

УДК 524.74(083.8)

# КАТАЛОГ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПАР ГАЛАКТИК ИЗ БАЗЫ ДАННЫХ HyperLEDA, ОГРАНИЧЕННЫЙ АБСОЛЮТНОЙ ВЕЛИЧИНОЙ – 18.5

© 2018 Л. Нотталь<sup>1\*</sup>, П. Шамаро<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>LUTH, UMR CNRS 8102, Парижская Обсерватория, Медон CEDEX, 92195 Франция<sup>2</sup>GEPH, UMR CNRS 8111, Парижская Обсерватория, Медон CEDEX, 92195 Франция

Поступила в редакцию 20 декабря 2017 года; принята в печать 24 марта 2018 года

Настоящая работа посвящена построению каталога изолированных пар галактик из базы данных внегалактических объектов HyperLEDA. Лучевые скорости парных галактик варьируются в пределах [3000, 16000] км с<sup>-1</sup>. Для получения наиболее полного несмещенного каталога пар мы ограничили абсолютную величину галактик до  $M \leq -18.5$ . Критерии, используемые для определения изолированных пар галактик, следующие: 1) критерий скорости: разность лучевых скоростей между парой галактик  $\Delta V < 500$  км с<sup>-1</sup>; 2) критерий взаимного расстояния: проекция расстояния между членами пары  $r_p < 1$  Мпк; 3) критерий взаимности: каждый член пары является ближайшей галактикой для другой, что исключает мультиплеты; 4) критерий одиночности: мы определяем пару как изолированную, если отношение ( $\rho = r_z/r_p$ ) проекции расстояния пары до ее ближайшей галактики (с разностью скоростей менее 500 км с<sup>-1</sup> по отношению к паре) и проекции взаимного расстояния между членами пары  $r_p$  больше 2.5. Сначала мы искали подобные близкие галактики в каталоге источников HyperLEDA, ограниченном по  $M$ , затем в полной версии. Нам удалось не исключить небольшое число пар с близкими, но слабыми компаньонами — карликовыми галактиками. В каталоге пар галактик приводится значение  $\rho$  для каждой отдельной пары. Такой метод позволяет пользователю каталога выбирать любую степень изолированности (выше избранного предела  $\rho > 2.5$ ). Наш итоговый каталог содержит 13 114 пар галактик, из которых 57% умеренно изолированы при  $\rho > 5$ , а 30% — сильно изолированы с  $\rho \geq 10$ .

Ключевые слова: каталоги—галактики: группы: общее

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Изолированные пары галактик представляют собой простейшие гравитационные системы галактик. Исследование их динамики особенно полезно для оценки масс и отношений масса–светимость их членов, а также для возможности проверить наличие массивных гало и темной материи (см., например, основные работы Петерсона [1] и Ченгалура и др. [2]). Такие исследования требуют большого каталога пар галактик с точными лучевыми скоростями их членов.

Основополагающий каталог изолированных пар галактик был разработан Караченцевым [3]; в нем приводятся 603 пары к северу от склонения  $\delta = -3^\circ$ , он использовался в нескольких исследованиях. С тех пор появились другие каталоги галактических пар, например, каталог Соареса и др. [4], который дополняет каталог Караченцева в южном полушарии, а также каталог Караченцева и

Макарова [5], в котором собраны 509 связных пар Местного сверхскопления с лучевыми скоростями  $V_r < 3500$  км с<sup>-1</sup>.

В более недавнем “Каталоге изолированных пар галактик с точными лучевыми скоростями UGC” Шамаро и Нотталя [6] приводятся 1005 изолированных галактических пар с хорошо определенным критерием изолированности, взятым из uppsalsкого каталога галактик Нильсона [7].

Все эти парные каталоги выведены из старых галактических каталогов с типичным объемом выборки в примерно 10 000 галактик из паломарского и ESO Sky обзоров, а следовательно они содержат приблизительно 1000 или менее пар.

В настоящее время большие обзоры галактик (SDSS, 2MASS, 2dFGRS и т.п.) позволяют получать каталоги галактических пар с примерными объемами более чем в десять раз больше. Таким образом, Алонсо и др. [8] использовали (неопубликованную) выборку из почти 13 000 пар из SDSS-DR2 и 2dFGRS для исследования увеличения активности звездообразования в галактических па-

\*E-mail: laurent.nottale@obspm.fr

\*\*E-mail: pierre.chamarau@obspm.fr

рах, вызванного гравитационным взаимодействием. Однако, насколько нам известно, статистические динамические исследования не проводились для такой большой выборки пар.

В настоящей работе мы строим каталог изолированных пар галактик из базы данных HyperLEDA [9], которая на настоящий момент (сентябрь 2016) включает в себя 2 714 382 галактических красных смещений, включая основные источники из SDSS-DR12 (и предыдущих выпусков) и 2dF. Мы ограничили наше исследование лучевыми скоростями  $2500 < V < 16500 \text{ км с}^{-1}$ , для которых HyperLEDA имеет примерно 250 000 записей, а также членами пар с абсолютными величинами  $M < -18.5$ .

Наша основная цель — динамическое статистическое исследование изолированных пар галактик, которое будет продолжено в последующих работах. Отдельная работа [10] была посвящена статистическому определению фактических разностей скоростей и фактических расстояний между членами пар из значений проекций (подобная “депроекция” нужна для понимания их динамики).

Настоящая работа организована следующим образом: Раздел 2 посвящен короткому описанию каталога галактических источников, который мы извлекли из базы данных HyperLEDA; в Разделе 3 мы представляем и применяем критерии, используемые для определения изолированных пар галактик; итоговый каталог из 13 114 галактических пар описан в Разделе 4; некоторые его общие статистические свойства и исправления за космологические ложные пары обсуждаются в Разделе 5, итоги подводятся в Разделе 6.

