселенная остывает, приводя к современной низкой температуре фонового излучения и наблюдаемой распространенности легких элементов,*
- * *первичные флуктуации плотности растут за счет гравитации, образуя крупномасштабную структуру вселенной.*

Но этого не достаточно. Чтобы обеспечить триумф большого взрыва, нужны важные дополнительные ингредиенты:

- * *инфляция – объясняет изотропию космического излучения;*
- * *темное небарионное вещество – создает крупномасштабную структуру и уменьшает неравномерности космического излучения;*

- * *темная энергия – объясняет ускорение расширения, наблюдаемое посредством соотношения звездная величина - красное смещение;*
- * *космический «рецепт» – около 70% темной энергии, 25% холодного темного вещества, 2.5% горячего темного вещества, 2.5% барионного вещества, включая 0.5% светящихся звезд и газа.*

Темное вещество создает структуры, не оставляя больших следов в фоновом космическом излучении, как это неизбежно происходило бы, если бы барионное вещество собиралось само, без доброй помощи от темного небарионного вещества. Этот список также содержит самое последнее достижение большого взрыва – странную субстанцию под названием «темная энергия». Она необходима, чтобы объяснить наблюдения очень далеких сверхновых.

Почти единодушное принятие космологической модели большого взрыва демонстрирует впечатляющий триумф парадигмы расширяющейся вселенной, на основе которой дается объяснение всем имеющимся наблюдательным фактам. Под давлением столь грандиозной картины, конечно, возникает соблазн закончить книгу в этом месте. Однако это не конец истории, и самые драматические повороты еще впереди. Действительно, как учит история, любая теория Вселенной не может быть окончательной истиной. Когда наблюдения продвигаются глубже, всегда появляются новые неожиданные явления, которые делают уважаемые старые теории – на самом деле старыми и, конечно, уважаемыми.

Глава 10

Открытие тенденции галактик к сгущиванию

10.1. Неоднородности в распределении галактик на небесной сфере

Тысячелетиями звезды считались неподвижными точками на небесной сфере, до тех пор, пока расстояния до них не стали измеримыми. После изобретения телескопа человек узнал о туманностях. Очевидно, что туманности находились на разных расстояниях, но можно было только вглядываться в эти туманные пятна, не имея средств измерить, каковы же в действительности эти расстояния.

Древние наблюдали разные созвездия, которые не являются настоящими группами звезд, а всего лишь интересными проекциями на небе. Но есть и настоящие звездные скопления, такие как Гиады и «Семь сестер» или Плеяды. Что-то похожее происходит с астрономами, когда они наносят на карту положения туманностей на небе. Охотник за кометами Шарль Мессье обнаружил концентрацию туманностей в созвездии Девы. Вильям Гершель обнаружил скопление из многих сотен туманностей в Волосах Вероники и некоторые другие группы. Затем его сын Джон получил намеки на существование того, что теперь называется Локальным Сверхскоплением – концентрацией в Деве, «которая считается основным телом этой системы», а наша Галактика «расположена за пределами ее самой плотной части».

Фотографические обзоры неба в первые годы XX века выявили тысячи новых туманностей, и эта работа была продолжена с еще большим рвением, когда оказалось, что туманности – это галактики. Стало ясно, что полоса туманностей проходит через Деву и перпендикулярна бедной туманностями ленте Млечного Пути. Существование уплощенного Локального Сверхскопления было установлено в 1950-ые годы в основном усилиями де Вокулера. Действительно существует полоса, образованная на небе галактиками – что-то похожее на Млечный Путь, видимый на звездном небе!

Галактики на небе показывают явную тенденцию скапливаться также за пределами ленты Локального Сверхскопления. Эти скопления стали индивидуальными объектами исследований. В 1927 году Лундмарк нанес на небесную сферу 55 скоплений в статье, в которой он также признал, что галактики часто обнаруживаются парами, образующими двойные галактики. Карта наводила на мысль, что скопления сами могут скапливаться. Были ли это настоящие скопления скоплений, т.е. сверхскопления? Десятилетия жарких споров ушли на то, чтобы решить этот вопрос.

10.2. Происхождение спора о сверхскоплениях галактик

Первая стадия спора относится к 1930-ым годам. Хаббл доказывал, что скопления галактик являются последними структурными единицами в распределении вещества, тогда как Харлоу Шепли (Harlow Shepley) представил доказательства о еще более крупных структурах. Шепли был директором Обсерватории колледжа в Гарварде и ведущим американским астрономом, который к концу 1910-ых годов использовал шаровые звездные скопления (и звезды цефеиды) для составления карты Млечного Пути, обнаружив, что его центр находится далеко, в направлении на созвездие Стрельца. Это важное открытие снова сдвинуло нас с центрального положения – согласно модели, популярной до работы Шепли (так называемая Вселенная Каптейна), считалось, что мы находимся довольно близко к центру Млечного Пути.

Шепли инициировал широкий фотографический обзор галактик. Каталог Шепли-Еймс 1932 года, содержащий 1249 ярких галактик, явился основой для Опорного Каталога де Вокулеров в 1960-е годы. Исследуя распределение скоплений галактик, Шепли пришел к выводу, что существуют «метagalактические облака» (нынешние сверхскопления), например, в созвездии Волосы Вероники, Центавре и Геркулесе. Облако в Центавре теперь называется сверхскоплением Шепли.

Интересно упомянуть, что Клайд Томбо, первооткрыватель планеты Плутон, отметил сверхскопление Персей-Рыбы как побочный продукт его интенсивных поисков планеты. Он насчитал 1800 галактик в этом удлинённом облаке, которое теперь является активно исследуемой концентрацией скоплений галактик на

*Харлоу
Шепли
1885-1972*

*Клайд
Томбо
1906-1997*

расстоянии около 100 Мпк. Когда Томбо работал в обсерватории Лоуелл, его начальни-

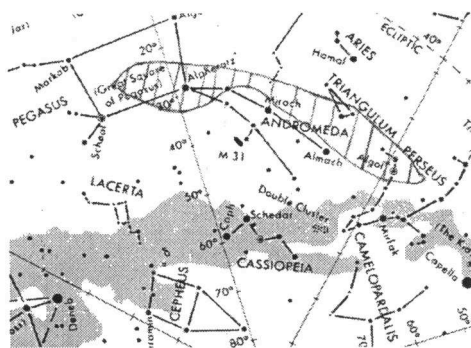


Рис. 10.1. В 1936 году Клайд Томбо (Clyde Tombaugh) открыл вытянутое сверхскопление из 1800 галактик, протянувшееся между созвездиями Персея и Рыб. Оно обведено на верхней части этой карты. Обратите внимание на серую ленту Млечного Пути, с созвездием Кассиопеи внутри (и внутри Локального Спирального Рукава) и на нашу соседнюю галактику Андромеду (M31).

ком был Весто Слайфер – первооткрыватель космологических красных смещений!

В отличие от Шепли, Эдвин Хаббл считал, что «тенденция к скапливанию, по-видимому, действует на ограниченном масштабе. Никакие структуры на шкале, превышающей большие скопления ... определенно не известны». В то время число скоплений было еще мало, и огромный авторитет Хаббла одержал победу. Кстати, в 1940-ые и 1950-ые годы Шепли, как и многие его соотечественники, попал под наблюдение ФБР, в тщетной попытке доказать его связь с коммунизмом (как сообщалось в январском выпуске журнала *Astronomy*). Его описывали как «упрямого сторонника собственных идей», с «врожденной нелюбовью к властям», желающего «неизменно делать противоположное тому, что ему приказывали или чего от него ожидали». Возможно, искренний информатор считал эти черты чем-то отрицательным в обществе, но в науке таланты идут собственным путем...

Кластеризация или неоднородность является важным атрибутом мира галактик. Она бросается в глаза уже на старой карте, показывающей распределение ярких спиральных туманностей на небе.

Вальтер
Бааде
1893-1960

Действительно, лучшее место для нахождения галактики – это недалеко от другой. Выдающийся астроном Вальтер Бааде (Walter Baade) вспоминает в своих лекциях, что «у меня с Хабблом было длительное пари на 20 долларов к 1, кто первым сможет убедить другого, что [галактическая] система, которую он нашел, – единичная. Мы так и не смогли решить это пари... Так что одиночные галактики могут быть редкими». Наш Млечный Путь точно следует этому правилу: он является членом группы галактик, которую Хаббл назвал Локальной Группой галактик. Другим большим членом Локальной Группы является галактика Андромеды, видимая даже невооруженным глазом. Кроме того, имеются около двадцати более мелких галактик-членов. Ближайшее крупное скопление галактик находится в направлении на созвездие Девы. Скопление в Деве содержит сотни галактик, и оно является центром намного более крупного Локального Сверхскопления. Наша Локальная Группа находится на краю этой системы, примерно в 20 млн. парсек от центрального скопления в Деве.

10.3. Богатые скопления галактик Эйбла

Число известных скоплений сильно возросло с выходом в 1958 году каталога Джорджа Эйбла (George Abell), содержащего 2712 *богатых скоплений галактик*. Говорят, что скопление богатое, если оно содержит много ярких галактик. Такие скопления редки, но их можно видеть с больших расстояний в пространстве. Кстати, наше соседнее скопление в Деве, которое так велико, что оно замедляет наше удаление от него, вовсе не самое богатое в мире! Коллекция Эйбла была результатом фотографического обзора всего северного неба, выполненного на большом 48-дюймовом телескопе Шмидта в Паломарской обсерватории – чрезвычайно важная наблюдательная программа дала астрономам огромное количество данных о звездах и галактиках. Девятьсот копий 60 × 60 см фотографий Паломарского Атласа Неба были основным инструментом наблюдательной астрономии в обсерваториях по всему миру в течение десятилетий.

Теперь вопрос звучал так: образуют ли богатые скопления Эйбла сверхскопления? Сам Эйбл считал, что его скопления сами образуют скопления. Имея в руках большое число скоплений, было сравнительно легко ответить «да».

Интересное исследование в тот «двумерный период», в 1967 году, произвел Тао Кiang (Tao Kiang) из Ирландской обсерватории Дансинк (Dunsink). Он применил статистическую модель к распределению скоплений Эйбла по небу. В этой модели, которую в 1950-ые годы предложили Ежи Нейман (Jerzey Neyman) и Элизабет Скотт (Elizabeth Scott), объекты встречаются только в скоплениях, центры которых случайным образом рассеяны в пространстве. Если мы под словом «объект» понимаем скопление галактик, то является ли их наблюдаемое распределение по небу чем-то похожим на то, что предсказывает статистическая модель?

*Ежи
Нейман
1894-1983*

*Элизабет
Скотт
1917-1988*

Чтобы исследовать этот вопрос, Тао Кiang с помощью компьютера генерировал искусственные распределения объектов, спроектированных на небо, с учетом пространственного распределения, определенного моделью Неймана-Скотт. Сравнение с реальным распределением на небесной сфере позволило ему сделать вывод, что скопления Эйбла сами скапливаются, но не таким простым образом, что галактики образуют примерно идентичные скопления, а те образуют идентичные сверхскопления. Наблюдения нельзя было привести в соответствие со сверхскоплениями одного фиксированного размера. Кiang сделал вывод, что кластеризация галактик происходит на всех масштабах – нет никаких четко выраженных иерархических уровней. Его гипотеза о бесконечной кластеризации галактик снова восстановила галактику в качестве фундаментального строительного кирпичика вселенной. Он был вынужден так визуализировать расположение галактик, чтобы различные скопления взаимопроникали друг в друга. В противном случае «средняя плотность должна уменьшаться по мере того, как объем, по которому берется среднее, увеличивается». Таким образом, он подошел близко к очень современному взгляду на фрактальную кластеризацию, но предпочел руководствоваться космологическим принципом Эйнштейна, сохранив повсюду равную среднюю космическую плотность.

10.4. Может ли пыль объяснить неоднородное распределение галактик на небесной сфере?

Однако не для всех астрономов видимое группирование галактик на небе было убедительным. Некоторые предупреждали о влиянии космической пыли. Действительно, еще в 1940-ых годах Виктор Амбарцумян выполнил фундаментальное теоретическое

исследование того, как облачное распределение межзвездной пыли могло бы повлиять на видимое распределение галактик. А когда в 1952 году Нейман и Скотт представили свою статистическую модель кластеризации, они предусмотрительно указали два альтернативных объяснения наблюдаемой кластеризации: 1) не только видимое, но и действительное пространственное распределение галактик кластеризовано, или 2) кластеризация является только видимой и вызвана влиянием ослабления света пылевыми облаками. И они добавили, что, несомненно, оба фактора играют какую-то роль. Но какой фактор доминирует в суперкластеризации? Этот вопрос стал важным на следующей стадии спора о сверхскоплениях.

Конечно, зона избегания означает, что в плоскости Млечного Пути много пыли. Что было менее понятно, так это сколько пыли заслоняет видимость галактик, когда мы смотрим перпендикулярно этой плоскости, на галактический полюс. В прошлом считалось, что сквозь полярные шапки наш взгляд в пространство практически свободен от пыли, что делает эти области очень ценными для внегалактической астрономии. Однако постепенно различные наблюдения нарисовали другую картину: полярные шапки тоже усеяны небольшим количеством пыли, хотя из-за сравнительно небольшого ее количества грязное окно выглядит почти совершенно чистым. Тем не менее, на наблюдения галактик влияет достаточно много пыли (и газа).

Например, построение лестницы космических расстояний требует, чтобы у нас была точная информация о величине ослабления света пылью (пыль ослабляет яркость галактик, вводя астрономов в заблуждение относительно слишком больших оценок расстояния). А различная величина пыли в противоположных направлениях на небе может вызвать ошибочные «поточковые движения» галактик. Пыль также дает слабое тепловое излучение и может наложить свой отпечаток на фоновое космическое излучение. Так как астроном стряхнуть эту пыль не может, он вынужден научиться жить с ней.

Исследуя клочковатое распределение туманностей на небесной сфере, Шарлье также обсуждал возможность того, что его может исказить «темное поглощающее вещество». Аналогично, в 1960-ые и 70-ые годы несколько астрономов попытались понять неоднородное распределение скоплений галактик не как реальные сверхскопления в пространстве, а как артефакт, вызванный неоднородным ослаблением света в Млечном Пути или даже в межгалактическом пространстве. Такая возможность вполне реальна, поскольку в

запыленных направлениях более слабые скопления галактик будут затемнены. Скопления видны лучше всего, когда они находятся за почти прозрачными областями с малым количеством пыли.

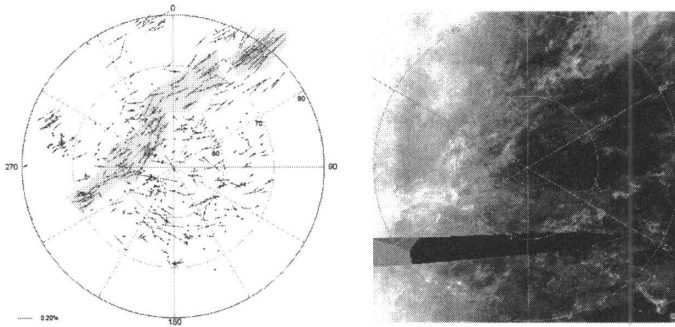


Рис. 10.2. Северный галактический полюс (в созвездии Волосы Вероники) является довольно запыленным окном в космос, как показано на этих двух картах полярной шапки (галактическая широта $>60^\circ$). На правом рисунке показано измеренное со спутника IRAS инфракрасное излучение, испускаемое холодной пылью (узкая черная полоса – это артефакт из-за отсутствия данных). Имеются длинные волокна и сложное фрактальное распределение пыли. На левой карте показаны направления поляризации света от далеких звезд, по измерениям А.Бердюгина и П.Теерикорпи на Северном Оптическом Телескопе (Nordic Optical Telescope – NOT) (Ла Пальма). Вытянутые частицы пыли, ориентированные межзвездным магнитным полем, поляризуют свет от звезд. Заштрихованная область – это вытянутое облако пыли, которое впервые обнаружил Т. Маркканен (Т. Markkanen) в 1970-ых годах.

*Эрик
Хольмберг
1908-2000*

Эрик Холмберг (Erik Holmberg), выдающийся шведский исследователь галактик и один из учеников Кнута Лундмарка, был очень обеспокоен той ролью, которую пыль может сыграть в формировании видимого узора галактического скопления на небе. В своей статье 1974 года «Связь распределения скоплений галактик с галактическим поглощением» он представил доказательство того, что области на небе, которые содержат много скоплений, более прозрачны (содержит меньше пыли), чем небо в целом. Он сделал вывод, что «таким образом, косвенно доказано случайное распределение скоплений галактик». Действительно, в то время к вопросу о сверхскоплениях еще нельзя было подойти прямо, работая в трехмерном пространстве.

Интересно отметить, что сам Фриц Цвики, который обнаружил темное вещество в галактических скоплениях и чей

обширный каталог скоплений галактик использовал Холмберг, считал, что суперкластеризация вызывается *межгалактическим* ослаблением света. Радикальное мнение было у Бориса Фесенко из Пскова, который считал, что даже сами скопления галактик являются прозрачными дырами в запыленном Млечном Пути.

Теперь, когда мы знаем, что сверхскопления реально существуют, беспокойство о флуктуирующей экстинкции может показаться устаревшим или даже просто исторической диковиной. В конкретном вопросе о сверхскоплениях этому объяснению, казавшемуся столь рациональным, суждено было потерпеть неудачу. Но нет причин игнорировать влияние пыли вообще. Несмотря на то, что пространственное распределение галактик далеко не случайно, результат Холмберга – больше скоплений в прозрачных областях – остается верным, и нам не следует забывать, что наши лучи зрения достигают галактик и квазаров сквозь пятнистое запыленное окно.

10.5. 3-D астрономия из вершины пространственного конуса

Студенты-астрономы изучают старую и всегда важную дисциплину – сферическую астрономию. Через столько лет после Птолемея мы все еще практически находимся как бы в центре огромной сферы, на которую проецируются звезды и галактики. Мы можем передвинуть их на их истинные положения вокруг нас, только если знаем расстояния до них. Тогда, если мы посмотрим на ограниченную область неба, мы получаем конус, с вершины которого мы смотрим на его содержимое. Это была бы трехмерная карта какой-то части вселенной.

Но даже если бы астроном знал все расстояния в пространственном конусе, он все еще чувствовал бы наше неудобное положение «на дне колодца». Мы встречались с одной из подобных проблем в связи со смещением (байесом) Малмквиста. Конус будет заполнен галактиками очень искаженным образом. Яркие по своей природе галактики находятся по всему конусу, тогда как карликовые галактики сконцентрированы в небольшом объеме около вершины, потому что мы просто не можем видеть их на большом расстоянии. Обратите внимание, что сферическая оболочка толщиной Δd и радиусом r пропорциональна Δdr^2 , при этом объем возрастает как *квадрат* радиуса (расстояния). Действительно, именно этот эффект объема вместе с законом обратного квадрата для потока света ($f \sim r^{-2}$)

приводит к формуле смещения Малмквиста. Его можно также использовать для демонстрации парадокса сверкающего неба в бесконечном классическом пространстве.

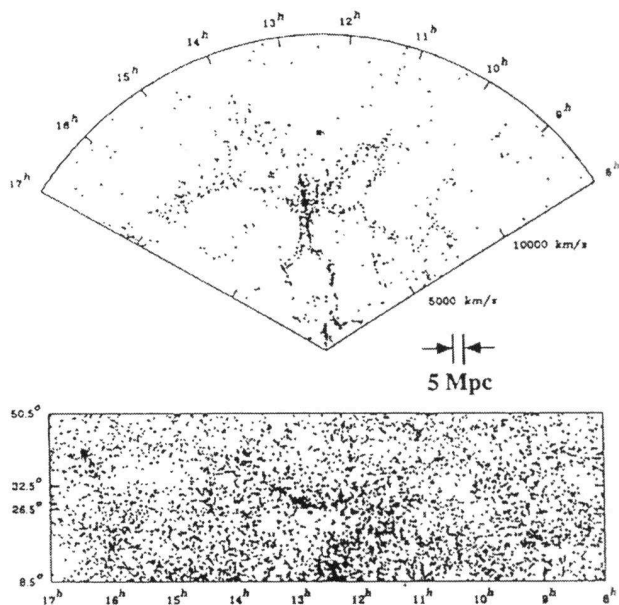


Рис. 10.3. Верхний рисунок – это конусная диаграмма первого обзора красных смещений CfA. Эта трехмерная карта показывает неоднородные структуры и пустоты, которые не видно, если просто смотреть на небо без информации о красных смещениях (внизу). Вытянутые структуры галактик, направленные на наблюдателя (у вершины конуса) – это «Пальцы Бога», вызванные быстрым движением галактик внутри скоплений.

Иногда наше положение в конусе приводит к особенно странным проблемам. Например, есть популярная теория (которая называется «унификацией»), согласно которой различные типы активных галактик являются в действительности одним и тем же. Активная галактика видна как радиогалактика, или как квазар, или как так называемый блазар, в зависимости от направления, с которого галактика видна. Если мы видим аккреционный диск вокруг сверхмассивного объекта «плашмя», то мы видим активное ядро во всем его великолепии – это квазар или, в предельном случае, блазар.

Если мы смотрим на ту же галактику со стороны, то активное ядро заслонено толстым слоем пыли, тогда у нас перед глазами радиогалактика. Подтвердить такую теорию было бы легко: просто пойдите и посмотрите на квазар с разных направлений... Поскольку о таком предприятии не может быть и речи, у астронома есть на выбор множество косвенных тестов теории унификации.

Тем не менее, несмотря на то, что трехмерные карты не позволяют астроному увидеть все, что ему хотелось бы, было понятно, что иметь их – великое дело. Только подумайте об упомянутом выше споре о сверхскоплениях галактик, который основывался на двухмерных проекциях. Но чтобы составить такие карты для галактической вселенной, нам нужны расстояния. Расстояния до галактик, полученные только по их видимым размерам или яркостям, были в целом такими неточными, что совершенно смешивали любые пробные трехмерные карты. И только в последнее время число галактик с более точными фотометрическими расстояниями начало расти. Но красное смещение все еще намного лучший индикатор расстояния для галактик.

В 1960-ых годах был опубликован Опорный каталог ярких галактик Жерара де Вокулера, в котором содержались измерения красного смещения для примерно 1500 галактик. Этого было достаточно для первых попыток составить трехмерные карты, или, по крайней мере, карты срезов пространства. Например, можно ограничить красное смещение двумя значениями и нанести на карту все такие галактики. Тогда они должны лежать внутри сферической оболочки вокруг нас и структуры не будут расплываться из-за разных расстояний.

Астрономы узнали о таких новых работах в сентябре 1977 года, на международном симпозиуме, посвященном крупномасштабной структуре вселенной, состоявшемся в Таллине, Эстония. Среди участников были многие люди, чьи фамилии появляются на страницах нашей книги (Де Вокулер, Пиблс, Дэвис, Тифт, Бэрбидж, Чернин, Парийский, Зельдович, Рудницкий, Эйбл, Холмберг, Яаккола, Фесенко, Караченцев, Кианг, Хукра (Huchra)...). На третий день встречи астрономы из Тартусской обсерватории Михкель Йоевер (Mihkel Jõeveer) и Яан Эйнасто (Jaan Einasto) сделали потрясающее сообщение о пространственном распределении галактик. Их статья называлась «Имеет ли Вселенная ячеистую структуру?» Для построения трехмерных карт они использовали известные на то время красные смещения галактик. Эти карты, оказались далеки от гладкого

распределения галактик, они обнаружили удивительные структуры вокруг нас в пространстве, в виде длинных волокон и гигантских стен, отмечающих своего рода соты. Имелись огромные пустоты, в которых вообще не было галактик.

Имевшиеся в то время наблюдения наводили на мысль, что «ячейки» имеют в ширину около 30 Мпк – примерно размер Локального Сверхскопления. Позднее Эйнасто и его группа представили доказательство приблизительно регулярной сети скоплений, в которой расстояние между стенами равно около 120 Мпк. Современные карты галактик все еще не позволяют увидеть, как скопления распределены на расстояниях, больше чем несколько «размеров ячейки».

10.6. Экскурсия по местному гиперобъему

Ячеистая структура, обнаруженная группой Яана Эйнасто при помощи каталогов таких немногочисленных красных смещений, стимулировала ускорение работы по измерению многих новых красных смещений по всему небу. Многих астрономов беспокоили разнородные, неполные данные, которые тогда имелись. Обнаруженная архитектура галактической вселенной была совершенно неожиданной, и приняли ее неохотно, потому что она не была похожа на ожидаемое равномерное заполнение галактиками локальной вселенной.

Первый обзор, направленный строго на получение полной выборки красных смещений в большой области неба, выполнили астрономы Гарвард-Смитсоновского Центра Астрофизики в США. Нужно упомянуть некоторые имена, стоящие за этими пионерскими усилиями: Марк Дэвис (Marc Davis), Джон Хукра (John Huchra), Маргарет Геллер (Margaret Geller), Валери де Лаппаран (Valérie de Lapparent)... Они измерили красное смещение галактик из каталога Цвики, звездная величина которых была ярче, чем $m = 14.5$, и которые занимали на небе узкую полосу высотой в несколько градусов и шириной в несколько десятков градусов. Этот обзор сделался известным под названием CfA. Позже Джон Хукра вспоминал свою реакцию, когда он увидел первые трехмерные карты этого обзора: «... моей первой, очень консервативной реакцией было: ух! Что я сделал не так?» Он не ожидал ничего необычного в распределении галактик.

Кстати, именно Хукра обнаружил в 1984 году удивительный пример гравитационного линзирования – знаменитый крест Эйнштейна.

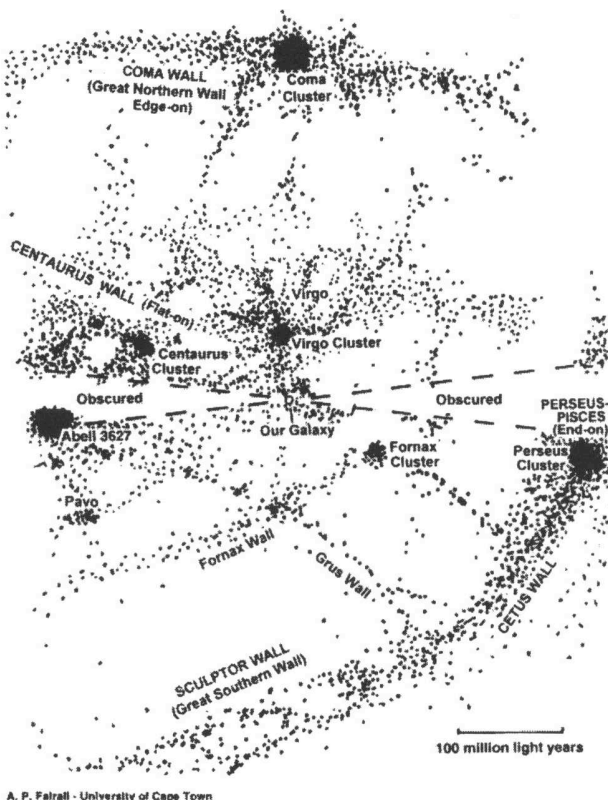


Рис. 10.4. Скопления, сверхскопления, волокна и пустоты в локальной галактической вселенной в пределах примерно 100 Мпк. Млечный Путь находится в центре.

Новая карта, опубликованная в 1986 году в статье под названием «Срез Вселенной», подтвердила открытую эстонцами ячеистообразную кластеризацию галактик и выявила еще большее разнообразие в распределении галактик. Сегодня свободно говорят о Великой Стене через созвездие Волосы Вероники, Стене Кита через сверхскопления Персея и Рыб, Пустоте Скульптора между созвездием Печь и Великими Южными Стенами.

Мы напоминаем, как воплотилась в жизнь мечта Лундмарка, когда в 1950-ых годах де Вокулер установил существование «Млечного Пути» галактик – Локального Сверхскопления. Но, может быть, это действительно произошло только когда в 1980-ых годах Жорж Патурель и его сотрудники Люсет Боттинелли (Lucette Bottinelli), Люсьен Гугенхайм (Lucienne Gougenheim) и Паскаль Фуке (Pascal Fouqué) показали, что на внегалактическом небе видна очень большая структура – своего рода «Млечный Путь» скоплений галактик. Его «гипергалактическая» плоскость почти совпадает с плоскостью Локального Сверхскопления и содержит некоторые другие соседние сверхскопления. О похожих наблюдениях сообщал Brent Тулли (Brent Tully).

Другие астрономы попытались сделать глубокие «проколы» в виде узких пространственных конусов. На этом пути интригующие наблюдения выполнил в 1990 году Ричардс Эллис (Richards Ellis) и его коллеги из университета Дэрхама (Durham). Они выполнили остронаправленный обзор красных смещений галактик, сосредоточив внимание на очень маленьком участке неба, где можно было измерить все красные смещения галактик с приемлемым временем и трудозатратами. Исследование красных смещений (т.е. расстояний) показало видимую периодичность в пространственной плотности галактик. Плотные населенные узкие стены галактик разделялись почти пустыми областями. Интервалы между пиками имели длину около 120 Мпк. Они были видны в двух противоположных направлениях на небе. Могли ли эти явления быть связаны с более локальной сетью Эйнаста? Это не известно, но снова показана сильная неоднородность распределения галактик.

Здесь нужно упомянуть еще одну проблему трехмерной астрономии, которая использует наблюдения из вершины конуса. Наблюдаемые красные смещения галактик всегда содержат часть, вызванную реальными движениями галактик, обусловленными гравитационными эффектами близких масс. Значит, красное смещение всегда имеет небольшую некосмологическую часть, и расстояния, полученные с помощью закона Хаббла, всегда содержат какую-то ошибку. Карты, основанные на красных смещениях, являются не вполне точными копиями истинной трехмерной галактической вселенной.

Один тип ошибок буквально бросается в глаза. Плотные скопления галактик кажутся сильно вытянутыми на картах, как будто они «указывают» на наблюдателя. Эти «Пальцы Бога» не являются

истинными вытянутыми структурами в пространстве. Они вызваны высокими скоростями галактик-членов внутри массивных галактических скоплений. Те галактики, которые оказались двигающимися почти на нас или от нас, сдвинуты также на картах красного смещения в том же направлении, делая скопление вытянутым. Цвики обнаружил, что галактики в скоплениях быстро двигаются, вероятнее всего, из-за гравитации темного вещества. Пальцы Бога позволяют «увидеть» невидимые массы.

Глава 11

Фрактальность крупномасштабного распределения галактик

11.1. Ранние аргументы об однородности распределения галактик

В первые десятилетия XX века в космологии было несколько косвенных аргументов, которые, как тогда казалось, подтверждали однородность распределения галактик во вселенной и побуждали теоретиков развивать однородные модели мира. Наблюдательными свидетельствами однородности считали подсчеты галактик, наличие флуктуаций в поглощении пылью, наличие линейного закона Хаббла, начинающегося с малых масштабов, и изотропия распределения галактик в проекции на небесную сферу.

В 1930-ые годы Хаббл провел подсчеты галактик на снимках нескольких небольших участков неба. Для сравнительно ярких галактик (ярче, чем 17-ая величина) он обнаружил, что подсчеты подчиняются закону « $0.6m$ », но для более слабых галактик (до 21-ой величины) их число растет медленнее, отклоняясь от этого закона. Формула статистической астрономии дает ожидаемое число галактик, которые ярче, чем заданная величина. Наблюдатель подсчитывает на небе количество объектов ярче, чем видимая величина m . В общем случае фрактального распределения источников света в евклидовом пространстве получающиеся подсчеты задаются соотношением $\log N(m) = 0.2Dm + const$, где D – фрактальная размерность. Для равномерного распределения ($D = 3$) существует знаменитый результат звездной статистики, называемый теоремой Зеелигера: $\log N(m) = 0.6m + const$.

Действительно, наблюдаемый закон $0.6m$ рассматривался как сильное доказательство однородности распределения галактик. Из этих наблюдений сам Хаббл сделал вывод, что наблюдаемая локальная вселенная является прекрасным образцом вселенной в целом. И Эйнштейну было приятно, что его космологическое предположение, которое прежде было теоретической догадкой, таким образом,

получило своего рода наблюдательное подтверждение, по крайней мере, для наиболее ярких галактик.

Современные данные о подсчетах ярких галактик, основанные на данных из каталога LEDA, покрывающего все небо, были недавно опубликованы в работе Теерикорпи. Для интервала звездных величин от 10-ой до 15-ой, был получен закон « $0.44m$ », который соответствует фрактальной размерности $D=2.2$. Таким образом, современные подсчеты ярких галактик опровергают однородное распределение галактик, по крайней мере, до расстояний, соответствующих $m=15$, т.е. около 200 Мпк.

Для более слабых галактик подсчеты также отклоняются от закона $0.6m$. Хаббл рассматривал этот вопрос в своей книге *Наблюдательный подход к космологии*. Слабость означает удаленность, и он отметил, что уклонение могло быть вызвано тем, что галактическая плотность убывает при удалении от Млечного Пути. Но для него это означало бы странно выделенное положение нашей Галактики, противоречащее духу Коперника. Интересно, как мог бы рассуждать Хаббл, если бы он знал о фракталах, которые как раз и показывают падение плотности вокруг каждого наблюдателя?

В настоящее время известно, что на подсчеты слабых галактик сильно влияют различные дополнительные факторы. Кроме геометрии пространства и истинного распределения галактик, подсчеты зависят от спектра галактик и от космической эволюции яркости галактик. Так что подсчеты слабых галактик, столь многообещающие на первый взгляд, на практике не являются надежным способом измерения крупномасштабного пространственного распределения галактик.

Более сильный аргумент следовал из наблюдаемого закона Хаббла. Модели Фридмана расширяющейся вселенной были быстро применены для понимания закона «красное смещение – расстояние». В рамках этих моделей линейность соотношения $Z(r)$ следует из однородного распределения вещества. И наоборот, наблюдаемый закон Хаббла рассматривался как наблюдательное свидетельство в пользу однородности распределения галактик на тех масштабах, где он наблюдается, т.е. начиная с 1 Мпк. Это считалось сильным аргументом в пользу однородности на масштабах в интервале от 1 до 100 Мпк. Удивительным образом современные данные показывают, что на этих масштабах распределение галактик сильно неоднородно и в тоже время линейный закон Хаббла действительно выполняется! Это приводит к парадоксальной ситуации, о которой речь пойдет ниже.

Для того, чтобы исключить влияние флуктуаций поглощения пыли в Галактике, необходимо было построить трехмерные карты распределения галактик, т.е. нужны были массовые измерения расстояний до галактик. Эта задача до сих пор остается одним из главных направлений внегалактической астрономии.

В течение длительного времени данные об истинных расстояниях до галактик были редки, и имелось только распределение галактик в проекции на небо. Тем не менее, из распределения по небу был получен еще один косвенный аргумент в пользу однородности, который исходит из наблюдательного факта, что небо довольно гладко покрыто слабыми далекими галактиками. Эта изотропия, вместе с принципом отсутствия центра, обычно рассматривается как доказательство однородной галактической вселенной.

Однако сильно неоднородные фрактальные распределения тоже могут иметь изотропное распределение на небе. Это следует из теоремы о проекции фракталов, согласно которой, например, для структур в трехмерном пространстве, имеющих фрактальную размерность $D > 2$, проекция на плоскость приводит к равномерному распределению. Аналогично для проекции на небесную сферу наблюдатель внутри такой фрактальной структуры будет видеть изотропное распределение на небе.

11.2. Закон Карпентера – де Вокулера для сгущивания галактик

Приведенные косвенные аргументы в пользу однородности казались довольно убедительными, хотя яркие локальные галактики демонстрировали сильное сгущивание. Многие астрономы считали, что скопления галактик – это редкие флуктуации на однородном фоне галактик и, когда мы посмотрим на достаточно большой объем пространства, галактическая вселенная, в конце концов, станет гладкой.

Поразительно, как сильна была власть парадигмы однородности над нашими умами! Долгие годы господствовало мнение, что вселенная локально неоднородна, но на больших масштабах она, несомненно, становится однородной. Гласом вопиющего в пустыне были слова, написанные в 1970 году Жераром де Вокулером, который осознавал странность этой сильной веры:

В 1930-ые годы астрономы утверждали, а космологи верили, что, за исключением, может быть, нескольких скоплений, галактики

распределены по пространству случайно; в 1950-ые годы то же свойство приписывалось центрам скоплений; теперь есть надежда, что, если уж должны остаться сверхскопления (а они, по-видимому, останутся), то, по крайней мере, они представляют собой последний масштаб скучивания, о котором нам нужно беспокоиться...

Оказалось, что сверхскопления «остались». А тенденция продолжилась: за последние десятилетия доказательство неоднородности было распространено на все более и более возрастающие расстояния.

Закон Карпентера – де Вокулера. Уже первые исследования наиболее ярких туманностей на небе показали, что они образуют облака и скопления. Самой интересной находкой 1930-ых годов было то, что эти неоднородности не случайны, а обладают особой регулярностью. Человеком, который стоял за этой находкой, был Эдвин Карпентер (Edwin Carpenter), директор обсерватории Стьюарт в Аризоне с 1938 года и до конца жизни.

Эдвин
Френсис
Карпентер
1898-1963

Карпентер изучал скопления галактик и обнаружил, что их численная галактическая плотность (число галактик на единицу объема) зависит от размера скопления, так что в более крупных скоплениях плотность меньше. Если бы плотность сохранялась одинаковой, то полное число галактик-членов росло бы как куб размера. Он вычислил, что вместо куба населенность растет медленнее, как размер, возведенный в степень 1.5. Этот результат в терминах объемной плотности числа галактик n можно записать как: $n \sim N/R^3 \sim R^{1.5}$. Карпентер счел такое соотношение космическим ограничением, так что скопление заданной протяженности может иметь определенное ограниченное число членов. Это соотношение простирается от пар галактик до крупных систем из сотен членов, и для него это означало, что небольшие группы и крупные скопления по сути своей не отличаются... Он записал пророческие слова:

...объекты, которые общепринято считаются физическими скоплениями, являются всего только пределами неоднородного, хотя и не случайного, распределения, которое ограничено по плотности...

