

УДК 524.72–325.4(083.8)

## КАТАЛОГ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПАР ГАЛАКТИК С ТОЧНЫМИ ЛУЧЕВЫМИ СКОРОСТЯМИ

© 2016 П. Шамаро\*, Л. Ноталь\*\*

Парижская Обсерватория, 92195 Медон CEDEX, Франция

Поступила в редакцию 29 сентября 2015 года; принята в печать 16 июля 2016 года

Работа посвящена созданию каталога изолированных пар галактик из Уппсальского каталога галактик (Uppsala Galaxy Catalog, UGC) с использованием точных лучевых скоростей. В UGC приведена 12921 галактика с  $\delta > -2^{\circ}30'$ , и этот каталог полон вплоть до видимого диаметра  $1'$ . Критерии, использованные для определения изолированных пар галактик, основаны на информации о скорости, взаимном расстоянии, взаимодействии и изоляции. Исследование пекулярных скоростей позволило получить очень точные лучевые скорости для компонентов пар по высокоточным измерениям в оптическом диапазоне и линии H I (средняя ошибка разности скоростей составляет  $10 \text{ км с}^{-1}$ ). Итоговый каталог содержит 1005 пар галактик с  $\rho > 2.5$ , из которых 509 имеют  $\rho > 5$  (50% пар, т.е. 8% галактик из каталога UGC), а 273 сильно изолированы, с  $\rho > 10$  (27% пар, т.е. 4% галактик UGC). Также приведены некоторые глобальные свойства каталога пар.

Ключевые слова: каталоги — галактики:общее — галактики:группы:общее

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изолированные пары галактик представляют собой простейшие гравитационные системы галактик. Изучение их динамики особенно результативно для оценок масс и соотношений масса-светимость их компонентов, а также для проверки возможного наличия массивных гало и темной материи (см., например, работы Петерсона [1] и Ченгалура и др. [2]). Для подобных исследований нужен обширный каталог галактических пар, для компонентов которых точно измерены лучевые скорости. Впервые каталог изолированных пар галактик был создан Караченцевым [3]; он содержит 603 пары к северу от склонения  $\delta = -3^{\circ}$  и использовался в нескольких исследованиях. С тех пор стали доступны и другие каталоги пар галактик, например, каталог Соареса и др. [4], который дополняет каталог Караченцева в южном полушарии, и, особенно, каталог Караченцева и Макарова [5], в котором собраны 509 связанных пар Местного сверхскопления с лучевыми скоростями  $V_r < 3500 \text{ км с}^{-1}$ .

В последнее время несколько работ были посвящены исследованию усиления звездообразования в галактических парах, вызванного гравитационным взаимодействием, что привело к созданию новых каталогов пар. Самое большое число пар (почти 13 000) использовалось для этих целей Алонсо и др. [6] после отбора из каталогов SDSS-DR2 и 2dFGRS.

В настоящей работе мы составили каталог изолированных пар галактик пользуясь Уппсальским каталогом UGC (Uppsala General Catalog of Galaxies) [7]. UGC охватывает северное небо от  $\delta > -2^{\circ}30'$ , и он полон вплоть до видимого диаметра  $1'$ . Так как функция линейного диаметра галактик известна [8], можно соответственно внести необходимые поправки, учитывающие потерю галактик с расстоянием, в наш каталог при необходимости.

Наша главная задача — статистическое исследование динамики изолированных пар галактик, которое будет продолжено в следующих работах. Отдельная работа будет посвящена статистическому определению истинных разностей скоростей и расстояний между компонентами пар, которые нужны для понимания их динамики.

Данная статья организована следующим образом: Раздел 2 посвящен краткому описанию UGC и соответствующей функции диаметра; в Разделе 3 вводятся и применяются критерии для определения изолированных галактических пар; сбор точных лучевых скоростей компонентов описан в Разделе 4; итоговый каталог из 1009 пар галактик приводится в Разделе 5, где также обсуждаются его основные статистические свойства и поправки, учитывающие космологически ложные результаты; заключение приведено в Разделе 6.