## 2. КАТАЛОГ ИСТОЧНИКОВ ИЗВЛЕЧЕННЫЙ ИЗ БАЗЫ ДАННЫХ HYPERLEDA

На настоящий момент (2016 год), база данных HyperLEDA содержит 4 964 207 измерений красных смещений для 2 851 256 объектов, из которых 2 714 382 — галактики (с высокой степенью достоверности) (Макаров и др. [9, 11] и Макаров 2016, частное сообщение). База данных красных смещений HyperLEDA включает в себя самые свежие поступления, десять из которых содержат более чем примерно 20 000 объектов. Основные источники — SDSS-DR12 и предыдущие выпуски [12] (2 217 085 объектов), а также 2dF (236 197 объектов).

Из этой базы данных, мы извлекли выборку для каталога галактик с избранными красными смещениями

$$2500 < V = cz < 16\,500^{-1},$$

содержащий 249 685 записей. Затем мы составили субкаталог, ограниченный по абсолютной величине в фильтре  $B$  ( $M < -18.5$ ), который содержит 150 068 галактик с диапазоном красных смещений  $3000 < V < 16\,000 \text{ км с}^{-1}$  (так как наш критерий для разности скоростей членов пар составляет  $\Delta V < 500 \text{ км с}^{-1}$ ).

Это позволяет нам составить каталог галактических пар с членами ярче  $M = -18.5$  и охватить диапазон красных смещений  $3000 < V < 16\,000 \text{ км с}^{-1}$ . Однако, критерий изолированности, позволяющий определять пары, использует полный, неограниченный каталог галактик (см. ниже).

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОЛИРОВАННЫХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ПАР И МЕТОД

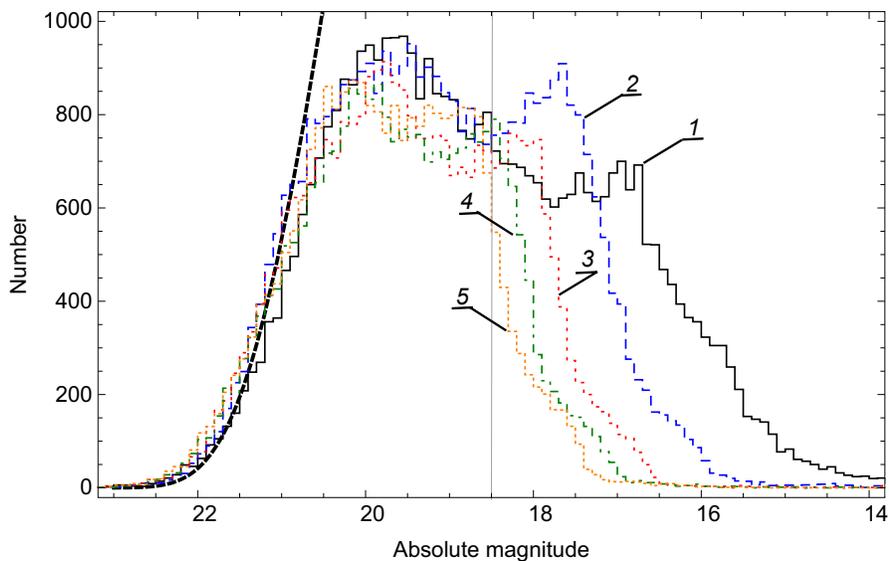
### 3.1. Постановка задачи

Пара галактик характеризуется шестью переменными: тремя координатами “взаимного расстояния” галактик  $(x, y, z)$  и тремя координатами разности скоростей между ее членами  $(v_x, v_y, v_z)$ . Однако, только три из этих шести параметров можно получить из наблюдений. А именно, предполагая, что ось  $z$  ориентирована в направлении от наблюдателя, следовательно,  $(x, y)$  находится в плоскости неба, можно пронаблюдать только  $x, y$  и разность лучевых скоростей  $v_z$ . Из координат  $x$  и  $y$  возможно вычислить взаимное расстояние между членами пары в проекции на небесную плоскость,  $r_p = \sqrt{x^2 + y^2}$ . На практике эта проекция взаимного расстояния выводится из наблюдаемого угла на небе  $\theta$  между галактиками и расстояния до пары  $D, r_p = D\theta$  (так как  $\theta \ll 1$  для наших пар, которые удовлетворяют  $V > 3000 \text{ км с}^{-1}$  т.е.  $D > 43 \text{ Мпк}$  при  $h = 0.7$ ).

Вследствие этих наблюдательных ограничений мы должны выбирать наши критерии определения пары из этих двух параметров,  $v_z$  и  $r_p$  (в дополнение к пределу по абсолютной величине). Мы предпочли брать не слишком ограничивающие пределы ( $500 \text{ км с}^{-1}$  и  $1 \text{ Мпк}$  соответственно) во избежание упущения реальных пар с членами, находящимися на большом расстоянии друг от друга. Как следствие, в выборке обязательно присутствуют ложные (космологические) пары, которые будут учтены и исключены в последующем анализе.