Неоднородное, хотя и не случайное – это напоминает объекты, называемые фракталами! Карпентер усмотрел глубокую связь там, где другие могли видеть только разные группы галактик. Однако осознал космологическое значение закона «плотность – размер» лишь другой астроном.



Рис. 11.1. Жерар и Антуанетта де Вокулер в Париже, 1962 год.

Жерар де Вокулер, переехавший из Франции в Соединенные Штаты, был одним из великих наблюдателей XX века. Его карьера началась с планет нашей Солнечной Системы, а затем его внимание обратилось на далекие галактики, которые, в конце концов, стали главной его целью. Вместе со своей женой Антуанеттой он положил начало *Опорному каталогу ярких галактик* – основному источнику информации для любого ученого, изучавшего галактики. Его работа по далеким галактикам и значению постоянной Хаббла привела к длительному спору между двумя школами «большого» и «малого» значений, который еще продолжается.

Де Вокулер был страстным исследователем локальной вселенной. Он привел свидетельства существования плоского Локального Сверхскопления вокруг скопления галактик в Деве и заявил, что его масса вызывает отклонения в космологическом расширении. Тогда это было противоречием, а теперь мы знаем, что закон Хаббла действительно искажается поблизости от скопления в Деве. Даже наша Локальная Группа на краю Сверхскопления была «замедлена» примерно до 200 км/сек массивным скоплением, притягивавшим нас миллиарды лет.

*Жерар де
Вокулер
1918-1995*

*Антуанетта
де Вокулер
1921-1987*

Вдохновленный работой Карпентера, де Вокулер вычислил по новым данным плотность вещества в галактических скоплениях различного размера. Он опубликовал результаты своих вычислений и размышлений в 1970 году в статье «В пользу иерархической космологии». Он предположил существование универсального закона «плотность-размер» в галактической вселенной:

$$\text{плотность} = \text{константа} \times \text{размер}^{-\alpha}$$

где $\alpha \approx 1.7$.

Жерар де Вокулер связал этот закон с идеей иерархической кластеризации, которая, по его мнению, является фундаментальным явлением космологической физики. Вокулер подчеркивал, что простую модель регулярной иерархии надо заменить более общими моделями статистических флуктуаций плотности, похожими на турбулентность с ее иерархией вихрей. Он интуитивно представлял себе важные, но странные свойства, которыми, как он думал, обладали бы такие миры. *Во-первых*, «в пространстве нет выделенного положения», что делает такие модели приемлемыми космологическими кандидатами. *Во-вторых*, в каком-то смысле иерархическое распределение вещества однородно, поскольку любые два отдельных больших и равных объема (окружающих какой-то элемент иерархии) в среднем содержат равную полную массу. *В-третьих*, существует особенно озадачивающее, интуитивно непонятное свойство: «все наблюдатели, где бы они ни находились (но внутри иерархии), будут видеть, что средняя плотность убывает» при увеличении глубины наблюдений вокруг наблюдателя.

По-видимому, до Вокулера эти свойства так ясно еще не были сформулированы в печатном виде. Но его идеи об иерархии были встречены без энтузиазма. Были и наблюдательные возражения, о которых мы уже говорили выше, например, подсчеты ярких галактик соответствовали закону однородного распределения. Да и Алан Сэндидж указывал, что закон Хаббла надежен на всем протяжении от малых до больших расстояний, тогда как глубоко внутри иерархической галактической системы ожидалось бы сильное отклонение от линейного соотношения между скоростью и расстоянием. Вокулер представил-таки доказательство искривленного закона Хаббла в локальной вселенной («константа» Хаббла растет с расстоянием). Но тогда установили, что это искривление вызвано эффектом селекции (похожим на отклонение Малмквиста), который влияет на измерение расстояний. На самом деле загадка

искривленного закона Хаббла открыла для одного из нас (П.Т.) дорогу в удивительный мир космических расстояний.

Возможно, разочарованный холодным приемом, Вокулер не развивал свою иерархическую космологию дальше и безмолвствовал до конца жизни. Но он общался с единственным человеком в мире, который понял, к чему тот пришел. Этим человеком был Мандельброт, который уже в 1960-ые годы начал размышлять о фрактальной структуре внегалактической вселенной. «Я больше не одинок!» – воскликнул он, когда впервые увидел статью де Вокулера об иерархической космологии. Позднее он писал, что исследование скоплений галактик сильно стимулировало развитие фрактальной геометрии. Сверхмассивные элементы (галактики) в реальном пространстве и точки в абстрактном небе математика нашли друг друга.

11.3. Фрактальный подход Мандельброта к скоплениям галактик

В 1977 году в своей книге *Фракталы: форма, случай и размерность* Бенуа Мандельброт предвидел, что галактики распределены фрактально, и дал первое математическое описание фрактальных свойств такого распределения. Он вспоминал, как примерно в 1965 году его стремлением было осуществить закон убывающей плотности в модели, в которой нет «центра вселенной».

Мандельброт считал фрактальное распределение галактик большим концептуальным шагом в описании космологического распределения вещества. Это своего рода синтез иерархической структуры («тезис») и однородности («антитезис»), основанный, по существу, на случайности. Действительно, существует фундаментальная разница между истинно случайными фракталами и жесткими иерархическими протофракталами. В протофракталах иерархия вводится внешним образом, явным определением ее уровней. Но фракталы внутренне содержат масштабную инвариантность (самоподобие) и, как неизбежное следствие, создается внутренняя иерархия. Полезным примером является пыль Леви, которая создается процессом случайного блуждания, в котором направление каждого шага выбирается изотропно, а длина шага подчиняется некоторому распределению вероятности (см. Рис. 11.2).

Фрактальность несет в себе и следы однородности. Внутри фиксированного радиуса, т.е. для фиксированного масштаба, любой

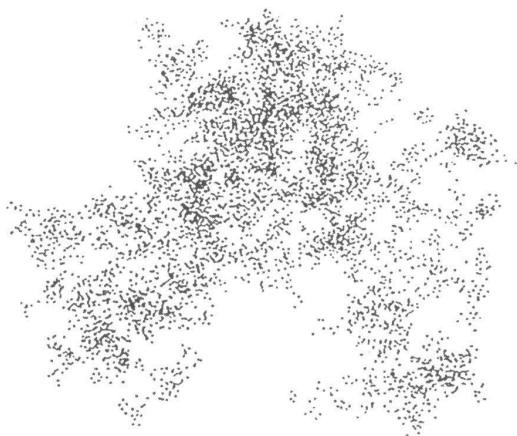


Рис. 11.2. Стохастическое фрактальное распределение (пыль Леви) на плоскости, фрактальная размерность 1.26. Лакунарность этой пыли, сгенерированной по алгоритму, предложенному недавно Мандельбротом, намного меньше, чем, скажем, для простых регулярных фракталов.

наблюдатель насчитывает одинаковое число элементов *в среднем*. Но при изменении радиуса обнаруживается «новая однородность» с новой средней численной плотностью. Следовательно, для случайных фракталов не существует центра – также как и у однородного распределения.

Таким образом, Мандельброт совершил первый шаг к подлинным фракталам в космологии, обобщив космологический принцип Эйнштейна, соответствовавший $D = 3$, на фрактальность, допускающую неоднородное распределение галактик с $D < 3$. Его «Условный космологический принцип» утверждает, что все наблюдатели видят вокруг себя одинаковые космические пейзажи, но только при условии, что они ведут наблюдения «сидя» на элементах структуры (галактиках).

Интересно, что идея «условности» пришла Мандельброту в голову из совершенно другого контекста, когда он изучал временную кластеризацию ошибок передачи данных по телефонным линиям. Он делал это совместно с Джейм Бергером (Jay Berger) из IBM, где Мандельброт долгое время работал. Вроде бы телефонные линии довольно далеки от космологии, но в действительности статья, которая родилась в этом сотрудничестве в 1963 году, была первой, в которой

«ранее эзотерическое понятие» о фрактальной размерности было интерпретировано как фундаментальная физическая величина. Мандельброт пишет, что «мои исследования, а, значит, и вся моя жизнь, изменились из-за случайных обстоятельств, которые привели к этой статье». Это созвучно с тем, что он сказал, когда мы встречались с ним в институте Миттаг-Леффлер в Стокгольме в ноябре 2001 года: «Я верю во вселенную, в которой множество нулей вносит что-то значительное». Иногда безобидное событие или идея, мелькнувшая в другой области, могут привести в движение важную цепь развития.

В пространственном контексте слово «условный» подчеркивает, что каждый наблюдатель занимает какой-то материальный элемент структуры. Это существенная разница между элементами фрактальной структуры и пустотой. Только *если* наблюдатель находится в точке структуры, он видит, что распределение вещества подчиняется фрактальному закону. Если наблюдатель по каким-то особым причинам находится в большой пустой области («войде»), то тогда фрактальное уменьшение плотности можно обнаружить только на масштабах, намного превышающих размер войда. Асимметрия между наблюдателями, находящимися в точках структуры, и наблюдателями, рассеянными в пространстве случайным образом, очень важна. Случайная точка, скорее всего, будет находиться в бесконечно большом войде (в бесконечной фрактальной вселенной), и такой наблюдатель почти ничего бы не увидел.

В Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) с 70-х годов ведутся исследования скоплений галактик и крупномасштабной структуры вселенной. В работах группы астрономов под руководством Игоря Караченцева были проведены пионерские исследования фрактальных структур галактик. Впервые степенной характер корреляционной функции богатых скоплений Эйбла был найден Александром Копыловым и Анатолием Клыпиным.

Космологический принцип Мандельброта – о том, что наблюдатели, прикрепленные к материальным элементам структуры, эквивалентны, – близок к принципу, представленному Милном. Таким образом, фрактальность вселенной прекрасно удовлетворяет космологическому принципу Милна. Это также согласуется с тем, что Игорь Караченцев назвал «экологической коррекцией к принципу Коперника» – реальный наблюдатель может *жить* только на материальном небесном теле или близко к нему.

11.4. Живем ли мы на вершине айсберга?

Новая фрактальная геометрия природы преподносит сюрпризы нам, привыкшим мыслить в терминах обычных распределений, подобных «идеальному газу». Например, наблюдатель внутри фрактальной структуры видит, что плотность вещества уменьшается наружу, как если бы он стоял на вершине горы. И это верно для любого наблюдателя, что радикально отличает фрактальность от обычного сгущивания. Если бы наблюдатели не знали о фрактальности, то каждый бы думал, что находится в истинном центре вселенной. Их бы устраивало такое положение дел до тех пор, пока не начала работать внегалактическая коммуникационная сеть. Весть о том, что у каждого есть привилегированное положение, будет шоком для обитателей фрактальной вселенной.

Вместе с нашими французскими коллегами, мы принимали участие в исследованиях, посвященных интригующему вопросу: можем ли мы увидеть, что плотность вокруг нас уменьшается, как это ожидается при фрактальности? Фактически мы многие годы занимались внегалактическими темами, тесно связанными с фрактальностью, даже не зная еще об этом понятии. Это такие вопросы как иерархическое распределение галактик и его влияние на закон Хаббла в рамках клочковатой галактической вселенной. Новые прекрасные возможности открыла большая выборка спиральных галактик KLUN. Эта выборка была составлена для измерения постоянной Хаббла, и расстояния до всех ее 6600 галактик известны из метода Тулли-Фишера. Но ее можно также использовать, чтобы понять, как средняя плотность вокруг нас зависит от расстояния.

Метод получения плотности таков, что угадать результат заранее нельзя. Поэтому было очень волнительно видеть первые диаграммы, нарисованные компьютером. На небольших расстояниях, где галактик мало, полученная плотность флуктуирует хаотически. Затем, около 20 Мпк, она начинает четко следовать закону плотности, предсказанному фрактальной размерностью $D \approx 2$. Средняя плотность круто убывает до 200 Мпк – достижимого предела выборки KLUN! Так что напрашивался лестный вывод, что мы живем на вершине большой горы. Однако если вас как космолога не очень устраивает это орлиное гнездо, то вы можете принять более скромную точку зрения, что Млечный Путь занимает заурядное положение во фрактальной структуре.

Забавно представить другой возможный конечный результат. Что, если бы мы получили, что плотность от нас возрастает? Означало бы это, что фрактальная размерность больше 3? Нет, не означало бы, потому что в регулярном трехмерном пространстве фрактальная размерность не может превышать трех. В таком случае пришлось бы с грустью признать, что мы живем на дне ямы. То, что D не может превышать 3, легко увидеть для случая иерархического скопления точек, характеризуемого числом элементов N и отношением размера R . Если фрактальная размерность превышает 3, то из формулы $N \sim R^D$ следует, что элементы более низкого уровня, образующие элемент более высокого уровня, занимают больше пространства, чем есть, и, значит, они должны проникать друг в друга.

Представление о том, что каждому кажется, будто он живет на вершине горы, – это твердый орешек для так называемого «здорового смысла». За века мы привыкли к идее, что здравый смысл – плохой проводник в науке, и часто утверждают, что он в действительности препятствует развитию науки. Тому есть много примеров: трудности в принятии идеи о движущейся шарообразной Земле, а позднее релятивистские и квантовые явления. В этом контексте здравый смысл рассматривается как отказ принять новые знания, или как догматическое настаивание на старых взглядах, или неспособность понять новые теоретические концепции.

Однако в здравом смысле есть и положительные стороны, которые лучше отражены в соответствующих словах на русском и финском языке, которые буквально означают «здоровый смысл». Действительно, человеческие существа обладают интуитивным ощущением истины, потребностью в ясной аргументации, способностью понять логические связи и, конечно, они руководствуются своим жизненным опытом как ценной «базой данных».

Следовательно, здравый смысл – это не то, что дается навсегда. Он меняется со временем в результате увеличения и расширения хранилища человеческого опыта, науки и образования. Аристотель и Птолемей считали Землю неподвижной не потому, что они отказывались принять новые знания или хотели затормозить развитие космологии, а напротив, потому что их интуиция, научные аргументы и экспериментальные данные согласовывались с неподвижной Землей. Поняв общепринятую картину мира или парадигму, здравый смысл всегда включает очевидные понятия, которые рано или поздно заменяются другими концепциями. Как

отделить то, что имеет более постоянную значимость, от того, что только временно, – это труднейшая задача науки.

Суммируя вышесказанное, можно сказать, что сложность фракталов (и чудеса микромира, и парадоксы теории относительности) – это действительно крепкий орешек, *но крайне интересный и стоящий*, для современного здравого смысла. Нужно только допустить, что вселенная, а, значит, и теория, ее описывающая, содержит нечто, далеко превышающее возможности нашего воображения. В конце концов, мы живем посередине между квантовым миром и миром космологическим, в которые нелегко попасть. Так же, как наши глаза оптимизированы для того, чтобы видеть максимум в спектре солнечного света, наш мозг, возможно, был сконструирован так, чтобы справляться с проблемами, которые встречаются в нашем локальном окружении. Не удивительно, что наши попытки проникнуть в части мира очень малого и очень большого масштаба являются такими волнующими и вызывающими экскурсиями!

11.5. Первые обзоры красных смещений галактик

Когда в 1970 году Вокулер предположил, что для распределения галактик существует универсальный закон «плотность-светимость», его исследование ограничивалось в основном скоплениями галактик, для которых были данные о размере и массе. В течение какого-то времени по распределению галактик в пространстве невозможно было проверить прямо ни этот закон, ни фрактальный взгляд Мандельброта. Затем появился новый эффективный способ. В массовых обзорах, продолжающих пионерские работы Вокулера, Цвики, Эйнасто и других, были измерены красные смещения в больших областях наблюдаемой вселенной. Расстояния были получены по красным смещениям с помощью закона Хаббла. Получившиеся трехмерные карты показывают реальное пространственное распределение галактик, за исключением небольших ошибок, вызванных собственными движениями галактик.

В настоящее время у астрономов есть красные смещения для тысяч галактик из Обзора Центра Астрофизики (Center for Astrophysics - CfA), Обзора красных смещений Южного неба (Southern Sky Redshift Survey – SSRS), Обзора красных смещений Лас Кампанас (the Las Campanas Redshift Survey – LCRS), Проекта Среза Южной Европейской Обсерватории (European Southern Observatory Slice

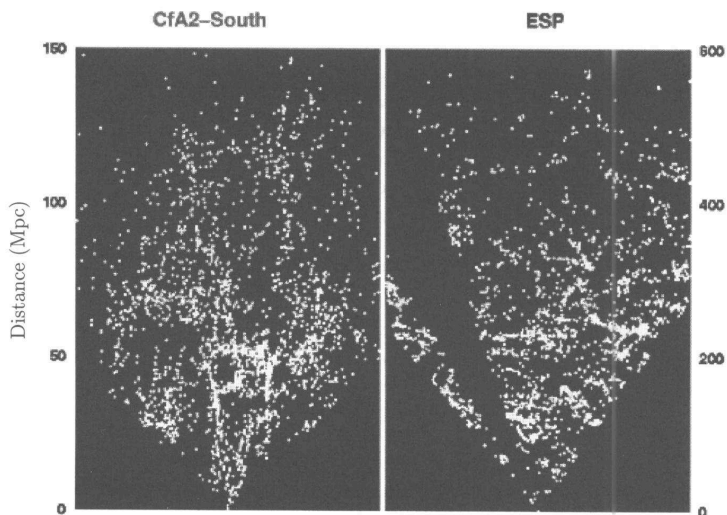


Рис. 11.3. Сравнение карт CfA и ESP. Последняя показывает, что фрактальная структура тянется до сотни Мпк. Обратите внимание, что на правом рисунке 5 Мпк соответствуют 0.5 мм, но ясно видны скопления размером в 100 Мпк.

Project – ESP), 2-х градусный полевой обзор (2dF). Другие большие наблюдательные программы (такие как SDSS) еще продолжают. Команда LCRS впервые использовала мульти-объектные спектрографы для одновременного измерения красных смещений почти 120 галактик.

Таблица 11.1. Большие обзоры галактических красных смещений, по которым измерялась или будет измеряться фрактальная размерность. Ω означает часть неба, охваченную обзором, R_s – это глубина обзора в Мпк для $H=60\text{кмсек}^{-1}/\text{Мпк}$, N – полное число галактик, D – фрактальная размерность.

Обзор	Ω	N	R_s	D
CfA	0.15	1845	260	1.9 ± 0.2
SSRS	0.14	1773	200	2.0 ± 0.2
LCRS	0.01	26000	800	1.8 ± 0.2
ESP	0.0005	4000	1000	1.9 ± 0.3
LEDA	(≈ 1)	70 000	(500)	2.1 ± 0.2
2dF	0.05	250 000	1000	2.2 ± 0.2
Sloan	0.25	1 000 000	1000	-

galaxies with $0.007 < z < 0.02$

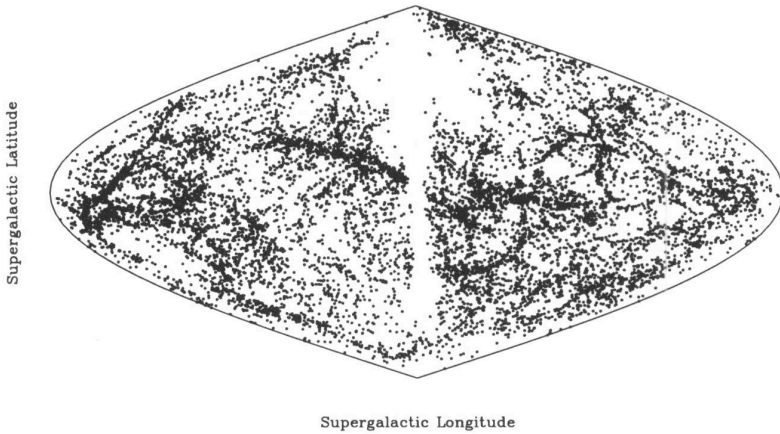


Рис. 11.4. Вид галактического неба, предлагаемый базой внегалактических данных LEDA. Мы показываем галактики с красными смещениями меньше, чем 6000 км/сек. Экватор карты совпадает с плоскостью Локального Сверхскопления. Даже проекция на небо выявляет другие сверхскопления, связанные цепочками галактик. LEDA, созданная Жоржем Патюрелем в Лионской обсерватории, является замечательным слиянием данных из галактических каталогов, предоставляя нам чудесную возможность изучать структуры локальной вселенной. Хелен ди Нелла (Helen di Nella) и Патюрель, совместно с группой Пиетронеро, проанализировали выборку галактик из LEDA. Они обнаружили, что распределение галактик имеет хорошо определенную фрактальную природу до масштаба 250 Мпк, с фрактальной размерностью около 2.

Первый систематический обзор, CfA, проник в пространство на глубину около 200 Мпк и вместе с SSRS охватил 1/3 неба. Его можно использовать для изучения пространственного распределения галактик на масштабах меньше 50 Мпк (это радиус самой большой сферы, которую объем обзора может полностью охватить). Обзоры LCRS и ESP являются узкими срезами в пространстве. Они очень глубокие, но покрывают существенно меньшие области на небе, и максимальные сферы имеют размеры только 10 Мпк.

Хотя такая картография пока довольно молодая ветвь астрономии, она уже принесла неожиданные новости. Галактики распределены очень неоднородно, с богатым разнообразием структур. Но какова природа этой неоднородности? Лев Толстой написал в «Анне Карениной», что все счастливые семьи счастливы одинаково, а

каждая несчастная семья несчастлива по-своему. Можно считать, что то же относится к счастливому состоянию однородности, которое, так сказать, всегда одинаково, но неоднородными распределения могут быть многими разными способами.

11.6. Пиетронеро и загадка пяти мегапарсек

В июне 1987 года в журнале *Physica A*, который обычно освещает вопросы статистической физики, вышла статья. Ее автором был профессор Римского университета Лучиано Пиетронеро (Luciano Pietronero), специалист в этой области физики. Однако название звучало как что-то, пришедшее не из земной лаборатории: «Фрактальная структура Вселенной: корреляции галактик и скоплений и средняя плотность массы». Для космологического сообщества это было необычное послание о нарушении Космологического Принципа, пришедшее из далекой области знаний. В то время понятие фрактала, созданное Бенуа Мандельбротом в 1960-ых годах, едва ли касалось астрономии. Фрактальная геометрия – это прекрасный пример междисциплинарного подхода к решению проблем в разных областях науки. Но пересечение границ не всегда приветствуется.

Десять лет ушло на углубленные наблюдения и жаркие споры, прежде чем в январе 1999 года журнал *Nature* признал, что вселенная «по существу фрактальна» на масштабах ниже 100 Мпк. Хотя взгляды на галактические фракталы для самых больших масштабов пока расходятся, наблюдения проникают все глубже, и с началом нового века пришли новости, что галактики, скопления галактик и квазары свидетельствуют в пользу структур на масштабах до 300, 600, 900 Мпк.

Небо, усеянное слабыми галактиками, кажется довольно гладким. Это вроде бы поддерживает многолетнюю точку зрения, что галактическая вселенная должна быть однородной на масштабе выше нескольких мегапарсек, а кластеризация могла бы существовать только на малых масштабах. Это естественно ведет к мысли, что распределение галактик можно описать теорией малых флуктуаций в хорошо определенной средней плотности.

Однако эта идеалистическая картина была сильно нарушена, когда красное смещение превратило распределения на небе в трехмерные пространственные карты. На смену гладкому небу

пришли большие скопления и пустоты, тянущиеся до масштабов целых карт.

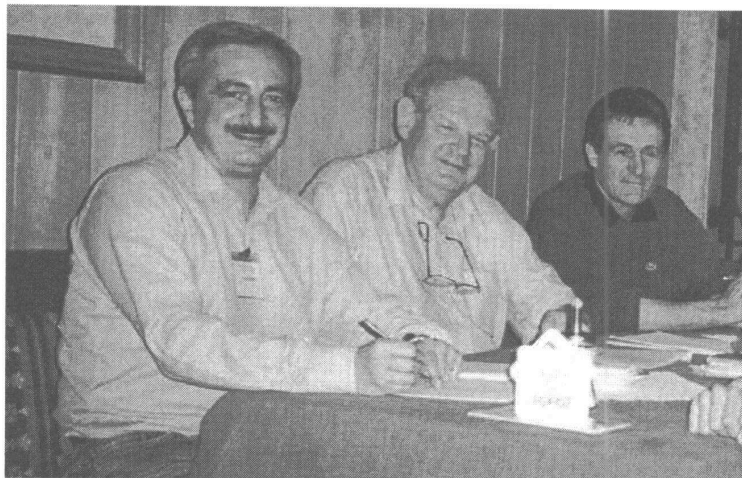


Рис. 11.5. Лучиано Пиетронеро, Бенуа Мандельброт и Жорж Патюсель во время дискуссии на конференции «Наблюдательная космология» в Сесто Пустерия (Италия) в июле 1996 года.

Ситуация была крайне неожиданной. Первые трехмерные карты были проанализированы в начале 1980-ых годов статистическими методами, основанными на гипотезе малых флуктуаций. Любопытно, что, несмотря на то, что эти структуры вроде бы тянулись на очень большие расстояния, вычисленный масштаб однородности оказался маленьким – несколько мегапарсек. Этот загадочный результат интерпретировали по-разному, а лидирующим был аргумент, что эти структуры большие, но их плотность в среднем мала. Так что считалось, что они совместимы с предположением об однородности. Ситуация была непонятна: математический анализ истинной сильной неоднородности привел к странному заключению, что распределение галактик однородно! Именно это вызвало любопытство Лучиано Пиетронеро. В письме к авторам он отмечал:

«В 1986 году стали доступны первые срезы каталога галактик CfA, и я заметил, что они показывают сложные структуры с очевидными фрактальными свойствами. Пустоты тянулись по крайней мере на 50 Мпк, тогда как кластеры и волокна продолжались до 100 Мпк и более. Я был очень удивлен, когда увидел, что статистический

анализ этих распределений привел к длине корреляции всего в 5 Мпк. Обратите внимание, что интерпретация этой длины в рамках использованного математического метода состояла в том, что она должна отмечать пересечение между масштабом сильной кластеризации и существенно гладким распределением. Аргумент малой амплитуды меня не убедил, поскольку фрактальные структуры по своей природе имеют большие амплитуды и, по крайней мере, пустоты нельзя было считать мелкими пертурбациями средней плотности. Так что вместо того, чтобы поверить заявлению, что иррегулярные структуры совместимы с гладким распределением, я рассуждал наоборот: если математический анализ дает такой результат, то что-то в этом анализе не так».

11.7. «Принстонские Диалоги» о фрактальности крупномасштабной структуры Вселенной

В декабре 1999 года сотня физиков и астрономов, половина из которых были матерые специалисты, а другая половина – молодые ученые, собралась на вершине горы в Сицилии на международную школу по космологии и фракталам, организованную Нормой Санчес (Norma Sánchez) из Парижской обсерватории, в маленьком живописном городке Эриче, как некоторые говорят, самом старом в Европе. Двадцать лет назад папа Иоанн Павел II отдал ключи от старого монастыря Европейскому Физическому Обществу для обсуждения наиболее важных проблем физики.

Эриче и Парижская обсерватория – это места, где фрактальность галактической вселенной горячо обсуждалась в последние годы, и где молодое поколение имело возможность узнать о новых фрактальных методах в космологии. Эти конференции – конструктивный результат более ранних дебатов, вершиной которых были «Диалоги» в Принстоне.

Естественно, что до трехмерной астрономии, когда были видны только размытые проекции пространственного распределения, мнения о сверхскоплениях разделились. Но даже появление пространственных карт ситуацию не успокоило.

В 1996 году университет Принстона, престижного научного городка недалеко от Нью-Йорка, принимал международное астрономическое совещание под название *Критические Диалоги в Космологии*. Не удивительно, что среди актуальных тем был спор о

значении постоянной Хаббла, в котором Густав Тамманн защищал «малое» значение 55, а Венди Фридман (Wendy Freedman), представ-



Рис. 11.6. Лучиано Пиетронеро и его сотрудники Франческо Силос Лабини, Пол Колеман (Paul Coleman) и Марко Монтуори (Marco Montuori) сфотографированы в Принстоне во время конференции «Критические Диалоги в Космологии» в 1996 году. Эта группа открыла фрактальную структуру галактической вселенной для широкого обсуждения, используя новые методы анализа.

лявший группу Проекта по постоянной Хаббла на космическом телескопе имени Хаббла, говорил в пользу «большого» значения 70. Но кто бы мог представить за несколько лет до этого, что первый диалог будет касаться вопроса о том, является ли вселенная однородной или фрактальной? И что защитником со стороны фракталов будет Лучиано Пиетронеро, который привнесет в астрофизику новые откровения из статистической физики и науки о сложности.

Между соперничающими представлениями двух школ состоялись жаркие дебаты. Более консервативный взгляд представлял Марк Дэвис, уважаемый специалист по исследованиям крупномасштабных структур в расширяющейся вселенной. Он согласился, что галактическая вселенная имеет фрактальные свойства, но только до расстояния примерно в 10 Мпк, после которого космический пейзаж выравнивается. Пиетронеро указал, что традиционные статистические методы неадекватны наблюдаемой

сильной кластеризации. Затем он показал, что новые, более общие методы естественно ведут к непротиворечивой картине, указывающей на радикальную точку зрения, – фрактальное распределение, наблюдаемое на малых масштабах, продолжается до границ трехмерной карты (в то время это около 100 Мпк). Существует ли фрактальность на еще более крупных масштабах, остается открытым вопросом.

Результатом дебатов было дружеское пари между двумя джентльменами. Если в следующем, более глубоком обзоре красных смещений фрактальные свойства действительно доходят до масштабов больше, чем 15 Мпк, то Марк Дэвис ставит Пиетронеро ящик лучшего Калифорнийского вина. В противном случае Лучиано Пиетронеро дарит Дэвису лучшее итальянское вино...

С тех пор спор о фрактальных свойствах галактической вселенной годами продолжается, а вино только зреет в своих бутылках. Но в чем же смысл этого спора? Главный вопрос состоит в том, как измерять внегалактические фракталы.

11.8. Метод корреляционной функции указывает на 5 Мпк

Для анализа пространственного распределения галактик существует два основных метода. Обычно астрономы применяют так называемый *метод корреляционной функции*. Начало этому подходу положил Джеймс Пиблс – ведущий теоретик в космологии, во всеобъемлющей книге которого *Крупномасштабная структура Вселенной*, вышедшей в 1980 году, был прекрасный обзор первых споров об однородности и кластеризации. Этот метод применили в 1969 году японцы Х. Тоцуи (H. Totsuji) и Т. Кихара (T. Kihara) в своей статье «Корреляционная функция для распределения галактик». Этот метод был разработан для исследования малых флуктуаций на фоне однородного распределения вещества.

Если в некоторой выборке галактик наблюдаемое число галактических пар в некотором интервале масштабов выше, чем ожидается из случайного однородного распределения (задаваемого законом вероятности Пуассона), то говорят, что между галактиками есть корреляция. Корреляционная функция измеряет, как избыточное число пар зависит от расстояния между ними. (На танцплощадке ожидается резкое увеличение корреляции для расстояний в 1 метр и меньше!) Обычно корреляция (т.е. избыточное число) сильнее для

малых расстояний (масштабов) и становится слабее к большим масштабам. Масштаб расстояния, за которым избыточное число пар уже не велико, называется *длиной корреляции*. В действительности точным критерием является то, что наблюдаемое число пар меньше, чем значение, ожидаемое при случайном пространственном распределении, умноженное на два. На масштабах больших, чем длина корреляции, распределение приближается к однородному.

Главным результатом исследования корреляционной функции является утверждение о том, что на малых масштабах, от 10 кпк до 10 Мпк, распределение галактик имеет фрактальную размерность $D \approx 1.2$, а для масштабов больше характерной длины корреляции в 5 Мпк распределение галактик становится однородным. Таким образом, этот метод дает два числа, вокруг которых кипят споры:

$$D \approx 1.2 \text{ и } R_{max} < 10 \text{ Мпк} .$$

В методе корреляционной функции предполагается, что однородность уже существует в пределах выборки галактик, и что известна средняя космическая плотность. Чтобы вычислить ожидаемое число пар галактик необходимо и то, и другое. Этот метод прекрасно работает, когда мы характеризуем флуктуации на малых масштабах в такой «гладкой» выборке из вселенной. Однако, если распределение галактик сильно неоднородно на всех масштабах выборки, тогда метод корреляционной функции не срабатывает. Его применение отсекает крупные структуры и ведет к ошибочному заключению, что был достигнут масштаб однородности.

Действительно, при применении анализа корреляционной функции к имеющимся выборкам галактик появляется нечто странное. Полученная длина корреляции равна примерно 5 Мпк. Пиетронеро был озадачен этим значением. На тех же самых трехмерных картах невооруженным глазом ясно видны структуры размером в 50 Мпк (см. рис. 11.4). Еще один сюрприз появился, когда астрономы посчитали корреляционную функцию для более глубоких выборок галактик. Отклонение от однородности и длина корреляции росли вместе с увеличением глубины выборки. Этого бы не произошло, если бы выборки, и большие и маленькие, охватывали однородные части вселенной.

Другую загадку задали богатые скопления галактик, которые видны на более далеких расстояниях, чем обычные галактики, и, таким образом, прослеживают более глубокий объем. В 1983 году Анатолий Клыпин и Александр Копылов впервые построили корреляционную

функцию для Эйбловских скоплений. Длина корреляции оказалась неожиданно большой – 25 Мпк! Означает ли это, что сами скопления кластеризованы сильнее, чем галактики?

11.9. Метод условной плотности находит фрактальность до 100 Мпк

Недостатков корреляционной функции можно избежать, применяя другой инструмент. В 1987 году новый подход, называемый методом *условной плотности*, предложил Лучиано Пиетронеро, который является специалистом по сложным структурам в статистической физике, появляющимся во многих природных явлениях, таких как пробой диэлектрика и явления структурирования. Там иррегулярности являются правилом на всех масштабах, и для их описания нужны новые математические методы.

Пиетронеро осознал, что похожая степень сложности, по-видимому, присутствует и в пространственном распределении галактик. Он любит говорить, что один из лучших примеров фрактального узора, который он знает, является распределение галактик во вселенной. На него производит впечатление, что галактические фракталы самоподобны от примерно 0.1 Мпк до 100 Мпк, т.е. в большом диапазоне масштабов. В лабораторных фракталах отношение максимального и минимального масштабов обычно составляет десять или сто.

Суть метода условной плотности проста. Он измеряет не отклонение от однородности, как это делает корреляционная функция, а то, как ведет себя средняя плотность при увеличении масштаба. Признаком фрактальности является то, что объемная плотность числа галактик (число/объем) уменьшается вокруг каждой точки согласно степенному закону. Слово «условный» означает, что подсчеты производятся вокруг точек структуры (для сравнения, вспомним условный космографический принцип!)

Сначала астроном составляет трехмерную карту какой-то части локальной вселенной вокруг себя. Для этого он должен для каждой галактики измерить а) ее положение на небе (направление), что сделать легко, и б) расстояние до нее, что намного труднее.

По сути, нужно поместить топографа в галактику, чтобы посчитать окружающие галактики внутри сфер разного радиуса: 1 Мпк, 2 Мпк, и т.д. Наблюдатель записывает результаты, и переходит

на другую галактику, где продолжает подсчеты. И так далее, до тех пор, пока не будут обойдены все галактики выборки. В конце путеше-

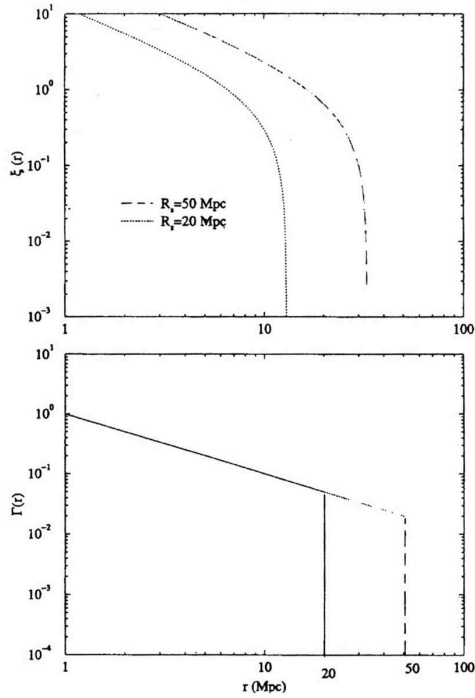


Рис. 11.7. Корреляционная функция (вверху) и условная плотность (внизу) показаны для двух выборок с глубиной 20 и 50 Мпк в рамках фрактального распределения галактик. Амплитуда и длина корреляции возрастают при увеличении внешнего края выборки, тогда как условная плотность просто продолжает уменьшаться. Наклоны линейных частей обеих функций ($D - 3$) дают фрактальную размерность выборки.

твия топограф берет записи и вычисляет среднее арифметическое подсчитанных чисел галактик в пределах сферы заданного размера. Он повторяет это для всех радиусов. Эти средние подсчеты, деленные на соответствующие объемы, дают то, что называется условной плотностью. Если эта плотность уменьшается с радиусом по степенному закону с показателем степени $D - 3$, тогда распределение галактик фрактально и его размерность равна D . Число галактик в

пределах радиуса R растет как $N \sim R^D$. Объемная плотность числа галактик есть $n = N / V \sim R^{(D-3)}$ для фрактальной размерности $D \in (0,3]$

К счастью, достаточно сделать подсчеты по карте, не летая в

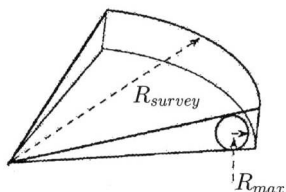


Рис. 11.8. Типичная конусная диаграмма для выборки галактик в узком угле, показывающая, насколько максимальная сфера, полностью заключенная в наблюдаемом объеме, меньше, чем глубина обзора.