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

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

## 2. БАЗИС ДЛЯ КАТАЛОГА ПАР ГАЛАКТИК: КРАТКАЯ СПРАВКА О КАТАЛОГЕ НИЛЬСОНА UGC

### 2.1. Уппсальский общий каталог

Уппсальский общий каталог галактик, созданный Нильсоном [7], является полным каталогом вплоть до предельного диаметра  $1'0$  и/или предельной видимой величины  $14^m5$  Паломарского обзора неба (POSS). Каталог охватывает небо к северу от склонения  $-2^\circ5$  и содержит 12921 галактику.

На момент создания каталога (1973) только у нескольких галактик были известны лучевые скорости. Следовательно, каталог UGC необходимо дополнить независимым исследованием лучевых скоростей, что мы и сделали, пользуясь базой данных HyperLeda<sup>1</sup> (см. ниже). На момент составления настоящего каталога пар, скорости были известны для 12 141 галактики, т.е. для 94% галактик UGC (см. рис. 1).

### 2.2. Функция диаметра каталога UGC

Используя наше распределение скоростей галактик из каталога UGC, мы можем проверить функцию диаметра Хадсона и Линдена–Белла [8] и возможность ее уточнения. Действительно, данная функция диаметра определяется следующим образом:

$$\Phi_e(D)dD = \Phi_e^* \exp(-D/D^*) d(D/D^*), \quad (1)$$

где  $\Phi_e(D)dD$  — число галактик в единице объема с диаметрами в диапазоне  $[D, D + dD]$ ,  $\Phi_e^*$  — плотность галактик UGC в единице объема (для всех диаметров), а  $D^*$  — характеристический диаметр.

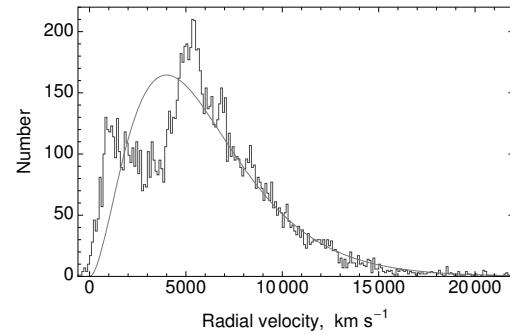
Галактика на расстоянии  $r$  включена в UGC в случае, если ее видимый диаметр не превышает  $1'$ , т.е. если ее линейный диаметр  $D_r > \pi r/10.8$  (для  $D_r$  в кпс и  $r$  в Мпс). Следовательно, из уравнения (1), число  $dN(r)$  галактик UGC между сферами радиусов  $r$  и  $r + dr$  задается для однородного распределения как

$$dN(r) = 4\pi f \Phi_e^* \exp(-D_r/D^*) r^2 dr, \quad (2)$$

где  $f$  — часть небесной сферы, охватываемой каталогом ( $f = 0.42$  для UGC, с учетом зоны экранирования нашей Галактикой).

Если преобразовать расстояние  $r$  в лучевую скорость  $v$ , пользуясь законом Хаббла, получим

$$dN(v) = 4\pi f \frac{\Phi_e^*}{H_0^3} \exp(-v/v^*) v^2 dv \quad (3)$$



**Рис. 1.** Гистограмма лучевых скоростей галактик UGC, с бинами по  $100 \text{ km s}^{-1}$ ; по оси ординат отложено число галактик в бине. Кривая аппроксимирует область распределения для больших расстояний ( $v > 7500 \text{ km s}^{-1}$ ) через функцию диаметра (в предположении о равномерном распределении).

для числа галактик UGC в интервале от  $v$  до  $v + dv$ , где  $v$  — хаббловская скорость на расстоянии  $r$ , а  $v^*$  — скорость галактики диаметром  $D^*$ , видимый диаметр которой составляет  $1'$ .

Используя метод наименьших квадратов, мы аппроксимировали полученным законом хвостовую часть новых данных о скоростях ( $v > 7500 \text{ km s}^{-1}$ , чтобы удалить близкие флуктуации, вызванные группированием) и получили (около 3300 галактик)  $v^* = 1997 \pm 85 \text{ km s}^{-1}$  (см. рис. 1). Интегрируя, мы получили  $\Phi_e^* = NH_0^3/(8\pi f v^{*3})$ , с  $N = 12 141$  (число галактик с известными лучевыми скоростями). Это приводит к значению плотности каталога  $\Phi_e^* = (0.144 \pm 0.018) h^3 \text{ Mpc}^{-3}$ .