### 3.2. Отбор пар

Сначала мы извлекли из базы данных HyperLEDA каталог галактик с измеренными гелиоцентрическими красными смещениями в диапазоне



**Рис. 1.** Гистограмма зависимых от расстояния абсолютных величин галактик извлеченных из базы данных HyperLEDA в диапазоне  $3000 < V < 16\,000 \text{ км с}^{-1}$ . Справа налево показаны интервалы скоростей  $[3000, 7000]$  (1),  $[7000, 10\,000]$  (2),  $[10\,000, 12\,000]$  (3),  $[12\,000, 14\,000]$  (4) и  $[14\,000, 16\,000]$  (5). Черная пунктирная линия показывает функцию светимости Шехтера [13], построенную по наиболее ярким галактикам.

$2500 < V < 16\,500 \text{ км с}^{-1}$ . Согласно нашему критерию разности скоростей ( $500 \text{ км с}^{-1}$ ), это соответствует парному диапазону красных смещений  $3000 < V < 16\,000 \text{ км с}^{-1}$ .

Такой выбор обоснован следующими соображениями:

- $V > 3000 \text{ км с}^{-1}$  позволяет использовать красное смещение как критерий с достаточным уровнем значимости;
- $V < 16\,000 \text{ км с}^{-1}$  диктуется нашим выбором предела по абсолютной величине  $M < -18.5$  совместно с наблюдаемой эволюцией распределения абсолютных величин галактик с расстоянием из исходного каталога HyperLEDA (см. Рис. 1). Действительно, из рисунка видно, что такое распределение является почти полным вплоть до абсолютной величины  $M \approx -20.5$  вне зависимости от расстояния, а затем становится неполным для более слабых объектов, но так же вне зависимости от расстояния при  $M < -18.5$  и  $V < 16\,000 \text{ км с}^{-1}$ . Для более слабых галактик наблюдаемое распределение становится сильно зависимым от расстояния, а затем резко обрывается на  $M = -18.5$  в самом дальнем интервале скоростей  $14\,000\text{--}16\,000 \text{ км с}^{-1}$ .

Данные полученные из HyperLEDA включают название основного объекта, координаты (J2000), полную синюю величину, абсолютную величину, диаметр  $d_{25}$ , лучевую скорость, ошибку лучевой

скорости, модуль расстояния  $mod\theta$ , полученный из оценки расстояния, не зависящего от красного смещения, и модуль расстояния  $modz$ , полученный из красного смещения и закона Хаббла, к которому мы добавили номер идентификации (от 1 до 249 685).

Далее мы перечислим последовательные критерии, использованные для построения нашего каталога изолированных галактических пар из каталога источников hyperLEDA, определенные выше. Каждый последующий критерий применяется к соответствующей выборке пар, и в результате мы получаем новую выборку с более жесткими ограничениями, вплоть до последнего критерия, который приводит к конечному каталогу изолированных пар.

(1) Сначала мы идентифицируем возможные члены пар галактик из каталога источников HyperLEDA, ограниченного по  $M$ , как определено выше. Такой поиск обеспечивает диапазон лучевых скоростей членов  $[3000, 16\,000] \text{ км с}^{-1}$  и их абсолютных величин  $M < -18.5$ . Это дает однородность выборки в диапазоне выбранных расстояний (см. Рис. 1) и аналогичном диапазоне светимостей для членов пар.

(2) Для каждой галактики А из (1) мы ищем ее ближайшего соседа В из ограниченного по  $M$  каталога на проецируемом расстоянии  $r_p < 1 \text{ Мпк}$  и с разностью скоростей  $\delta V_{\text{lim}} < 500 \text{ км с}^{-1}$

(см. [6]). В результате получается первый набор пар галактик.

(3) Критерий взаимности: оставляем пару, определенную в (2), только если ближайшая галактика к члену В является галактикой А, с которой поиск пары был начат. Эта процедура позволяет исключить мультиплеты [6].

(4) Критерий изоляции: мы определяем галактическую пару если отношение  $\rho = r_3/r_p$  проецируемого расстояния  $r_3$  центра пары к ближайшей галактике (с разностью скоростей меньше  $500 \text{ км с}^{-1}$  по отношению к паре) и проецируемого взаимного расстояния между членами  $r_p$  больше 2.5. Для удовлетворения данного критерия следуем двум шагам:

а) Начинаем с выборки, пар полученной в (3), и ищем ближайшую галактику (обозначенную {3}), определенную выше в каталоге источников HyperLEDA, ограниченному по  $M$ ; оставляем только те пары, для которых  $\rho > 2.5$ .

б) далее ищем в *полном* (неограниченном) каталоге HyperLEDA ближайшую галактику к каждой паре из а) для учета более слабых галактик (обозначенных {3'}). Оставляем все пары с  $\rho' > 2.5$ , а также пары с  $\rho' < 2.5$  если у ближайшей галактики светимость ниже  $L_m/10$ , где  $L_m$  — светимость более слабого члена пары (т. е.  $\Delta M > 2.5$ ). Действительно, в последнем случае ближайший компаньон оказывает пренебрежимое гравитационное влияние на пару на любом расстоянии от нее. Галактические пары, ограниченные этим последним критерием, составляют наш итоговый каталог из 13 114 изолированных пар.