реальности на другие галактики. Честно признаться, есть много других практических проблем. Карты не полны, поскольку мы не видим слабые галактики на больших расстояниях. Объемы карт не сферические. Это обычно узкие конусы или срезы, затрудняющие процедуру подсчета.

Вдохновленный загадкой 5 Мпк, Пиетронеро решил пересмотреть все данные по галактикам с точки зрения фрактальных структур. В результате этих усилий, предпринятых группой Франческо Силос-Лабини, возникла совершенно новая картина. По словам Пиетронеро, это было все равно, что составить из кусочков головоломки окончательную правильную композицию. Новый подход совершил чудо. Было показано, что различные наблюдения, которые до этого, казалось, конфликтовали друг с другом, находятся в хорошем согласии. Эти результаты показали, что распределение галактик имеет фрактальную размерность $D \approx 2$, и сгущивание продолжается на большие масштабы так, что максимальный размер неоднородности достигает пределов имеющихся карт, короче:

$$D \approx 2 \text{ и } R_m > 100 \text{ Мпк} .$$

Другим результатом было простое объяснение непонятного до этого увеличения длины корреляции галактик и скоплений галактик Эйбла. Это изменение происходит просто потому, что во фрактальной структуре средняя плотность «коварно» уменьшается с увеличением объема выборки (см. Рис. 11.7).

Интересно сравнить современные результаты обнаружения фрактальной структуры галактик с совершенно противоположным

заключением Эдвина Хаббла в 1930-ых годах, что «однородное распределение простирается до пределов наших телескопов». Фрактальность, обнаруженная там, где до этого вроде бы была установлена однородность, иллюстрирует, как драматически могут новые наблюдения изменить наше представление о Вселенной.

11.10. Искать однородность или предполагать ее наличие?

Физики изучают в лабораториях образцы вещества как внешние наблюдатели, экспериментируя с ними, как захочется. Подобная роскошь – всего лишь мечта для астронома, которому суждено изучать галактики только из одной точки в пространстве – Млечного Пути. Затем, в зависимости от способа обработки данных, астроном из одних и тех же наблюдений может получить удивительно несхожие результаты – только вспомните постоянную Хаббла: 50 и 100! То же самое происходит, если фрактальное распределение исследуется с помощью неподходящих инструментов. Как правило, получаются противоречивые результаты и ощущение растерянности. Точно такой является ситуация с длиной корреляции в 5 и 100 Мпк. Теперь мы понимаем, почему возможно вывести такие разные результаты для пространственного распределения галактик. Причина в том, что астрономы использовали два разных метода для измерения галактических фракталов.

По существу, метод условной плотности предназначен для *поиска* масштаба перехода от фрактальности к однородности, тогда как метод корреляционной функции *предполагает* наличие однородности и не может применяться в условиях отсутствия однородности.

Конечно, на рынке математических методов предлагается много разных способов, которые можно использовать для изучения пространственного распределения галактик. Мы обсудили только два, которые первыми появились в космологии, и которые хорошо иллюстрируют, почему важно использовать подходящий метод в новых условиях фрактальности. Другие методы нужно тщательно проверить на фрактальных распределениях и затем применять к реальным данным. Отказ от хорошего математического инструмента для анализа наблюдений был бы похож на отказ от приглашения Галилея посмотреть в телескоп. Более глубокое понимание фрактальности требует современных методов, чувствительных к

различным свойствам фрактальных распределений, таких как лакуарность, и того, что физики называют фазовым спектром преобразования Фурье флуктуаций плотности.

То, что мы описали выше, есть напоминание о значимости междисциплинарных исследований. Когда требуется изменить точку зрения, не удивительно, что это делают люди, пришедшие из другой области. Для Пиетронеро изучение скоплений галактик было применением его специальности – статистической физики – к новой области. Ученым полезно держать ум открытым для такой междисциплинарной деятельности, даже если кажется, что она не соответствует обычному подходу в этой области. Поддержка оригинальных проектов подобного типа может дать неожиданно значительные открытия.

Столкновение идей в науке не обязательно приводит к крушению, а скорее служит углублению нашего понимания вселенной. Спор о фракталах – это именно такой случай, в котором старые вопросы можно увидеть в свете новых концепций, и это может привести к новой интерпретации наблюдений.

Обложка журнала *New Scientist* от 21 августа 1999 года гласила: *Фрактальная Вселенная – Все, что мы знаем о космосе, может быть ошибочным*. Таким шокирующим заголовком выразился научный журналист Маркус Чоун (Marcus Chown), проследив за жарким диспутом между ведущим космологом Офером Лахавом (Ofer Lahav) и астрофизиком более молодого поколения Франческо Силос Лабини.

Лахав представлял точку зрения стандартной космологической модели большого взрыва, в которой однородность вещества является основной гипотезой. Так он, как и большинство астрономов, считает, что фракталы кончаются через несколько десятков мегапарсек. Один из аргументов – это то, что нет динамической теории, которая могла бы произвести сильно флуктуирующие фрактальные структуры на крупных масштабах из первоначального очень гладкого состояния. Другим доводом является изотропное распределение по небу далеких рентгеновских источников и фонового космического излучения.

Силос Лабини ответил, что неоднородные фракталы в пространстве могут выглядеть на небе очень гладкими, даже если фрактальность простирается на сотни мегапарсек. Это связано к лакуарностью фрактального распределения. Более того, он подчеркнул, что многие стандартные результаты основаны на

предположении об огромной массе темного вещества, которое прямо не наблюдается, но привлекается для объяснения разницы между теорией и наблюдениями. Он указал, что наблюдаемое фрактальное распределение галактик создает новую сложную загадку, от решения которой мы, может быть, очень далеки. Но встретиться с трудной проблемой намного интересней, чем спрятать ее «под ковер».

Оба спорщика согласились, что критические наблюдения для разрешения фрактального спора поступят из широкоугольных глубоких обзоров красных смещений галактик. Напомним еще один важный момент. При обсуждении однородности нужно помнить, что вселенная, как известно, содержит несколько субстанций: вакуум и другие релятивистские компоненты, темное вещество и обычное светящееся вещество. Вакуум всегда однороден, тогда как темное вещество и галактики могут иметь зону фрактальности и переход в однородность. Важно, что фрактальная галактическая вселенная и однородная релятивистская среда могут счастливо жить вместе. Обе они удовлетворяют Космологическому Принципу, не имея центра.

11.11. Открывая третье тысячелетие: массовые обзоры красных смещений галактик

Во внегалактической астрономии начало нового тысячелетия отмечено гонкой за представительной выборкой галактик, которая наконец позволит решить проблему крупномасштабной структуры Вселенной. Появились наблюдения, указывающие на наличие самых крупных из всех когда-либо виденных структур. Три типа независимых свидетельств пришли из глубоких обзоров галактик, богатых скоплениями галактик и квазаров. Они наводят на мысль, что существует непрерывная иерархия структур вплоть до нескольких сотен мегапарсек.

Первое свидетельство дал *2dF Обзор красных смещений галактик*, в котором использовался Англо-Австралийский 4-метровый телескоп, расположенный в горах к северо-западу от Сиднея. Название обзора происходит от поля зрения телескопа шириной 2 градуса. В обзоре будут измерены красные смещения всех галактик вплоть до довольно слабой величины ($19.5m$) и он будет состоять из двух частей. Одна часть в направлении на Северный Галактический Полус покрывает область $75^\circ \times 7.5^\circ$. Вторая часть в Южном галактическом полушарии равна $75^\circ \times 15^\circ$. Обзор 2dF уже завершен и содержит впечатляющее количество 250 000 галактик с красными смещениями

до ≈ 0.15 . Первый анализ 2dF данных методом условной плотности показал фрактальное распределение с размерностью $D=2.2$ в интервале масштабов $1 \div 40$ Мпк, что соответствует радиусу максимальной сфе-

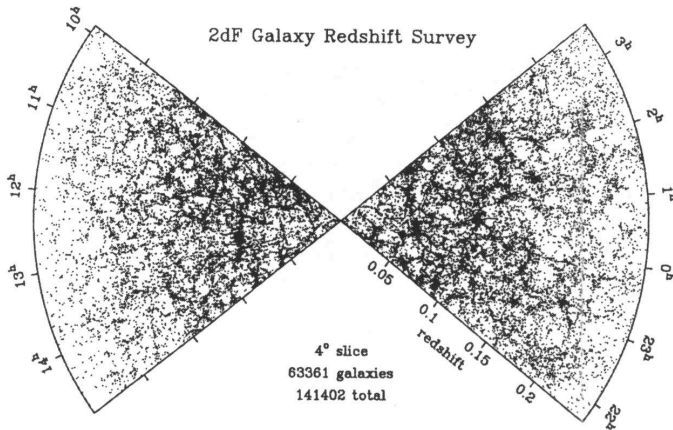


Рис. 11.9. Результаты галактического обзора 2dF, который простирается до глубин около тысячи мегапарсек. Вопрос на следующее десятилетие: тянутся ли фракталы до масштабов в гигапарсеки?

ры, полностью погруженной в объем выборки. Новый метод анализа распределения галактик вдоль тонких цилиндров позволил установить фрактальность вплоть до масштабов 100 Мпк.

Второй сюрприз преподнесли новые наблюдения богатых скоплений галактик. Астрономы используют скопления для изучения крупномасштабной структуры, поскольку яркие галактики скопления легко наблюдать даже на далеких расстояниях. И снова, как это произошло и раньше, более глубокий обзор показал непрерывный рост флуктуаций плотности до 600 Мпк.

Третья новость пришла из самого глубокого в астрономии обзора объектов – обзора красных смещений квазаров, или обзора 2dF QSO. Для него использовался тот же телескоп и те же площадки на небе, что и для обзора 2dF галактик, но объекты наблюдения – квазары, являясь самыми яркими объектами во вселенной, дают возможность изучать самые глубокие области космоса. Первый анализ спектра флуктуаций плотности показал, что они растут до 900 Мпк.

Эти последние открытия показывают, что последнее слово о пространственном распределении галактик на самых больших масштабах еще не сказано. Мы пока не знаем, где фрактальное распределение галактик превращается в однородность и как глубоко

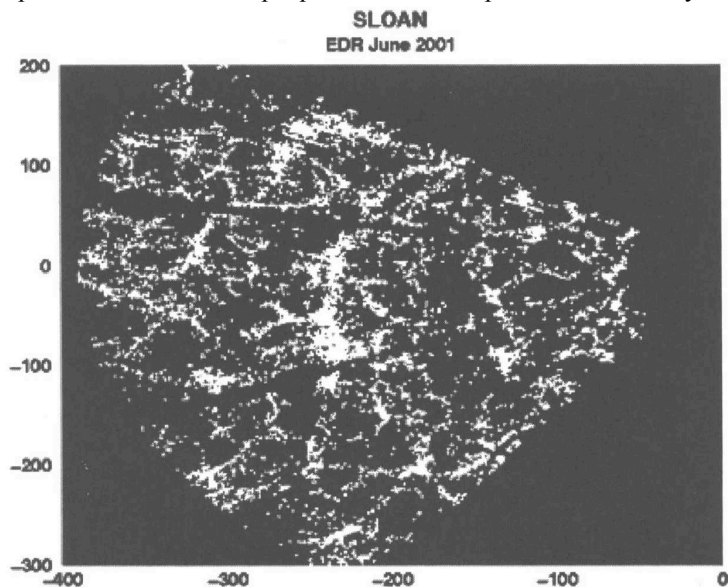


Рис. 11.10. Первые результаты галактического обзора SDSS показали наличие галактических структур с масштабами до сотен мегапарсек.

мы должны пойти, чтобы достичь «представительной» Хаббловской выборки, охватывающей, по крайней мере, одну ячейку однородности. Только внутри такого объема мы можем посчитать, какая доля от общей космической массы содержится в галактиках, и определить размер самой большой структуры во вселенной.

Решающий шаг для понимания природы распределения галактик ожидается от Слоуновского Цифрового Обзора Неба (Sloan Digital Sky Survey – SDSS). Финансирование проекта обеспечил Фонд Альфреда Слоуна, который был учрежден в 1934 году Альфредом П. Слоуном (Alfred P. Sloan), президентом корпорации General Motors. В этой американско-японской программе измеряются красные смещения одного миллиона галактик ярче 19-ой звездной величины, при помощи специального телескопа, находящегося в обсерватории Апах Пойнт

(Apache Point) в Нью-Мексико. Диаметр его зеркала 2.5 метра, а поле зрения составляет около 3 градусов на небе. Установленный на телескопе современный спектрограф может одновременно измерять красные смещения 640 галактик за одну экспозицию. За хорошую ночь 30 кремниевых электронных световых датчиков очень сложной камеры дают 200 гигабайт данных!

Обзор Sloan охватывает более четверти неба, что позволяет проверить фрактальную структуру в сферах с размерами, сравнимыми с глубиной обзора – около 500 Мпк! В июле 2001 года появился первый выпуск небольшой части обзора Sloan. Мы приводим конусную диаграмму этих данных на Рис.11.10, который явно показывает структуры с размерами около 100 Мпк. Однако точный анализ – это дело будущего.

Чтобы изучать гигапарсековые (1000 Мпк) масштабы, нужно проникнуть очень глубоко в пространство. Однако на очень больших расстояниях можно обнаружить только самые яркие и редкие объекты, такие как квазары. Это затрудняет исследование сверхкрупных масштабов вселенной, потому что все еще видна только «верхушка айсберга». Дело осложняется разными космологическими эффектами, которые начинают влиять на наблюдения и их интерпретацию. Например, объем пространственного конуса, который мы заполняем квазарами, больше нельзя вычислить по простому линейному соотношению между расстоянием и красным смещением – мы вступили в мир больших красных смещений и соперничающих космологических моделей.

Обзор Sloan соберет на небе около 100 000 квазаров, с целью изучения структур на масштабах около 1000 Мпк. Космическая карта, выполненная с помощью квазаров, поможет ответить на давний вопрос: существует ли действительно переход в однородность на масштабах в гигапарсеки?

Первые настоящие трехмерные внегалактические карты выявили богатое разнообразие структурных форм галактической вселенной. Это богатство отражено в описаниях, украшающих страницы астрономических журналов: двойные, тройные, группы, богатые, регулярные и иррегулярные скопления, стены, сверхскопления, пустоты, волокна, ячейки, мыльные пузыри, великие аттракторы, комья, концентрации, ассоциации... Конечно, каждое из них отдельно является волнующим предметом изучения, но их можно

также рассматривать как разные проявления одной главной сущности, называемой фракталом.

Успех фрактальной геометрии в описании того, что Лундмарк называл «очень сложной структурой в несомненно гигантской вселенской системе», есть необходимый первый шаг к пониманию происхождения крупномасштабных космических образований.

Глава 12

Происхождение мегафрактальных структур

12.1. Гравитация – строитель небесных структур

Закон гравитации Ньютона обманчиво прост. Мы уже видели, что даже взаимное движение всего трех тел непредсказуемо. Тем более никто не может представить себе, что такое детальная эволюция облака огромного числа гравитирующих тел.

Обычно можно рассматривать газ как рой частиц, которые взаимодействуют (упруго, как бильярдные шары) только тогда, когда они ударяются друг о друга. Это хорошая модель для газа в земных и космических условиях. Каждая частица газа движется свободно большую часть своей жизни и только на короткие моменты она сильно соударяется с другими частицами, попадающимися на ее пути. Удар заставляет частицу изменить направление и скорость движения. Для таких частиц, взаимодействующих короткое время, термодинамика предсказывает, что газ стремится к своему самому вероятному состоянию – термодинамическому равновесию. В этом состоянии все частицы равномерно рассеяны внутри сосуда, содержащего газ.

Что происходит, когда между частицами включается гравитация? Такой субстрат – самогравитирующий газ – совершенно отличается от обычного газа. Теперь гравитация удерживает газ вместе, образуя красивые структуры, такие как шаровые звездные скопления (см. Рис. 12.1). И так как гравитация каждой частицы ощущается другими даже на большом расстоянии, то все частицы как бы все время сталкиваются. Получающиеся коллективные явления можно изучать с помощью современных суперкомпьютеров. Очень эффективные компьютеры могут проследить шаг за шагом, как каждая частица движется под действием силы гравитации всех ее компаньонов. Такие вычисления показывают, что, начиная с хаотического первоначального состояния, ньютоновская гравитация создает сложные структуры различного размера.

Еще одним путем к тайнам самогравитирующего газа является построение теории того, как ведет себя такой газ. Это трудная пробле-

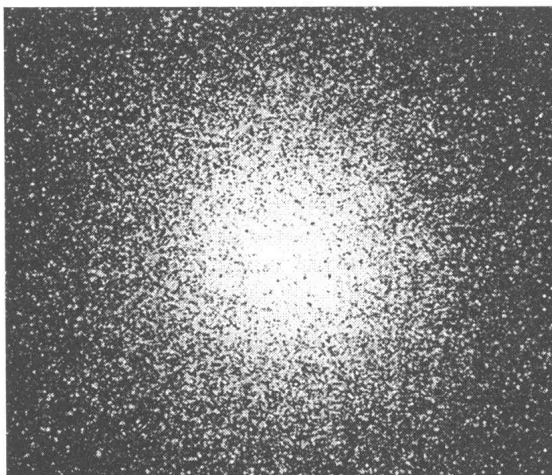


Рис. 12.1. Шаровое скопление ω Centauri сохраняет свою сферическую форму благодаря взаимной гравитации примерно миллиона звезд. Астрономы используют такие старые следы молодости Млечного Пути для вычисления возраста вселенной. Снято Тапио Корхоненом (Tapio Korhonen) на датском 1.5-метровом телескопе в Ла Силла, Чили.

ма, но в последнее время были достигнуты некоторые успехи. Парижские астрономы Гектор де Вега (Hector de Vega), Норма Санчез (Norma Sánchez) и Франсуаза Комб (Françoise Combes) показали, что состояние равновесия самогравитирующего газа является не равномерным распределением, а принципиально клочковатым и даже «иерархически кластеризованным». Тем самым в облаке частиц происходит чудо! Гравитация создает «фрактальный порядок» из индифферентного хаоса. Стремление гравитации создавать скопления и скопления скоплений используется в современной космологии, в которой гравитация является создателем очень крупномасштабных структур.

12.2. Потoki энергии и порядок из хаоса

Идея о том, что порядок может возникать из хаоса, не нова в физике и не ограничивается эффектом гравитации. Илья Пригожин, физик российского происхождения, Нобелевский лауреат, глубоко

изучил поведение «обычного» газа (которые можно считать теннисными шариками без гравитации). Он пришел к выводу, что в природе закон возрастания энтропии (тенденция к беспорядку и равновесию) не является таким всеобъемлющим, как считалось раньше. Да, он выполняется, если в начале физическая система находится недалеко от равновесия, но если у системы уже есть какая-то структура и существенный поток энергии внутри нее, то она стремится к еще большему порядку и структуризации на основе уменьшающейся энтропии.

Известным примером такой самоорганизации является образование конвективных ячеек в жидкости, через которую течет тепловая энергия (скажем, так, как происходит каждый день в кастрюле с водой на плите). Космическим случаем является поверхность Солнца, где конвекция переносит энергию из горячих внутренних областей и создает узор из гранул с типичным размером в 1000 км. Конвекция переносит энергию более эффективно, чем обычная проводимость, а природа любит экономичность. Таким образом, образование и поддержание структуры в системе газа или жидкости открывает новый канал для потока энергии.

Самый замечательный пример порядка, существующего благодаря постоянному потоку энергии, представляем собой мы сами и жизнь, процветающая вокруг. При температуре в сауне 100 С человеческое тело не стремится пассивно к термодинамическому равновесию с окружающей средой, а активно сохраняет свою нормальную температуру, и даже получает удовольствие в качестве побочного продукта. Не удивительно, что Пригожин называет жизнь «высочайшим выражением процесса самоорганизации».

12.3. Звезда как самогравитирующий ядерный реактор

Классической физике так и не удалось объяснить, что заставляет Солнце светить. Не было даже известно, как долго источник энергии, что бы это ни было, будет сохранять Солнце и другие звезды горячими. Теперь мы знаем, по определениям возраста Земли, что Солнце светило монотонно примерно 5 миллиардов лет. Обычные средства не могут поставлять требуемую энергию. Например, если бы Солнце было сделано из угля, то оно сгорело бы за 6000 лет.

Специальная теория относительности выявила неожиданную вещь, что каждая частица содержит огромную энергию ($E = mc^2$). Это

послужило ключом. Даже если бы маленькая часть солнечной массы превратилась в энергию, то можно понять поток его энергии в течение более пяти миллиардов лет. В действительности жизнь звезды – это постоянная борьба против силы гравитации, которая старается сжать звезду. Энергия, текущая наружу из очень горячих внутренних областей звезды, обуславливает силу давления, которая уравнивает силу гравитации.

В 1938 году Георгий Гамов (George Gamow) организовал в Вашингтоне встречу, на которой ученые смогли обсудить источник солнечной энергии. Ганс Бете (Hans Bethe), который когда приехал «ничего не знал о внутренности звезды, но все знал о внутренности ядра» (по словам Гамова), был очень вдохновлен этим событием и за шесть месяцев нашел механизм производства энергии для звезд, более тяжелых (и более горячих), чем Солнце. Независимо от него Карл Фридрих фон Вайцзекер (Carl Friedrich von Weizsäcker) тоже открыл этот углеродно-азотно-кислородный цикл, в котором углерод действует как катализатор при превращении четырех протонов в одно ядро гелия. Для звезд, похожих на наше Солнце или меньшего размера, основным источником энергии является *протон-протонная реакция*, также ведущая от протонов к гелию. Глядя на Сириус, углеродно-азотно-кислородный цикл можно увидеть, но в жаркий день протон-протонную реакцию можно почувствовать!

Звезды являются гигантскими ядерными реакторами, которые высвобождают посредством синтеза маленькую часть (менее 1%) спящей энергии массы. Кроме производства энергии, ядерные реакции служат также конструкторами тяжелых элементов, таких как углерод, азот, кислород и других, вплоть до железа. В своей классической статье «Синтез элементов в звездах» Маргарет и Джеффри Бербиджи (Margaret & Geoffrey Burbidge), Вильям Фаулер (Willim Fowler) и Фред Хойл (Fred Hoyle) описали в 1957 году, как это происходит.

Вещество в Солнце является хорошим примером нормальной материи во вселенной. Большие планеты нашей Солнечной системы также сделаны из «солнечного вещества», тогда как маленькие – Меркурий, Венера, Земля и Марс – имеют отличающийся состав. В нижеприведенной таблице сравниваются самые распространенные химические элементы на Солнце и на Земле, указанные в процентах от массы.

<i>Солнце</i>		<i>Земля</i>	
элемент	процент	элемент	процент
водород	77	железо	35
гелий	21	кислород	30
кислород	0.8	кремний	15
углерод	0.3	магний	13
неон	0.2	никель	2.4
азот	0.1	сера	1.9
железо	0.1	кальций	1.1

Так много водорода и гелия и так мало более тяжелых элементов – почему? Ответ, который дает современная космология, состоит в том, что легкие элементы пришли из ранней вселенной, тогда как тяжелые были «сварены» внутри звезд.

12.4. Рост крупномасштабной структуры в модели Большого Взрыва

Согласно космологической модели большого взрыва, галактики и их структуры постепенно образовались после того, как притяжение крошечных первичных зародышей вещества начало собирать окружающее вещество. Считается, что такая начальная зернистость берет свое начало в очень ранней инфляционной эпохе в виде флуктуаций отталкивающих квантовых полей, которые ускорили расширение. Гравитационный рост мог начаться только после того, как вещество стало нейтральным и стало избавляться от излучения, примерно через 300 000 лет после Большого Взрыва.

Но могли ли крошечные зернышки вырасти в нечто столь плотное и большое, как галактики? Фактически для этого требуется, чтобы начальные флуктуации плотности составляли 0.001 от средней плотности. А как убрать галактики из больших областей пространства, оставив огромные пустоты? Для такого героического дела нужно много времени. Наблюдаемые галактические потоки, ускоренные гравитацией, имеют скорости 500 км/сек. Поэтому в пределах возраста вселенной галактики могли пройти не больше 10 Мпк, что намного меньше, чем наблюдаемые 100-мегапарсековые скопления и пустоты. Следовательно, зародыши больших структур уже должны были существовать в то время, когда возникло космическое излучение. И, как указали Джозеф Силк и Джеймс Пиблс в 1960-ых годах, зародыши

одних только галактик должны были отпечатать относительную зернистость ± 0.001 на фоновое излучение. Расширение пространства и гравитационное сжатие заставляют флуктуации плотности $\delta d/d$ расти как масштабный множитель S : $\delta d/d \sim S(t) \sim 1/(1+z)$. Чтобы зерно превратилось в галактику, $\delta d/d$ должно вырасти (по крайней мере) до примерно 1, когда галактики уже наблюдаются около красного смещения $Z \approx 1$. Следовательно, когда $Z \approx 1500$, $\delta d/d$ должно быть около $1/1500$. Так как эти зародыши сопровождались примерно одинаковыми температурными вариациями $\delta T/T \approx \delta d/d$, то теперь следует ожидать температурных флуктуаций приблизительно $\Delta T/T \approx 10^{-3}$.

Тогда почему наблюдаемые флуктуации микроволнового фонового излучения в тысячу раз меньше? Здесь снова появляется темная материя. Чтобы поженить наблюдаемую гладкость космического излучения и существующую на настоящий день клочковатую фрактальность галактического распределения, придется предположить, что всем процессом управляло темное вещество, которое приняло на себя рост мегаструктур.

Как первым показал космолог из Московского университета Артур Чернин, зерна темного вещества являются не только первоначальной причиной скапливания видимого вещества, но они могут проделать этот фокус, не оставляя отпечатков на микроволновом небе. Такую прекрасную идею Чернин опубликовал в 1981 году. Энергичный лидер Московской космологической школы Яков Зельдович, вошедший в легенду своим строгим отношением к тому, что касается уровня научной работы, в этом случае быстро рекомендовал опубликовать статью.

Таким образом, современная теория образования структуры прячет флуктуации фонового излучения посредством двух предположений: во-первых, обычное барионное вещество, привязанное к излучению, было первоначально однородным, а во-вторых, существовало темное небарионное вещество, сквозь которое излучение с легкостью ускользало. Даже если это темное вещество распределено неравномерно, оно не оставляет своей подписи на космическом излучении. Предполагается, что темное вещество образует невидимые зародыши, вокруг которых формируются все крупномасштабные структуры во вселенной.

Для изучения процесса формирования структур космологи используют суперкомпьютеры для решения задачи N тел в моделировании гравитационного взаимодействия между миллионами



Рис. 12.1. Таким видел Артур Чернин Якова Зельдовича во время семинара в Москве в 1970-ые годы. В то время он развивал свою «блинную» теорию образования крупномасштабной структуры. В этом сценарии плоские стенки (или блины) образуются первыми, и только затем внутри них сгущаются галактики. Джеймс Пиблс предложил альтернативную картину, в которой сначала создаются маленькие звездные системы, а только затем, в результате гравитационного роста, появляются галактики и более крупные структуры.

частиц. Эти современные вычисления во многом пришли на смену более ранним приближенным теориям, развиваемым космологическими школами Зельдовича и Пиблса.

Модели N тел могут произвести фрактальные структуры на малых масштабах (< 10 Мпк), в которых кластеризация «нелинейна», т.е. пики плотности много выше, чем средняя плотность, и доминирующим фактором является локальная гравитация. На более крупных масштабах доминирует расширение пространства, и получающиеся структуры определяются скорее начальными условиями. Это означает, что для расчета образования структур критично иметь полный контроль над начальными положениями и скоростями частиц в начальной точке эволюции. В целом, кластеризация в модели N тел в сценарии большого взрыва есть результат действия нескольких эффектов: расширения пространства, начальных условий, свойств темного вещества и самогравитации начальных зародышей плотности.

Чтобы сравнить теоретические результаты с наблюдаемым скапливанием галактик, нужно все-таки учитывать еще один эффект – «байес», т.е. разницу между кластеризацией темного и светящегося вещества. Реальным создателем клочковатого распределения является темное вещество, но галактики не обязательно следуют за ним. Байес

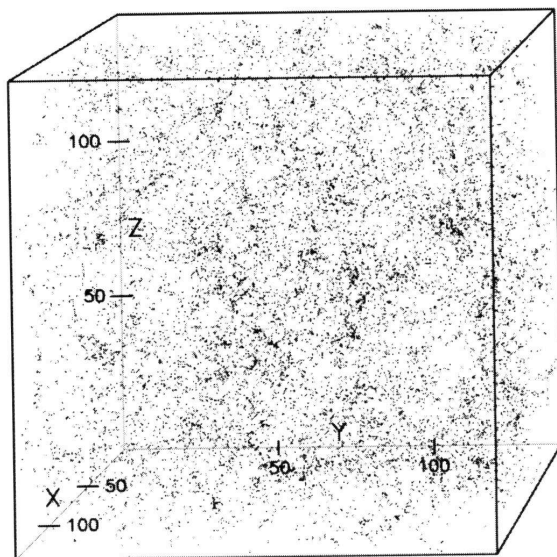


Рис. 12.2. Моделирование крупномасштабной структуры в рамках модели Большого Взрыва с холодным темным веществом ($\Omega_{CDM} = 0.3$) и темной энергией ($\Omega_{\Lambda} = 0.7$). Это вычисление проделал консорциум VIRGO, а картинку изобразил Микко Хански. Куб имеет 200 Мпк в поперечнике и содержит 15 000 галактик – конечных результатов гравитационного взаимодействия между несколькими миллионами масс темного вещества.

измеряет разницу. Например, галактики могли формироваться преимущественно на мелких пиках более гладко распределенного темного вещества, оставив большие объемы с низкой плотностью пустыми от галактик.

Выполнение расчетов в задаче N тел и сравнение результатов с наблюдениями галактической вселенной является очень сложной областью астрономии, которая еще находится в процессе развития. Но даже несмотря на различные источники ошибок и возможность добавить в рецепт темное вещество, настроить начальные условия и отрегулировать байес, все равно создается впечатление, что весь этот теоретический аппарат не в состоянии создать пейзажи, похожие на реальную картину структур с масштабами в сотни мегапарсек. Может оказаться, что вселенная еще слишком молода, а фоновое излучение

слишком гладко, чтобы такие структуры появились из каких-либо вычислений, основанных на гравитационной нестабильности в расширяющейся вселенной.

Возможным решением проблемы формирования наблюдаемой в современную эпоху фрактальной структуры вселенной может быть наличие первичных фрактальных начальных условий, которые только усиливаются и развиваются гравитационным полем исходных структур. В таком сценарии начальные фрактальные неоднородности генерируются с участием негравитационных сил. Например, фрактальность в модели Джинса-Хойла появляется в результате процесса иерархической фрагментации первичного газа. Во взрывном сценарии Острайкера-Кови первичная фрактальная структура генерируется в результате мощных взрывных процессов. В рамках взрывного сценария Шульман и Сейден, используя теорию перколяции, развили модель образования фрактальной крупномасштабной структуры.

12.5. Выделенность фрактальной размерности $D=2$

Удивительно, что первая модель фрактального (тогда называемого иерархическим) распределения вещества была рассмотрена еще Ньютоном в его «теории строения вещества», объясняющей, почему существуют различные плотности массы у различных веществ. В книге «Оптика» он рассмотрел модель строения вещества в виде регулярной иерархической структуры, так что доля «пустоты» в разных веществах различна, а элементарные первичные частички одинаковы. В модели Ньютона грань куба делилась пополам, и из 8 элементов оставались только 4. Таким образом, по формуле $D = \log N / \log A$, где A есть отношение размеров элементов, находим, что фрактальная размерность ньютоновских структур $D=2$.

Протофрактальный мир, который спроектировал Фурнье, а затем Шарлье и Селети, мог иметь различные фрактальные размерности. Причиной, по которой они выбрали конкретное значение «один», было желание избежать парадоксов бесконечной гравитации и сверкающего неба ньютоновской вселенной, происходящих от равномерного распределения звезд в бесконечном пространстве. Для $D = 1$ скорость убегания из элемента любого иерархического уровня конечна. Квадрат скорости убегания равен $v_{esc}^2 \sim \phi_N \sim GM/R = \text{const}$ для $D = 1$. Она намного меньше, чем скорость света, если размер

элемента намного больше, чем его гравитационный радиус. Известный Фурнье факт, что скорости звезд действительно малы, вдохновил его идею, что распределение звезд с фрактальной размерностью $D=1$ верно для всей бесконечной вселенной.

В 1920-ые годы Кнут Лундмарк был склонен к иерархии, которая подчиняется второму критерию Шарлье, т.е. соответствующему $D = 2$. Скучные наблюдения не давали какого-то убедительного доказательства, но Лундмарку нравилась мысль, что «Природа прилагает все усилия, чтобы достичь наилучшего возможного результата. Так же, как температура человеческого тела близка к температуре свертывания белка, мир построен таким образом, что он близок к коллапсу вследствие того, что полное притяжение находится около одного из пределов. В любом случае, три системы разных порядков, которые мы теперь знаем, - звезды, галактические и метагалактические системы, расположены так, что они удовлетворяют вышеприведенному найденному условию».

В 1953 году Фред Хойл, пионер во многих областях современной астрофизики, разработал первую модель иерархического образования звезд и галактик. В статье «О фрагментации газовых облаков на галактики и звезды» он рассмотрел каскадный процесс, начинающийся с однородного газового облака водорода. Из-за нестабильности Джинса это облако начнет коллапсировать, и в нем начнут возникать подэлементы. Число и размер элементов, которые определяют фрактальную размерность возникающей иерархии, зависит от процесса охлаждения в газе. Процесс иерархической фрагментации Хойла естественно производил структуры с фрактальной размерностью $D = 1$.

В рамках космологии стационарного состояния Хойл и Нарликар рассмотрели иерархическую модель с отношением размеров элементов $R = 3$ и числом подэлементов $N = 8$, что дает $D = 1.9$. Это исследование 1961 года конкретно касалось подсчетов радиоисточников, которые в то время считались основным аргументом против стационарного состояния. В новой модели квазистационарного состояния крупномасштабные структуры имеют негравитационное происхождение (Этот механизм изучен намного меньше, чем гравитационная кластеризация). Ожидается, что события мини-творения, с более высокой вероятностью возникновения нового вещества вокруг уже существующего, ведут к фрактальному пространственному распределению.

Современные космические карты свидетельствуют о том, что пространственное распределение галактик имеет фрактальную размерность, близкую к двум, по крайней мер, на масштабах от 1 Мпк до примерно 100 Мпк. Является ли эта фрактальная размерность просто случайной? Может быть, в $D = 2$ есть особое физическое значение?

В 1981 году один из нас (Ю.Б.) предложил аргументы, почему галактическое распределение могло бы быть фрактальным с размерностью $D \approx 2$. На самом деле в то время концепция фракталов еще не была хорошо известна в Советском Союзе, и книгу Мандельброта было практически невозможно достать. В имевшихся статьях Вертца и Вокулера использовались регулярные иерархические структуры, характеризуемые параметром дилуции (который просто связан с фрактальной размерностью). И теория, и наблюдения делали дилуцию, соответствующую $D = 2$, привлекательной возможностью.

Теоретически интересным было гравитационное красное смещение в рамках фрактальных структур, которое в случае $D = 2$ дает линейное соотношение «красное смещение – расстояние», похожее на закон Хаббла. Наблюдения включали подсчеты галактик и соотношение «вириальная масса – размер» для галактических систем от двойных галактик до сверхскоплений. В частности, вириальные массы (в которые входит и светящееся, и темное вещество) определялись по уникальным на тот момент данным статьи «Средние характеристики галактических систем и проблема существования скрытой вириальной массы», опубликованной в 1968 году Игорем Караченцевым, который был пионером наблюдательных исследований темной материи (и, кстати, учеником Виктора Амбарцумяна). Скрытая масса оказалась почти пропорциональной квадрату размера системы, или, на языке фракталов, $D = 2$. Недавно один из нас (П.Т.) проанализировал современные обширные данные по двойным галактикам, собранные Караченцевым, и показал, что для того, чтобы согласовать орбиты двойных галактик с их массивными гало, снова приходится предположить соотношение «размер – масса» с $D \approx 2$.

Еще одним контекстом, в котором появилось $D \approx 2$, было исследование образования галактик, проведенное в 1986 году Л.Шульманом (L.Schulman) и П.Сейденом (P.Seiden). В их модели галактики рождались аналогично тому, как образование звезд распространялось внутри галактики. Рождение одной галактики стимулирует рождение близких галактик из первичного космического газа. Если этот процесс происходит вблизи его порога просачивания,

тогда возникает иерархическая структура, при этом критическая фрактальная размерность для процесса просачивания равна примерно 1.95.

Шведский физик Ханнес Альфвен (Hannes Alfvén), лауреат Нобелевской премии 1970 года, предложил космологическую модель, в которой центральную роль играют высоко ионизованный газ (т.е. плазма) и магнитные поля. «Потому что в начале была плазма». Стандартная космология тоже имеет плазму в ранней вселенной, но считается, что после эпохи рекомбинации, когда вещество становится нейтральным, доминирующую роль берет на себя гравитация, а магнитные поля важны только локально. Хотя есть аргументы против этой модели в целом, крайне интересно, что существенным свойством Альфвеновской космологии является неизбежная клочковатость распределения вещества. В плазменных явлениях неоднородности и их иерархии случаются спонтанно. В 1986 году, при обсуждении образования галактик в плазменной космологии, Эрик Лернер (Eric Lerner) показал, что плазма порождает магнитные волокна с универсальным соотношением «масса – размер», опять соответствующим $D \approx 2$.