Эти результаты согласуются в пределах ошибок со значениями Хадсона и Линден–Белла [8]  $\Phi_e^* = (0.15 \pm 0.03) h^3 \text{ Mpc}^{-3}$  и  $v_0 = 2200 \pm 150 \text{ km s}^{-1}$  и уточняют их. Отметим, что значение  $v_0$  Хадсона и Линден–Белла являлось аппроксимацией, сделанной с меньшим числом лучевых скоростей  $N = 1510$ , доступным в то время. Ошибка, которую они приводят,  $150 \text{ km s}^{-1}$ , учитывает систематические ошибки видимых диаметров UGC.

### 2.3. Пары галактик Нильсона

В каталоге UGC также присутствует, в описании к каждой галактике и ее окружающей области, указание («pair with») на ее возможное нахождение в паре с другой галактикой каталога. Исходя из этой информации, Нильсон составил список из 596 пар [9]. Однако, Нильсон использовал качественные критерии (оценивал данные POSS «на глаз») для определения изолированных пар; во время составления UGC было известно мало лучевых скоростей.

<sup>1</sup><http://leda.univ-lyon1.fr>.

В рамках составления нашего нового каталога пар на основе качественных критериев и точных лучевых скоростей для почти всех галактик UGC, мы проверили подлинность пар Нильсона. Мы нашли, что у 395 из 596 Нильсоновских пар разность лучевых скоростей между компонентами пары меньше  $500 \text{ км с}^{-1}$ , т.е. у 66% пар, и у 362 меньше  $350 \text{ км с}^{-1}$  (61% пар в списке Нильсона).

Далее, если сравнивать наш новый каталог (см. ниже), находим, что 348 пар из 362 удовлетворяют нашим иным, качественным, критериям (проецируемое разделение компонентов и относительная изоляция), т.е. 96% пар. Однако, полное число пар в данном новом каталоге пар из UGC — 1246, т.е. в 3.5 раза больше, чем реальное число (не космологическое) пар в списке Нильсона.

Мы можем заключить, что основная трудность Нильсона в построении списка пар состояла в отсутствии лучевых скоростей; более того, его качественные критерии изолированности и удаленности подтверждаются нашими численными, но они кажутся более строгими, чем наши, так как только 30% наших пар есть в списке Нильсона.

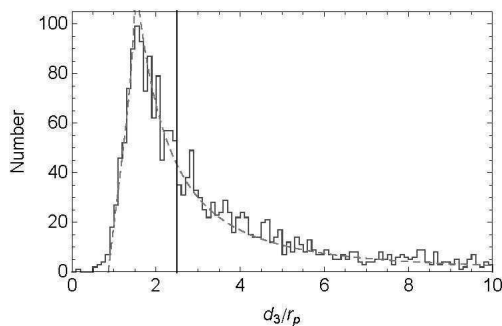
### 3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПАР ГАЛАКТИК

Пара галактик характеризуется шестью переменными: тремя координатами расстояния между галактиками  $(x, y, z)$  и тремя разностями скоростей компонентов  $(v_x, v_y, v_z)$ . Однако, только три из этих шести параметров доступны из наблюдений. А именно, предположив, что ось  $z$  направлена от наблюдателя, а следовательно,  $(x, y)$  находятся в картинной плоскости, мы можем наблюдать только  $x, y$  и разность лучевых скоростей  $v_z$ . Используя координаты  $x$  и  $y$ , можно посчитать расстояние между компонентами пары в проекции на небо,  $r_p = \sqrt{x^2 + y^2}$ . На практике, эта проекция расстояния вычисляется из наблюдаемого телесного угла  $\theta$  между галактиками и расстоянием до пары  $D$ , т.е.,  $r_p = D \theta$  (так как  $\theta \ll 1$ , кроме нескольких случаев близких пар).

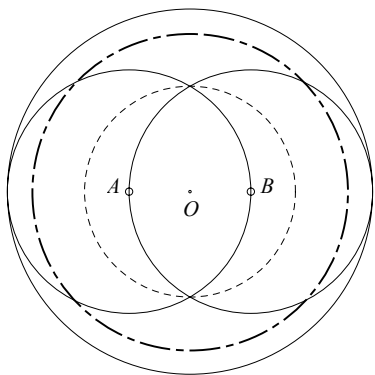
В связи с этими наблюдательными ограничениями мы должны выбрать критерии определения пар из этих двух параметров,  $v_z$  и  $r_p$ . Мы решили не слишком ограничивать диапазон, чтобы не упустить возможные действительные пары с удаленными компонентами. В процессе отбора мы ожидаем появления ложных (космологических) пар, которые будут учтены и исключены из последующего анализа.