#### 4. ИТОГОВЫЙ КАТАЛОГ ПАР: ОПИСАНИЕ

Получившийся каталог пар (см. Таблицу) отсортирован в порядке возрастания прямых восхождений первого члена пары. Он содержит, для каждой пары: в колонке (1) координату J2000  $\alpha$  первой галактики пары, в долях часа; (2) координату J2000  $\delta$  первой галактики пары, в десятичных градусах; (3) абсолютную величину в фильтре В первой галактики пары; (4) гелиоцентрическую лучевую скорость  $V_1$  первой галактики пары, в  $\text{км с}^{-1}$ ; (5) неопределенность  $V_1$ , в  $\text{км с}^{-1}$ ; (6) координату J2000  $\alpha$  второй галактики пары, в долях часа; (7) координату J2000  $\delta$  второй галактики пары, в десятичных градусах; (8) абсолютную величину

в фильтре В второй галактики пары; (9) гелиоцентрическую лучевую скорость  $V_2$  второй галактики пары, в  $\text{км с}^{-1}$ ; (10) неопределенность  $V_2$ , в  $\text{км с}^{-1}$ ; (11) абсолютное значение разности лучевых скоростей  $\Delta V$  между членами пары, в  $\text{км с}^{-1}$ ; (12) неопределенность  $\Delta V$ , в  $\text{км с}^{-1}$ ; (13) взаимное расстояние между членами пары в проекции на небесную плоскость, в Мпк; (14) отношение  $\rho = r_3/r_p$  для самой близкой к паре галактики из каталога, ограниченного по абсолютной величине (см. текст); (15) абсолютная величина в фильтре В этой ближайшей галактики.

Значение  $\rho = 10$ . в колонке (14) обозначает пары с высокой степенью изоляции с  $\rho \geq 10$ .

Значение  $M_3 = 0$ . в колонке (15) означает, что абсолютная величина для ближайшей галактики {3} отсутствует в базе данных HyperLEDA.

#### 5. СВОЙСТВА КАТАЛОГА ПАР

Детальный анализ каталога, в частности, касающийся статистических депроекций разностей скоростей и расстояний между членами пар, будет проведен в последующих работах. Здесь мы приводим некоторые общие свойства каталога.

##### 5.1. Распределение расстояний

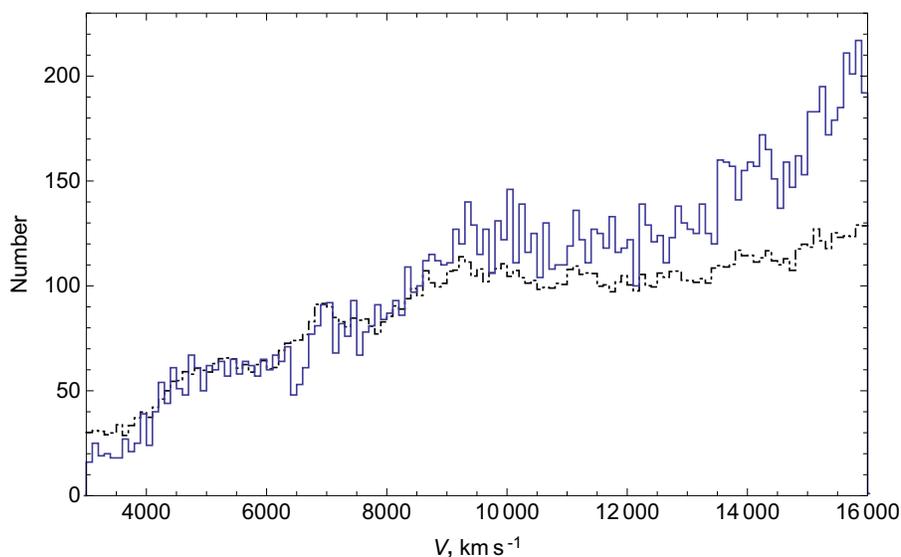
Распределение космологических лучевых скоростей (а следовательно, расстояний) пар показано на Рис. 2 в сравнении с распределением расстояний галактик в исходном каталоге.

Согласие между двумя распределениями в целом удовлетворительно, что предполагает, что пары были правильно выбраны случайным образом из распределения галактик в родительском каталоге HyperLEDA, а также что количество пар вплоть до приблизительно  $10\,000 \text{ км с}^{-1}$  и примерно 150 Мпк почти постоянно.

Однако за пределами примерно  $10\,000 \text{ км с}^{-1}$ , наблюдается увеличивающийся избыток числа пар по сравнению с исходным каталогом. Этот эффект связан с неполнотой современных данных о красных смещениях ниже предела по абсолютной величине около  $-20.5$ , как видно из Рис. 1. Эта неполнота может приводить к двум возможным эффектам: (i) пропущенным парам из-за отсутствия данных о красных смещениях; (ii) лишним (не полностью изолированным) парам из-за отсутствия измерений красного смещения для соседних галактик. Избыток пар, наблюдаемый выше примерно  $10\,000 \text{ км с}^{-1}$  на Рис. 2, показывает, что доминирует второй эффект. Это приводит к снижению эффективности критерия изоляции, так как все меньше слабых галактик учитывается в поисках ближайшей к паре галактики (см. Рис. 1), как в

Каталог изолированных пар галактик HyperLEDA: примеры данных. Объяснение в тексте.  
 Полный каталог будет доступен в электронном виде в VizierR

$\alpha_1$	$\delta_1$	$M_1$	$V_1$	$\varepsilon_{V_1}$	$\alpha_2$	$\delta_2$	$M_2$	$V_2$	$\varepsilon_{V_2}$	$\Delta V$	$\varepsilon_{\Delta V}$	$r_p$	$\rho$	$M_3$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
0.00124	-0.08334	-19.59	7125	3	0.00217	-0.04059	-19.51	7096	3	29	4	0.081	10.	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0.01549	-25.9058	-21.24	15083	29	0.01375	-25.89882	-20.18	15317	32	234	43	0.094	5.46	-20.
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23.99548	-29.15997	-20.52	8270	51	23.9847	-29.12384	-19.13	8715	32	445	60	0.302	3.05	-22.2
23.99812	-35.79635	-18.98	15319	89	23.99964	-35.77914	-19.11	15140	64	179	110	0.097	10.	0



**Рис. 2.** Распределение пар в соответствии с космологическим расстоянием, измеренным по лучевой скорости (сплошная линия). Оно сравнивается с распределением всех галактик исходного каталога (пунктирная линия) после нормирования (на фактор 20) в пределах 3000–10 000 км с<sup>-1</sup>.