*Ханнес
Альфвен
1908-1995*

12.6. Фрактальные состояния в задаче N тел

При взгляде на иерархические структуры, образованные гравитирующими частицами, вспоминаются некоторые пассажи книги Артура Кестлера «Призрак в машине» из «до-фрактальной» эпохи 1967 года, в которых он очаровательно писал об иерархических системах в биологии и психологии. Он придумал слово «голон» (от греческого слова, означающего «целое») для обозначения под-целых или элементов сложных иерархий, которые «ведут себя частично как целые или полностью как части, в зависимости от того, как на них посмотреть». Кестлер любит говорить об «эффекте Януса». У всех элементов иерархии, как у римского бога Януса, есть два лица, глядящих в противоположных направлениях. Одно лицо смотрит «вниз», на подчиненные уровни, как самозванный хозяин. Другое вглядывается «вверх», являясь зависимой частью, слугой. Фактически, каждый хозяин является и слугой, а каждый слуга – это также хозяин. Как слуга, элемент испытывает притяжение других элементов того же уровня, и в то же время как хозяина его поддерживает внутреннее притяжение его собственных слуг.

Проблемы эволюции, стабильности и выделенной фрактальной размерности больших систем частиц, движущихся под действием их взаимных гравитационных сил, пока не решены. Было проведено только несколько исследований, но они подсказывают, что фрактальная размерность 2 является, по-видимому, теоретически выделенным значением в самогравитирующем газе.

В 1990 году Жан Перданг (Jean Perdang) с помощью численного эксперимента установил, что для фрактала, образованного гравитирующими точечными массами, стабильная конфигурация возможна, но только если ее фрактальная размерность меньше критического значения, которое равно 2. Несколько лет спустя Даниэль Пфеннигер (Daniel Pfenniger), при изучении облачной межзвездной среды, построил иерархическую модель, в которой на каждом уровне элементы достигали равновесия. Он обнаружил, что системы, в которых доминируют дальнедействующие силы, предпочитают образовывать фрактальные структуры. Для гравитации фрактальная размерность должны быть меньше двух, тогда как для близкодействующих сил состояние не может быть иерархическим, и размерность должна быть близка к трем.

Группа французских астрономов – Гектор де Вега, Норма Санчез и Франсуаза Комб – опубликовали в 1996 году в журнале *Nature* интересный результат, который, кажется, согласуется с вычислениями Перданга. В теоретических исследованиях газа из самогравитирующих частиц они пришли к выводу, что при статистическом равновесии газ является не однородным, а образует структуры с фрактальной размерностью, равной либо 2, либо 1.59. Их работа относится и к локальной галактической вселенной, и к межзвездной среде внутри галактик.

Затем важное модельное исследование кластеризации в гравитирующих системах N тел выполнила группа Пиетронеро в Римском университете. Чтобы отделить эффект взаимной гравитации от эффекта космологического расширения пространства, они с помощью суперкомпьютера рассмотрели статическое евклидово пространство и примерно 30 000 частиц. Было обнаружено, что процесс образования структур начинается с небольших изначально присутствующих случайных флуктуаций плотности, которые вырастают в самоподобные зернистые структуры. Они развиваются от маленьких до больших масштабов, заполняя, в конце концов, весь объем, как это можно видеть на Рис. 12.3. Хотя не было найдено, что система приближается к определенному статистическому равновесию,

образующаяся структура быстро начинает подчиняться фрактальному закону с $D \approx 2$. По причине различных вычислительных ограничений, в частности, конечного размера моделируемого объема, пока остается открытым вопрос о том, как долго такие структуры могут существовать в безграничной вселенной.

Магическое число два можно качественно понять, представив себе, что ньютоновская сила гравитации в такой фрактальной системе постоянна для всех масштабов расстояний. Для фрактальной структуры масса внутри радиуса R равна $M(R) \sim R^D$, следовательно, для $D=2$ масса сферы вокруг каждой галактики возрастает как квадрат ее радиуса, в то время как сила Ньютона уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Значит, рост силы, вызванный увеличением массы, компенсируется увеличением расстояния, а полная сила остается постоянной. Если фрактальная размерность больше двух, тогда сила гравитации от крупномасштабных флуктуаций будет доминировать над силой от маленьких кластеров. В противном случае ($D < 2$) доминируют мелкомасштабные флуктуации. Следовательно, $D = 2$ есть критическая фрактальная размерность, для которой все кластеры «демократично» влияют на все частицы одинаково. Догадку Лундмарка, что фрактальная размерность $D = 2$ является своего рода критической размерностью для вселенной, теперь можно понять более глубоко.

Необходимо также отметить, что старые аргументы в пользу $D = 1$, предложенные для решения парадоксов ньютоновской космологии, больше не требуются в модели Фридмана, в которой время жизни вселенной конечно. Даже в статической вселенной, как показал Хольцмарк для однородно рассеянного вещества, скорости галактик остаются низкими, благодаря изотропии распределения масс.

12.7. Теория сложности Андерсона

В 1972 году в известной статье нобелевского лауреата Филипа Андерсона «То, что больше, – другое» появилась идея, которая теперь развилась в новую ветвь науки, называемую теорией сложности. Ее принцип состоит в том, что «реальность имеет иерархическую структуру, в которой на каждой стадии нужны совершенно новые законы, понятия и обобщения, требующие той же степени вдохновения и творчества, что и на предыдущей». Это дало совершенно свежий взгляд на природные явления. Изучения

элементарных кирпичиков, из которых состоит вещество, недостаточно, когда кирпичики складываются вместе в прекрасные структуры. Сложность появляется изучением таких в высшей степени структурированных архитектур, имеющих законы и свойства, которые нельзя предсказать, зная сами кирпичики. Это новая междисциплинарная область включает в себя объекты исследования, простирающиеся от физики, геологии, астрофизики до экономики и биологии.

Хороший пример сложности виден в проблеме вычисления орбит для системы из двух гравитирующих частиц и системы из трех таких частиц. Система двух тел имеет простые и легко представимые решения, тогда как решение системы трех тел оказалось само по себе целой сложной наукой. Как мы уже говорили, современная теория хаоса возникла из глубокого анализа Пуанкаре проблемы трех тел, которую нельзя понять без изучения фрактальных свойств динамических странных аттракторов. Сложная фрактальная структура вселенной, по-видимому, отражает коллективные явления, порождаемые огромным числом гравитирующих частиц.

Сложность, в андерсоновском смысле, означает, что даже под действием одной и той же фундаментальной силы большие системы демонстрируют новые свойства, которые нужно открыть. Но изучение вселенной еще более затрудняется тем, что такая сложность возникает на фоне очень разных масштабов с различными доминирующими фундаментальными силами и законами. Более того, научное понимание достигается ценой упрощения картины природы, чтобы можно было применить к ее явлениям математическую модель. Но через какое-то время природа сама запротестует против, так сказать, этой узкой одежды. Новые наблюдения и эксперименты ведут к новым теориям и моделям. И, рано или поздно, природа снова выходит за пределы принятой маски – реальность ускользает сквозь пальцы. Действительно, реальный объект, будь то камень, поднятый на улице, или галактика, увиденная в телескоп, содержит в себе богатые глубины физической реальности.

Здесь заманчиво взглянуть на древнее индийское понятие «бесконечной неоднородности», описанное Конрадом Рудницким. В этом контексте это означало бы, что нельзя ухватить вселенную в одной определенной модели: когда мы изучаем вселенную глубже, появляются новые, неожиданные вещи, граница неизвестного отодвигается и расширяется и в макромир, и в микромир. Сказать, что расширение знаний сопровождается увеличивающимся контактом с

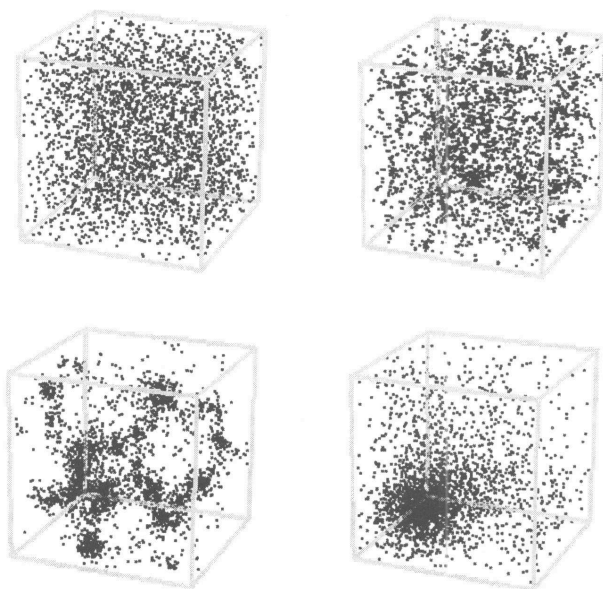


Рис. 12.3. Результаты моделирования в задаче N тел роста структуры при ньютоновском законе гравитации. Гравитирующие частицы, расположенные случайным образом (слева сверху), с течением времени начинают образовывать структуры на все больших масштабах.

неизвестным – больше, чем метафора. Опыт показывает, что по мере того, как наука движется вперед, всегда встречаются девственные ландшафты, и появляются новые, прежде не задаваемые вопросы.

Тем не менее, в сердце космолога живет желание понять всю физическую вселенную, хотя у него, может быть, есть ощущение, что это скорее мечта, чем реалистичная цель (даже если подходящим образом определить слово «всю»!). Вспомним, как ньютоновский мир, основанный на старой физике, страдал от многих парадоксов. И при всем своем успехе, бесконечная фридмановская модель, полная всех типов вещества и темной энергии, все еще содержит эту необъяснимую сингулярность, как бы дверь во что-то намного большее. Новая физика с ее релятивистскими и квантовыми законами, в конце концов, пролетит свет на первичную арену, на которой выросли зерна нынешних галактик.

На границе знаний мы предпочитаем представлять себе вещи самым простым из возможных образов, и только позже вынуждены

нарисовать более сложную картину. В космологии кажется, что фридмановская модель, однородная благодаря ее релятивистским компонентам, хорошо описывает многие текущие наблюдения. Но означает ли это, что мы, наконец, достигли уровня реальности, где последним словом является идеальная однородность? Или мы все еще, как и раньше, представляем себе платоновское небо регулярных форм? Размышления, приведшие к инфляционной теории, несут в себе похожую на мечту идею, что то, что мы называем нашей вселенной есть только один стандартный пузырь среди мириад других вселенных, которые образовались из первичного квантового супа. Такая фантастическая сверхвселенная была бы опять фрактальной, бесконечно неоднородной!

12.8. О чем говорят мегафракталы?

Признание современной космологией фрактальности крупномасштабной структуры содержится в обзорной статье Кельвина Ву (Kelwin Wu), Офера Лахава (Ofer Lahav) и Мартина Риса (Martin Rees) в журнале *Nature*: «Вселенная является неоднородной – и существенно фрактальной – на масштабах галактик и скоплений галактик, но большинство космологов думает, что на более крупных масштабах она становится изотропной и однородной». Тем не менее, эта область так молода, что даже в самых последних астрономических энциклопедиях мы не найдем заглавного слова «фрактал». В настоящее время горят споры о самых больших масштабах, до которых тянется фрактальность. Здесь нам хотелось бы подчеркнуть несколько представлений и выводов, проистекающих из исследования мегафракталов.

Общепринято, что от снежинок на Земле до галактических сот фракталы являются существенной частью картины. А мегафракталы показывают, что «соревнование» между гладкостью и неровностью в Природе продолжается на еще более крупных масштабах. Примечательно, что Космологический Принцип может охватить и однородность, и фрактальность. На вопрос, поставленный Иоганном Ламбертом о возможности иметь и «подчиненность» (иерархию), и «демократию» (отсутствие управляющего центра), теперь можно ответить утвердительно.

Обнаружение мегафракталов основано на получении гигантских выборок положений галактик в пространстве и на

применении адекватных математических методов, таких как анализ условной плотности. Изучение космических фракталов является блестящим примером преимущества взаимодействия между различными областями науки, которое вовлекает объединенные усилия астрономов, физиков и математиков.

Фрактал связывает наблюдаемые явления и теорию, которая их объясняет. Это описательное понятие, которое в своей основе содержит принцип самоподобия, но ничего не говорит о физическом механизме построения фрактала. Другими словами, в духе понимания природы Мандельбротом, можно сказать, что фрактальность галактик может быть понимаема и «вниз», и «вверх». Вниз, фрактальность объясняет впечатление иерархии. Вверх, мы ожидаем более глубокого объяснения фрактальности, например, действием гравитационных и других сил.

Какую новую физическую картину мира могут дать фракталы? Вильям Саслоу (Willam Saslow) тоже размышлял над этим вопросом в своей фундаментальной книге «Распределение галактик – гравитационная кластеризация в космологии». Он выражает надежду (пока что только надежду), что «мультифрактальное описание галактик может представлять странный аттрактор, который является результатом нелинейных динамических уравнений гравитационной кластеризации галактик».

Наблюдаемый закон Хаббла больше нельзя рассматривать как результат однородного распределения *галактик* – фрактальная клочковатость видимого (и части невидимого) вещества скорее обнаруживает однородность какой-то глубинной, неизвестной гладкой субстанции, на которую опирается модель Фридмана. Крайне интересно, что одновременно с мегафракталами астрономы нашли свидетельства присутствия вакуума или темной энергии, которые могут обеспечить столь долгожданную однородность.

Мегафракталы больше не нужны для объяснения парадокса ночной темноты, но они, уходя глубокими корнями в прошлое, в конце концов, прольют свет на Темный Век, когда галактики были в зародыше, и даже на эпоху, предшествующую той, когда были испущены фотоны космического излучения. Моделирование N гравитирующих частиц является главным инструментом для изучения роста структур из первичных зародышей. Гравитация, космос и фракталы естественно появляются вместе.

Как мы видели, в создание космических фракталов могут быть вовлечены различные процессы. В зависимости от физического

состояния вещества, эволюционной фазы вселенной и масштаба структуры может доминировать тот или иной порождающий механизм. Если фрактальность тянется до масштабов гигапарсек, то такие «гигафракталы» могут уходить корнями в распределение самих первичных зародышей. Мы только начали рисовать полную картину космических фракталов и их происхождения.

Примером идеи, возникшей из фракталов, является интересная попытка, предпринятая индийским физиком Буррой Сидхартом (Burra G. Sidharth), построить вселенную «с изрезанной береговой линией» от мельчайших масштабов микромира до самых больших космических масштабов. Он доказывает, что существует универсальное соотношение между размером системы и числом ее элементов ($R \sim \sqrt{N}$), выполняемое с масштаба Планка вверх до масштаба вселенной. Взгляд Сидхарта выдержан в духе взгляда Джона Уилера (John Wheeler) на физику как на регулярность, основанную на хаосе, что Уилер выразил так: «Я думаю, что все беспорядочно построено на непредсказуемых результатах миллиардов и миллиардов элементарных квантовых явлений, и что законы ... физики возникают из хаоса под действием регулирующего принципа, открытие и правильная формулировка которого есть задача номер один...»

Богатый источник новых наблюдений и идей – уединенные астрономические обсерватории под темными небесами – являются нашей подлинной связью с глубоким пространством. Пионерские усилия Эдвина Хаббла и Алана Сэндиджа привели к наблюдательному подходу к космологии, в которой та часть мира, которую можно исследовать с помощью имеющихся телескопов, становится нашим входом во вселенную.

В настоящее время космологию часто рассматривают как изучение того, что произошло в первую минуту после создания вселенной. Такая работа – далекая экскурсия в то, что нельзя наблюдать прямо, привлекательная для теоретического ума. Другой подход дает наблюдательная космология, в духе которой написана эта книга, скорее начинается с наших окрестностей в пространстве и времени. Наблюдения постепенно углубляют наши знания локальной вселенной и увеличивают маленькую, но драгоценную область, в которой модели колоссального мира вступают в контакт с реальностью.

Астрономия становится по-настоящему трехмерной, и это происходит и во внегалактическом пространстве, и даже ближе к

дому. Из-за отсутствия хороших индикаторов расстояния внутри нашего

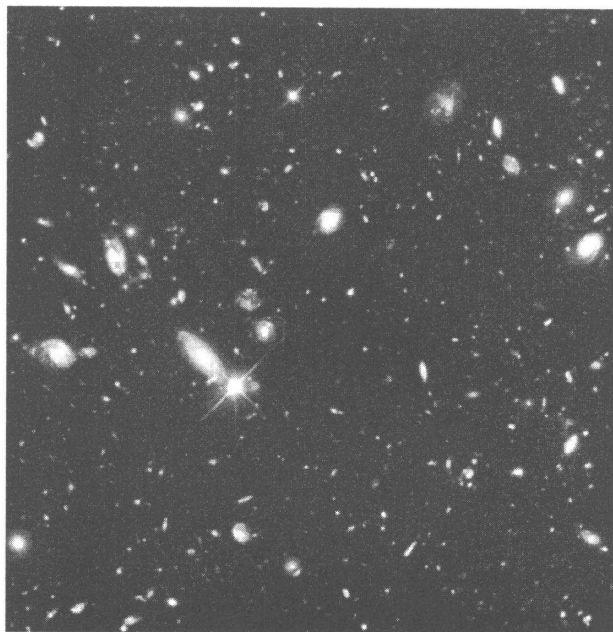


Рис. 12.4. Этот самый глубокий в истории вид галактической вселенной дал Космический телескоп им. Хаббла. Когда мы смотрим на небо, мы больше не видим голубую яшму или вращающиеся хрустальные сферы, несущие звезды. Наши мысли летят глубоко в пространстве и назад во времени, за галактики, к загадочному началу, которое наполняет нас трепетом и изумлением.

Млечного Пути невозможно было построить надежные трехмерные карты его звездного, газового и пылевого населений. Это коренным образом изменится в следующем десятилетии. Европейский спутник GAIA измерит точные параллаксы миллионов звезд в Млечном Пути, так что, в конце концов, мы сможем исследовать нашу родную галактику при помощи точной карты.

В течение наступающего десятилетия пространственное распределение светящегося вещества будет нанесено на карту с беспрецедентной точностью по охватывающим все небо обзорам миллионов галактик и тысяч квазаров. Эти обзоры выполняются не с помощью новых телескопов-тяжеловесов, а с помощью скромного

размера телескопов новой технологии. Самое большое – не всегда самое лучшее! Но чтобы проникнуть в Темный Век, за красное смещение 5, и изучить раннюю эволюцию галактик и их структуры, астрономам нужны очень большие телескопы на земле и в космосе. В 2009 году планируется запустить преемника Космического телескопа имени Хаббла – 8-метровый космический телескоп следующего поколения.

Программа Хаббла и Сэндиджа по проверке фридмановской модели мира продолжается с каждым новым поколением наземных и космических обсерваторий. Наблюдения принесли и успех, и удивление. Сверхновые – лучшие стандартные свечи в глубоком пространстве – привели к революционному предположению, что вселенной правит темная энергия.

Действительно ли существует темная энергия, или маятник снова качнется? Число наблюдаемых сверхновых, используемых для обнаружения ускорения вселенной, существенно возрастет, когда начнет работать телескоп – охотник за сверхновыми. Например, телескоп *Supernova/Acceleration Probe (SNAP)* (Исследование Сверхновых/Ускорения) сможет собрать урожай из 2000 сверхновых за три года работы! Если новые наблюдения подтвердят их наличие, то темная энергия с ее антигравитацией станет насущным хлебом космологической физики. Даже ближнее пространство, близкое к Локальной Группе, является природной лабораторией, в которой можно изучать все космические ингредиенты: светящееся и темное вещество, и темную энергию.

Всего несколько столетий назад известный людям мир был как песчинка по сравнению с тем, что мы знаем теперь. Грандиозное расширение наших астрономических знаний, начиная с нашей родной планеты, проходя через Солнечную Систему и звездные поля Млечного Пути и достигая, наконец, глубокой галактической вселенной, выявило драгоценную вещь: на гигантски разных масштабах действуют одинаковые законы физики. Это невероятно большой шаг от зрелого яблока, падающего в вашем саду, до скоплений галактик, собирающихся в мегафракталы. Но именно этот универсальный закон на больших и малых масштабах считается создателем крупномасштабных структур во вселенной.

Если мегафракталы являются результатом гравитационного роста, тогда три области космологии должны, наконец, обрести согласие: пространственные карты светящегося и темного вещества, теоретическое моделирование задачи N тел и исследования

флуктуаций фонового космического излучения. Миссии новых космических обсерваторий дадут уникальную информацию о зернах, которые, как считается, выросли в нынешние мегафракталы. Однако обратите внимание, что наше окно в прошлое не совсем чистое даже для миллиметровых радиоволн. Крошечные первичные вариации фонового космического излучения нужно извлечь из слабого мерцания холодной космической пыли, которая рассеяна вдоль всего луча зрения из глубокого пространства до нашей родной галактики.

Глава 13

Загадки космологической физики

13.1. Загадка сингулярности

Космологическая модель Фридмана представляет собой решение гравитационных уравнений Эйнштейна для бесконечного однородного распределения вещества. Согласно этой модели в настоящую эпоху происходит расширение Вселенной, следовательно, в далеком прошлом в ней произошло уникальное событие, начало, состояние нулевой протяженности и бесконечной плотности. Из этой загадочной сущности – *сингулярности* – родились пространство, время и материя.

В сингулярности нарушаются все обычные физические законы, и физики безмолвно застывают перед этим странным объектом. Джон Уилер (John Wheeler) из Принстонского университета назвал эту ситуацию, когда фундаментальная физическая теория приводит к сингулярности, «величайшим кризисом в физике». Действительно ли мы обнаружили границу знаний или сингулярность является сигналом того, что математическую теорию продвинули слишком далеко, за пределы ее применимости? Возможно, мы находимся на пороге ответа на вопрос о природе сингулярности. Ответ ожидается от гравитационно-волновых обсерваторий, ожидающих сигналов, излучаемых взрывающимися звездами.

В космологии Ньютона звезды были рассеяны однородно по бесконечному пространству. Это естественное, невинное на вид предположение приводит к тяжелым проблемам, как мы видели, когда посещали парадоксальную вселенную сэра Исаака и остались без красот звездного неба темными ночами. Фридмановская модель мира также допускает однородное распределение вещества, но она свободна от сверкающего неба из-за малого возраста вселенной. Однако появляются новые парадоксы. Галактики уплывают друг от друга, следовательно, в прошлом был момент, когда все они были в «одной точке», в сингулярности. Неизбежность существования сингулярности в общей теории относительности была доказана как теорема Роджером

Пенроузом (Roger Penrose) и Стивеном Хокингом (Stephen Hawking) в 1960-ых годах. Бесконечная интенсивность излучения, опалившая бесконечную классическую вселенную Ньютона, теперь трансформировалась в бесконечно плотное и бесконечно горячее начало фридмановской вселенной.

Но как исследовать сингулярность большого взрыва, если она только одна в истории вселенной и ее невозможно достичь? Это оказывается возможным, поскольку сингулярность является строгим предсказанием теории гравитации Эйнштейна не только для вселенной в целом, но и для очень компактных объектов, возникающих при коллапсе массивных звезд в черные дыры. Как таковая, сингулярность черной дыры имеет ту же природу, что и сингулярность большого взрыва, и открытие черной дыры послужило бы доказательством ее космологического старшего брата. Не удивительно, что кандидаты в черные дыры в нашем Млечном Пути и в далеких квазарах привлекают пристальное внимание. Они открыли новые перспективы для изучения физики сильных гравитационных полей вблизи сингулярностей и, следовательно, проверки природы гравитации.

Что такое сингулярность и горизонт черной дыры?

Уравнения Эйнштейна имеют в качестве решения необычные математические объекты, впервые названные черными дырами Джоном Уилером в 1967 году. Черная дыра похожа на дверь в одну сторону, люк, через который вещество может покинуть нашу вселенную и никогда не вернуться. Гравитация на краю черной дыры так велика, что ничто, даже свет, не может оттуда вырваться. Маленькие черные дыры (с массами меньше массы горы в один млн. тонн) испытывают квантовое испарение. Предсказанный Стивеном Хокингом в 1974 году, этот процесс еще не был проверен экспериментально – лабораторных черных дыр не существует, а астрофизические кандидаты в черные дыры скрыты вторичными эффектами. Для черных дыр со звездными массами испарение заняло бы намного больше времени, чем возраст вселенной.

Расстояние, на котором лежит граница черной дыры – *горизонт* – называется Шварцшильдовским или *гравитационным радиусом*. Его значение зависит только от массы вещества, сколлапсировавшего в черную дыру. Эта формула была выведена немецким астрономом Карлом Шварцшильдом (Karl Schwarzschild), который решил уравнения Эйнштейна для единичной точечной массы, находящейся в состоянии покоя в пустом пространстве. Это

Карл
Шварцшильд
1873-1916

произошло в последний год его жизни, когда он служил добровольцем на Восточном фронте. Его фамилия означает «черный щит» – подходящее описание границы черной дыры...

Если сжать тело до размера меньшего, чем его гравитационный радиус, то тогда скорость убегания с поверхности (вторая космическая скорость) будет больше, чем скорость света. Например, если кому-нибудь удалось бы сжать Солнце в шар радиусом меньше 3 км, то в результате получилась бы черная дыра. Гравитационный радиус задается формулой $R_g = 2GM/c^2$, где M – масса тела. Для солнечной массы $R_g = 2.95$ км. Чтобы частица вырвалась от притяжения тела, ее скорость должна быть больше скорости убегания $v_{esc} = (2GM/R^2)^{1/2}$. Если радиус тела $R < R_g = 2GM/c^2$, тогда $v_{esc} > c$ и объект становится черной дырой.

Все, что падает в черную дыру, достигает сингулярности и навсегда потеряно для остальной вселенной. Однако есть интересная разница между тем, что видит внешний наблюдатель, и тем, что будет испытывать смелый исследователь, падающий вместе с веществом. Удаленный наблюдатель видит исследователя, который вечно приближается к горизонту черной дыры, но так никогда и не достигает его. В этом смысле черные дыры – это никогда не кончающийся процесс.

Гравитационное красное смещение, вызванное близостью к черной дыре, быстро возрастает, так что через короткое время любой сигнал, приходящий от исследователя, становится слишком слабым, чтобы его можно было обнаружить. А что же сам исследователь? Теория говорит, что он пересечет радиус Шварцшильда через какое-то конечное время, которое показывают его часы, и даже не заметит ничего особенного в этот момент, согласно принципу эквивалентности в свободно падающей системе отсчета гравитация отсутствует. Хотя после этого безвозвратного шага его судьба совершенно предрешена. В мгновение ока огромные приливные силы разорвут исследователя на части и его останки будут поглощены запредельным чудовищем – сингулярностью.

13.2. Физические аргументы против сингулярности и черных дыр

*Роберт
Оппенгеймер
1904-1967*

В 1939 году Роберт Оппенгеймер (Robert Oppenheimer) и его студент, русский эмигрант Георгий Волков теоретически открыли, что

*Георгий
Волков
1914-2000*

нейтронная звезда теряет устойчивость, если она более массивна, чем Солнце. Такие объекты, как гласит общая теория относительности, будут неизбежно коллапсировать в черную дыру. Позже было показано, что предел Оппенгеймера-Волкова для массы нейтронной звезды может достигать 3 солнечных масс. Это часто используемый критерий – если кто-то находит компактный темный объект, более массивный, чем 3 солнца, то этот объект является черной дырой.

Весьма интересно, что сам Эйнштейн, отец общей теории относительности, написал в том же 1939 году статью, в которой он попытался показать, что шварцшильдовские сингулярности в природе существовать не могут. У него был простой аргумент, который практически переворачивал рассуждения Джона Мичела (John Michell) о том, что могут существовать черные дыры. В 1784 году Мичел заметил, что сила гравитации какой-то массы может быть такой большой, что даже свет не сможет истекать из нее, а после тщетной попытки будет падать обратно. Это было первым предсказанием черной дыры.

Эйнштейн рассмотрел случай, когда тело состоит из большого числа частиц, движущихся по изотропно ориентированным круговым орбитам. Если уменьшать радиус этих орбит, то наступит момент, когда скорость на круговой орбите становится больше скорости света. По существу, Эйнштейн обратил аргумент о скорости убегания. Действительно, если частица находится первоначально далеко за пределами компактного тела с размером меньше, чем его радиус Шварцшильда, то скорость ее свободного падения будет превышать скорость света, когда частица достигнет поверхности такого тела, потому что для любого расстояния скорость свободного падения равна скорости убегания. Так как специальная теория относительности запрещает движение со скоростью большей скорости света, то Эйнштейн сделал такой вывод: «Основным результатом данного исследования является ясное понимание того, почему «шварцшильдовские сингулярности» не существуют в физической реальности».

Современные исследователи наследия Эйнштейна считают, что «не желавший такого ребенка, отец черных дыр» совершил интересную концептуальную ошибку (даже его ошибки – если таковые имелись – всегда были интересными!) Он рассматривал компактные стационарные тела, но, похоже, просмотрел нестационарную природу самого пространства внутри черной дыры, которая является непрерывным процессом коллапса. В общей теории

*Джон
Мичел
1724-1793*

относительности пространство внутри горизонта событий течет в сингулярность, и ока-

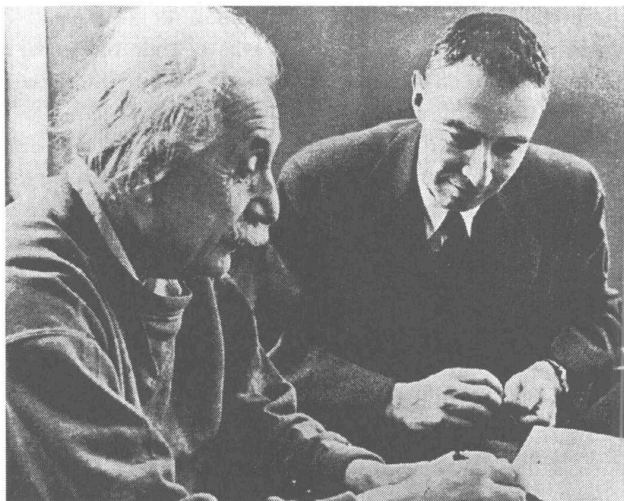


Рис. 13.1. Альберт Эйнштейн и Роберт Оппенгеймер в Принстоне. В 1939 году они опубликовали две противоположных точки зрения на черные дыры. Оппенгеймер рассчитал, как образуются черные дыры. Эйнштейн доказывал, что черные дыры не могут существовать в физической реальности.

зывается, что скорость падающего тела относительно потока пространства не превышает скорость света.

Однако то, что считалось упущением в рамках геометрической гравитации, было блестящей интуитивной догадкой в рамках квантово-полевой гравитации, в которой нет текущего пространства и, следовательно, аргумент Эйнштейна справедлив.

Эйнштейн был не одинок в своих сомнениях. Один из создателей современной астрофизики сэр Артур Эддингтон (Arthur Eddington) был глубоко обеспокоен предсказанным коллапсом в сингулярность. Интуиция Эддингтона говорила ему, что в теории было упущено что-то существенное. К концу жизни он думал, что должно существовать какой-то физический закон, мешающий окончательному коллапсу массивной компактной звезды в черную дыру.

В 1979 году на конференции, посвященной Эйнштейну, датский физик Клаус Мёллер (Claus Møller) снова поднял вопрос о

реальности сингулярности. *Математические* сингулярности действительно существуют в общей теории относительности и в других физических теориях как решения уравнений. Однако в физике обычно находится какая-то физическая причина, которая с необходимостью исключает призрак сингулярности. Мёллер предложил искать теорию гравитации, которая воспроизводит все положительные черты общей теории относительности в слабом гравитационном поле, но которая не допускает сингулярностей в сильных полях. Существуют ли такие физические причины в случае черных дыр?

«Подшло ли правление черных дыр к концу?» Такими словами открылся в январе 2002 года выпуск журнала *New Scientist* – престижного еженедельного обзора научных достижений. Они отражают новые возможности борьбы с сингулярностями черных дыр, найденные Павлом Мазуром (Pawel Mazur) и Эмилем Моттолой (Emil Mottola). Ранние теории черных дыр не принимали во внимание квантовые эффекты, тогда как эти физики рассматривают квантовую структуру физического вакуума и приходят к выводу, что вместо черных дыр вселенная может содержать «гравизвезды». Это могут быть необыкновенные небесные тела, которые выглядят как черные дыры, но без сингулярности, и их поддерживает отрицательное давление вакуума. Возможно, это способ избежать сингулярности в общей теории относительности, но дебаты только начинаются.

Совершенно другие аргументы против сингулярности предлагаются в квантово-полевой гравитации. В своих лекциях Ричард Фейнман с энтузиазмом констатировал, что гравитация – это не «что-то загадочное», но ее можно понимать как поле, содержащее энергию. В полевом подходе гравитация является настоящей силой, понятие энергии гравитационного поля хорошо определено, и энергия сохраняется, согласно теореме Нетер. Энергия поля важна для квантовой интерпретации гравитации, и «каждый излученный гравитон уносит частичку энергии». А что же сингулярность? Давайте посмотрим, как закон сохранения энергии определяет граничный размер для частицы с массой.

Но сначала обратимся к хорошо известному примеру из электромагнетизма. Наличие электрического поля вокруг электрона означает, что электрон не может быть сколь угодно маленьким. Действительно энергия электрического поля *за пределами* некоторого радиуса имеет определенное положительное значение. Эта энергия должна быть меньше, чем энергия массы покоя электрона, так как

масса покоя включает в себя все в электроне, в том числе и его электрическое поле. Чем меньше мы берем размер электрона, тем больше будет его энергия поля. Следовательно, существует критический размер, называемый *классическим радиусом электрона*, $R_e = e^2/m_e c^2 = 2.8 \times 10^{-13}$ см, при котором энергия электрического поля равна энергии массы покоя. Если бы электрон был меньше, то поле обладало бы большей энергией, чем масса покоя, что является противоречием.

Легко повторить эту цепочку аргументов, когда роль электрического заряда играет гравитирующая масса. Звезда окружена гравитационным полем. Его энергию можно вычислить по формуле, похожей на формулу для электрического поля. И так как энергия поля не может превышать энергию массы покоя, снова следует, что звезда должны быть больше некоторого минимального критического размера, который оказывается равен одной четвертой гравитационного радиуса тела $R_g = 2GM/c^2$.

Таким образом, полевая гравитация содержит физическую причину, предотвращающую сингулярность. Закон сохранения энергии накладывает граничный размер для любой звезды: коллапс в размер меньше, чем гравитационный радиус, потребовал бы больше энергии, чем начальная энергия массы покоя звезды. Квантовая полевая гравитация отвергает существование черных дыр! В своей книге Фейнман не рассматривал это неизбежное следствие положительной энергии поля, но считал энергию гравитационного поля фундаментальной физической величиной.

Гравизвезды, постоянно коллапсирующие объекты, темные звезды... Гравизвезда Мазура и Моттолы сделана из физического вакуума, помещенного в невакуумную оболочку. Вещество, падающее на гравизвезду, ударяется об оболочку и излучает намного больше энергии, чем оно бы произвело, если бы падало на черную дыру. Похожий внешний вид ожидается для постоянно коллапсирующих объектов, предсказанных индийским физиком Абхасом Митрой (Abhas Mitra). Он проанализировал физический смысл пространства-времени внутри горизонта событий и сделал неожиданное заявление, что «сферический коллапс физической жидкости в общей теории относительности не допускает образования поверхностей захвата». Это означает, что падающий исследователь так и не пересекает своего рода люк, что противоречит современному пониманию черной дыры. Следовательно, радиус любого сколлапсировавшего тела будет превышать гравитационный радиус. Эти два примера показывают, что

не исключено, что даже геометрическая гравитация может создавать релятивистские объекты с радиусами, близкими к горизонту событий, но которые не являются настоящими черными дырами.

Более того, чтобы сделать мир интересным даже без черных дыр, у полевой теории гравитации есть представление о стабильных и компактных *релятивистских темных звездах* с радиусами, близкими к радиусу Шварцшильда. Их существование можно предвидеть из общих физических соображений, но их свойства в деталях пока не известны. Если такие темные объекты реальны, то они были бы странным классом небесных тел, хотя и не таких диковинных, как черные дыры.

Одним отличительным свойством темной звезды является то, что сила гравитации на ее поверхности не только остается конечной, но и уменьшается при увеличении массы (максимальное ускорение $g_{max} < c^4/GM$, где M – масса звезды). В черных дырах любой массы сила гравитации на радиусе Шварцшильда всегда бесконечна. Темные звезды, по причине конечной силы гравитации, в принципе могут иметь любые массы, больше чем 3 солнечных массы – границы Оппенгеймера-Волкова между нейтронными звездами и черными дырами в общей теории относительности.

Еще одно различие между темной звездой и черной дырой состоит в том, что у первой есть материальная поверхность, и скорость убегания меньше, чем скорость света, хотя и близка к ней. Свет, просачивающийся с темной звезды, теряет почти всю свою энергию из-за сильного гравитационного красного смещения, и звезда практически не видна. Но если такие звезды аккрецируют окружающий газ, то большая часть энергии массы покоя газа может превратиться в излучение, и они могут быть очень яркими. Это делает «гравизвезды», «постоянно коллапсирующие объекты» и «темные звезды» дальними родственниками. Они соперничают с черными дырами при интерпретации наблюдаемых высокоэнергичных явлений.

Теоретики могут спорить о существовании таких существей, но только наблюдения могут решить, что предпочитает иметь природа. Релятивистская астрофизика – это новый раздел астрономии, посвященный исследованиям сильного гравитационного поля массивных компактных астрофизических объектов. Некоторые недавние результаты таких наблюдений мы обсуждали в главе 8.