Наши критерия отбора следующие:

- Малое расстояние между компонентами: проекция удаления  $r_p < r_{\text{lim}}$ , где  $r_{\text{lim}} = 1 \text{ Мпс}$  (напомним, что расстояние между Млечным Путем и МЗ1 составляет  $0.7 \text{ Мпс}$ ).
- Малая разность скоростей: разность лучевых скоростей  $v_z < V_{\text{lim}}$ , где  $V_{\text{lim}} = 500 \text{ км}^{-1}\text{с}$  (учитывая, что впоследствии мы будем вносить поправки за ложные пары, «компоненты» которых имеют большое различие скоростей, в основном, из-за хаббловского расширения).
- Критерий обоюдности: должно быть выполнено требование, что если самой близкой к галактике  $A$  является галактика  $B$ , то  $A$  также самая близкая к  $B$ . Это первый критерий изолированности, который также позволяет исключить мультипланетные системы.
- Информация об относительной изоляции:  $d_3$  — проекция расстояния ближайшей галактики из каталога UGC до пары (также при  $|\Delta V_r| < 500 \text{ км с}^{-1}$  по отношению к центру пары). Мы рассчитали отношение  $\rho = d_3/r_p$  для всех пар, удовлетворяющих первым трем критериям. Итоговый каталог содержит все пары, для которых  $\rho > \rho_l = 2.5$ , в нем приводятся значения  $\rho$  для каждой пары. Следовательно, подкаталоги слабо изолированных пар ( $\rho > 2.5$ ), изолированных пар (например,  $\rho > 5$ ) и сильно изолированных пар (например,  $\rho > 10$ ) включены в каталог. Это позволяет пользователю выбирать собственные критерии изоляции. Отметим, что внешняя сила, приложенная к каждому компоненту третьей галактикой, в среднем меньше на  $1/\rho^2$  силы, приложенной компонентами друг к другу, т.е. изолированные пары динамически и физически независимы.
- Дополнительный критерий изоляции: предыдущий критерий изолированности может не выполняться в области малых диаметров галактик ( $1'$ ), так как возможные компоненты пары меньшего размера, присутствующие в окрестностях, не будут числиться в UGC и будут пропущены. Поэтому мы решили пользоваться более глубоким Каталогом Галактик и Скоплений Галактик Цвики и др. (CGCG [10]) для поиска галактик в окрестностях пар. Предел звездной величины каталога CGCG ( $m < 15^m7$ ) соответствует среднему предельному диаметру UGC (голубая большая ось), равному  $0.8$ . Наконец, мы ограничили все пары так, что диаметры обоих компонентов были больше  $d \geq 1'2$ , а для других пар мы применили тот же параметр изоляции  $\rho_z = d_{3z}/r_p$  (как было сделано ранее для галактик UGC) к галактикам CGCG с разностями лучевых скоростей для центра пары  $|\Delta V_r| < 380 \text{ км с}^{-1}$ . Далее, все пары с  $\rho_z < 2.5$



**Рис. 2.** Наблюдаемое распределение  $\rho = d_3/r_p$  для всех 2280 обоюдных пар;  $r_p$  — проекция расстояния между компонентами пары;  $d_3$  — проекция расстояния между центром пары и ближайшей галактикой из UGC. Предел нашего каталога пар ( $\rho > \rho_l = 2.5$ ) показан вертикальной линией. Теоретически ожидаемое внутреннее обеднение из-за частичного ограничения на изоляцию, внесенного критерием обоюдности (см. рис. 3 и уравнение (4)), показано серой пунктирной линией. Аппроксимация внешней части законом  $\rho^{-2}$  показана серой пунктирной кривой.



**Рис. 3.** Иллюстрация ограничения по изолированности, внесенного критерием обоюдности. Этот критерий исключает присутствие третьей галактики в двух кругах радиусом  $r_p$  с центрами на каждом компоненте ( $A$  и  $B$ ) пары с общим центром  $O$ . Это исключение полно от  $\rho = 0$  до  $\rho = \sqrt{3}/2 \approx 0.866$  (пунктирный круг), затем частично на больших значениях (штрих-пунктирный круг), и наконец, оканчивается на  $\rho = 3/2$ .