полном каталоге галактик, так и в ограниченном по абсолютной величине: мы убедились, что это смещение дает правильный порядок величины для такого относительного увеличения.

### 5.2. Погрешности разности скоростей

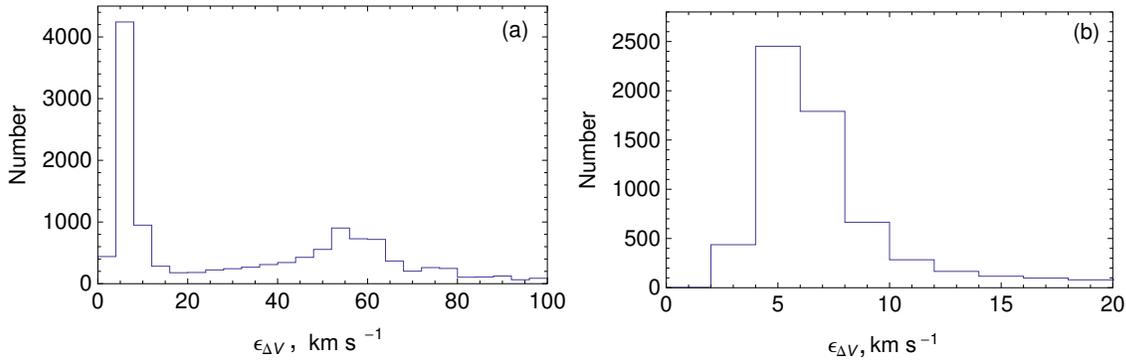
На Рис. 3 показана гистограмма неопределенности  $\varepsilon_{\Delta V} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}$  разности лучевых скоростей членов пары. Половина пар имеют очень хорошие измерения лучевых скоростей: у 6093 пар  $\varepsilon_{\Delta V} < 20$  км с<sup>-1</sup> с острым пиком на 5 км с<sup>-1</sup> (см. Рис. 3b). Для этих пар медианное среднее составляет  $\varepsilon_{\text{med}} = 6$  км с<sup>-1</sup>, что гораздо ниже медианы в примерно 200 км с<sup>-1</sup> разности лучевых скоростей между членами пар.

Для 11 461 пар с  $\varepsilon_{\Delta V} < 70$  км с<sup>-1</sup> (86% выборки) средняя неопределенность составляет 26 км с<sup>-1</sup>, а медианная достигает 13 км с<sup>-1</sup>.

Следовательно, получившийся большой субкаталог имеет очень хорошее качество данных, которые позволяют провести точный динамический анализ.

### 5.3. Распределение разностей лучевых скоростей между членами пар

На Рис. 4 мы приводим гистограмму разностей лучевых скоростей между членами галактических пар, которая монотонно убывает с возрастанием лучевой скорости (в пределах статистических флуктуаций). Это теоретически ожидаемо,



**Рис. 3.** Гистограммы неопределенности разностей лучевых скоростей между членами пар  $\epsilon_{\Delta V} = \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2}$ . (а): ширина бина составляет  $4 \text{ km s}^{-1}$ . На гистограмме представлен острый пик точных измерений скоростей на примерно  $5 \text{ km s}^{-1}$  (радио HI и SDSS измерения) и второй максимум около примерно  $50 \text{ km s}^{-1}$  из-за менее точных оптических измерений; (б): приближение первого пика погрешностей. Ширина бина —  $2 \text{ km s}^{-1}$ .

так как распределение вероятности проецируемой скорости для данного  $V$  постоянно на интервале  $[0, V]$  [10], так что вклад в значение проекции  $V_r$  складывается из всех  $V$  больше  $V_r$ , а следовательно, увеличивается при уменьшении  $V_r$ . Здесь объем каталога достаточно велик для строгой монотонности, несмотря на флуктуации в примерно  $\sqrt{N}$ .

Мы исследуем более подробно это распределение скоростей и его “депроекцию” в следующей работе.

#### 5.4. Распределение взаимных расстояний между членами пар

На Рис. 5 мы приводим распределение проецируемых расстояний  $r_p$  между членами пар из нашего каталога, для трех значений (относительного) параметра изоляции:  $\rho > 2.5$  (слабо изолированные пары),  $\rho > 5$  (средне изолированные пары) и  $\rho > 10$  (сильно изолированные пары). Во всех трех случаях распределение постоянно убывает при возрастании значений  $r_p$ . Распределения стремятся к нулю соответственно при  $r_p \approx 0.8, 0.4$  и  $0.2 \text{ Mpc}$  (строго говоря, не достигая его).

Распределение  $r_p$  в нашем каталоге можно приблизительно аппроксимировать законом  $r_p^{-3/2}$ . Это не совпадает ни с результатом Тернера [14], который применил закон  $r_p^{-1/2}$  для своей выборки (определенной по другим критериям), ни с каталогом пар UGC [6], для которого применяется  $r_p^{-1}$ .