13.3. Загадка скрытой массы в космологии

Следующая загадка космологической физики связана с открытием огромного количества невидимого вещества во вселенной – это захватывающий триллер, последние страницы которого еще предстоит написать. Астрономы видят в свои телескопы только светящееся вещество в виде обычных звезд и газа. Но большая часть космической субстанции прячется в глубокой тьме. Это *темное вещество* обнаруживает себя по своему воздействию на световые лучи и по движению находящегося поблизости вещества.

Темное вещество существует, но его природа и состав – это глубокая тайна современной космологии. Его пространственное распределение является в настоящее время одной из самых горячих тем в астрономии. Является ли оно верным спутником светящегося вещества или одно рассеяно более гладко, заполняя дыры между галактиками? Гравитационное линзирование выдало присутствие темного вещества и показало, что его трехмерное распределение, по-видимому, очень клочковатое.

Ещё в 1925 году Кнут Лундмарк попытался определить массу Млечного Пути. Используя немногочисленную информацию о скоростях звезд и размере нашей галактики, он вывел, что 10^{12} солнечных масс объясняли бы эти движения. Оцененное число видимых звезд было в сто раз меньше, около 10^{10} . Лундмарк сделал вывод, что существуют темные звезды и темное вещество, причем он и ввел этот термин.

Затем Фриц Цвики совершил замечательное открытие, касающееся скоплений галактик. Он использовал новый способ оценки массы скоплений, основанный на теореме вириала из классической механики. Теорема вириала утверждает, что потенциальная энергия системы гравитирующих частиц в состоянии равновесия в два раза больше ее кинетической энергии: $U = -2E_k$, где $U \approx -GM^2/R$, а $E_k \approx Mv^2/2$, M – масса системы, v – характерная скорость частиц, а R – характерный размер скопления. Следовательно, наблюдаемый размер и распределение скоростей дают полную массу системы, включая ее темную массу: $M \approx Rv^2/G$. В 1937 году Цвики доложил о результате для скопления Кома – роя из тысяч галактик в созвездии Волосы Вероники. Его полная масса была в 500 раз больше, чем масса, которую можно было ожидать на основании всего света, излученного галактиками, если бы они состояли из звезд, похожих на наше Солнце.

Когда человек смотрит на красивые снимки спиральных галактик, ничто не заставляет его заподозрить, что они состоят из чего-то, отличного от ярких звезд, газовых облаков и некоторого количества пыли. Это естественное представление было разрушено в 1970-ых годах, когда Вера Рубин (Vera Rubin) и Кент Форд (Kent Ford)

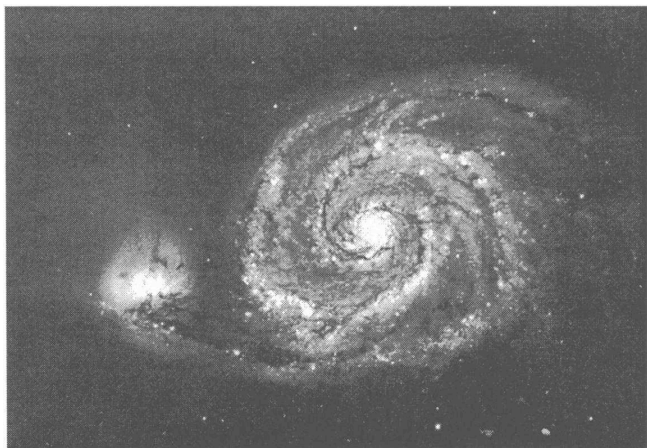


Рис. 13.2. Близкая спиральная галактика M51 в созвездии Гончих Псов довольно похожа на Млечный Путь. Ее вращение говорит о присутствии невидимого массивного гало, в которое погружена галактика. Йохан Холмберг (Johan Holmberg) и Крис Флинн (Chris Flynn) показали, используя наблюдения, выполненные на спутнике HIPPARCOS, что в нашем Млечном Пути темное вещество окружает плоский светящийся диск.

начали подробно изучать вращения галактик. По доплеровским смещениям спектральных линий света от газовых облаков они определяли скорость вращения спиральных галактик на разных расстояниях от центра. Ожидалось, что вращение будет сильно замедляться на видимом краю галактики. Но это не так! Галактики продолжают вращаться с высокой скоростью даже на больших радиусах, где звезды уже не видны: вращение управляется не видимым веществом, а чем-то другим.

Вращение нашей собственной галактики определить трудно, поскольку мы находимся внутри. Тем не менее, можно сделать вывод, что Млечный Путь вращается с той же скоростью, что и другие похожие спиральные галактики, имея скорость вращения примерно

220 км/час на радиусах, более далеких, чем тот, где проходит орбита Солнца.

Эти наблюдения были интерпретированы как доказательство *темных гало* вокруг галактик. Вещество гало, превышающее массу видимых звезд в несколько раз, дает знать о себе только через силу гравитации. Оно не излучает никакого видимого света, и мы очень мало знаем о его составе.

Но существует ли темное вещество в действительности? Было принято приписывать загадочные видимые явления в астрономии чему-то невидимому, иногда успешно (вспомним планету Нептун!), но не всегда. Возьмем очень старый пример. Анаксагор заставил темные тела вращаться вокруг Земли под Луной, которая отвечала, вместе с тенью Земли, за затмения. Довольно естественно, что астрономы попытались объяснить современное темное вещество как результат наблюдательных ошибок, неадекватных способов или даже новых свойств ньютоновской силы гравитации. Но появились разного рода независимые доказательства, делающие все более сильными доводы в пользу гравитирующего темного вещества.

13.4. Гравитационные линзы измеряют количество скрытой массы

Современный способ исследования темного вещества основан на использовании эффекта *гравитационного линзирования*. Суть явления проста: если на луче зрения между наблюдателем и удаленным объектом (звездой или квазаром) оказывается массивное тело (линза), то его гравитационное поле искривляет световые лучи и может сфокусировать их к наблюдателю. Роль линз могут выполнять звезды, галактики, скопления галактик, а также скрытая масса и темные небесные тела.

Гравитационное линзирование – это эффект слабой гравитации, похожий на то, как свет искривляется Солнцем. Получающийся угол отклонения равен $\theta = 4GM/Rc^2 = 1.75''(M/M_{\odot})/(R/R_{\odot})$, где M – это масса тела, а R – расстояние от центра массы, на котором луч света проходит мимо него, M_{\odot} и R_{\odot} – масса и радиус Солнца.

Эффект линзирования далеких источников звездами был впервые рассчитан в 1924 году Орестом Хвольсоном (Orest Chwolson) в Санкт-Петербургском Университете. Если луч зрения между наблюдателем и удаленной звездой пересекается другой звездой

Орест
Хвольсон
1852-1934

(линзой), то наблюдатель видит вокруг звезды светящееся кольцо. Кольцо – это линзированное изображение более далекой звезды. Хвольсон предсказал также, что если линза находится не точно на луче зрения, тогда наблюдатель видит вместо кольца двойное изображение. В 1936 году Эйнштейн независимо проделал те же вычисления и ука-

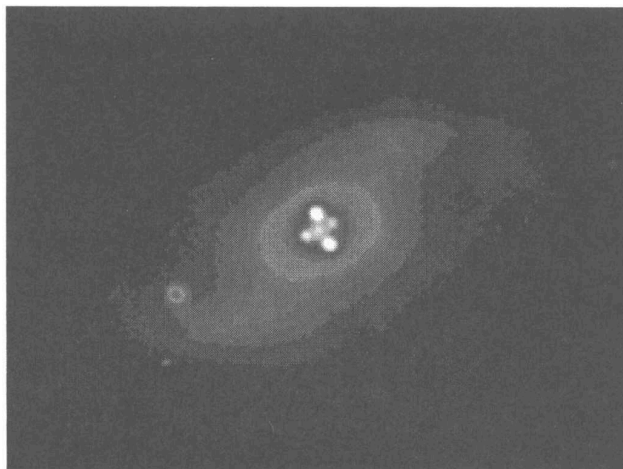


Рис. 13.3. Знаменитое кратное изображение, обусловленное гравитационным линзированием: «крест Эйнштейна», который наблюдали А.Яунсен (A.Jaunsen) и М.Яблонски (M.Jablonski) на Nordic Optical Telescope на острове Ла Пальма. Гравитация вещества галактики работает как гигантская линза и расщепляет изображение далекого квазара на четыре отдельных точки. Этот эффект помогает астрономам измерить темное вещество в линзирующей галактике.

зал, что наблюдать этот эффект должно быть трудно. Если линза похожа на наше Солнце, то угловой радиус кольца будет безнадежно мал, около одной тысячной доли секунды дуги для расстояний внутри Млечного Пути, и наблюдать его слишком тяжело.

После вычислений Эйнштейна Фриц Цвики показал, что галактики, которые в миллиарды раз более массивны, чем звезды, могут давать кольца с размером в несколько угловых секунд. Но прошло почти четыре десятилетия, прежде чем была обнаружена первая гравитационная линза. В том случае галактика создала двойное изображение далекого квазара. Два изображения, разнесенные на небе

всего на 6 секунд дуги, имели идентичные спектры, показывающие, что это два изображения одного объекта. В настоящее время известны десятки линзированных изображений, и среди них несколько колец Хвольсона-Эйнштейна. В литературе эти явления называются «кольцами Эйнштейна», подтверждая поговорку, что «все молоко достается самому большому коту»...

Астрономы считают гравитационные линзы на небе очень полезным эффектом, позволяющим исследовать скрытую массу во Вселенной. Гравитационные линзы расщепляют изображения далеких объектов и, что очень важно, поток фотонов, приходящий от объекта, намного увеличивается, возможно усиление блеска в сотни раз. Гравитационные линзы – это естественные гигантские телескопы, которые позволяют увидеть очень слабые и далекие галактики. Это хороший инструмент для изучения темного вещества, дающий информацию о полных гравитирующих массах и размерах самих линз.

Еще один способ пролить свет на темное вещество – это наблюдение ориентаций протяженных галактик – отпечатков «слабого» линзирования – в поле далеких галактик. В результате получается карта кластеризованной компоненты темного вещества. С этой целью группа астрономов из Bell Laboratories, возглавляемая Энтони Тайсоном (Anthony Tyson), предложила построить LSST (Large-aperture Synoptic Survey Telescope – Синоптический обзорный телескоп с большой апертурой) с тремя 8-метровыми зеркалами, предназначенный для изучения изображений слабых галактик (до 29-ой звездной величины) в поле 7 кв. градусов. Этот телескоп будет делать потрясающе подробную карту распределения темного вещества.

МАСНО в гало Млечного Пути. Темное вещество в гало галактик может содержаться в МАСНО (Massive Compact Halo Objects – Массивных компактных объектах гало), вроде астероидов, планет или мертвых звезд. Хитрый способ обнаружить такие МАСНО в нашем Млечном Пути предложил в 1986 году астроном из Принстона Богдан Пачински (Bohdan Paczynski). Когда мы следим за звездами в близкой галактике, то должны время от времени видеть неожиданные вспышки звезд, когда невидимый движущийся МАСНО пересекает луч зрения. В настоящее время астрономы постоянно следят за 8 миллионами звезд в спутнике нашей галактики Большом Магеллановом Облаке в ожидании уярчений. Через несколько лет усилий была открыта дюжина событий линзирования.

Продолжительность уярчения зависит от массы темного тела, его расстояния от нас и его скорости. Если МАСНО составляет одну десятую массы Солнца и движется со скоростью 100 км/сек на расстоянии в 10 кпс, то звезда сначала становится ярче примерно на один месяц, после чего в течение еще одного месяца ослабевает до своей обычной яркости. Это симметричное поведение отличает события линзирования от обычных переменных звезд.



Рис. 13.4. Темное вещество в скоплении Abell 2218 действует как гигантская линза, создавая дугообразные изображения очень далеких галактик позади этого скопления. Снимки с Космического Телескопа им. Хаббла, подобные этому, позволяют астрономам оценить массу таинственной невидимой субстанции.

По всей видимости, события линзирования выявили МАСНО. А что же их массы? Наблюдения указывают на массы в несколько десятых долей от солнечной массы. Так как очень короткие уярчения трудно обнаружить, в настоящее время этот метод ничего не может сказать об очень маленьких телах, с массой менее одной миллионной доли солнечной массы (что-то вроде нашей Земли). Еще неизвестно, какая часть массы гало состоит из МАСНО, но она может достигать десятков процентов.

С помощью удивительно маленьких телескопов (диаметром от 40 см до 1 м) и, тем не менее, современных компьютерных систем, мы, возможно, уже взглянули мельком на загадочную компоненту вещества.

Мегалинзирование скоплениями галактик. После пионерской работы Цвикки, астрономы изучили все виды галактических систем, от маленьких групп до больших скоплений. Было обнаружено, что, как правило, вириальная масса, необходимая для того, чтобы удержать их от разбегания, в десять раз больше, чем масса всех галактик-членов. Метод вириальной массы основан на ряде предположений, например, что скопление находится в устойчивом состоянии, не расширяясь и не сжимаясь. Кроме того, нужно отличить истинных членов скопления от галактик фона и переднего плана. Если одно из этих предположений не верно, то полученная масса может быть слишком большой. Так что нужны другие, независимые методы.

Существует еще один способ измерения полной массы большого скопления галактик: масса скопления непрерывно притягивает окружающие галактики к его центру. Это должно быть заметно в виде маленького отклонения от линейного закона Хаббла. Действительно, галактики вокруг близкого галактического скопления в Деве показывают такое отклонение. Масса, полученная на основе этого эффекта, примерно равна массе Девы, определенной по теореме вириала, что снова указывает на темное вещество.

Спутниковые рентгеновские обсерватории, запущенные на орбиту вокруг Земли, обнаружили интенсивное рентгеновское излучение, приходящее от многих скоплений галактик. Его испускает очень горячий (до 100 млн. градусов Кельвина) газ, заполняющий скопление. И, что интересно, было обнаружено, что полная масса скопления, которая удерживает эту горячую «атмосферу» от убегания, тоже очень велика. Она примерно равна массе, полученной с помощью теоремы вириала. Масса самого горячего газа, даже вместе с галактиками, не достаточно велика, чтобы составить полную массу скопления.

Звезды и галактики отклоняют свет. То же делают и галактические скопления, которые действуют как гигантские гравитационные линзы. Большие оптические телескопы выявили странные дуги вокруг скоплений. Размеры этих колец могут достигать нескольких десятков секунд дуги (см. рис.13.4). Такие большие миражи могут образоваться, только если масса скопления снова примерно такая, как подсказывают рентгеновские наблюдения и теорема вириала. Массивные скопления галактик выступают в роли гигантских гравитационных телескопов. Самая далекая галактика, имеющая красное смещение $Z=10$, обнаружена как раз с помощью такого природного телескопа.

В Главе 5 мы обсуждали свидетельства того, что квазары с большим красным смещением и галактики с низким красным смещением ассоциированы на небе чаще, чем можно ожидать при случайных совпадениях. Означает ли это, что существует аномальная лишняя компонента в космологических красных смещениях? Может быть. Но возможно также и то, что гравитационные линзы в гало галактик, находящихся ближе, урчают квазары, и, таким образом, производят наблюдаемые ассоциации.

Квазары Арпа лежат обычно в проекции на небо на расстояниях в 60-100 кпс от центра их «хозяйской» галактики. Это означает, что если квазары – очень далекие объекты, то их свет проходит через массивное гало близкой галактики. Если гало содержит подходящим образом гранулированное темное вещество, то объекты Арпа могут быть миражами, создаваемыми гравитационным линзированием.

Однако можно показать, что эффект микролинзирования слабыми звездами в гало не может создать наблюдаемое число ассоциаций квазар-галактика. Кроме того, звезды двигаются и пересекают луч зрения довольно быстро: квазар должен ослабевать в течение полугода, тогда как объекты Арпа уже десятки лет все еще на небе, сверкая как и прежде.

Один из нас (Ю.Б.) совместно с Юлией Бухмастовой рассмотрел другое объяснение эффекта Арпа, отличное от гравитационного линзирования. Для этого потребовались бы большие комки темного вещества в гало, с массами, подобными шаровым звездным скоплениям. Микролинзирование звездами и макролинзирование галактиками не может произвести такое явление. Только «мезолинзирование» шаровыми скоплениями и другими массивными конгломератами темного вещества в галактических гало могло бы заявить о себе под видом эффекта Арпа. В этом случае открытие Хальтона Арпа (Halton Arp) предоставило новую возможность для изучения природы темного вещества в гало далеких галактик, дополняя наблюдения МАСНО в гало нашей собственной Галактики. Эту гипотезу можно проверить с помощью интерферометрических наблюдений на телескопах VLTI, поскольку предсказываемое расщепление изображений квазаров должно составлять миллисекунды дуги.

13.5. Загадка холодной небарионной скрытой массы

Для стандартной космологической модели большого взрыва темное вещество является абсолютно необходимым элементом. *Во-первых*, инфляционная модель предсказывает, что плотность полной массы во вселенной равна критической. *Во-вторых*, теория первичного нуклеосинтеза требует, чтобы обычное барионное вещество, такое как атомы и молекулы, составляло только малую долю от общей массы. Следовательно, небарионное вещество должно составлять подавляющую часть полной массы вселенной. Отсюда возникают важные вопросы: какова природа темного вещества и не слишком ли много обычного вещества?

Согласно инфляционной модели параметр полной плотности $\Omega = 1$. Наблюдаемая плотность светящегося вещества (звезды в галактиках) намного меньше, и приходится постулировать, что существует много темной материи. Но состав ее не может быть произвольным. Обычное, барионное вещество может составлять только малую его часть.

Видимое вещество составляет только 0.4% от критической плотности:

$$\Omega_{lum} \approx 0.004 \text{ (светящееся вещество)}$$

Это значение зависит от постоянной Хаббла, от отношения массы к светимости для галактик, а также от объема, в котором подсчитываются галактики (из-за фрактальности). Хотя есть сильное свидетельство в пользу темной массы вокруг галактик и в скоплениях, из наблюдений пока не ясно, достаточно ли темного вещества, чтобы заполнить разрыв между $\Omega_{lum} \approx 0.004$ и $\Omega = 1$.

Теоретически можно вычислить, сколько легких элементов (гелия, дейтерия, лития) образовалось из водорода за первые минуты жизни вселенной. Особенно хорошо известна из наблюдений распространенность гелия. Его доля массы в газовых туманностях и звездах, в которых ядерные реакции не изменили его первоначального значения, сходится к значению в 23%. Это наблюдаемое значение гелия означает очень мало нормального вещества в виде *барионов*, т.е. протонов и нейтронов – строительных блоков для химических элементов:

$$\Omega_{lum} \approx 0.06 \text{ (предсказание теории большого взрыва)}$$

Значение барионного параметра плотности, предсказанное по нуклеосинтезу в модели большого взрыва, зависит от постоянной

Хаббла: $\Omega_{bar} = 0.02(100/H_0)^2$, и приведенное выше значение соответствует $H_0 = 60 \text{ км сек}^{-1} / \text{Мпк}$.

Так как наблюдениям химического состава доступно только светящееся вещество, и $\Omega_{lum} \ll \Omega_{bar}$, то целых 90% от предсказанного барионного вещества имеет неизвестный химсостав! Это означает, что распространённость легких элементов больше не является такой опорой теории большого взрыва, как раньше.

Следовательно, если инфляционная модель верна и $\Omega = 1$, то всего 6% космической массы может быть в форме обычного вещества, такого как звезды, газ и пыль. Остальные 94% должны быть в какой-то экзотической форме *небарионного вещества*, которое так и не было обнаружено в лаборатории. Известное небарионное вещество, такое как электроны и нейтрино, может составлять только очень маленькую часть требуемого темного вещества.

В любом случае, если мы припишем всем галактическим скоплениям большие массы, полученные по рентгеновским исследованиям и гравитационному линзированию, то одно это делает параметр плотности фридмановской модели близким к 0.2, т.е. в несколько раз больше, чем предсказанная плотность барионного вещества. Кроме того, разные динамические оценки плотности темного вещества сходятся примерно к

$$\Omega_{lum} \approx 0.3 \text{ (темное вещество)}$$

Следовательно, должно существовать большое количество небарионного вещества, холодного (Cold Dark Matter – CDM) или горячего (Hot Dark Matter – HDM), если мы принимаем модель большого взрыва.

Океан массивных нейтрино? Теория большого взрыва предсказывает, что *нейтрино* должны заполнять пространство, как остатки от первой секунды вселенной – их должно быть столько же, как фотонов космического излучения ($\sim 1000 / \text{см}^3$), численно превосходя электроны и протоны в сотни миллионов раз. Однако трудно измерить, действительно ли их масса равна нулю. Нейтрино взаимодействуют с веществом очень слабо, они просто «жужжат» вокруг нас, пролетая почти беспрепятственно, со скоростью близкой к скорости света. Таким образом, нейтрино образуют среду, называемую «горячим темным веществом» (HDM), поскольку они двигаются так быстро.

Наличие массы у нейтрино весьма важно для физики частиц и космологии. Огромное количество нейтрино означает, что даже если

масса составляет, скажем, одну миллионную часть массы электрона, то полная масса нейтрино была бы в несколько раз больше, чем масса видимого вещества. Действительно, в 1980-ых годах первые эксперименты по измерению массы нейтрино обнаружили такие большие значения, что космическая плотность массы, обусловленная нейтрино, могла бы равняться критической плотности. Чтобы оценить вклад массы нейтрино в космологический параметр плотности Ω , можно использовать формулу $\Omega_{\text{neutrino}} = (m_e + m_\mu + m_\tau) / 30\text{eV}$, где массы трех типов нейтрино выражены в электрон-вольтах, а $H_0 = 60$ км сек⁻¹/Мпк. Однако этот результат не был подтвержден, и в настоящее время новые эксперименты показывают, что масса нейтрино меньше, чем 2.5 eV.

Недавно в лаборатории Super-Kamiokande в Японии было получено новое доказательство ненулевой массы нейтрино. Обнаруживают нейтрино из внутренних областей Солнца, возникающие при ядерных реакциях. Следует отметить, что космологические первичные нейтрино, если они существуют, имеют такие маленькие энергии (по причине красного смещения), что их нельзя обнаружить на наших нейтринных телескопах. Так что у нас нет пока прямого доказательства этого предсказания теории большого взрыва.

Сердцем нейтринной обсерватории является сосуд с 50 000 тонн воды, помещенный в старой цинковой шахте. Приходят нейтрино трех видов: физики говорят об электронных, мюонных и тау нейтрино. Когда электронные или мюонные нейтрино, очень редко, соударяются с молекулой воды, то получающаяся слабая вспышка регистрируется чувствительными фотоумножительными детекторами, покрывающими крышу и стены. Анализируя записи, команда из 120 японских и американских физиков пришла к выводу, что слишком мало нейтрино приходит снизу, через Землю. Эту асимметрию они приписывают различной длине пути, который проходят нейтрино, образовавшиеся при соударениях космических лучей в нашей атмосфере, прежде чем они достигают сосуда с водой.

Теоретически, каждое нейтрино представляет собой смесь из трех «массовых состояний», которая определяет, будет ли нейтрино электронного, мюонного или тау типа. Эта смесь не стабильна, а может меняться, приводя к другому типу нейтрино. У тех нейтрино, которые проходят длинный путь сквозь Землю, есть время для того, чтобы изменить свой тип, и это объясняет асимметричные приходы обнаруженных мюонных нейтрино. Физики вполне убеждены, что

результаты Super-Kamiokande указывают на ненулевую массу нейтрино, возможно для всех типов. Масса может составлять «целых» пять миллионных долей массы электрона, или быть равной 0.1 eV. Если это так, то в первичных нейтрино могло бы быть столько же массы, сколько во всех звездах вселенной, т.е. $\Omega_\nu \approx \Omega_{lum}$. Таким образом, нейтрино как кандидат в горячее темное вещество дает только маленькую часть всего темного вещества. Действительно, по-



Рис. 13.5. Две дамы из Лиона сплетничают о горячих новостях о массе нейтрино (подсмотрел Жорж Патюрель).

1-ая женщина: Слышали последние новости? Будто бы масса нейтрино равна 30 электрон-вольт!

2-ая женщина: 30 электрон-вольт!? Но это же меняет массу вселенной!

следние новости говорят, что эксперимент в нейтринной обсерватории Sudbury в Канаде подтвердил, что сумма масс трех типов нейтрино лежит в пределах от 0.1 до 8 eV.

Поиски темной материи продолжаются. Пока неизвестно, что такое физические носители темного вещества, кроме того факта, что они гравитационно взаимодействуют с видимым веществом. При поисках кандидатов в темное вещество полезно помнить, что их можно четко разделить на два класса: обычное барионное вещество,

такое как в планетах и звездах, и экзотическое небарионное вещество, такое как нейтринные остатки от ранней вселенной.

Что касается состава барионного темного вещества, то астрономы следуют стратегии, напоминающей то, что рекомендовал Шерлок Холмс: сначала они определяют, какие типы объектов *не могут* быть хорошими кандидатами. Можно исключить обычные звезды и гладко распределенные газ и пыль, так как их было бы видно в существующие оптические или радио телескопы. Очень слабые звезды, такие как белые карлики и нейтронные звезды или какие-то невообразимые темные звезды, пока исключить довольно трудно. А различные конгломераты в галактических гало, что-то вроде комет, астероидов, планет, остатков мертвых звезд и очень холодные молекулярные облака пока могли ускользнуть незамеченными из астрономических сетей.

Открытие Super-Kamiokande, что масса нейтрино составляет около 0.1 eV, открывает новую эру в экспериментальном исследовании небарионного темного вещества. Нейтрино «горячие», тогда как стандартная модель образования галактики предполагает, что она состоит в основном из «холодных» частиц, способных принять участие в гравитационной кластеризации. Теории элементарных частиц предлагают множество кандидатов в такую субстанцию. Два из них очень многообещающи, и их можно искать в экспериментах с высокими энергиями. Эти частицы – аксионы и нейтралино. Ожидается, что масса аксиона составляет от 10^{-6} до 10^{-4} eV, тогда как нейтралино намного тяжелее – от 50 GeV до 500 GeV. Национальная лаборатория Лоуренс Ливермор в США проверяет в настоящее время предпочтительный диапазон массы аксиона. Эксперименты DAMA в Кран Сессо и CDMS на подземном оборудовании в Стенфорде изучают диапазон масс, в котором могут быть обнаружены нейтралино.

Кризис CDM моделей образования галактик. В рамках стандартной космологической модели образование структур всех масштабов начинается с роста малых флуктуаций плотности холодной темной материи (Cold Dark Matter). Природа носителей CDM остается неизвестной, хотя ряд свойств этих частиц ограничивается сопоставлением наблюдений и модельных расчетов. Так, CDM частицы должны быть небарионной бесстолкновительной холодной материей, которая в течение всей эпохи образования структур взаимодействует только гравитационно. Практически CDM-моделирование сводится к численному интегрированию задачи N

гравитационно взаимодействующих точечных частиц. В современных расчетах число частиц достигает 10^8 . В результате численных расчетов с большим разрешением было показано, что спектр образующихся крупномасштабных неоднородностей может воспроизводить имеющиеся наблюдения пространственного распределения галактик при выборе соответствующего масштабно зависимого байеса.

В последние годы в связи с появлением новых наблюдательных данных выяснилось, что CDM-модели в простейшем варианте чисто гравитационно взаимодействующих частиц сталкиваются с рядом серьезных трудностей:

1) наблюдаемые профили массы в гало галактик с низкой поверхностной яркостью, наблюдаемое количество карликовых галактик – спутников массивных галактик и наблюдаемый угловой момент барионного вещества дисков галактик находятся в противоречии с предсказаниями CDM-моделей;

2) наблюдения далеких радиогалактик ($z = 3 - 4$) и квазаров ($z = 6$), родительские галактики которых являются гигантскими эллиптическими галактиками, тогда как CDM-модели предсказывают недавнее образование эллиптических галактик путем слияний;

3) карликовые, иррегулярные и L_* галактики имеют похожее пространственное распределение и не присутствуют в войдах, что противоречит предсказанию CDM-модели.

Учитывая эту новую ситуацию в космологии Пиблс отмечает, что главным неизвестным элементом CDM-моделей является «физика темного сектора», и, следовательно, на передний план в космологии выходят тесты фундаментальной физики, позволяющие прояснить природу скрытой массы во Вселенной, и «до тех пор пока это не сделано, образование структуры является рискованным основанием для космологических тестов».

Фундаментальная физика темного сектора включает также изучение возможного взаимодействия между всеми компонентами массы во Вселенной: вакуумоподобной материей, небарионной темной материей, включающей холодную (CDM) и горячую (HDM – нейтрино, фотоны, гравитоны) скрытую массу, а также барионной материей. Отсутствие знания физики этих взаимодействий является главным препятствием в дальнейшем развитии стандартной космологической модели.

13.6. Загадка темной энергии и космологического вакуума

Недавние наблюдения сверхновых на больших красных смещениях выявили еще одну странную субстанцию, даже более странную, чем темное вещество. У нее отрицательное давление, ее энергия больше, чем энергия темного вещества, и она управляет динамикой всей вселенной. По причине ее необычной физики ее называют «темной энергией», чтобы отличать ее от темного вещества, которое тоже загадочно, но более знакомо по своим гравитационным эффектам. Долго считалось, что гравитация вещества, и темного и светящегося, замедляет расширение вселенной. Так что это было, как гром среди ясного неба, когда астрономы, изучающие далекие сверхновые, получили, что расширение *ускоряется*. Что ускоряет вселенную? Теоретики не могут найти иного выхода, чем приписать это ускорение «антигравитации» темной энергии, которую также называют «квинтэссенцией». Темное вещество и темная энергия – эти загадочные компоненты решают судьбу вселенной в модели большого взрыва.

Январский выпуск журнала Scientific American открыл новый, 1999-ый год специальным сообщением: «Революция в космологии». Это был отклик на неожиданный результат, полученный двумя группами астрономов, которые несколько лет изучали очень далекие сверхновые звезды. Продолжая программу, начатую Сэндиджем, они ставили своей целью построение диаграммы Хаббла для большой части видимой вселенной с помощью так называемых сверхновых типа Ia. Считается, что такая сверхновая возникает, когда белый карлик с массой около 0.6 массы Солнца взрывается в результате избыточного потока газа с его звезды-компаньона. Две знаменитых сверхновых в нашем Млечном Пути, которые знаменовали собой революционные для космологии времена в 1572 и 1604 годах, были, вероятно, типа Ia. Первую тщательно наблюдал Тихо Браге, и видел также Галилей, будучи маленьким мальчиком. Вторая, «новая Кеплера», произвела на Галилея больше впечатление – в конце концов, и небеса меняются!

Максимальные светимости этих взрывов почти одинаковы, и их можно использовать как хорошие стандартные свечи. В максимуме блеска они становятся яркими как целая галактика – большое достижение для звезды, менее массивной, чем Солнце!

С помощью самых больших наземных телескопов и космического телескопа имени Хаббла астрономы смогли обнаружить и измерить такие сверхновые на далеких расстояниях, вплоть до

выхода в глубокую вселенную, на красном смещении около 1. Разные модели Фридмана предсказывают разное соотношение между звездной величиной и красным смещением. Кривая для стандартной инфляционной модели была популярна в течение двух десятилетий, хотя не было никаких прямых наблюдательных доказательство ее превосходства. Когда новые наблюдения были нанесены на диаграмму

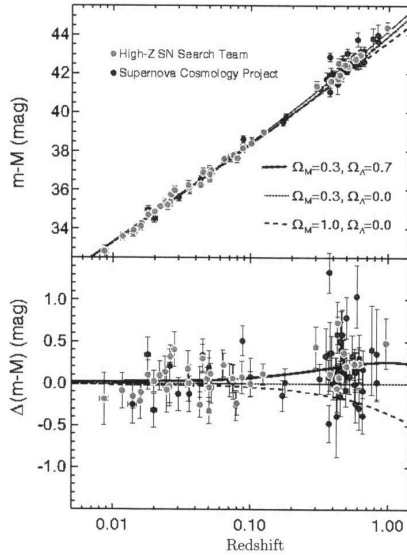


Рис. 13.6. Диаграмма красное смещение – звездная величина для далеких сверхновых типа Ia показывает ускорение вселенной. Пунктирная кривая – это ожидаемое соотношение между зв. величиной и красным смещением в «старой» инфляционной модели, в которой лямбда-член равен нулю. Наблюдаемые сверхновые слабее, и они скапливаются вокруг (жирной) кривой, соответствующей модели, в которой темная энергия составляет 70% от всей массы вселенной.

Хаббла, неким шоком было то, что сверхновые не следует предсказанию инфляционной модели (они были слабее на больших красных смещениях). Чтобы объяснить наблюдаемую диаграмму Хаббла, пришлось вернуть в модели Фридмана космологическую постоянную Эйнштейна. На Рис. 13.6 мы показываем результаты «Группы по поиску сверхновых с большими Z», возглавляемой Брайаном Шмидтом (Brian Schmidt). Еще одна серьезная команда – это

«Проект по космологии на основе сверхновых», возглавляемый Саулом Перлмуттером (Saul Perlmutter).

Казалось, что надежда доказать инфляционную модель потерпела крах. Инфляция предсказывала, что критическая плотность полностью обусловлена обычным веществом. Космолог Лоуренс Краус (Lawrence Krauss) писал в то время: «Одно уже стало ясно наверняка. Стандартная космология 1980-ых годов, постулировавшая плоскую вселенную, в которой преобладает вещество, умерла». Отброшенную ранее космологическую постоянную Эйнштейна тепло приняли обратно, и она стала играть центральную роль в интерпретации наблюдаемой вселенной.

Одним важным следствием уравнений гравитации Эйнштейна является то, что положительная космологическая постоянная соответствует силе отталкивания – «антигравитации». Следовательно, расширение вселенной ускоряется, несмотря на то, что гравитация обычного вещества пытается сопротивляться.

Открытие космологического ускорения потребовало тесного сотрудничества астрономов, работавших на космических и наземных телескопах. Эти усилия и их результат – скромное отклонение точек данных на Хаббловской диаграмме – напоминают нам историю открытия Кеплером едва заметной эллиптичности орбиты Марса по данным, полученным в проекте Тихо Браге. Вспомните также прецессию точки весеннего равноденствия на небе, открытую Гиппархом во втором веке до н.э. Во время поездки в Александрию из своего родного Родеса он узнал о старых наблюдениях звезд, выполненных за полтора столетия до этого. Когда он сравнил свои собственные измерения звездных положений со старыми, обнаружилась прецессия (позже объясненная как отражение прецессии земной оси). Обнаружение такого медленного процесса требует длительных и точных наблюдений. Не все важные и неожиданные явления очень зрелищны!

Загадка лишних 120 порядков космологического вакуума.

Лямбда-член (космологическую постоянную) в уравнениях Эйнштейна можно интерпретировать как вклад космологического вакуума в полную плотность массы во вселенной. Если мы хотим сохранить инфляционную идею о нулевой кривизне, то *сумма* плотностей вещества и вакуума должна быть равна критической плотности. В этом случае наблюдения сверхновых можно объяснить, если плотность вакуума примерно в два раза больше плотности

вещества. Но тогда истинным правителем является уже не темное вещество, а нечто более загадочное – космологический вакуум!

Космологический вакуум, как он рисуется в теории, – это очень необычный вид «материи». У него положительная энергия, но отрицательное давление. В уравнении Фридмана космологический вакуум появляется как сумма положительной плотности энергии и в три раза большего отрицательного давления, создавая, в конце концов, отрицательную плотность *гравитационной* массы для вакуума. Отрицательная гравитационная масса производит силу отталкивания или «антигравитацию». Между любыми двумя галактиками в расширяющемся пространстве отрицательная масса вакуума возрастает со временем, что ведет ко все более высокому ускорению вселенной. Модель Фридмана описывается следующим точным уравнением движения: $\ddot{r} = -GM_{eff}/r^2$, где M_{eff} – гравитирующая масса вещества и «субстанции Λ » внутри радиуса r . По причине однородности $M_{eff} = 4\pi/3 (\rho + 3p/c^2) r^3$, где $\rho = \rho_m + \rho_\Lambda$, и $p = p_m + p_\Lambda$ – полные плотность и давление. Эффективная масса отрицательна, если $-3p > \rho c^2$. В терминах параметра плотности полная плотность вселенной равна сумме плотностей Λ и вещества: $\Omega = \Omega_\Lambda + \Omega_m$

В современной физике вакуум – это не просто пустое пространство, а океан непрерывно рождающихся и аннигилирующих частиц. Еще одним странным аспектом вакуума является энергия нулевых колебаний всех квантовых полей, существующих во вселенной. Это порождает большую загадку. Почему плотность космологического вакуума оказывается такой маленькой, близкой к критической плотности, примерно 10^{-29} г/см³? Прямое вычисление плотности вакуума из теоретической физики приводит к невероятно огромному значению примерно в 10^{94} г/см³! Это значение называется также плотностью Планка и ее можно выразить через три фундаментальных константы G , h и c ($\rho_{Plank} \approx c^5/G^2h$). Время, длина и плотность Планка должны естественно появиться в релятивистской квантовой теории гравитации. Так как пока нет законченной «*Ghc*-теории», вакуум все еще является фундаментальной проблемой современной физики. Как мы уже говорили в Главе 7, название «*Ghc*-теория» имеет свои корни в давней статье, опубликованной в 1927 году Георгием Гамовым, Дмитрием Иваненко и Львом Ландау, которые классифицировали физические теории согласно фундаментальным константам, которые в них содержатся. Среди Ленинградских физиков они были известны как «три мушкетера». Позже к этой веселой команде присоединился Матвей Бронштейн

(1906-1938). В 1936 году он опубликовал пионерскую работу, в которой предлагал рассматривать гравитоны как частицы, переносящие силу гравитации. Его короткая жизнь оборвалась через два года, как жертвы сталинского террора.