были исключены из итогового каталога. Мы также исключили пары, где  $d \geq 1.2$ , но  $\rho_Z < 0.5$ .

Для применения этих критериев мы пользовались следующим методом.

Мы дополнили цифровую версию каталога UGC [7], в которой присутствуют 12 939 галактик, лучевыми скоростями из базы внегалактических данных HyperLeda [11]. Использовалась скорость  $V_{LG}$ , исправленная за центроид Местной группы. На время составления этой версии UGC в каталоге было доступно 12 141 лучевых скоростей объектов. Расстояния до галактик  $D$  взяты из «mod0» базы

HyperLeda (модуль, независимый от красного смещения), который является оценкой зависимости светимость—расстояние без влияния красного смещения. В иных случаях расстояния были получены по исправленному красному смещению  $V_{LG}$  из соотношения Хаббла  $D = V_{LG}/H_0$ , при  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпс}^{-1}$ .

Мы написали программу на Mathematica<sup>2</sup>, ищущую вокруг каждой галактики из каталога UGC все близкие галактики с проекцией расстояния на небо  $d < 1 \text{ Мпс}$ , для  $d = \theta D_1$  и  $d = \theta D_2$ , где  $D_1$  — космологическое расстояние опорной галактики, а  $D_2$  — космологическое расстояние каждой из выбранных галактик. Затем мы оставили только те галактики, для которых разница лучевой скорости со скоростью опорной галактики  $|\Delta V_r| < 500 \text{ км с}^{-1}$ .

Таким образом мы нашли 6489 неизоллированных галактик (для которых имеется один или более спутников по данным критериям), что значит, что примерно 50% UGC галактик изолированы (их список см. в [7]).

Далее мы применили критерий обоюдности к галактикам со спутниками. В результате мы получили 2280 обоюдных пары (где каждая галактика в паре является самой близкой к другой, что позволяет исключить мультиплеты типа тройных, цепочек и т.п.).

Наконец, из полученного списка обоюдных пар мы отбираем ближайшую галактику к их центру в всем каталоге UGC с относительной разностью лучевых скоростей  $|\Delta V_r| < 500 \text{ км с}^{-1}$ . Затем оставляем только те пары, у которых ближайшая галактика имеет соотношение проекций относительных расстояний  $d_3/r_p > 2.5$ . Всем трем критериям соответствуют 1321 пара.

Касаемо изолированности пар, мы отмечаем, что критерий обоюдности исключил мультиплетные системы, цепочки, и т.п. Теперь пользователь, работающий с каталогом, может варьировать степень влияния самой близкой к паре галактики в зависимости от типа проводимого исследования. Вместо того, чтобы выбирать произвольный критерий изоляции, мы определили для всех 2280 взаимных пар расстояния до ближайшей галактики из каталога UGC (вплоть до  $\rho = 10$ ). Соответствующее распределение показано на рис. 2. Значение  $\rho$  дано в каталоге, позволяя пользователю извлекать любой подкаталог изолированных пар согласно своему выбору.

По критерию  $\rho > 2.5$  отбирается около половины обоюдных пар (1246 из 2280) каталога. Мы нашли, что 633 из них (около 50%) слабо изолированы ( $2.5 < \rho < 5$ ), 613 пар (50% каталога пар)

<sup>2</sup><http://www.wolfram.com/mathematica/>

— изолированы  $\rho > 5$ , а 307 пар (25% каталога) — сильно изолированы ( $\rho > 10$ ), что согласуется с наблюдаемым убыванием распределения вероятностей  $\rho$  по закону  $\rho^{-2}$  (см. рис. 2).

Дополнительный критерий изоляции с использованием галактик CGCG (с параметром изолированности  $\rho_Z$ ) уменьшил набор изолированных пар до итогового числа 1005 объектов (16% галактик UGC). Статистика остается, в целом, такой же: у 509 изолированных пар  $\rho > 5$  (50% пар, т.е. 8% галактик UGC), 273 пары сильно изолированы,  $\rho > 10$  (27% пар, т.е. 4% галактик UGC), где  $\rho$  — тот же параметр изоляции, связанный с UGC галактиками.