#### 5.5. Распределение относительных расстояний до ближайших галактик к парам

На Рис. 6 показано наблюдаемое распределение относительных расстояний  $\rho = r_3/r_p$  до ближайших к парам галактикам (из каталога галактик,

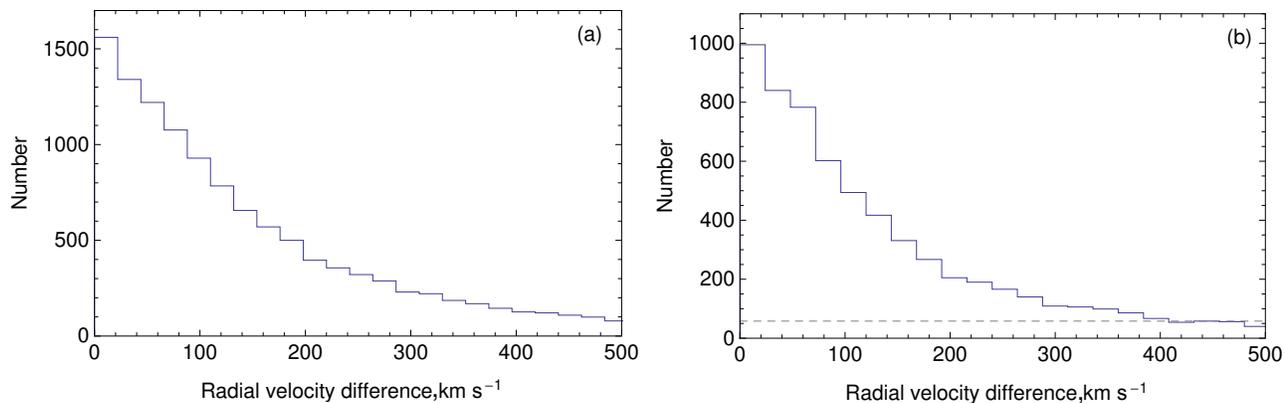
ограниченного по  $M$ ). Оно демонстрирует убывающий характер,  $\rho^{-2}$  в согласии с распределением из каталога пар UGC [6].

Когда мы приписываем значение 10 для  $\rho$  в нашем каталоге, это значит, что ближайшая галактика к паре не была найдена в зоне поиска, и что она не была идентифицирована (за исключением нескольких маргинальных случаев); это значение в Таблице означает  $\rho \geq 10$ . Число  $\rho \geq 10$  составляет 4268 (32.5% каталога). У 794 пар галактика {3'} (ближайшая галактика к каждой паре искомая в *полной* (неограниченной) базе данных HyperLEDA, см. Раздел 3.2) идентифицирована ( $\rho' \leq 10$ ), в то же время {3} (поиск по базе HyperLEDA с ограничением по  $M$ ) — не идентифицирована. Для 2721 пар галактика {3'} ближе к паре, чем {3}. Наконец, малая доля пар (350, т.е. 2%) имеет  $\rho' \leq 2.5$ . Эти случаи соответствуют парам с близкими слабыми компаньонами-карликами, которые не были исключены, несмотря на их взаимную близость, так как разность их абсолютных величин  $\Delta M > 2.5$ .

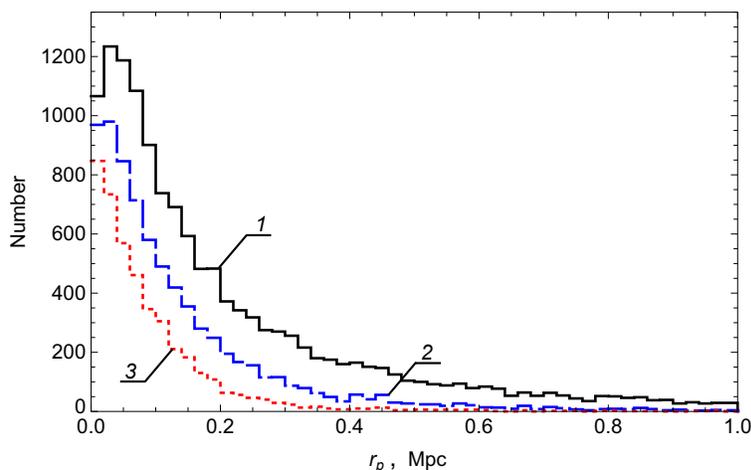
Отметим, что остается возможность того, что слабые галактики с  $M > -18.5$  лежат на расстоянии между {3'} и {3}, когда они различаются, так как мы искали только ближайшую галактику к паре в обоих случаях. Некоторые пары следовало бы исключить из нашего каталога вследствие этого дополнительного компаньона {4}, но так как критерии  $\rho_4 \leq 2.5$  и  $\Delta M < 2.5$  выполнены только для 350 пар, их итоговое число ожидается маргинальным (< 2%).

#### 5.6. Ложные (космологические) “пары”

Ожидается, что включение некоторых пар будет объясняться результатом проекционных эффектов, и на самом деле их члены лежат на больших относительных расстояниях. Действительно,



**Рис. 4.** Гистограммы разности лучевых скоростей между членами пар. (а): неопределенности  $\varepsilon_{\Delta V} < 70 \text{ км с}^{-1}$ , ширина бина —  $22 \text{ км с}^{-1}$ . (б): неопределенности  $\varepsilon_{\Delta V} < 20 \text{ км с}^{-1}$ , ширина бина —  $24 \text{ км с}^{-1}$ . Гистограммы монотонно убывают, как и ожидается для проекции скоростей. Штриховая горизонтальная линия на рисунке справа показывает оценку вклада “ложных” космологических “пар”.



**Рис. 5.** Гистограмма проецируемых взаимных расстояний между членами пар, ширина бинов по  $0.02 \text{ Мпк}$ . Верхняя линия (1): все данные ( $\rho > 2.5$ ). Средняя линия (2): изолированные пары ( $\rho > 5$ ). Нижняя линия (3): сильно изолированные пары ( $\rho > 10$ ).