Почему физики в своих лабораториях не слишком беспокоятся по поводу такой огромной плотности вакуума? Потому что в физике элементарных частиц обычно можно не принимать во внимание гравитацию, которая в микромире в любом случае мала. Плотность Планка считается нулевым уровнем, как спокойная поверхность моря, относительно которой измеряются все энергии.

Теория элементарных частиц предсказывает, что не только вакуум, но и некоторые квантовые поля можно описать как субстанции с положительными плотностями энергии и отрицательным давлением. Следовательно, эти теоретические сущности можно считать кандидатами на роль темной энергии. Гипотетические скалярные поля с такими свойствами называются квинтэссенцией. («Скалярное поле» описывает вещество как поле числовых значений в разных точках пространства. Менее экзотичным, чем космологическое антигравитационное скалярное поле, было бы температурное скалярное поле, задающее температуру в каждой точке, скажем, переполненного концертного зала.)

Уравнения Эйнштейна для однородной темной энергии, имеющей простое уравнение состояния между давлением и плотностью, дает неожиданный, но строгий результат: ускорение вселенной описывается точным уравнением Ньютона для силы гравитации, в котором масса внутри сферы вокруг любой точки отрицательна! $M_{DE}(r)$ есть гравитирующая масса темной энергии внутри радиуса r с уравнением состояния $p_Q = w\varepsilon_Q$, $w \in [-1, 0)$ так что $M_{DE} = 4\pi/3 (1 + 3w)\rho_Q r^3$. Она отрицательна для $w < -1/3$. Параметр w – это новый параметр физики и космологии (наряду с H , Ω , Λ). Для вакуума $w = -1$, для «пыли» $w = 0$, а для фотонного газа $w = 1/3$.

Отрицательная гравитирующая масса означает, что вместо замедления, вызываемого обычным веществом, квинтэссенция производит ускорение. Это странное поведение – антигравитация темной энергии – есть новое изобретение космологической физики, и оно еще не проверено в лабораторной физике.

После того, как открыли ящик Пандоры, в космологии начали появляться странные вещи. Недавно в качестве «главного кандидата» в темную энергию была предложена новая сущность – спинтэссенция.

Эта спинтэссенция является не вещественным (в математическом смысле), а *комплексным* скалярным полем...

В своей статье 1929 года, посвященной открытию линейного закона $Z(r)$, Эдвин Хаббл сделал вывод, что он, по-видимому, обнаружил эффект де Ситтера (т.е. влияние космологической постоянной). Поразительно также, что книга Артура Эддингтона *Расширяющаяся Вселенная* пронизана идеей важности космологической постоянной. Эддингтон был взволнован только что открытым законом Хаббла и думал, что расширение вселенной приводится в движение космическим отталкиванием (ему не нравилось альтернативное объяснение Леметра, который предложил «теорию фейерверков», предшественницу теории большого взрыва, в которой расширение началось с мощного выброса из первичного атома). Похоже, что с последними наблюдениями далеких сверхновых нечто вроде эффекта де Ситтера вернулось через 80 лет!

Возраст вселенной в модели с Λ -членом. Первые оценки константы Хаббла, произведенные семьдесят лет назад, выявили некую странность: вселенная вроде бы моложе, чем Земля! Действительно, если в космологической модели утверждается, что вселенная имеет конечный, измеримый возраст, то эта модель вынуждена существовать под постоянной угрозой опровержения. Проблема возраста преследовала теорию большого взрыва с момента ее рождения. Наиболее яркие примеры дают старейшие шаровые скопления и очень далекие галактики.

Возраст вселенной, имеющей критическую плотность и сделанной из вещества, – 11 миллиардов лет – меньше, чем возраст шаровых скоплений. Это явное несоответствие назвали *парадоксом возраста*. Ситуация такая же озадачивающая, как если бы отец было моложе своего сына...

Но вселенная, ускоряемая космологической константой, может быть старше, чем обычная инфляционная вселенная. Это легко понять: ускоряющаяся вселенная расширялась в старые времена медленнее, чем теперь, и, следовательно, ей потребовалось больше времени, чтобы достичь своего настоящего размера.

Мы приводим Таблицу возрастов для ускоряющейся вселенной, в которой доминирует космологическая константа (здесь $\Omega_{matter} = 0.3$, $\Omega_{\Lambda} = 0.7$, $H = 60$). Возраст такой вселенной равен 16 миллиардам лет, и она удобно вмещает старейшие шаровые скопления.

Z	T_{back}	T_{age}	T_{back}^{accel}	T_{age}^{accel}
0	0	11000	0	16000
1	7100	3900	9200	6800
3	9600	1400	13500	2500
5	10250	750	14600	1400
7	10490	510	15100	900
10	10700	300	15450	550

Более того, проблема возраста вселенной есть и в настоящий момент: парадокс обостряется при движении во времени назад к большому взрыву, например, при наблюдении очень далеких галактик. Из таблицы возрастов для *неускоряющейся* инфляционной вселенной видно, что при $Z = 5$ вселенной было «всего» 750 миллионов лет. Наблюдения выявили галактики и квазары на таких больших красных смещениях. Возникает вопрос, достаточно ли было времени для такого быстрого их образования после большого взрыва. Недавно Юрий Парийский и его группа показали, что есть намеки на проблему возраста для далеких радиогалактик, которые, судя по их красному цвету, содержат звезды, которые, кажется, намного старше, чем 750 миллионов лет.

Хорошая модель мира должна давать достаточно пространства и времени, чтобы галактики могли сформироваться и созреть, и избежать загадки B^4 ($B^{4} = \text{«Born Before the Big Bang»}$ – «Рожденный до большого взрыва»). Когда галактики обнаруживаются на все больших и больших красных смещениях, то такая проблема возраста становится все более интересной. В настоящее время рекордное красное смещение равно 6.7, что соответствует времени в 550 миллионов лет после большого взрыва (или около 1 000 миллионов лет в ускоряющейся вселенной).

На Гавайском 10-метровом телескопе была обнаружена красная радиогалактика 53W091, возраст которой, при ее красном смещении = 1.55, составляет более 3.5 миллиардов лет. Возраст неускоряющейся модели на этом красном смещении равен всего 2.7 миллиарда лет. Эта ситуация показывает, почему так важно наблюдать далекие галактики. Они содержат информацию о той эпохе, когда были сформированы галактики. Ускоряющаяся вселенная дает больше времени для того, чтобы галактики сформировались и созрели.

13.7. Загадка космологического красного смещения – 15-ая проблема Сэндиджа

Алан Сэндидж, который родился за три года до того, как его наставник Эдвин Хаббл открыл закон красного смещения, всю свою жизнь посвятил космологии. Когда в 1991 году Сэндиджа наградили Премией Крэфурда, он подчеркнул, что космология – это экспериментальная наука, которая имеет дело с проверяемыми предложениями. В частности, должен быть и способ проверить, вызвано ли космологическое красное смещение расширением пространства или это другой эффект космологической физики.

В своей классической статье 1929 года Хаббл подчеркивал, что измеряется «смещение спектра», а не скорость удаления галактик. В течение всей дальнейшей жизни Хаббл пытался ответить на вопрос какой механизм вызывает в действительности космологическое красное смещение. В 1995 году на конференции по *Ключевым проблемам астрономии и астрофизики*, состоявшейся на Канарских Островах, Алан Сэндидж представил список из 23 астрономических проблем на следующие три десятилетия в виде, аналогичном знаменитым 23 проблемам Гильберта в математике. Первой проблемой в космологии (в его списке – это 15-ая проблема астрономии) было: *Является ли расширение реальным?*

Как ни удивительно, нелегко прямо доказать, что красное смещение вызвано расширением пространства, а не каким-то другим эффектом, например, «старения (или усталости) света». «Старение света» – это общее название для некоторых теоретических моделей, предложенных для объяснения красного смещения вместо расширения. Предположим, что фотон постепенно теряет свою энергию при путешествии в пространстве. Так как энергия фотона обратно пропорциональна длине волны, то с потерей энергии длина волны увеличивается (красное смещение).

Теория старения света в настоящее время только экзотическая возможность, тогда как есть три известных явления, которые действительно могут быть причиной космологического красного смещения. Это обычное движение и гравитация, которые проверены экспериментально, а также расширение пространства:

- *Движение в пространстве – эффект Доплера*
- *Гравитация – эффект Эйнштейна*
- *Расширение пространства – эффект Леметра*

Эффект Леметра и эффект Доплера. В классической статье 1927 года, в которой Жорж Леметр впервые ввел космологическое красное смещение, он подчеркнул, что причиной красного смещения является увеличивающийся радиус вселенной. Он назвал это *кажущимся* эффектом Доплера, потому что обычное движение источника имитировало бы похожий сдвиг в спектре. В чем состоит критическая разница между красным смещением, вызванным расширением пространства (эффект Леметра) и эффектом Доплера, обусловленным движением? В случае расширения пространства длина волны фотона постоянно растягивается вдоль всего его пути от источника света до наблюдателя. Но когда удаляющееся тело в статическом пространстве излучает фотон, то его длина волны не меняется вдоль пути и имеет постоянный сдвиг, определяемый в момент излучения фотона. Красное смещение, вызванное расширением пространства, отличается от механизма Доплера, поэтому неправильно объяснять космологическое красное смещение эффектом Доплера.

Эдвард Харрисон (Edward Harrison) ясно указал, что даже математические выражения для этих двух механизмов существенно отличаются, как и должно быть, если отличаются явления. Чтобы вычислить скорость удаления объекта с наблюдаемым красным смещением, нужно знать точное соотношение между расстоянием и красным смещением. В случае моделей Фридмана эту важную формулу для простого частного случая «пылевидной вселенной» впервые нашел в 1958 году Вольфганг Маттиг (Wolfgang Mattig), через много лет после того, как были открыты модели расширяющегося пространства.

Формула Доплера связывает наблюдаемое красное смещение Z и обычную скорость удаления V источника света: $1 + Z_{Dop} = (c + V)^{1/2} / (c - V)^{1/2}$, откуда скорость равна $V = c(Z^2 + 2Z) / (Z^2 + 2Z + 2)$. Обратите внимание, что всегда $V < c$. В расширяющейся вселенной, например, формула Маттига (выведенная для случая $\Omega = 0$, $\Lambda = 0$) дает скорость расширения $V_{exp} = cZ(1 + Z/2) / (1 + Z)$, которая может быть больше, чем c , для больших Z .

Если мы измеряем красное смещение от далекой галактики и хотим знать ее скорость удаления, то ответ будет зависеть от природы красного смещения. Согласно эффекту Доплера, галактика с красным смещением 5 улетает со скоростью 0.95 c . Но в расширяющемся пространстве Фридмана ее скорость удаления в настоящую эпоху нужно вычислять, используя точное соотношение «скорость – красное

смещение». Например, в случае $\Omega = 0$, $\Lambda = 0$ формула Маттига дает результат в три раза больше скорости света.

Можно ли экспериментально установить природу космологического красного смещения? Рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Предположим, что мы можем привязать один конец крепкого, но легкого каната к далекой галактике, в то время как в Млечном Пути он будет свободно разматываться из гигантского барабана. Можно измерить две вещи: красное смещение галактики и скорость, с которой канат выходит из барабана. И расширение пространства, и обычное движение предсказывают, что барабан будет вращаться. Просто сравнив эти два измерения с двумя формулами (эффекта Леметра и эффекта Доплера), мы можем решить, какой механизм правильный. Кроме того, барабан может вести себя неожиданным образом. Он может не вращаться вообще. Это может произойти, если причиной красного смещения является гравитация или эффект старения света.

Более практическую, хотя и менее прямую, проверку природы космологического красного смещения предложили Ричард Толман (Richard Tolman) и Эдвин Хаббл в 1930-ые годы. В статической Евклидовой вселенной поверхностная яркость источника не зависит от его расстояния до наблюдателя, тогда как в расширяющейся вселенной Фридмана поверхностная яркость намного слабее при больших красных смещениях Z :

- *Классическое пространство без красного смещения:* поверхностная яркость постоянна
- *Эффект усталости света:* поверхностная яркость убывает как $(1 + Z)^{-1}$
- *Расширяющееся пространство:* поверхностная яркость убывает как $(1 + Z)^{-4}$

Эффект усталости света вызывает уменьшение поверхностной яркости потому, что каждый фотон теряет энергию пропорционально красному смещению как $(1 + Z)$. В расширяющемся пространстве два дополнительных эффекта приводят к гораздо более быстрому падению яркости.

В 2001 году Алан Сэндидж и Лори Любин (Lori Lubin) выполнили наблюдения поверхностной яркости эллиптических галактик с большими красными смещениями, измеренными на космическом телескопе им. Хаббла. Им удалось дотянуть тест до красного смещения 0.92, так что если расширение реально, то в

Ричард
Толман
1881-1948

поверхностной яркости должен быть виден сильный тренд. Результат был довольно близок к тому, что ожидалось для расширяющегося пространства, тогда как у эффекта усталого света были серьезные трудности.

Интересно, что такое же поведение $(1+z)^{-4}$ для поверхностной яркости предсказывается также для доплеровского и гравитационного красных смещений далеких объектов. Следовательно, строго говоря, этот тест не может определить разницу между красными смещениями расширения пространства, гравитации и доплеровским.

Так как эффект Доплера тоже проходит тест поверхностной яркости, можно все-таки спросить, а нельзя ли описать удаление галактик как движение в пространстве, избегая всех этих разговоров о «расширяющемся пространстве». И можно также спросить, мог ли Ньютон предвидеть расширяющуюся вселенную?

Предположим, что в его расширяющемся мире субстрат звезд расширяется относительно абсолютного пространства, так что мы видим вокруг нас закон Хаббла. Проблема состоит в том, что всемирное расширение звездной составляющей определяет привилегированный центр в абсолютном пространстве. Может быть, именно поэтому Ньютон не рассматривал расширение или сжатие всей вселенной, более того он считал статичность распределения вещества доказательством бесконечности вселенной, в которой условие изотропии приводит к взаимной компенсации всех космологических сил. Хотя в 1930-ых годах Эдвард Милн (Edward Milne) попытался показать в своей кинематической космологии, что глобальное расширение вещества внутри пространства Минковского специальной теории относительности может существовать без выделенных точек, современная космология считает, что расширяется само пространство.

13.8. Парадокс Хаббла - де Вокулера

«Однородность влечет закон Хаббла». Это объяснение закона Хаббла всегда считалось большим достижением расширяющейся однородной вселенной. И, как было отмечено во время спора о фракталах, если бы вселенная была неоднородна, то мы ожидали бы увидеть не равномерное расширение, а беспорядочный разброс скоростей галактик, являющийся результатом клочковатости вещества. В своей книге 1932 года «Расширяющаяся Вселенная» Артур Эддингтон применил свой излюбленный воздушный шар и к

этому вопросу, написав, что «расширение однородно, только если плотность равномерна», а в неоднородной сфере «неровные части не расширяются с той же скоростью, что и гладкие интервалы между ними».

Анализ условной плотности выявил фрактальное распределение галактик на масштабах, начиная с 1 Мпк и доходя по крайней мере до 100 Мпк. В том же диапазоне расстояний (и дальше) мы находим закон Хаббла. Поэтому, есть два космологических соотношения – закон красного смещения Хаббла и закон фрактальной

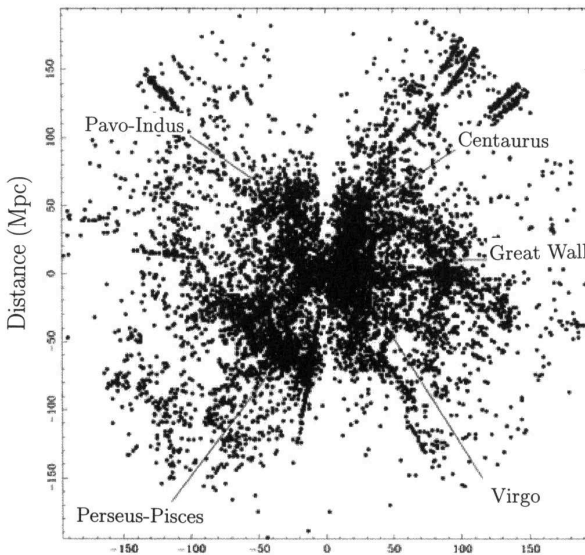


Рис. 13.7. Мегафракталы, выявленные с помощью базы данных LEDA. Такая локальная карта вплоть до 300 Мпк является основой для более подробного изучения структур и галактических потоков.

плотности де Вокулера, и оба универсальны в том смысле, что они верны для любого наблюдателя.

Мирное сосуществование законов Хаббла и де Вокулера очень озадачивает, поскольку ожидается, что внутри очень неоднородной фрактальной структуры закон Хаббла, как связь «скорость – расстояние», нарушается. Гравитация комков вещества тянет галактики с их постоянных мест в расширяющемся

пространстве, придает им дополнительные скорости в том или ином направлении, и, таким образом, искажает любой регулярный закон расширения.

Такие вычисления впервые проделали Дж Верц (J.Wertz) и М. Хаггерти (M. Haggerty) в 1972 году. Позже мы, совместно с Александром Громовым, использовали модели Толмана-Бонди для сферически-симметричных масс. Пространство расширяется согласно закону Хаббла на крупных масштабах, где достигнуто однородное распределение вещества. На малых масштабах, где средняя плотность массы больше из-за фрактальности, расширение медленнее, а на еще более мелких масштабах любое регулярное расширение разрушается гравитационным торможением.

Можно считать, насколько неожиданным является это сосуществование фракталов и закона Хаббла. Предположим, что все космическое вещество находится в галактиках, а максимальная шкала фрактальности равна 100 Мпк, за которыми вселенная однородна. В такой модели закон Хаббла строго выполняется только для расстояний, больше 100 Мпк. Теперь его судьба в близкой вселенной будет зависеть от плотности. Если параметр плотности равен 1 (инфляционная вселенная без темной энергии), тогда не должно быть никакого космологического красного смещения ближе, чем 25 Мпк. Но Хаббл впервые обнаружил свой закон именно на этих малых расстояниях! Мы действительно видим хороший закон Хаббла намного ближе, чем скопление в Деве, до пределов нашей Локальной Группы. Что означает этот парадокс?

Парадокс был бы решен, если бы средняя плотность всего вещества во вселенной была намного меньше критической, например, с параметром плотности не 1, а 0.01. Но такая низкая плотность не достигает значения плотности 0.3, следующего из других динамических тестов. Таким образом, даже однородное темное вещество, доминирующее на всех масштабах, на которых наблюдается линейный закон Хаббла (т.е. начиная с окрестностей Млечного Пути), не может объяснить этого парадокса. Однако если это не может сделать темное вещество, есть интереснейшая возможность, что открытая недавно темная энергия, ускоряющая вселенную, может быть отсутствующим элементом этой головоломки.

Парадокс Хаббла - де Вокулера и темная энергия. После того, как по наблюдениям далеких сверхновых (с красным смещением, близким к 1) был обнаружен эффект космологического вакуума, можно было бы подумать, что это не имеет ни малейшего отношения к

локальной окрестности нашей галактики. И каким бы мог быть его эффект?

Артур Чернин первым обратил внимание в дискуссии с авторами на то, что граница между гравитацией и вакуумом проходит неожиданно близко к нашей Галактике. Это следует из точного уравнения движения: $\ddot{r} = -GM_{\text{eff}}/r^2$, где $M_{\text{eff}} = M_m(r) + M_\Lambda(r)$ есть сумма гравитационных масс вещества $M_m(r)$ и вакуума $M_\Lambda(r)$ внутри радиуса r . У вакуума отрицательная гравитационная масса, и его антигравитация стремится компенсировать притягивающую гравитацию между массами, плавающими в пространстве. На некото-

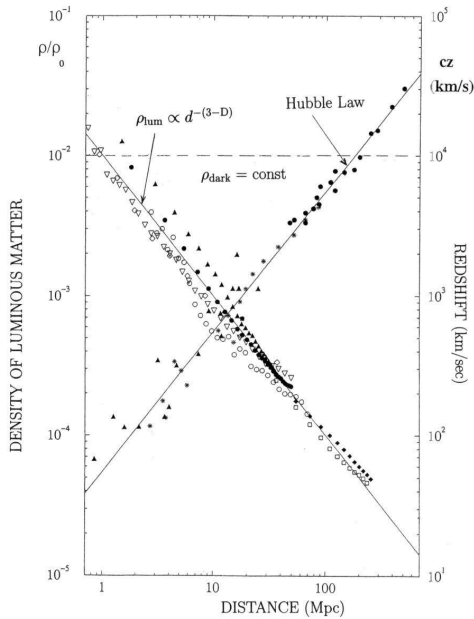


Рис. 13.8. Парадокс Хаббла – де Вокулера или мирное сосуществование двух главных космологических законов: закона красного смещения Хаббла (возрастающий вправо) и фрактальный закон убывающей средней плотности. Равномерно распределенная темная энергия показана пунктирной горизонтальной линией. Ключковатые структуры галактик все более и более крупных масштабов все глубже и глубже погружаются в тихий океан темной энергии.

ром расстоянии от массы компенсация становится полной (гравитация = антигравитации). На меньших расстояниях преобладает гравитация, а на больших расстояниях лидерство выигрывает вакуумная сила отталкивания.

Для нашей Локальной Группы галактик нетрудно вычислить, где проходит граница между областями, в которых доминирует гравитация или вакуум, если плотность вакуума примерно в два раза больше плотности вещества. Граница оказывается довольно близко, на расстоянии всего 1-2 Мпк, на краю Локальной Группы. Внутри нашего маленького роя галактик гравитация удерживает все вместе, но когда мы смотрим на немного более далекие галактики, то между нами и

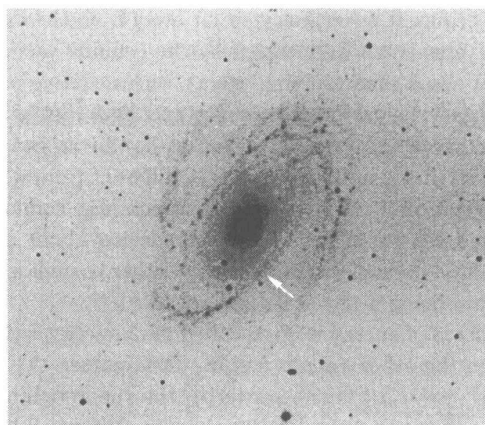


Рис. 13.9. В 1993 году в спиральном рукаве близкой галактики M81 в созвездии Большой Медведицы вспыхнула сверхновая (это место показано стрелкой). Исследование намного более далеких сверхновых привело астрономов к выводу, что расширение вселенной ускоряется посредством какой-то антигравитирующей субстанции. На расстоянии M81 (3 Мпк) антигравитация вакуума в пространстве между ней и Млечным Путем превышает обычную гравитацию между ними.

«ними» преобладает сила отталкивания, возникающая из вакуумного «ничто».

Приятной для космологов стороной темной энергии является то, что она рассеяна более гладко, чем галактики. В частности, вакуум может быть подлинно однородной субстанцией, о чем постоянно мечтают космологи. Квантовая физика вакуума и гравитации, которую

еще нужно разработать, становится принципиально важной для понимания вселенной.

Таким образом, плотность энергии вакуума плохо понята в космологической физике, и наблюдения заставляют согласиться со словами Жоржа Леметра, который первым осознал, что космологическая константа в уравнениях Эйнштейна представляет собой вакуум с отрицательным давлением и, следовательно, космологическое отталкивание: «Все происходит так, как будто энергия вакуума отличается от нуля».

Модели Фридмана с фрактальным распределением галактик. Три ключевых открытия – закон Хаббла, фоновое космическое излучение и крупномасштабные фракталы – были недавно объединены в новый тип модели Фридмана. Здесь роль однородной субстанции для модели играет космическое излучение, тогда как фрактальность видимого вещества достигает масштабов, где ее средняя плотность меньше, чем плотность фотонного газа. Эту оригинальную модель построила команда из астрономов (Майкл Джойс, Марко Монтуори и Франческо Силос Лабини) и физиков (Филип Андерсон и Лучиано Пиетронеро). Филип Андерсон, обладатель Нобелевской премии из Принстона и пропагандист науки о сложности в разных областях физики, теперь занялся физикой космических фракталов.

Главное свойство фрактального распределения – то, что средняя плотность падает при увеличении масштабов, – приводит к тому, что плотность вещества становится меньше, чем плотность излучения. Параметр плотности космического излучения в настоящую эпоху равен $\Omega_{CR} = 7 \cdot 10^{-5}$. Для фрактальных структур, тянущихся на несколько тысяч мегапарсек, средняя плотность кластеризованного вещества становится меньше, чем очень маленькая плотность однородного фотонного моря. Это позволяет фридмановской модели содержать фрактальную структуру, которая тянется за пределы расстояния Хаббла (5000 Мпк).

Интересным свойством этой модели является то, что она описывает вселенную без доминирующего темного вещества. Она содержит новый сценарий образования крупномасштабных структур, в котором фрактальные зерна засеяны в очень ранней вселенной. Но одно предсказание, возможно, не подтверждается последними наблюдениями флуктуаций фонового космического излучения. Ожидается, что пятна имеют в поперечнике несколько угловых минут,

что намного меньше одного градуса, который наблюдали в экспериментах Boomerang и WMAP.

13.9. Загадка космологического гравитационного красного смещения

Парадокс Хаббла – де Вокулера может указывать на две противоположных возможности, в зависимости от того, какой закон для космологии важнее. С точки зрения стандартной модели, фундаментальным является закон Хаббла. В этом случае, как объяснялось выше, должна существовать однородная субстанция, производящая линейный закон Хаббла. Тогда наблюдаемая фрактальная структура является редким светящимся веществом, которое не влияет на динамику вселенной.

Но, может быть, первичным является фрактальный закон, заключающий в себе все вещество! Тогда причиной закона Хаббла должно быть не однородное вещество, а что-то другое. А не может ли закон Хаббла иметь какую-то глубокую связь с фрактальным законом? И если однородное вещество не требуется для своей главной функции – объяснять закон Хаббла в расширяющемся пространстве, не следует ли нам задать также вопрос и о расширении пространства?

Если нет расширения пространства, то тогда красное смещение может быть вызвано либо обычным движением, либо гравитацией. Последняя возможность особенно интересна, потому что гравитация фрактальной структуры может проявляться как красное смещение в свете от далеких галактик.

В 1947 году сэр Герман Бонди показал в своей классической статье о неоднородной космологической модели (названной позже моделью Толмана-Бонди), что в приближении малых красных смещений полное космологическое красное смещение галактики содержит две части: во-первых, смещение, вызванное скоростью удаления, а во-вторых, глобальное гравитационное смещение, вызванное распределением массы между галактикой и наблюдателем.

Эта вторая часть космологического красного смещения довольно загадочна, так как она возникает в однородном распределении, где нет выделенных точек. Гравитационное смещение численно равно разности потенциалов между краем и центром шара, деленной на квадрат скорости света: $Z = \Delta\varphi / c^2$. В центре шара находится источник света, так как событие излучения фотона предшествует событию поглощения фотона наблюдателем,

находящимся на границе шара с радиусом, равным расстоянию между источником и наблюдателем. В этом случае удовлетворяется принцип причинности, и все потенциальные наблюдатели находятся на границе такого шара. Кроме того, знак смещения следует также из точной формулы Маттига, которая дает именно красное гравитационное смещение. Отметим, что утверждение о фиолетовом космологическом гравитационном смещении, сделанное в некоторых работах, ошибочно, так как основано на рассмотрении наблюдателя (а не источника) в центре шара.

В однородной вселенной масса шара пропорциональна кубу радиуса, следовательно, гравитационный потенциал пропорционален квадрату радиуса. Однако во фрактальной структуре масса шара вокруг далекой галактики растет как квадрат радиуса, если фрактальная размерность равна 2. Если применить к этому случаю формулу гравитационного смещения частоты, то видно, что гравитационное красное смещение должно подчиняться линейному закону Хаббла:

$$\text{гравитационное красное смещение} = \text{константа} \times \text{расстояние} \\ (D = 2).$$

Наблюдаемое значение константы близко к значению «гравитационной постоянной Хаббла», если средняя плотность вещества в пределах хаббловского радиуса близка к критической плотности моделей Фридмана. Тогда почему гравитационное красное смещение не является широко принятой интерпретацией закона Хаббла? Увы, этот механизм требует намного больше массы в близкой вселенной, чем наблюдается. Для объяснения значения постоянной Хаббла чисто гравитационным эффектом потребовалась бы огромная масса примерно тысячи галактик в пределах радиуса в 1 мегапарсек! Этот парадоксальный конечный результат снова иллюстрирует, как темное вещество упрямо появляется из разных космологических рассуждений.

13.10. Загадка остывания газа в расширяющемся пространстве

В космологии большого взрыва парадокс вечных ньютоновских звезд был прекрасно решен: ограниченный возраст всего мира объясняет присутствие светящихся звезд. Но возникает новая энергетическая загадка. В своей книге *Принципы физической космологии* Джеймс Пиблс подводит итог развития космологии

двадцатого века. В главе о фоновом тепловом излучении он обсуждает загадку остывающего космического газа, состоящего из фотонов. Куда уходит теряемая фотонным газом энергия при расширении вселенной? Он сделал вывод, что «Решение этого кажущегося парадокса состоит в том, что, хотя закон сохранения энергии – это хорошая локальная концепция, ..., в общей теории относительности не существует общего глобального закона сохранения энергии».

Закон сохранения утверждает, что энергию системы можно изменить только двумя способами: совершив над системой работу (т.е. сжав ее) или добавив или удалив тепло. В виде формулы это выглядит так:

$$\text{изменение энергии} = \text{перенос тепла} - \text{проделанная работа}$$

Например, когда к поршню прикладывается сила, уменьшая тем самым объем газа в цилиндре, работа равна *давление × изменение объема*. Если в этом процессе тепло не добавляется и не удаляется, то энергия газа должна увеличиться точно на ту же величину, что проявляется как увеличение температуры газа. В этом случае вышеприведенная формула выглядит так:

$$\text{изменение энергии} + \text{давление} \times \text{изменение объема} = 0$$

$$dE + pdV = 0$$

Нуль в правой части означает, что в любом таком процессе полная энергия (энергия газа + работа) сохраняется.

В лаборатории увеличение объема вызывается давлением на стенки сосуда в статическом пространстве. В зависимости от знака давления, есть три разных случая. Для *положительного* давления (например, обычный газ и излучение) внутренняя энергия уменьшается с увеличением объема благодаря работе, которую совершает давление газа на перемещение стенок сосуда, так что уменьшение энергии газа проявляется во внешней работе. Так работают паровые машины.

В расширяющемся пространстве такое объяснение невозможно. Однородную вселенную можно разбить на множество равных ячеек, в которых все процессы происходят одинаково. Если мы применим вышеприведенную формулу к одной из ячеек, то изменение объема теперь соответствует величине созданного пространства. Однако так как по обе стороны стенок давление остается одинаковым (газ повсюду однородный), то над газом не совершается работа, когда стенки отодвигаются друг от друга, т.е. «давление × изменение

объема» должно быть равно нулю, и, следовательно, внутренняя энергия не должна измениться. Но, тем не менее, излучение и газ остывают во время расширения пространства, и, таким образом, со временем энергия уменьшается. *Куда девается энергия*, если однородное давление не выполняет работы? Это также означает, что космологический большой взрыв – это вовсе и не взрыв, поскольку при любом взрыве в физической лаборатории существует разница между высоким давлением в центре и низким давлением за пределами взрыва. Однородная вселенная имеет повсюду одинаковое давление, а внешнего пространства не существует.

Эдвард Харрисон (Edward Harrison) писал в своей классической книге *Космология*: «На вопросы, куда девается энергия в расширяющейся вселенной и откуда она берется в коллапсирующей вселенной, ответ такой: никуда и ниоткуда, поскольку в одном этом случае энергия не сохраняется». Этот парадокс энергии вдохновил Харрисона на то, что в статье 1995 года в *Astrophysical Journal* он указал, что расширение вселенной можно было бы использовать для того, чтобы обеспечить легендарный вечный двигатель, «бесплатную закуску». Он привел мысленный эксперимент по извлечению энергии из расширяющейся вселенной и таким путем показал, что существуют нерешенные вопросы, касающиеся закона сохранения энергии.

Примеры несохранения энергии видны также в поведении гравитирующей массы в расширяющемся пространстве. Возьмем простую вселенную, содержащую пылевые частицы (т.е. считаем давление равным нулю). Рассмотрим сферу, радиус которой возрастает вместе с пространством, так что число частиц внутри нее не меняется (это так называемая сопутствующая сфера). Гравитирующая масса этой сферы, которая определяет динамику расширения пространства, также остается постоянной во времени. Однако гравитирующая масса излучения в сопутствующей сфере уменьшается, а абсолютное значение массы вакуума увеличивается!

Проблема энергии в космологической модели большого взрыва есть прямое следствие проблемы энергии гравитационного поля в общей теории относительности. Расчет изменения энергии следует из тождества Бианки для уравнений Эйнштейна, которое дает $T^{ik}_{(m);i} = 0$. Это «уравнение непрерывности» означает, что $dE = -pdV$. С его помощью можно рассчитать, насколько изменилась энергия космологической жидкости, однако в космологии оно не говорит, куда делась или откуда пришла энергия, так как давление работы не совершает. То, что это уравнение непрерывности не выражает

сохранения энергии-импульса, подчеркивали Ландау и Лифшиц в *Классической теории поля* (1973) (параграф 96: Псевдотензор энергии-импульса гравитационного поля). Это происходит потому, что в общей теории относительности тензор энергии-импульса $T^{ik}_{(m)}$ не содержит члена, соответствующего гравитационному полю (нет физически удовлетворительного понятия плотности энергии гравитационного поля), тогда как закон сохранения энергии должен включать и вещество и гравитацию.

*Эдвард
Милн
1986-1950*

13.11. Удаление галактик со скоростью больше световой

Специальная теория относительности утверждает, что никакая частица или сигнал не могут двигаться быстрее, чем скорость света. Все фундаментальные теории (электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий) называются релятивистскими именно по этой причине. Но в модели большого взрыва очень далекие галактики имеют скорости удаления, превышающие скорость света, как следует из точной формулы для скорости расширения в однородном пространстве. Это связано с фактом, на который указал в 1934 году британский астроном Эдвард Милн (Edward Milne): расширение при большом взрыве описывается точно такой же формулой, которая определяет поведение однородного ньютоновского облака пыли. Кинематика этого облака полностью совпадает с кинематикой модели большого взрыва. Так как в теории Ньютона не существует максимальной скорости, эта свобода переходит в расширяющееся пространство стандартной космологической модели. Точная релятивистская формула Робертсона для скорости удаления галактики имеет вид: $V_{exp} = H R = c R/R_H$, где $R_H = c/H$ есть хаббловское расстояние. Для галактики на расстоянии $R > R_H$ скорость ее убегания V_{exp} превышает скорость света!

Отец инфляции Алан Гут (Allan Guth) писал в своей статье «Большой взрыв и космическая инфляция»: «Хотя это нарушает предпосылки специальной теории относительности, это вполне приемлемо в общей теории относительности... В общей теории относительности нет ничего, что накладывало бы какие-либо ограничения на скорость, с которой может происходить такое растяжение пространства».

Существенным аспектом модели расширяющейся вселенной является то, что расширяется само пространство, а галактики внутри него не движутся. В этом смысле пространство общей теории

относительности напоминает абсолютное пространство ньютоновской космологии. В общей теории относительности абсолютное математическое пространство может расширяться, тогда как ньютоновское абсолютное пространство статично.

Законы специальной теории относительности касаются движения внутри пространства. Следовательно, можно оправдать сверхсветовые движения, поскольку галактики в действительности никуда не двигаются – они не переносят никакой информации из одного места в другое. Поэтому их огромные скорости удаления – это не те скорости, на которые специальная теория относительности накладывает ограничения. Увеличение расстояния до них вызвано всего лишь возникновением пространства между галактиками, хотя это указывает на необычность физики творения пространства.

Однако проблема сверхсветового расширения все-таки не дает уму покоя, и согласованное растяжение пространства в точках, которые разнесены на расстояния, намного превышающие расстояние Хаббла, заставляет задуматься, как вселенная «умудряется» создавать пространство повсюду с одной и той же скоростью?

*Освальд
Веблен
1880-1960*

13.12. Геометрия и физика: взгляд Пуанкаре и Эйнштейна

Анри Пуанкаре считал, что никогда нельзя будет экспериментально определить действительно ли геометрия пространства отклоняется от евклидовой. Так как современная космология измерила теперь конкретное, довольно точное значение кривизны пространства (нуль, т.е. Евклидово пространство!), любопытно бросить беглый взгляд на старый спор о взаимоотношении геометрии и физики.

Если спросить математика: что такое геометрия? – то можно получить обескураживающий ответ. Возьмем определение, данное Освальдом Вебленом (Oswald Weblen) и Альфредом Уайтхедом (Alfred Whitehead): «часть математики называется геометрией потому, что это название кажется хорошим для достаточного числа компетентных людей». Для самой математики не интересно, как геометрические понятия связаны с реальным пространством, тогда как для физики это жизненно важный вопрос. Математическое пространство со своими идеальными сущностями не может быть полностью адекватно картине реального физического пространства. *Математические* понятия «расстояния» и «кривизны» не эквивалентны *физическим* «расстоянию» и «кривизне».

*Альфред
Уайтхед
1861-1947*

Пуанкаре говорил, что геометрия не имеет дела с реальными вещами, поскольку ее понятия – это элементы идеального мира. Только геометрия вместе с физикой, т.е. единство *геометрия-физика*, является предметом экспериментального исследования. Можно сначала выбрать геометрию, а затем найти физические законы, так чтобы не было противоречия с экспериментами. Либо можно пойти в противоположном направлении и начать с физических законов и найти геометрию. Вывод Пуанкаре состоял в том, что удобно изменить физические законы и не трогать простую евклидову геометрию. Для современного физика это не только проще всего, но и несет также глубокий результат теоремы Нетер: симметрия Евклидова пространства (или пространства Минковского) обеспечивает законы сохранения, столь фундаментальные для физики. Примером является квантово-полевая гравитация, которая работает в пространстве-времени Минковского.