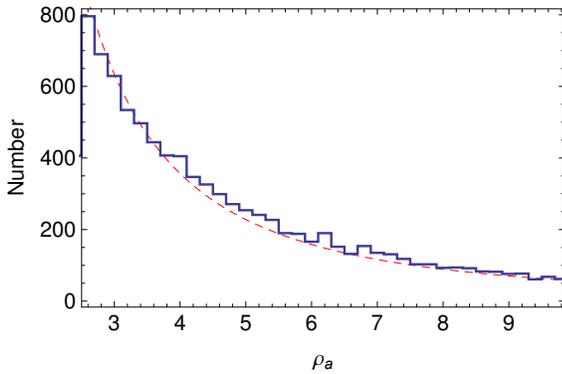
критерий лучевой скорости  $\Delta V < 500 \text{ км с}^{-1}$  был выбран для того, чтобы включить очень тесные пары, которые по третьему закону Кеплера должны иметь большие взаимные скорости. Однако, такой предел на разность скоростей соответствует также большому космологическому расстоянию,  $d_c = DV/H_0 = 7 \text{ Мпк}$  (принимая постоянную Хаббла  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ ). Тогда наш критерий взаимного расстояния  $r_p < 1 \text{ Мпк}$  будет нарушен, начиная с  $\Delta V = 70 \text{ км с}^{-1}$ .

Мы попытались оценить вклад в распределение космологических ложных “пар”, ожидая его зависимость от лучевой скорости. Объем выборки, определенный нашими критериями, представляет собой почти радиальный цилиндр вдоль луча зрения, так что число ложных пар линейно зависит

от  $\Delta V$ . Следовательно, соответствующая частота в интервале  $[\Delta V, \Delta V + d\Delta V]$  примерно постоянна. Этот аргумент основан на средней постоянной плотности Вселенной, т. е. не учитывает локальные флуктуации, что является оправданным предположением для рассматриваемой здесь глобальной статистики.

Это ожидаемое постоянное количество подтверждается наблюдаемой гистограммой разностей лучевых скоростей (правый Рис. 4, погрешности  $\varepsilon_{DV} < 20 \text{ км с}^{-1}$ ), которая демонстрирует почти постоянное распределение после  $\Delta V \gtrsim 400 \text{ км с}^{-1}$ .

Значение  $400 \text{ км с}^{-1}$  — приемлемый предел для максимальной разности скоростей между членами истинных пар. Идентификация этого плоско-



**Рис. 6.** Наблюдаемое распределение относительных расстояний ближайших галактик к центрам пар (из исходного каталога галактик ограниченного по абсолютной величине)  $\rho = r_a/r_p$ . Доля галактик с  $\rho \geq 10$  составляет 32%. Красная штриховая линия показывает аппроксимацию распределения  $\rho^{-2}$ .

го хвоста (содержащего примерно 240 пар) как ожидаемого распределения космологических пар дает верхний предел на вклад ложных пар. Так как наблюдаемая постоянная частота встречаемости в диапазоне примерно  $400\text{--}500 \text{ км с}^{-1}$  составляет приблизительно 58 пар в бинах по  $24 \text{ км с}^{-1}$  (см Рис. 4), мы можем получить оценку полного числа ложных пар, примерно 1200, т.е. менее 10% парного каталога, что является относительно низким уровнем засоренности. Более точную оценку можно получить, учтя реальное распределение галактик (двухточечная функция корреляции), что мы планируем сделать в последующем детальном анализе динамики этих пар.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы выполнили построение выборки (слабо или сильно) изолированных галактических пар из базы данных HyperLEDA. Мы ограничили наш каталог абсолютной величиной  $M < -18.5$  и диапазоном красных смещений  $[3000, 16\ 000] \text{ км с}^{-1}$ .

Для этой цели мы выбрали точные количественные критерии для определения изолированных пар галактик, а именно: 1) малую разницу лучевых скоростей между членами пар:  $\Delta V < 500 \text{ км с}^{-1}$ ; 2) малую проекцию расстояния между членами пар:  $r_p < 1 \text{ Мпк}$ ; 3) взаимность, позволяющая исключить мультиплеты; 4) критерий изоляции: мы определяем пару как изолированную, если отношение  $\rho = r_3/r_p$  проецируемого расстояния пары до ближайшей галактики (у которой скорость отличается менее чем на  $500 \text{ км с}^{-1}$  по отношению к паре) и взаимного проецируемого расстояния между членами пары  $r_p$  больше 2.5, сначала в

исходном каталоге HyperLEDA ограниченном по  $M$  (ближайшая галактика  $\{3\}$ ), затем в полном каталоге (ближайшая галактика  $\{3'\}$ ). Однако, мы оставляем пары с  $\rho > 2.5$  и  $\rho' < 2.5$  если светимость ближайшей галактики меньше  $L_m/10$ , где  $L_m$  — светимость более слабого члена пары (т. е.  $\Delta M > 2.5$ ), что позволяет нам не отсекал пары с компаньонами-карликами. Каталог галактических пар дает значения  $\rho$  для каждой изолированной пары.

Наконец, оставляя в финальной версии каталога все пары с  $\rho$  больше довольно низкого предела ( $\rho > 2.5$ ), мы делаем возможным для пользователя каталога выбирать любой критерий изолированности за этим значением, определяя, например, “слабо изолированные пары”  $2.5 < \rho < 5$ , “умеренно изолированные пары” ( $5 < \rho < 10$ ) и “сильно изолированные пары”  $\rho \geq 10$ . Отметим, что Тернер [15] использовал тот же критерий, что и для наших “умеренно изолированных пар” ( $\rho > 5$ ), для определения своих пар.