В своей лекции 1924 года, посвященной геометрии и опыту, Эйнштейн принял, что принцип Пуанкаре правилен, поскольку геометрия основывается на понятии жесткого стрижня, тогда как в реальном мире найти такую вещь может быть трудно. Тем не менее, Эйнштейн считал, что существование «практически жестких» стрижней позволяет геометрии быть предметом эмпирического изучения. Вопрос о том, является ли геометрия вселенной евклидовой или нет, имеет ясный смысл, а ответ можно получить из эксперимента, который он назвал практической геометрией. Естественно выбрать более общую Риманову геометрию и формулировать физические законы в ней. Это путь общей теории относительности.

Неевклидовы геометрии – как математические модели – не содержат внутренних противоречий. Следовательно, физическое пространство может быть неевклидовым. Измерима ли кривизна физически, если мы используем реальные единицы и процедуры измерения длины? Как подчеркнул Алан Сэндидж, «если кривизна пространства реальна, то это должно создать разницу в чем-то, что мы можем измерить».

Для замкнутого двумерного искривленного пространства, каким является обычная сфера, можно представить двумерных существ, живущих на ее поверхности. Эту идею подробно обсуждал Ганс Райхенбах (Hans Reichenbach) в своей книге *Философия пространства и времени*. Плоские обитатели могут «обойти» свой мир за какое-то число шагов и установить его конечный размер. Они могут также определить кривизну, измерив сумму углов треугольника.

Ганс
Райхенбах
1891-1953

Стороны треугольника проводятся нахождением кратчайших путей между его вершинами. Для треугольника ABC на сфере сумма углов A, B и C равна $\Sigma = A + B + C = 180^\circ + \sigma$. Здесь угловой избыток σ равен $\sigma = S/R^2$, где S – площадь треугольника, а R – радиус сферы. Следовательно, с помощью измерений углов A, B и C и площади треугольника S двумерные существа, работая только внутри своего пространства, могут определить кривизну их пространства $K = 1/R^2$. В принципе, такие измерения можно выполнить и в нашем трехмерном мире.

Приведенное выше описание того, как измерить кривизну, кажется очевидным, но оно зависит от критического предположения: в искривленном пространстве должна быть неизменная единица длины, которую можно переносить из одного места в другое свободным (неискажающим) движением или через информацию, полученную по лучам света, как в астрономии.

В евклидовом физическом пространстве можно определить и понимать единицу длины как расстояние между двумя свободно двигающимися частицами, которые были приведены в движение с одинаковыми скоростями, например, перпендикулярно проходящей между ними линии. Таким образом, можно перенести единицу длины в любую точку пространства. Такой «абсолютно мягкий» (свободное движение) метровый стержень дает те же результаты измерения, как и «абсолютно твердый» жесткий стержень. Абсолютно твердый стержень – это что-то, что сопротивляется всем силам, пытающимся изменить расстояние между его конечными точками, когда он движется в пространстве.

В искривленном пространстве дела обстоят по-другому. Там прямые евклидовы линии заменены *геодезическими* – кратчайшими путями, соединяющими две точки. Тогда эти две процедуры (жесткий стержень или свободное движение) дают разные результаты.

При движении жесткого стержня по сфере его концевые точки движутся не по геодезическим. Тогда можно измерить кривизну, а ее радиус можно выразить в единицах этого жесткого метра. Или наоборот, локальную длину можно выразить при помощи фундаментального радиуса кривизны как единицы измерения. Возможно, имея в виду именно это, Гаусс писал в письме Тауринусу от 8 ноября 1824 года: «...Иногда я шучу, что было бы хорошо, если бы евклидова геометрия не была истинной, потому что тогда у нас была бы абсолютная априорная мера длины...» Именно по той же причине Эддингтон предпочел замкнутую сферическую вселенную –

ее радиус кривизны давал ему повсеместную сравнительную длину, которая была ему нужна для его сложной космологической теории, связывавшей микромир атомов и макромир галактик.

Можно также попытаться перенести единичную длину из одного места в другое с помощью двух свободных частиц. Свободное движение – это движение по геодезическим. В этом случае расстояние между двумя свободно движущимися частицами, которые были приведены в движение с равными скоростями, перпендикулярными проходящей через них линии, по определению равно единице. Если постоянная единичная длина определяется таким образом, т.е. с помощью абсолютно мягкого стержня, то собственно геометрические измерения (расстояний, углов) не дают разницы между евклидовой и искривленной геометрией.

Вышесказанное подчеркивает роль измерительного стержня в практической геометрии, основная цель которой состоит в измерении глобальной кривизны пространства по наблюдениям галактической вселенной. Практическая геометрия предназначена не только для того, чтобы решить, какова геометрия нашей вселенной, но также для того, чтобы определить, являются ли основные понятия, применяемые в геометрии (такие как жесткие или мягкие стержни), адекватными на космологических масштабах.

Взаимосвязь геометрии и физики особенно ярко проявляется в стандартной космологической вселенной. Расширение и остывание вселенной – это базисные физические процессы в модели большого взрыва. Расширение пространства выглядит знакомым при сравнении с надуваемым шаром, когда каждый может видеть, как разделяются две любые точки на резиновой оболочке. Однако в этом процессе скрыта своя часть загадок. Галактики удаляются друг от друга со скоростями, больше чем скорость света, но делают это без действительного движения! Космологическое красное смещение в пространстве Фридмана вызвано не эффектом Доплера. Газ и излучение остывают во время расширения, не выполняя работы!

Загадки расширяющегося пространства уходят корнями в проблему связи между физикой и геометрией. Что происходит с метровым стержнем в расширяющемся пространстве – это тонкий вопрос. Вспомнив об удивительном микромире с его квантовым законами, можно было бы ожидать, что на больших масштабах макромир предлагает нечто, столь же трудно выразимое в терминах обычной физики. Некоторые странности в классической модели

большого взрыва могут напоминать ситуацию век назад, когда классическая физика подошла к своему концу.

Прежде чем говорить о расширении пространства, сначала необходимо знать, что такое само пространство. Является ли оно соотношением между телами или это может быть вид субстанции? Этот фундаментальный открытый вопрос физики обсуждал Анри Пуанкаре, который в своих книгах *Наука и Гипотеза* и *Наука и Метод* анализировал связь между геометрией и экспериментальной физикой. Эксперименты сконцентрированы на телах, а не на пространстве. Нельзя передвинуть кусок пространства или сравнить его с другой частью пространства. Можно только двигать и сравнивать друг с другом тела. Размер тела всегда измеряется относительно материального метрового стержня – единицы измерения.

Чтобы проиллюстрировать относительность пространства, Пуанкаре дает некий вариант *Метаморфоз* Кафки: Предположим, что за ночь все размеры вселенной увеличились в тысячу раз. Когда я открою утром глаза, что я почувствую? Удивительно, но ничего. Моя кровать увеличилась во столько же раз, как и мое тело, и в целом все измерения размера дают точно тот же результат, как и раньше: метровый стержень увеличился бы на ту же величину. Урок состоит в том, что можно измерить расширение, только если существует единица длины, которая не меняется. Строго говоря, пример Пуанкаре нужно дополнить утверждением о соответственном поведении других физических величин, таких как масса, электрический заряд и скорость света. Чтобы расширение осталось незамеченным, эти константы должны измениться соответственно.

Так как космологическое красное смещение наводит на мысль, что мы можем измерить расширение пространства, то что тогда не меняется в нашем мире? Эддингтон писал в своей книге *Расширяющаяся Вселенная*, что такие неизменные вещи существуют в виде метрового стержня, Земли и нашей Солнечной Системы. «...расширяются только межгалактические расстояния. Сами галактики остаются нетронутыми; и все более мелкие системы – звездные скопления, звезды, люди-наблюдатели и их аппаратура, атомы – полностью свободны от расширения». Позже к этому списку были добавлены галактические скопления. Существование такой цепочки жестких объектов обычно приписывается связывающим силам, обусловленным электричеством или гравитацией.

Мы научились рассматривать расширение пространства по знакомой аналогии с раздувающимся шаром. Точки, нарисованные на

шаре, удаляются друг от друга, следуя закону Хаббла, и поверхность (пространство) при расширении увеличивается. Можно говорить также о «разбухающем пространстве», имея в виду аналогию с поднимающимся пирогом.

Однако если мы хотим понять расширение пространства более глубоко, эти аналогии могут не оправдаться. Разбухающее пространство может вызвать заблуждение, что само пространство как-то течет – нельзя передвинуть кусок пространства, как сказал Пуанкаре. А в надуваемом шаре рост поверхности происходит за счет утончения оболочки. Но внутри самого пространства нет такого запаса лишнего пространства: говорить, что пространство расширяется – это то же, что говорить, что пространство рождается. К пространству внутри радиуса Хаббла каждую секунду добавляется объем порядка объема нашей Локальной группы галактик. Непрерывное рождение пространства – это почти метафора, а термин «рождение пространства» иногда считают плохим способом говорить о расширении пространства. По нашему мнению, он помогает понять некоторые важные свойства расширяющегося пространства.

Рассмотрим старую добрую резиновую сферу, но теперь вместе с приклеенными к ней монетками. Жесткие монеты отмечают те места во вселенной, где нет расширения пространства. Между монетками на сфере в мире закона Хаббла существует физическое явление увеличения объема, неважно, какое слово употребляется – «расширение» или «рождение». Если расстояние между двумя галактиками увеличивается, но эти галактики не движутся *внутри* пространства, тогда естественно понимать, что пространство появляется в области между ними.

Метафора творения пространства становится более вещественной, когда мы осознаем, что, согласно стандартной теории, пространство появляется вместе с реальной субстанцией, вакуумом, кипящим океаном частиц и античастиц. Кстати, это делает несколько более теплыми отношения между теорией большого взрыва и ее давним соперником – космологией стационарного состояния. Теперь процесс непрерывного рождения существует в обеих моделях. В космологии стационарного состояния вещество рождается вместе с пространством, сохраняя плотность вещества постоянной, тогда как в теории большого взрыва непрерывно рождается вакуум.

13.13. Практическая космология: на пути к четвертой научной картине мира

Говорят, что Евклид жил в Александрии, при дворе короля Птолемея I, которого учил математике, возможно, после того, как сам обучался философии Платона в Афинах. Предполагают, что это он заметил королю, что в геометрии нет королевской дороги. Как мало известно о его личной жизни! Но его всегда будут помнить за его книгу *Элементы*, которая, как говорят, является самой копируемой и изучаемой книгой после Библии. (В настоящее время утверждают, что популярность Евклидовых треугольников была превзойдена некими кольцами, о которых написал проф. Толкиен.). Евклид собрал все геометрические знания своего времени и представил это в виде аксиом, известных как Евклидова геометрия. Она все еще служит прекрасной моделью аксиоматической системы, в которой из основных базовых предпосылок можно вывести богатый набор результатов.

Астрономы измеряют расстояния до галактик, используя знакомое правило: далекая галактика выглядит меньше, чем ее близкий двойник. Или же, чтобы получить расстояние, они измеряют поток света и используют правило I/R^2 . (Евклид упоминает, что из двух равных сегментов тот, который находится дальше, дает меньший угол. Кажется, Кеплер первым указал, что поток света, распространяющийся во всех направлениях от (точечного) источника, убывает согласно закону обратного квадрата.) В пределах примерно 100 Мпк оба вида измерений приводят к идентичным результатам, что ожидается, если евклидова геометрия верна. Например, значение константы Хаббла одинаково по индикаторам расстояния на основе углового размера и потока.

Но что имеется в виду под «расстоянием» вообще? Простой ответ состоит в том, что расстояние между двумя телами – это длина веревки, натянутой между ними, измеренной единичным стержнем. В действительности, это то, что называется *метрическим расстоянием* в геометрии, которое является также фундаментальным расстоянием в наших космологических моделях, основанных на жестких метровых стержнях. Однако такое измерение ленточкой непрактично для больших расстояний даже на Земле. Другие способы измерения расстояний порождают другие понятия расстояний.

Мы упоминали о двух популярных рабочих лошадках астронома: *расстоянии по угловому размеру* и *расстоянии по потоку*. В

*Евклид
ок. 300 г.
до н.э.*

прозрачном евклидовом пространстве расстояния по угловому размеру и по потоку равны, и, более того, они равны фундаментальному метрическому расстоянию. В неевклидовом пространстве все эти расстояния могут отличаться. Космолог пытается использовать эту разницу, чтобы, сравнивая разные расстояния, установить истинную геометрию.

Существует несколько способов, используемых в современной космологии для обнаружения кривизны пространства. В частности, классическими космологическими тестами являются:

- *Подсчет галактик*
- *Потоки и красные смещения стандартных свечей*
- *Угловые размеры и красные смещения стандартных стержней*

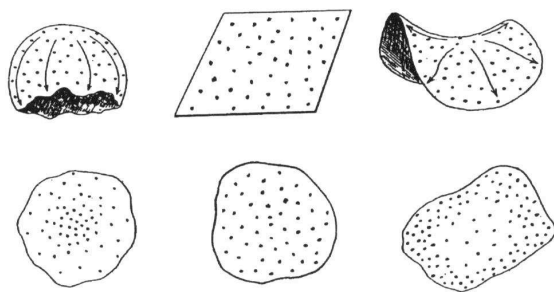


Рис. 13.10. Подсчет галактик в сферическом (слева), евклидовом и гиперболическом (справа) пространствах. По сравнению с евклидовым пространством, в сферическом пространстве число галактик на больших расстояниях меньше, тогда как у гиперболического пространства больше объема для далеких галактик.

Всем известно, что в евклидовом пространстве объем вокруг наблюдателя возрастает пропорционально кубу расстояния. Когда пространство неевклидово, это не так. В сферическом пространстве объем возрастает медленнее, а в гиперболическом быстрее. Тогда правильную геометрию можно определить простым подсчетом галактик до разных расстояний.

Однако на практике эту идею применить нелегко, поскольку астрономам не известно расстояние до всех галактик. А если вместо расстояний использовать величины галактик, как впервые это сделал

Хаббл в 1930-ых годах, то тест по подсчету серьезно осложняется неизвестной эволюцией светимости галактик. Это Ахиллесова пята этого теста. Кроме того, тест по подсчету верен, только если галактики заполняют пространство равномерно – предположение об этом является темой нашей книги.

В методах стандартных свечей и стержней пытаются посмотреть, как видимые величины и угловые размеры небесных тел зависят от расстояний до них (т.е. от красных смещений). Модели Фридмана предсказывают различное их поведение в разных искривленных пространствах. Мы уже встречались с наиболее успешным классом стандартных свечей для больших расстояний – сверхновыми типа Ia. Вместо того чтобы показать кривизну пространства, как ожидалось, они неожиданно добавили к модели Фридмана космологическую константу. Теперь геометрия пространства определяется суммой плотностей вещества и темной энергии, в то время как поведение видимой звездной величины зависит не от их суммы, а от двух типов плотностей отдельно. Это означает, что для измерения геометрии пространства понадобится несколько других тестов.

В нерасширяющемся евклидовом пространстве угловой размер стандартного стержня тем меньше, чем больше расстояние до него, что мы хорошо знаем из повседневной жизни. Но в моделях Фридмана происходит нечто драматическое. Как указал в 1959 году Фред Хойл, они предсказывают, что сначала угловой размер уменьшается до красного смещения примерно 1 (точное значение зависит от параметра плотности), а затем неожиданно начинает возрастать! Можно приближенно понять такое поведение, если вспомнить, что в то время, когда свет вышел из двух концов стандартного стержня, вселенная была меньше. Но сам стержень был того же размера, что и близкий стандарт. Следовательно, ему было нужно сравнительно больше пространства, и он кажется наблюдателю большим. Обратите внимание на предположение о жестком метровом стержне!

После того, как Хойл предложил этот тест, астрономы попытались измерить геометрию пространства по угловым размерам. В качестве многообещающих стандартных стержней рассматривались двойные радиоисточники вокруг радиогалактик и квазаров. При присущих им размерам, достигающих сотен килопарсек, двойные источники видны на небе под углом в десятки секунд дуги даже на красных смещениях, превышающих единицу. К замешательству астрономов, наблюдения вплоть до самых далеких двойных

источников показывают непрерывное уменьшение углового размера и отсутствие загиба вверх на больших красных смещениях. Чтобы понять такое поведение стандартного стержня в рамках фридмановских моделей, приходится думать об эволюции и других эффектах, которые делали бы двойные источники меньше в прошлом. Нельзя просто измерить кривизну, несмотря на то, что в руках есть вполне приемлемый стандартный стержень.

Другой тип стандарта длины предложил в 1993 году Кеннет Келлерман (Kenneth Kellerman), который использовал длину струйных выбросов в самых центрах радиогалактик и квазаров. Однако результат остается недостоверным, поскольку видимость внутренней компоненты зависит от многих технических параметров.

Фоновое космическое излучение имеет замечательные свойства, которые обеспечивают новые типы космологических («пост-классических») тестов. Примером является простая зависимость его

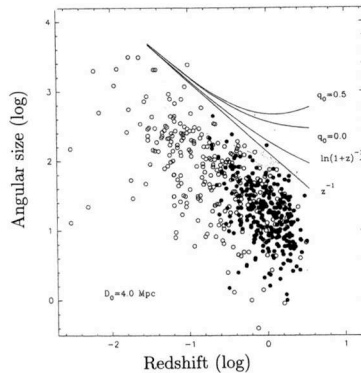


Рис. 13.11. Зависимость углового размера двойных радиоисточников от красного смещения для радиогалактик (кружки) и квазаров (точки). Эти данные не показывают ожидаемого минимума в угловом размере около красного смещения 1 (т.е. при $\log z \approx 0$). Диаграмма выполнена К. Нилссоном.

температуры от красного смещения в виде $T = T_0 (1 + Z)$, предсказанная космологией большого взрыва, и предлагающая прямую проверку остывания вселенной. Для измерения космической температуры использовались атомы в далеких газовых облаках. Например, на красном смещении 2 показание термометра оказалось около 9 градусов Кельвина, что согласуется с предсказанным нагревом. Температуру можно измерить точно, но проблема состоит в том, как учитывать холодную пыль, которая обычно сопровождает газ

и имеет температуру, сравнимую с температурой космического фона.

В настоящее время чувствительность и угловое разрешение радиоастрономической аппаратуры достигли такой точности, что для проверки геометрии можно использовать измерения маленьких участков неба с немного различающимися температурами. Продолжительные баллонные эксперименты Boomerang и Maxima, а также наземные интерферометрические наблюдения на DASI определили типичный размер пятен – около одного градуса в поперечнике (примерно размер двух полных лун). Этот результат был подтвержден данными со спутника WMAP.

В рамках космологии большого взрыва такой угловой размер жестко связан с параметром полной плотности вселенной. Размер в один градус приводит к $\Omega = 1.01 \pm 0.02$. В Фридмановских моделях параметр плотности, равный единице, означает, что кривизна расширяющегося пространства в точности равна нулю. Точность в 2 % озна-

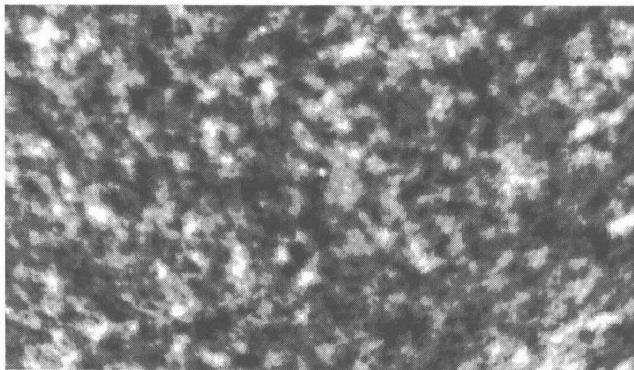


Рис. 13.12. Карта мелких температурных флуктуаций фонового космического излучения, измеренная в эксперименте Boomerang внутри области на небе размером 10×20 градусов. Из типичного углового размера этих структур, который равен 1 градусу, можно вывести, что кривизна пространства вселенной равна нулю!

чает, что давняя мечта измерить кривизну пространства воплотилась в реальность. А результат волнующий: Евклид вернулся!

Есть история, может быть даже правдивая, что Ньютон смеялся только раз в жизни, и вроде бы это случилось, когда кто-то его спросил, не устарела ли уже евклидова геометрия. Почему-то нам сейчас вспомнился этот анекдот... Однако для того, чтобы иметь уверенность, что космологическое послание было надежно извлечено из наблюдаемого излучения, нужны дальнейшие исследования

мешающей пыли и открытых недавно многочисленных далеких галактик, излучающих субмиллиметровые радиоволны.

Вселенная большого взрыва – это следующий большой шаг после ньютоновского видения, охватывавшего весь космос. Подводя итог вышесказанному, можно констатировать, что новая космологическая картина вселенной опять скрывает загадки и приводящие в недоумение парадоксы:

- *сингулярность,*
- *непрерывное рождение вакуума и энергии,*
- *общее космическое время для удаляющихся наблюдателей,*
- *выделенное состояние покоя относительно космического излучения,*
- *сверхсветовая скорость удаления галактик,*
- *охлаждение газа расширением пространства,*
- *ньютоновское уравнение динамики расширения,*
- *евклидова геометрия расширяющегося пространства,*
- *природа скрытой небарионной материи,*
- *природа космологической постоянной.*

Неизбежное существование сингулярности во вселенной большого взрыва является большой загадкой. Физический закон геометрической гравитации предсказывает сингулярность – конец всех физических законов. Может быть, это лучшее указание на то, что нужна квантовая теория гравитации, прежде чем делать странные экстраполяции в сингулярность и далее.

Непрерывное рождение вакуума и энергии – это парадоксальное следствие однородной расширяющейся вселенной. Сталкиваемся ли мы здесь, как и в случае квантово-механической небулярной частицы, с радикально новой физикой, новой концепцией энергии?

Общее космическое время для наблюдателей, удаляющихся друг от друга, также выглядит парадоксальным, поскольку в лабораторной физике у движущихся наблюдателей разное наблюдательное время, а главным принципом теории относительности является то, что не существует универсального абсолютного времени. Но для вселенной в целом существует род выделенного времени. По словам космолога Майкла Роуэн-Робинсона (Michael Rowan-Robinson), время в современной космологии напоминает абсолютное время, которое рассматривал Аристотель! И которое, конечно же, лежало в основе классической физики.

Связанную с этим загадочную вещь, касающуюся пространства, подчеркнул недавно Раймо Лехти (Raimo Lehti): если можно указать на какое-то одно время, как на выделенное, тогда должно быть и какое-то выделенное пространство, поскольку пространство и время объединены в релятивистское пространство-время. Действительно, космическое излучение, заполняющее пространство, дает возможность определить выделенное состояние покоя для наблюдателя. Похоже, что, несмотря на принцип относительности, который прекрасно согласуется со всем, что физик наблюдает в своей лаборатории, вселенная была структурирована так, что существует пространство, относительно которого можно измерить нашу скорость, равную примерно 400 км/сек. Но можно также возразить, что это наша скорость относительно материальной компоненты нашей вселенной, относительно электронов, которые рассеяли фотоны в нашу сторону до того, как они соединились с протонами через примерно 300 000 лет после большого взрыва.

Во вселенной Фридмана динамика расширения подчиняется релятивистскому уравнению, в котором ускорение равно GM/R^2 . Это неожиданно, поскольку уравнение в точности то же самое, как в теории Ньютона, которая верна только локально и в ограниченных условиях. Хотя здесь масса включает в себя вклад от давления, это не меняет ньютоновских свойств уравнения. Например, релятивистская формула для скорости расширения $V_{exp} = HR$ является точным решением для классического расширяющегося облака пыли. Таким образом, для скорости удаления галактик не существует ограничений, таких как скорость света. Прочитируем Эдварда Харрисона: «Во всех своих приложениях ньютоновская теория верна только приблизительно, но как раз в этом, самом невероятном из всех случаев, она дает правильный ответ».

Космологические тесты выявили, что кривизна пространства равна нулю с точностью до 2%. Если этот результат сохранится, то это означает, что пространственная геометрия вселенной в любое космическое время очень близка к евклидовой. Это неожиданно после стольких лет поиска *искривленного* пространства, хотя инфляционная модель подготовила нас к возврату Евклида. Но нужно отметить, что плоское пространство фридмановской вселенной не совсем то же самое, что классическое евклидово пространство. Хотя моментальные снимки этого пространства в любой космический момент делают его похожим на евклидово, это все-таки динамическое расширяющееся пространство, тесно связанное с плотностью вещества и энергии. И,

конечно, вселенная не является объектом классической физики, даже если круг кажется замкнутым, когда мы встречаемся с чем-то вроде «абсолютного времени», «абсолютного пространства» и «скоростями, превышающими скорость света», но теперь это более высокий уровень реальности.

В основании однородной модели мира скрыты интригующие концептуальные загадки. Более того, эта модель не может существовать без вещей совершенно неизвестной природы – темного вещества и темной материи, которые определяют судьбу вселенной. Ясно, что космология, основанная на принципе однородности, еще далека от окончательной картины, в которой единственной интересной задачей является настройка значений космологических параметров. В противоположность такому образу мыслей, будоражит то, что современные наблюдения обнаруживают сильные неоднородности в пространственном распределении галактик, что сгущает тучи над однородной моделью мира, упрощающей реальность.

Глава 14

Космологические принципы в современных моделях мира

14.1. Три кита космологии

Просматривая популярные книги и энциклопедии, можно найти много разных определений космологии, от таких, как «...миф или система верований для объяснения функционирования природы...» до «совокупность всех ответов, которые мы нашли до настоящего времени». Для астронома космология – это нечто более конкретное. Астрономия изучает небесные тела. Космология пытается нарисовать картину, содержащую все в мире, даже те области, которые мы никогда не сможем наблюдать. Ее предмет – вся вселенная – является без преувеличения необыкновенным объектом.

Исследование реальности меняет наше отношение к космологии. Через тысячу, даже через сто лет космологи, возможно, будут обсуждать темы, очень отличающиеся от наших. Но, может быть, все еще будет верным определение из Новой Британской Энциклопедии: «в астрономии, космос, вся физическая вселенная, состоящая из всех объектов или явлений, наблюдаемых или постулируемых». Цель космологии – найти теорию, объясняющую и связывающую наблюдения, которые считаются относящимися к космологии.

Наука о вселенной покоится на трех «Китах» космологии: Принципе, Наблюдении и Теории. Они символизируют три связанные стороны любой попытки построить картину крупномасштабного мира.

Принцип является для космологов фундаментальным предположением. Возможно, самый общий принцип со времен Джордано Бруно состоит в том, что физические законы, найденные на Земле, верны везде. Некоторые принципы могут прятаться в тени и даже не считаться таковыми, вроде смелого предположения, что космология вообще возможна. Некоторые предположения редко произносятся вслух, такие, как убеждение, что обычная аналитическая математика адекватно описывает реальность. Некоторые принципы

имеют особый статус: чтобы связать известное и неизвестное приходится постулировать нечто, называемое космологическим принципом, который как бы расширяет наши знания на области, из которых мы никогда не сможем получить информацию. В настоящее время космологи строят свою работу на принципе однородности Эйнштейна. Начал также вызывать интерес космологический принцип фрактальности Мандельброта. Вселенная, основанная на фрактальности, вовсе не является «беспринципной», в чем ее иногда обвиняют сторонники однородности. Фрактальность означает порядок в хаосе, который одинаков для всех наблюдателей, и, значит, верен принцип Коперника.

Наблюдение, или эмпирический факт, может происходить из простого визуального изучения нашего окружения или из изощренных методов, используемых ныне астрономами. Наблюдение чрезвычайно важно – ученый может строить элегантные теории вселенной в уединенном кабинете, но только сравнение с природой оценит их истинность. Принципы и теории не могут жить настоящей жизнью без наблюдений. Что бы мы сейчас делали без галактической вселенной, закона Хаббла и 3-градусного космического излучения? При всем нашем уважении к принципам и теориям как составной части нашей науки, нам не следует забывать хороший совет Томаса Диггеса из эпохи Возрождения, когда возникла новая космология: вместо того, чтобы продвигаться в обратном порядке и от теорий стремиться к истинным наблюдениям, следует исходить из наблюдений, а затем проверять теории.

Теория – это физика, изученная в лабораториях и расширенная с помощью принципов на космический мир. Интересно отметить, что слово «теория» уходит корнями в греческое «*theoros*», происходящее от *theos* (Бог) и *oraō* (смотреть, следить). Можно считать, что теория – это попытка увидеть Бога в Его Творении. В космологии теории и модели подобны мысленным антеннам, которые человек направляет в области, никогда не достижимые даже на самых больших телескопах. Однако это ни в коем случае не простой полет фантазии – они должны правильно описывать наблюдаемую часть вселенной. Космологические модели основаны на классических, релятивистских и квантовых законах современной физики. Модели как математические конструкции описывают идеальный мир, представляемый на основе принципов, следуя мечте Пифагора, который очертил первый круг для планет. В обычном научном духе моделям противостоит другая сторона реальности – наблюдения. Как гласит древний Римский Закон:

Audiatur et altera pars или «Нужно выслушать обе стороны». Проверка предсказанного моделями есть насыщенный хлеб космологов.

14.2. Лестница ключевых открытий в наблюдательной космологии

Астрономические наблюдения исполняют в космологической физике роль эксперимента. Три фундаментальных эмпирических факта особенно важны как ступени лестницы ключевых космологических открытий, по которым поднималось человечество:

- *Линейный закон «красное смещение – расстояние»*
- *Чернотельное космическое 3-градусное излучение*
- *Фрактальная структура распределения галактик*

Потребовалось три поколения астрономов, чтобы довести эти неожиданные аспекты вселенной до нашего сознания. Закон красных смещений был открыт в 1929 году; тепловой океан фотонов был обнаружен в 1965 году; и, наконец, на грани нового века была открыта фрактальность.

Закон космологического красного смещения был первым великим открытием внегалактической астрономии. Огромное большинство астрономов приняло расширение пространства как естественную интерпретацию закона Хаббла. Эта точка зрения, основанная на многих косвенных доказательствах, является веской частью современной космологической парадигмы. Алан Сэндидж, несмотря на трудные вопросы об эволюции и селекционных эффектах, продемонстрировал, что поверхностная яркость галактик с большим красным смещением согласуется с предсказанием расширения вселенной. Величина обсуждаемой постоянной Хаббла теперь находится в пределах 50-70.

Фоновое космическое излучение было следующей ступенью на лестнице ключевых открытий. В 1978 году оно принесло Нобелевскую премию Арно Пензиасу и Роберту Вильсону, поскольку имеет исключительное значение для космологии и физики. В космологии самым точным измерением является измерение температуры космического излучения. Похоже, что глубже в пространстве (т.е. в более ранние эпохи) температура становится больше, как это и ожидается для модели большого взрыва. Наблюдения флуктуаций фонового излучения говорят в пользу вселенной с нулевой кривизной.

<i>Результаты космологии XX века</i>		
Явление	Наблюдения	Выводы
Закон Хаббла	Локальная галактическая вселенная Промежуточная вселенная Сверхновые типа Ia	$H_0 = 50 - 70$ $\Omega_\Lambda \approx 0.7, \quad \Omega_m \approx 0.3$ $T_0 \approx 16 \times 10^9$ лет
Фоновое космическое микроволновое излучение	Температура черного тела на разных красных смещениях Анизотропное распределение	$T(0) = 2.725 \pm 0.001$ К $T(z=2) \approx 9$ К $\Omega_{\text{total}} = 1.01 \pm 0.02$
Трехмерное распределение галактик	Обзоры красных смещений	$R_{\text{max}} \approx 100$ Мpc $D = 1.8 - 2.2$

Третье важное открытие – это фрактальное пространственное распределение галактик, обнаруженное с помощью первого открытия – закона Хаббла. Галактики кластеризованы в широком диапазоне масштабов, скопления показывают самоподобие, для которого требуется математика фрактальной геометрии.

Конечно, многие другие наблюдательные факты тоже важны для космологии, например, химический состав видимого вещества, эволюция галактик за космическое время, а также столкновения и слияния галактик. Мегафракталы – космические континенты, архипелаги и острова – были экзотической, но, тем не менее, правдивой новостью о чужеземных мирах, которую привезли домой современные исследователи космоса. Хотя их фрактальная размерность и максимальный масштаб все еще обсуждаются, мегафракталы требуют объяснения. Их происхождение является вопросом номер один для космологической физики.

Так как самые большие из известных структур приближаются к масштабу всей наблюдаемой вселенной, фрактальная геометрия становится естественной частью современной космологии. Это приводит нас к вопросу о том, как построены космологические модели и из каких строительных кирпичей? Какие модели согласуются с мегафракталами? Как возникают и эволюционируют фрактальные структуры? Что они в действительности говорят нам о нашей вселенной, загадочном единстве пространства, времени и материи?

университетах, и на которых ученые основывают свою работу. Парадигма может рухнуть, если новые наблюдения или теории отрицают ее основы, и ее может сменить новая парадигма, которая затем направляет и вдохновляет научную работу следующих поколений. Именно так наука движется вперед, как сказал Кун. Подобное произошло с геоцентрической системой Птолемея, когда коперниковская революция превратила вселенную с уникальным центром в наше современное жилище без выделенного места.

Помимо резких скачков, в эволюции науки бывают и более мирные периоды. Научное наследие прошлого постоянно растет. Старые теории не исчезают бесследно, но могут найти свое истинное место. Например, ньютоновская теория гравитации остается прекрасным инструментом в современной астрономии. Релятивистская гравитация показывает, где нужно перестать опираться на законы Ньютона.

Современная космология пытается ответить на несколько принципиальных вопросов:

- *Какова геометрия пространства-времени?*
- *Что такое гравитация?*
- *Как вещество распределено в пространстве?*
- *Какова природа космологического красного смещения?*
- *Что означает тепловое фоновое излучение?*
- *Что определяет стрелу времени?*

Ответы на эти вопросы являются строительными кирпичиками, из которых космологи строят свои «воздушные замки». У модели большого взрыва свой особый рецепт. Общая теория относительности – это теория гравитации, применимая ко всей вселенной. Вещество во всех его формах рассеяно в пространстве равномерно. Закон Хаббла появляется на масштабах, где существует однородное распределение вещества. Космическое излучение возникло в ходе горячего начала, до рождения звезд. Вселенная эволюционирует в ходе расширения пространства.

В полевом подходе к теории гравитации тоже своя космология. Будущие наблюдения гравитационных волн и компактных релятивистских объектов покажут, насколько глубоко можно вовлекать в космологию эту альтернативу общей теории относительности. В данное время можно только поразмышлять о некоторых интересных вопросах. Например, если рассмотреть фрактальные структуры с $D = 2$, то плотность энергии

гравитационного поля (виртуальные гравитоны), вызывающего силу гравитации, будет распределена равномерно, как газ в состоянии равновесия. Действительно, плотность энергии гравитационного поля задается формулой $\epsilon = 1/8\pi G (\nabla\phi)^2$, и в случае структуры с фрактальной размерностью $D = 2$, где $\phi \sim R$, следует, что $\epsilon = \text{constant}$. Таким образом можно понять, почему самогравитирующий газ стремится к распределению с $D \approx 2$. Следует подчеркнуть, что такая аналогия возможна только в теории, где существует энергия гравитационного поля.

14.4. Многоликий Космологический Принцип

В начале нашей истории мы говорили о времени, когда греческие философы сформулировали первые древние принципы, которые, по их представлениям, управляют всей вселенной. Но следует также упомянуть космологические взгляды древней Индии, которые изучал Конрад Рудницкий. Индийская философия была погружена в поэзию, и науки в современном понимании не было. Устное обучение, берущее начало за несколько тысяч лет до н.э., предназначалось для того, чтобы его узнавали на опыте, а не анализировали логически. Рудницкий понял глубинную идею, которую он назвал *древним Индийским космологическим принципом: Вселенная бесконечна в пространстве и времени и бесконечно неоднородна*. Какова бы ни была истина обо всем мире, космология началась скорее с более простого понятия о регулярности и однородности, которое легче представить, в нем есть эстетика, и его можно трактовать математически.

Небесные сферы Платона – прототип регулярности – в современных терминах можно назвать *принципом локальной изотропии*, в котором изотропия означает отсутствие выделенного направления на небе. Фактически, сама сферичность Земли прекрасно подчиняется этому правилу. Строго говоря, Платону пришлось дополнить сферы принципом кругового движения, что определило выделенное направление – ось вращения. И конечно, у его вселенной было особое место, занимаемое Землей.

Понятие отсутствия выделенного места тоже идет из Античности. В качестве руководящего принципа космологии атомисты отстаивали, что «неважно, в каком месте вы находитесь». В 1440 году Николай Кузанский ясно выразил принцип, что «центр

езде». В следующем веке Коперник, изменив традиционную математическую модель мира, сдвинул центр вселенной с Земли на Солнце. Вскоре после этого Бруно решительно написал, что «во вселенной нет центра». Его учение включало в себя также универсальность земных законов.

Если под вращающимся звездным небом принять принцип изотропии было легко, то потребовалось намного больше времени и драматических событий в науке, чтобы принять понятие отсутствия центра. В ретроспективе мы можем видеть, что Космологический Принцип – это своего рода объединение старых принципов отсутствия центра и локальной изотропии. В ньютоновской космологии он принял статус математического принципа в форме однородного звездного распределения.

Новый лик Космологического Принципа раскрыл Хаббл после открытия галактик. В 1934 году в своей Галлеевской лекции в Оксфорде он предположил, что «наблюдаемая область является представительной выборкой, и что природу вселенной можно вывести по наблюдаемым характеристикам этой выборки». Эта гипотеза Хаббла о представительной выборке утверждает, что наблюдатель может найти достаточно большой локальный объем, который показывает глобальные свойства вселенной. Он обобщает «отсутствие центра» на все локальные свойства и включает в себя локальную изотропию как особое свойство.

В 1930-ые годы Милн сформулировал современную версию Космологического Принципа: *картина всего мира, которую видит один наблюдатель (прикрепленный к какой-то фундаментальной частице или галактике), похожа на картину мира, которую видит любой другой наблюдатель*. Это включает в себя физические законы: они повсюду одинаковы и дают одно и то же. Это предположение лежит в основе и практической космологии. Например, Лундмарк определил индикатор расстояния как группу космических объектов, имеющих одинаковые физические свойства в разных галактиках. Предполагается, что принцип однородности законов природы верен, когда мы переходим от одной галактики к другой. Теперь можно перефразировать Принцип Коперника, сформулированный Рудницким (гл.2): Вселенная, наблюдаемая из любой галактики, во многом выглядит так же.

Но почему мы интуитивно думаем, что вселенная выглядит одинаково во всех местах? Одной причиной является исторический опыт: один за другим мы проецировали предполагаемые центры

вселенной на Землю, на Солнце, на Млечный Путь. Природа будто бы намекает нам, что Она не нуждается в «месте, на котором стоять». Следовательно, отсутствие абсолютного пространства, времени и движения в современной физике тоже облегчает принятие этой идеи.

В последнее время также широко обсуждается Антропный Космологический Принцип, согласно которому Вселенная устроена так, чтобы в ней мог существовать человек. Об этом говорит удивительно тонкая настройка физических постоянных, значения которых не случайны, а «подобраны» так, что любое даже малое изменение их значений привело бы к невозможности органической жизни.

Более философски, в духе антропного принципа, возможно, для того, чтобы человек воспринимал вселенную, она действительно должна быть спроектирована согласно плану Мастера, определенному Космологическим Принципом. Возможно, Эйнштейн видел проблески этого, когда сказал: «Самое непостижимое во вселенной – это то, что она постижима». Вселенная, созданная случайным образом, была бы непостижимой неразберихой, и, более того, она была бы лишена Эйнштейна и нас. Только большому, упорядоченному и симметричному миру могла быть дарована жизнь. Но со своей стороны мы видим нашего неотделимого спутника – прекрасную и постижимую Вселенную, как потрясающий подарок, которого мы, похоже, не заслуживаем...

14.5. Совершенный космологический принцип Бонди-Голда-Хойла

Знаменитый давний соперник большого взрыва – теория стационарного состояния – тоже иллюстрирует, как в модели вселенной используются космологические строительные блоки. Космологию стационарного состояния, некоторые аспекты которой все еще вызывают острый интерес, придумали в 1948 году Герман Бонди (Hermann Bondi), Томас Голд (Thomas Gold) и Фрэд Хойл (Fred Hoyle), работавшие в университете Кембридж, в Англии. Их Совершенный Космологический Принцип гласит, что вселенная не только *однородна в пространстве*, но также *однородна во времени*, то есть имеет одинаковый вид во все времена.

Рецепт космологии стационарного состояния мало отличается от рецепта большого взрыва. Существенное отличие только в одном отношении: не принимается глобальная эволюция. Равномерное рас-

*Фрэд Хойл
1915-2001*



Рис. 14.2. Фред Хойл стоит перед массивными древними каменными кругами в Стоунхендже. Это место говорит об интересе к небесным вопросам тысячи лет назад. Фотография появилась в его автобиографической книге *Дом там, где дует ветер*.

пределение галактик всегда одинаково. Красное смещение вызвано расширением пространства. Теория гравитации является геометрической, это общая теория относительности, за исключением одного дополнительного эффекта. Это наличие «С-поля», которое обеспечивает постоянное рождение вещества, что сохраняет плотность постоянной, несмотря на расширение пространства. Этот процесс продолжается вечно. Скорость рождения вещества равна примерно 1 атом водорода на кубический метр каждые пять миллиардов лет. Хотя каждая звезда рано или поздно выгорает, вновь образуемые звезды (и галактики) постоянно заменяют тех, что умерли.

Так как плотность вещества остается постоянной, не существует ни начала, ни большого взрыва, ни первичных фотонов... Вместо этого считается, что источником космического излучения является энергия, выделяющаяся в ядерных реакциях внутри звезд. Энергия появляется на поверхности звезд в виде горячих (для нашего Солнца это 6000°K) фотонов, которые устремляются наружу и заполняют пространство. Фотоны должны преобразоваться в холодное микроволновое излучение с температурой около 3 градусов Кельвина. Было предположение, что эту задачу выполняют частицы холодной

пыли в межгалактическом пространстве. Пыль улавливает горячие фотоны и немного нагревается. Затем она излучает, как всякое нагретое тело, и имеет низкую температуру.

Открытие в 1965 году теплового космического излучения, столь естественного для горячего большого взрыва, сделало стационарное состояние невероятным для большинства астрономов. Несмотря на этот удар, развитие теории продолжалось. В 2000 году Фред Хойл, Джеффри Бербидж и Джайант Нарликар представили результаты своего длительного исследования в книге *Другой подход к космологии*. Новая модель квази-стационарного состояния допускает эволюцию в виде дискретных событий творения: вещество рождается в виде частиц Планка, которые разрушаются в огненных шарах в барионы. Говорят, что повторные огненные шары служат местом для нуклеосинтеза легких элементов. Однако жаль, что новая модель несколько потеряла элегантность первоначальной теории стационарного состояния, которая жила интересной, смелой жизнью среди враждебных наблюдательных фактов.

14.6. Космологический Принцип Эйнштейна

В 1917 году, когда Европа была охвачена пламенем войны и революции, родился принцип космической гармонии. 6 октября в Берлине, в Прусской Академии на легендарной улице Унтер-ден-Линден Эйнштейн представил свою историческую работу по космологии. Эйнштейн применил свою совершенно новую общую теорию относительности к космологической проблеме, т.е. к построению модели вселенной в целом. Не зная о галактиках, он представлял, что мир заполнен звездами, и доказывал, что они имеют естественное пространственное распределение, которое однородно: концентрация вещества вокруг любого выделенного центра должна со временем исчезнуть, и однородность должна распространиться по всей вселенной. Любопытно, что этот взгляд напоминает взгляд атомиста Эпикура, которой не мог принять мира стоиков, в котором был один большой остров вещества внутри бесконечной пустоты: «Если бы пространство было бесконечным, а число тел ограниченным, то они не могли бы оставаться в каком-то одном месте, но двигались бы в бесконечность; без какой-либо поддержки или движущей силы кроме столкновений, они бы рассеялись»

Позже, в дискуссии с Селети Эйнштейн отверг иерархическое распределение звезд. Одной из причин был выделенный центр, на который указывал Эйнштейн, а Селети с ним не соглашался (см. Гл.4).

Эйнштейн принял принцип отсутствия центра, постулировал однородное распределение вещества и привнес в космологию релятивистскую гравитацию. В результате получился мир с однородной геометрией. Еще раньше, вероятно, самый близкий шаг к однородности в распределении вещества и геометрии пространства сделал в 1900 году Карл Шварцшильд, который в своем обсуждении звездных параллаксов и кривизны пространства предполагал, что звезды распределены равномерно. Он сделал вывод, что радиус кривизны сферического пространства (если наше пространство таково) должен быть по крайней мере в 160 миллионов раз больше, чем расстояние от Земли до Солнца. В этом случае распределение наблюдаемых звездных параллаксов согласовывалось бы с однородно рассеянными звездами.

Кроме отсутствия центра, другим плюсом однородности было упрощение уравнений Эйнштейна, что позволило ему вывести статическую сферическую модель мира. Он сравнивал себя с геодезистом, который описывает среднюю форму Земли с помощью эллипсоида, хотя детали поверхности являются сложными (теперь мы знаем, что могут появиться фрактальные горы и береговые линии...). И, наконец, в 1922 году Фридман освободил вселенную из этого окостеневшего состояния, позволив однородно распределенному веществу и пространству расширяться.

Название «Космологический Принцип Эйнштейна» для гипотезы об однородности вселенной придумал Эдвард Милн, который в 1930-ые годы анализировал основы космологии. В те ранние годы современной космологии прямого наблюдательного доказательства однородности вселенной не было, и космологи руководствовались теоретическими рассуждениями.

14.7. Классический вывод однородности из локальной изотропии

В воздухе витала догадка, что должен быть способ доказать, что из изотропии, наблюдаемой в одном месте, вместе с принципом отсутствия центра, следует, что однородность существует везде. Интуитивно кажется, что если каждое место так же хорошо, как любое другое, тогда каждый наблюдатель во вселенной (не только мы) видит

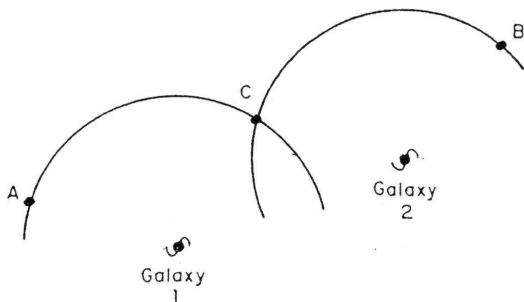


Рис. 14.3. Как связаны изотропия и однородность. Из изотропии вокруг каждой точки следует, что плотность на круге вокруг галактики 1 одинакова в каждой точке круга, и на круге вокруг галактики 2 плотность также постоянна. Поскольку круги имеют общую точку C, то плотность в действительности одинакова на обоих кругах. Таким же построением пересекающихся кругов можно показать, что в любой точке плотность одинакова, т.е. вещество распределено однородно. Существенным является предположение о гладком распределении плотности вокруг каждой точки.

изотропию, а этого не могло бы быть, если бы существовали крупномасштабные неоднородности. Действительно, в 1944 году британский математик Джеффри Уокер, который тесно сотрудничал с Милном, доказал эту гипотезу, начиная со своей гипотезы о локальной сферической симметрии, в которой предполагается, что изотропия существует локально вокруг каждой точки.

Простое рассуждение, приводящее к однородности, когда вокруг каждой точки существует изотропия, можно найти в книге Стивена Вайнберга *Первые Три Минуты*. На Рисунке 14.3 показано, как можно перейти из одной точки в другое произвольное место вдоль круговых дуг, на которых плотность сохраняется одинаковой. Следовательно, плотность одна и та же в каждой точке. Однако, строго говоря, этот вывод основан на скрытом математическом предположении о регулярности, т.е. о существовании гладкой плотности в каждой точке, и только тогда из левой части действительно следует вывод:

Изотропия + Отсутствие центра + Регулярность → Однородность

Здесь «изотропия плюс отсутствие центра» означает, что все точки эквивалентны, и вокруг каждой точки закон плотности не зависит от направления (хотя он может зависеть от расстояния до этой точки, доказательство показывает, что он не зависит!). «Регулярное»

распределение вещества описывается непрерывными гладкими математическими функциями. В главе «Упрощающие предположения космологии» своей книги *Введение в космологию* Джайант Нарликар явно ввел предположение о *гладкой жидкостной аппроксимации*, которая, по сути, означает переход от дискретного распределения частиц к непрерывному распределению плотности. Именно это мы называем «регулярностью». Оно означает, что можно использовать понятие плотности массы в каждой точке пространства, как в жидкости. В этом случае можно считать, что распределение точек содержит гладкий «сигнал», на который наложен дискретный «шум». Таким образом, именно объединение локальной изотропии, отсутствия центра и гладкости дает однородность – фундамент современных моделей мира.

14.8. Космологический принцип Мандельброта

Бенуа Мандельброт в своем рассказе о том, как он пришел к формулировке Космологического Принципа Фрактальности, писал, что фрактальную модель космоса в течение долгого периода не то что критиковали, но просто отбрасывали. Противопоставление однородной и фрактальной моделей Вселенной связано с длительной, хотя и столь же длительно подавляемой, оппозицией между идеями гладкости и иррегулярности.

В середине 1960-х годов в поле зрения Мандельброта попала статья Гамова, опубликованная в 1954 году в “Scientific American”, из которой он узнал о статье Шарлье об иерархической модели мира. Тогда Мандельброт сделал следующий шаг – кластеризация и иерархический вид больше не вводилась искусственно, но стали необходимым следствием стохастичности и масштабной инвариантности, т.е. фрактальности. Теперь условная стационарность, введенная им ранее при анализе случайных процессов, перешла в форму Условного Космологического Принципа. Слово «условный» означает, что этот принцип выполняется при условии, что наблюдатель принадлежит элементу структуры.

Точное описание фрактальных структур включает иррегулярные математические объекты. Поэтому в мире фракталов не всегда можно доверять выводам, основанным на обычных методах гладкой математики. Примером этого как раз и является приведенное

выше доказательство, что комбинация локальной изотропии и отсутствия центра означает однородное распределение вещества.

Посмотрим еще раз на Рис. 14.3 и сосредоточим внимание на пересечениях разных кругов. Обычно плотность в какой-то точке определяется как предельное значение массы, деленной на объем, когда мы допускаем, что объем стремиться к нулю. Но если плотность на круге нельзя определить таким гладким, жидкостно-подобным образом, то тогда нельзя приписать каждой точке значение плотности. Например, для фракталов такого предела не существует; вместо этого плотность, вычисленная внутри какого-то радиуса вокруг структурной точки, все время меняется от больших до произвольно малых объемов (хотя изменение подчиняется прекрасному степенному закону – признак фрактала). Следовательно, пересечение двух кругов может даже не содержать структурную точку!

Понятно, что доказательство однородности, основанное на том, что плотность вокруг всех точек гладкая, не всегда действует. Оно верно для регулярных распределений (и для дискретных), но не для фракталов. Именно гладкость стирает фрактальность. Таким образом, строго говоря, из локальной изотропии и принципа отсутствия центра вывести однородность нельзя. Но важно ли это на практике? Да, потому что это побуждает спросить, может ли наблюдаемая локальная изотропия, которую обычно считают признаком однородности, быть совместима с фрактальностью, которая по сути своей неоднородна, хотя в ней нет центра.

Внегалактические радиоисточники и источники рентгеновских лучей гладко заполняют небо. Эту изотропию часто интерпретируют как несовместимую с фрактальным пространственным распределением галактик, отмечая, что радио и рентгеновские источники – тоже галактики. Однако измерения красных смещений показали, что эти галактики обычно находятся на расстояниях тысяч или более мегапарсек, так что такой аргумент ничего не говорит о более локальной вселенной, на расстояниях $100 \div 500$ Мпк, где фрактальность является вопросом злободневным. Следовательно, как мы говорили выше, изотропия автоматически не означает однородность.

Как в общем случае выглядели бы фракталы при их проекции на небесный свод? На первый взгляд, можно было бы ожидать крупных пустот (войдов) и кластеров на небе, если фракталы существуют вплоть до очень далеких расстояний. Действительно, в 1970-ые годы первые примеры искусственных фрактальных

распределений в виде пыли Леви имели такие большие войды, что они не могли воспроизвести наблюдаемое распределение галактик. Эта неудача способствовала общему скептицизму по поводу применения фракталов в космологическом контексте. Те первые примеры были построены так, чтобы давать фрактальную размерность $D = 1.2$, а такая малая размерность сопровождается сильной концентрацией частиц в изолированных скоплениях.

Большая фрактальная размерность ($D \approx 2$), которая следует из современных наблюдений, дает менее выраженную кластеризацию. Более того, согласно теореме о проекции фракталов известно, что для фрактальных структур с размерностью $D \geq 2$ проекция на плоскость (или в астрономическом случае на небесную сферу) становится однородным (т.е. изотропным) распределением. Отсюда, в частности, следует, что из наблюдений только проекций на небесную сферу (как в ранних каталогах галактик) невозможно установить истинную фрактальную размерность пространственного распределения галактик. Именно это и произошло в 70-е годы, когда вывели $D=1.2$ из угловых каталогов галактик. Современные 3-мерные карты показывают, что фрактальная размерность пространственного распределения галактик лежит в интервале $2 \div 2.2$ и это согласуется с изотропией распределения галактик на небесной сфере.

Кроме того, теперь известно, что неоднородность проекции на небе зависит не только от фрактальной размерности, но и от так называемой *лакунарности*, которая является мерой того, как часто встречаются большие пустоты. Термин «лакунарность», придуманный Мандельбротом, происходит от латинского слова «лакуна», которое означает дыру. Численное моделирование показало, что фракталы с малой лакунарностью могут иметь на небе довольно гладкие проекции.

Еще одним фактором, сглаживающим пятнистость, является большая разница в светимостях небесных тел. В результате, два объекта с одинаковой видимой яркостью могут в действительности быть на очень разных расстояниях. Это перемешивание близких и далеких объектов скрывает кластеры и заполняет дыры, уменьшая небесную анизотропию для очень далеких радиоисточников. Конечно, только будущие трехмерные карты для этих объектов скажут, вызвана ли анизотропия реальной однородностью или фрактальностью с низкой лакунарностью на таких больших масштабах.

14.9. Космологические модели Эйнштейна-Мандельброта

Хорошо известно, что существуют подлинно однородные компоненты во вселенной: фотонный газ фонового космического излучения, океан маломассивных нейтрино и, что является, возможно, самым важным, физический вакуум или темная энергия. Так как средняя плотность фрактального вещества уменьшается с увеличением масштаба, то неизбежно будет масштаб, за которым плотность однородной компоненты будет больше, чем плотность фрактальной компоненты. Следовательно, можно считать, что, в конце концов, на таких масштабах вселенная однородна. Однако это вызвано не распределением галактик, а однородностью релятивистской компоненты вещества!

Что касается фрактального распределения галактик, то существуют две альтернативы – конечный и бесконечный диапазон фрактальности. Название «фрактальная вселенная» часто связывают с бесконечным фракталом. Такая вселенная имела бы нулевую среднюю плотность. Обратите внимание, что фрактал «асимптотически пуст». «Нулевая плотность» не означает «лишенный вещества». Полная масса идеальной бесконечной фрактальной вселенной бесконечно велика! Но распределение вещества таково, что все более крупные структуры «требуют» все больше и больше пространства, так что средняя плотность при вычислении на больших масштабах становится все меньше и меньше

Однако реальные физические объекты обычно имеют верхнюю и нижнюю границы, между которыми наблюдаются фрактальные свойства. Тогда можно ожидать, что фрактальное распределение галактик имеет ограниченную область масштабов. Например, оно становится однородным на каком-то максимальном масштабе R_{max} . Так, можно, как это сделал Мандельброт, допустить возможность, что распределение вещества может становиться однородным на больших масштабах, будучи фрактальным на более малых масштабах. У такой вселенной была бы ненулевая средняя плотность. Рассмотрим этот момент подробнее.

Для фрактальной структуры средняя плотность числа галактик внутри сферы вокруг любой галактики возрастает с увеличением радиуса в степени $D-3$. Если плотность становится постоянной за пределами сферы определенного размера, тогда фрактальное распределение превращается в однородность. Теперь

наблюдатель нашел максимальный масштаб фрактальности (верхний предел R_{max}), за которым мир в целом однороден ($D = 3$).

Можно представить себе такую ситуацию с помощью губки Менгера. Предположим, что исходный куб, из которого «вырезается» регулярная фрактальная структура, очень большой. Например, его размер может равняться 500 Мпк. В конструкции имеются более низкие уровни, которые описывают фрактальную кластеризацию галактик. Остановим построение на верхнем уровне. Представим, что такие кубические «губки» ставятся рядом друг с другом, так что они заполняют все бесконечное пространство. Тогда такая (довольно искусственная) вселенная была бы «супер-однородной» на масштабах, больше чем 500 Мпк, будучи фрактальной на более мелких масштабах.

Интересно, что Мандельброт около тридцати лет назад думал, что «наблюдения совместимы с некоторой кластеризацией далеко за пределами, предлагаемыми существующими моделями», и высказал гипотезу о том, что «распределение галактик и звезд включает область самоподобия, в которой фрактальная размерность удовлетворяет соотношению $0 < D < 3$ ». Выяснение этого вопроса является основным предметом современной внегалактической астрономии.

На каком расстоянии убывающая фрактальная плотность падает ниже постоянной плотности одной из однородных субстанций и как оно соотносится с верхним пределом R_{max} для фрактальных структур галактик? Космическое 3-градусное излучение является фотонным газом, который равномерно заполняет пространство. Его плотность равна примерно 10^{-33} г/см³. Физический вакуум – другая недавно предложенная однородная компонента – имеет плотность примерно в 10 000 раз выше. Чтобы вычислить расстояния равных плотностей, нужно знать, сколько темного вещества содержится в галактиках, и какова фрактальная размерность. Современные, пока еще скудные, знания о разных типах космического темного вещества допускают различные расстояния, от которых начинается однородность. Например, если будет подтверждено, что плотность вакуума действительно близка к критической, тогда вселенная может стать однородной всего через несколько мегапарсек, задолго до возможного перехода галактических фракталов в однородное распределение вещества.

По нашему мнению, восхитительно, что в современных космологических моделях есть место и для однородности, и для фрактальности. Интуиция Эйнштейна и Мандельброта открыли оба фундаментальных свойства вселенной.

ЭПИЛОГ

Гармония науки и веры

Наука и вера: враги или друзья?

Как показывает история, в вопросах глобального устройства Вселенной всегда тесно переплетаются наука, философия, религия, и политика. Поэтому анализ развития научной картины мира будет не полным, если мы обойдем молчанием проблемы взаимоотношения науки и истины, интеллекта и нравственности, веры и религии, мудрости и знания, Бога и человека, вокруг которых в современном научно-техническом мире разворачивается особенно острая дискуссия.

Вот два примера диаметрально противоположных мнений о науке и вере, которые можно считать характерными для конца XX века. Для определенности будем использовать недавние статьи на эту тему выдающегося физика лауреата Нобелевской премии академика РАН В.Л.Гинзбурга, представляющего атеистическую точку зрения.

Согласно взгляду «просвещенного гуманизма», наука связывается с прогрессом человечества, триумфом человеческого разума в познании и преобразовании природы. Чем больше развивается наука, тем меньше остается места на земле для Бога, чем выше уровень образования человека, тем меньше вероятность того, что он будет верить в Бога. Вера в Бога, который управляет вселенной и каждой деталью жизни человека, вера в продолжение жизни души после смерти человека, вера в святость Библии, – все это признаки отсталости и необразованности человека. Такая вера является тормозом на пути развития человечества, так что в будущем просвещенном обществе не будет места вере в Бога и религии.

Противоположная точка зрения на науку и веру лучше всего выражена словами папы Иоанна-Павла II в энциклике «Вера и разум» 1998 года. Вера и разум подобны двум крылам, на которых дух человеческий возносится к созерцанию истины. Бог заложил в сердце человека желание к познанию истины и этим объясняется стремление человека к научному знанию. Однако, чтобы достичь полноты познания истины о человеке и окружающем его мире, необходимо кроме разума еще и откровение от Бога, которое помогает преодолеть ограниченность человека.

Последователи просвещенного гуманизма задают важные вопросы: Что такое откровение? Как вера в Бога может помочь в

познании истины? Куда деваются чудеса в науке? Почему религия противостояла развитию науки? Почему в современном мире религия подстраивается под достижения науки? Не доказывает ли это, что истиной владеет именно наука?

Чтобы ответить на эти вопросы необходимо прежде всего уточнить что мы понимаем под словами наука, вера, религия, истина, вселенная, и Бог. Только освободившись от искаженных представлений как о науке, так и о вере, можно увидеть удивительную перспективу их взаимодействия, дающую не только полноту познания мира, но и мудрость в принятии решений в любых жизненных обстоятельствах.

Зависит ли вера в Бога от уровня образования?

Известный научно-популярный журнал “Physics World” (декабрь 1999г.) провел опрос среди случайной представительной выборки американских ученых. Вопрос был: верят ли они в Бога и продолжение жизни после смерти. Оказалось, что 40% ученых ответили «да», причем это число совпало с результатами аналогичных опросов, проведенных в 1914 и 1933 годах. А ведь именно в течение XX века такие науки, как физика и биология, развивались особенно быстро.

Таким образом, результаты опросов демонстрируют, что вера в Бога среди ученых и среди остальных людей распространена примерно одинаково, т.е. не зависит от уровня образования человека, а зависит от решения его сердца. Свобода воли человека – это тот привратник души, который решает открывать или нет сердце Богу, а Господь говорит «вот стою и стучу».

Важно и то, что даты опросов перекрывают интервал времени, когда наука открывала внегалактический мир, теорию относительности, квантовую механику, структуру генов. На процентное отношение верующих среди специалистов, ученых это не повлияло, значит, конкретный уровень развития науки в каждый данный момент не влияет на то, обращается человек к Богу или нет.

Хотя вера в Бога не может быть основана на мнениях людей, даже выдающихся, это решение каждый человек принимает самостоятельно, все же приведем некоторые конкретные примеры верующих ученых, так как эту тему часто обсуждают.

Прежде всего, отметим, что на страницах этой книги мы встречали много примеров того, как развитие научной картины мира

осуществлялось верующими учеными. Николай Кузанский, Николай Коперник, Джордано Бруно, Галилео Галилей, Исаак Ньютон, Жорж Леметр, Альберт Эйнштейн являлись одновременно и выдающимися учеными и верующими людьми, знающими и изучающими Библию. Таким образом, основоположники современного естествознания успешно совмещали научную работу с верой в Бога, они познавали как природу, творение Божие, так и Бога, Творца вселенной.

Религия и вера.

Часто в атеистической литературе имена Бруно и Галилея приводятся в качестве примера конфликта науки и религии, как жертвы инквизиции и гонений ученых в средние века. Прежде всего, нужно различать религию, как социальный институт, и веру, как реальное общение с Богом. Религия – это произведение рук человеческих, инструмент духовной власти, инструмент принуждения. Инквизиция, как одно из проявлений религии, занималась направленным уничтожением истинно верующих людей, тысячи христиан были замучены и сожжены на кострах, например, за чтение Библии. Только официальные служители церкви могли читать Библию. То, что сейчас Библия так свободно распространяется во всем мире – это результат борьбы с религией, то, что сделано вопреки религии. Сожжение на костре Джордано Бруно в 1600 году и суд инквизиции над Галилеем в 1632 году – это не противоречие науки и веры, а пример конфликта науки и религии.

Почти через четыреста лет папа Иоанн-Павел II публично признал ошибку церкви. Причина ее в том, что ограниченную научную теорию, систему мира Птолемея, приняли за догму и придали ей статус окончательной истины: если ты против того, что Земля покоится, то ты против религии, против Бога.

Относительно религии в Библии сказано, что Иисус Христос учил слушать фарисеев и книжников, когда они учат Библии, но не делать того зла, которое они делают в жизни. Нужно следовать Слову Бога, которое воплощено в Его Сыне. Иисус Христос говорил, что религиозные лидеры взяли ключи от истины, но сами не вошли и другим не дали. Не раскрыли истину о прямом общении каждого человека с Богом. Истинная вера – она именно живая, и Бог это не какое-то абстрактное существо, которое недоступно и безразлично к тебе, а это реальный Творец вселенной, и, в то же время, любящий

тебя Отец, соединивший Себя с человеком через Сына с помощью Духа Святого.

Разделение на конфессии – один из примеров действия религии, человеческого вклада в отношения с Богом, тогда как Вера – это прямое общение с Богом без посредников. Религия опирается на традиции, предписания и правила поведения, выполняя которые люди угождают Богу. Вера же, открытая через Слово Божие, есть Рука Бога, протянутая человеку, сила добра, действующая изнутри и направляющая человека.

Читая книгу пророка Исаяи или книгу Притчей Соломоновых, убеждаешься, что это гимн рассудительному знанию и мудрости. Человек получает наслаждение от занятия наукой. Почему интересно заниматься наукой? Потому, что открывается глубина Мудрости Творца, которая становится доступной даже ограниченному разуму человека. Ньютон был выдающимся математиком и физиком, но половина его трудов посвящена изучению Библии. Он был выдающимся теологом и написал на эту тему много книг, например, комментарии к «Откровению Иоанна Богослова». Основатель современной научной картины мира Эйнштейн тоже был верующим ученым, ему принадлежат слова: «наука без веры хрома, а вера без науки слепа».

В эпоху Возрождения произошло два великих прорыва в познании природы и Бога. Начало современного естествознания было заложено в открытии Галилеем экспериментального подхода в физике. В это же время Библия впервые переводится на языки, доступные многим людям для чтения и изучения. Именно тогда появилось представление о том, что Бог оставил людям две книги. Книга природы написана, по выражению Галилея, математическим языком и относится к творению Бога. Библия, написанная образным, доступным всем языком, это книга о Творце и Его плане для человека. Поэтому наука и вера – это дополняющие друг друга области. Автор природы и Библии один и тот же – это Бог.

Предмет и метод науки.

Прежде всего, наука направлена на рациональное познание окружающего мира с помощью разума человека. Можно сказать, что наука – это взгляд человека сверху на природу. Предметом науки является окружающая природа, поэтому ее правильным названием является также «природоведение» или «естествознание». Методом

науки является логика, математика и эксперимент. Современная наука состоит в построении теорий, т.е. математических моделей природных явлений и проверке их работоспособности на эксперименте.

Научное мышление всегда связано с абстрагированием, то есть с отбрасыванием и упрощением одних сторон реальности и выделением, фиксацией других. Так создается некая картина нашего локального участка Вселенной. Математика, как теория формы всех возможных миров, помогает создать внешнее описание, а содержанием ее должен наполнить эксперимент.

Уже отсюда видна принципиальная ограниченность научного знания и необходимость его постоянного обновления. Во-первых, развивается теория, появляются новые математические объекты и методы и, во-вторых, развивается техника эксперимента, позволяющая исследовать новые области реальности. Образцом фундаментальной науки является физика, успехи которой окружают нас на каждом шагу. Однако все физические теории ограничены уже потому, что они используют метод абстракции при построении теории. Поэтому всегда наступает момент, когда некоторое упрощение, отброшенное свойство, начинает быть существенным и тогда теория начнет расходиться с экспериментом.

Это приводит к неизбежному развитию и смене научной картины мира. Одна физическая теория сменит другую, но все они будут действовать в ограниченной области, потому что Вселенная бесконечно многогранна. Она бесконечна не только вширь или вглубь, но, например, также по размерности и по мощности пространства.

Главным критерием научной истины является эксперимент, поэтому так важна для науки повторяемость исследуемых событий, без которой нет полноценной научной теории. Новая научная теория должна объяснять известные ранее эксперименты и также предсказывать результаты новых экспериментов, которые старые теории не могут объяснить. Это универсальный метод науки – от теории к эксперименту и от эксперимента к коррекции теории.

Если же мы сравним наши конечные знания с бесконечной Вселенной, то получим бесконечно малое понимание природы. Именно ноль получается от деления конечной величины на бесконечность. И эта ограниченность не временная, а принципиальная. Вот тут и необходимо признать, что «я знаю, что ничего не знаю».

Библейская картина мира и человека.

Если книга природы рассказывает о творении, то Библия рассказывает о самом Творце. Научное познание природы – это

познание с помощью рационального мышления. Вера же – это познание Бога с помощью “сердца”, т.е. сущностью человека. Если наука – это взгляд человека сверху вниз на природу, то вера – это взгляд человека снизу вверх на Бога.

Священное Писание открывает человеку бессмертие души, его значимость, смысл жизни, систему вечных ценностей и божественный разум, который дает мудрость сердцу. Библия есть Слово Бога человеку, и ее исследование требует размышления и веры одновременно. Главное откровение Библии – это то, что Бог, Творец этой бескрайней вселенной, творец физических и духовных законов, естественного и сверхъестественного мира. Он же и любящий Отец, который стал доступен человеку через Иисуса Христа, который есть «путь, истина и жизнь». В этом состоит благая весть о спасении человека от зла этого временного мира и об ответственности каждого человека за свои поступки.

Полнота познания

Вера и наука – это разные измерения, они дополняют друг друга, а не исключают. Переход от науки к вере – это как переход от плоского мышления к объемному. Если человек занимается наукой без веры, без опоры на Бога, это обычно плохо кончается. Идет борьба за приоритеты – я первый, мой закон, я нашел. На самом деле все законы природы имеют одного Автора, и Он дал нам возможность изучать, видеть, чувствовать, жить этой жизнью.

Если в обществе нет веры, то закрыты каналы добродетели и идет нравственное разрушение, мир опускается во зло. Это важные практические вопросы – как вы относитесь к смыслу жизни, к другим людям, к миру. Ошибки в вере сразу видны. Если терроризм питается некоторой духовной теорией, значит, это ошибочная, ложная теория. Как и в науке, если в теории заложены ошибки, то эксперимент ей противоречит. Поскольку Бог есть любовь, то практика показывает кто действительно с Богом, а кто только прикрывается религиозной фразеологией.

Верующий ученый, прежде всего, честен в своих исследованиях. Честность в науке – важное качество, особенно там, где теорию трудно проверить экспериментом и все строится на гипотезах. Тогда надо быть особенно осторожным в утверждениях об «окончательно» установленных научных истинах.

В 1998 году в Калифорнийском университете в Беркли проходила конференция ученых и теологов, на которой обсуждались вопросы взаимоотношения науки и веры (см. *Scientific American*, август 1998, стр.22). На этой конференции выступал выдающийся астрофизик Алан Сэндидж, ученик Хаббла. Сейчас ему около восьмидесяти лет. Он христианин, изучает Библию и делает фундаментальные работы в космологии, о которых также мы рассказывали в этой книге. Сэндидж говорил, что необходимость ответа на такие вопросы, как, в чем смысл жизни, какова цель творения, какова природа нравственности привели его к отказу от атеизма.

Так что гармония науки и веры не только возможна, но и необходима.

Литература

Общая астрономия и история космологии

- Э.В. Кононович, В.И. Мороз : Общий курс астрономии (УРСС, Москва, 2001)
- H. Karttunen et al. (eds.) : Fundamental Astronomy (Springer, 2006)
- E.R. Harrison : Darkness at Night (Harvard University Press, 1987)
- E.R. Harrison : Cosmology – the science of the universe, 2nd edition (Cambridge University Press, 2000)
- M. Hoskin : Stellar Astronomy (Science History Publication , 1982)
- T. Kuhn : The Copernican Revolution (Harvard University Press, 1957)

Фракталы

- Б. Мандельброт : Фрактальная геометрия природы (ИКИ, Москва, 2002)
- Х.-О. Пайтген, П.Х. Рихтер : Красота фракталов (Мир, Москва, 1993)
- Р.М. Кроновер : Фракталы и хаос (Постмаркет, Москва, 2000)
- А.Д. Мороз : Введение в теорию фракталов (ИКИ, 2004)

Крупномасштабная структура Вселенной

- Ф.Дж.Э. Пиблс : Структура Вселенной в больших масштабах (Мир, Москва, 1983)
- Ю.В. Барышев, П. Теерикорпи : Фрактальный анализ крупномасштабного распределения галактик, Бюллетень САО РАН, т.59, 2006, 92-160
- F. Sylos Labini , M. Montuori, L. Pietronero : Scale-invariance of galaxy clustering, Physics Reports, vol. 293, 61-266, 1998
- A. Gabrielli, F. Sylos Labini, M. Joyce, L. Pietronero : Statistical physics for cosmic structures (Springer, 2005)
- A. Fairall : Large-scale structure in the universe (John Wiley & Sons, 1998)
- W. Saslaw: The Distribution of the Galaxies – Gravitational Clustering in Cosmology (Cambridge University Press, 2000)
- Историю дебатов о фрактальной вселенной можно найти на домашней странице группы Л.Пьетронеро: <http://pil.phys.uniroma1.it/debate.html>

Гравитация и космология

- Р.Ф. Фейнман, Ф.Б. Мориниго, У.Г. Вагнер : Фейнмановские лекции по гравитации (Янус-К, Москва, 2000)
- С. Вейнберг : Гравитация и космология (Мир, Москва, 1975)
- М. Боулер : Гравитация и относительность (Мир, Москва, 1979)
- Д.И. Нагирнер : Элементы космологии (Санкт-Петербургский университет, СПб, 2001)
- Ф.И. Федоров (ред.) : Астрофизика, кванты и теория относительности (Мир, Москва, 1982)
- Ю.В. Барышев : Полевая теория гравитации: желаемое и действительное, Гравитация, том 2, вып.1, стр.5 – 20, 1996
- Baryshev Yu.V., Sylos Labini F., Montuori M., Pietronero L. : Facts and ideas in modern cosmology, *Vistas in Astronomy*, vol.38, 419-500, 1994
- P. Davies (ed.) : *The New Physics* (Cambridge University Press, 1989)
- A.R. Sandage, R.G. Kron & M.S. Longair : *The Deep Universe* (Springer, 1995)

Вера и наука

- БИБЛИЯ для самостоятельного изучения по индуктивному методу, Синодальный перевод (Христианский Мост, Precept Ministries, 1997)
- И.С. Дмитриев : *Неизвестный Ньютон* (Алетейя, СПб, 1999)
- Сэр Исаак Ньютон : *Замечания на книгу пророка Даниила и Апокалипсис Св. Иоанна*, в двух частях (Новое Время, Петроград, 1915)
- Дж.Л. Шредер : *Шесть дней творения и Большой Взрыв* (ДААТ/Знание, Иерусалим-Москва, 2000)
- Дж. Хьютон : *Играет ли Бог в кости?* (Триада, Москва, 1998)
- В.Л. Гинзбург : *Наука и религия в современном мире, + Еще раз о науке и религии в современном мире*, веб-страница Трибуна журнала «Успехи физических наук» <http://www.ufn.ru/tribune>
- E. Cartlidge : *A brief history of physics and religion*, *Physics World*, December 1999, p.69
- W.W. Gibbs : *Beyond physics: Renowned scientists contemplate the evidence for God*, *Scientific American*, August 1998, p.22