Наш итоговый каталог содержит 13 114 пар галактик, из которых 7438 являются умеренно изолированными с  $\rho > 5$  (57% каталога). Так как исходный каталог содержит примерно 150 000 объектов с  $M < -18.5$ , это соответствует количеству приблизительно в 10% от общего числа галактик. Мы получили схожее количество для пар UGC [6] с тем же критерием изоляции  $\rho > 5$ . Это количество соответствует полученному Караченцевым и Макаровым [5] для изолированных пар (по другим критериям). Отметим также, что Гургулхон и др. [16] нашли, что 15% галактик являются членами изолированных пар, используя выборку в примерно 4000 близких галактик; в последнем исследовании изолированные пары были охарактеризованы четко определенным перенаселением по сравнению со средней плотностью галактик.

Наконец, 4268 пар сильно изолированы с  $\rho \geq 10$  (32.5% пар). Эти пары также включают примерно 5% ограниченных по  $M$  галактик HyperLEDA. Опять же, это количество такое же, как и в парном каталоге UGC, а также как и в родительском каталоге Караченцева 1972 года [3].

Распределение пар в зависимости от их космологического расстояния сопоставимо с распределением для исходных галактик HyperLEDA, с некоторым расхождением на больших расстояниях. Доля “ложных” космологических пар, т. е. галактик, которые кажутся близкими друг к другу из-за эффектов проекции, оценивается как малая (меньше 10% каталога).

Таким образом, у нас есть вполне удовлетворительная и большая выборка, которая позволяет проводить значимые статистические исследования.

Создание данного каталога пар, последующее за составлением выборки объектов из каталога пар UGC (содержащей 1005 пар), является вторым шагом, позволившим увеличить их число на порядок больше, чем 10, используя ныне доступные базы данных.

В последующей работе мы планируем выполнить динамическое исследование выделенных галактических пар с целью получить массы их членов, их отношения масса-светимость, а также по возможности проверить их на наличие массивных гало и темной материи. Такая работа нуждается в статистическом получении реальных разностей скоростей членов и их взаимных расстояний из известных измеренных проекций — задача, которая будет решена и использована в будущем анализе наших каталогов галактических пар.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе была использована база данных HyperLEDA (<http://leda.univ-lyon1.fr>) и мы благодарим Дмитрия Макарова за любезное предоставление нам новейшей информации о базе данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. D. Peterson, *Astrophys. J. Suppl.* **40**, 527 (1979).
2. J. N. Chengalur, E. E. Salpeter, and Y. Terzian, *Astrophys. J.* **461**, 546 (1996).
3. I. D. Karachentsev, *Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii*, No. 7 (1972).
4. D. S. L. Soares, R. E. de Souza, R. R. de Carvalho, and T. C. Couto da Silva, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **110**, 371 (1995).
5. I. D. Karachentsev and D. I. Makarov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 299 (2008).
6. P. Chamaroux and L. Nottale, *Astrophysical Bulletin* **71**, 270 (2016).
7. P. Nilson, *Nova Acta Regiae Soc. Sci. Upsaliensis Ser. V* (1973).
8. M. Sol Alonso, D. G. Lambas, P. Tissera, and G. Coldwell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367**, 1029 (2006).
9. HyperLEDA database, <http://leda.univ-lyon1.fr>
10. L. Nottale and P. Chamaroux (2018), in press.
11. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A13 (2014).
12. S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **219**, 12 (2015).
13. P. Schechter, *Astrophys. J.* **203**, 297 (1976).
14. E. L. Turner, *Astrophys. J.* **208**, 304 (1976).
15. E. L. Turner, *Astrophys. J.* **208**, 20 (1976).
16. E.ourgoulhon, P. Chamaroux, and P. Fouque, *Astron. and Astrophys.* **255**, 69 (1992).

## A Catalog of Isolated Galaxy Pairs Limited to Absolute Magnitude -18.5 Drawn from HyperLEDA Database

L. Nottale and P. Chamaroux

The present paper is devoted to the construction of a catalog of isolated galaxy pairs extracted from the HyperLEDA extragalactic database. The radial velocities of the galaxies in the pairs are in the range [3000, 16000] km s<sup>-1</sup>. In order to get an unbiased pair catalog as complete as possible, we have limited the absolute magnitude of the galaxies to  $M \leq -18.5$ . The criteria used to define the isolated galaxy pairs are the following: 1) velocity criterion: radial velocity difference between the pair members  $\Delta V < 500$  km s<sup>-1</sup>; 2) interdistance criterion: projected distance between the members  $r_p < 1$  Mpc; 3) reciprocity criterion: each member is the closest galaxy to the other one, which excludes multiplets; 4) isolation criterion: we define a pair as isolated if the ratio  $\rho = r_3/r_p$  of the projected distance of the pair to its closest galaxy (this one having a velocity difference lower than 500 km s<sup>-1</sup> with respect to the pair) and the members projected interdistance  $r_p$  is larger than 2.5. We have searched for these closest galaxies first in HyperLEDA  $M$ -limited source catalog, then in the full one. We have managed not to suppress the small number of pairs having close-by but faint dwarf galaxy companions. The galaxy pair catalog lists the value of  $\rho$  for each isolated pair. This method allows the user of the catalog to select any isolation level (beyond the chosen limit  $\rho > 2.5$ ). Our final catalog contains 13 114 galaxy pairs, of which 57% are fairly isolated with  $\rho > 5$ , and 30% are highly isolated with  $\rho \geq 10$ .

Keywords: *catalogues — galaxies: groups: general*