Внутреннее обеднение проявляется для этого распределения при  $\rho < 3/2$ . Это прямое следствие критерия обоюдности, который косвенно содержит в себе критерий изоляции (см. рис. 3). Фактически, можно точно учесть это обеднение, руководствуясь простыми геометрическими соображениями. Действительно, взаимные пары — это те, для которых ближайшая UGC галактика приходится на область круга радиусом  $\rho r_p$  с центром  $O$  (штрих-пунктирный круг на рис. 3, на самом деле — тонкое кольцо), которая находится вне двух кругов радиусом  $r_p$  и центрами в  $A$  и  $B$  (два компонента пары). Эта область соответствует двум симметричным дугам, видимым из  $O$  под углом  $\alpha$ . Если принять плотность галактик UGC вдоль штрих-пунктирного круга постоянной, то доля  $p$  взаимных пар составит  $p = \alpha/\pi$ . Отсюда также вытекает отсутствие взаимных пар для  $\rho < \sqrt{3}/2 \approx 0.866$  (штриховой круг на рис. 3) и, в свою очередь, взаимность всех пар с  $\rho > 3/2$ .

Легко вычислить  $\alpha$  методами аналитической геометрии, а именно

$$\alpha = 2 \arctan \left( \frac{\rho^2 - 3/4}{\sqrt{1 - (\rho^2 - 5/4)^2}} \right). \quad (4)$$

Получается, что доля  $p$  квазилинейно возрастает между от 0 до 1 при вариации  $\rho$  от  $\sqrt{3}/2$  до  $3/2$ , что прекрасно соответствует наблюдаемому распределению взаимных пар (см. рис. 2).

#### 4. ПОЛУЧЕНИЕ ТОЧНЫХ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ДЛЯ КОМПОНЕНТОВ ПАР ГАЛАКТИК

Одной из основных целей нашего исследования пар галактик является анализ распределения реальных (не в проекции) разностей скоростей между их компонентами. Для этого требуется использование самых точных лучевых скоростей  $V_r$  объектов нашего каталога. Нас не устраивают значения

$V_r$ , приведенные в базе HyperLeda, так как они представляют собой взвешенное среднее всех измерений, некоторые из которых точны, некоторые — нет. Даже при том, что автоматический метод, применяемый HyperLeda, учитывает ошибки при взвешивании, присутствие очень неточных значений довольно часто влияет на итоговую величину скорости. Поэтому мы предпочли выбрать только точные значения из базы и использовать только их.

Для получения значений  $V_r$  мы воспользовались библиографией базы HyperLeda, доступной на момент исследования (март 2014 г.) и базой данных внегалактических объектов NASA (NED [12]), в которой приведены разные измерения  $V_r$  вместе с погрешностями для каждой галактики (к сожалению, местами устаревшие).

Два основных источника измерений  $V_r$  — радио линия 21 см HI и оптические линии. Измерения HI в целом более точны чем оптические измерения, за исключением данных из Слоановского цифрового обзора неба (SDSS-III), точность которых выше  $5 \text{ км с}^{-1}$ , что эквивалентно точности измерений по HI.

Измерения HI компонентов пар галактик сопряжены с риском путаницы в случаях, когда угловое расстояние между компонентами меньше ширины диаграммы направленности на уровне половинной мощности радиотелескопа. Данный эффект может быть не проявлен в профиле линии HI, если разность скоростей между компонентами мала. Для того, чтобы не вносить эту ошибку, мы исключили измерения HI для подобных пар, используя только оптические данные; если оптические данные отсутствуют для обоих компонентов, то пара исключалась из нашего каталога. Отметим, что наименьшая ширина диаграммы направленности на уровне половинной мощности одноантенного радиотелескопа принадлежит Аресибо (3'3); таким образом, исключительно оптические измерения брались для пар с угловыми расстояниями менее 3'3.

Наши основные источники точных  $V_r$  следующие:

- оптические измерения из
  - (i) SDSSIII DR8;  $\varepsilon_{V_r} < 5 \text{ км с}^{-1}$  [13];
  - (ii) обзора красных смещений 2MASS;  $\varepsilon_{V_r} < 30 \text{ км с}^{-1}$  [14];
- данные линии HI из
  - (i) однородной компиляции спектральных параметров HI для 9000 галактик; среднее значение  $\varepsilon_{V_r} = 4 \text{ км с}^{-1}$  [15];
  - (ii) обзора Аресибо ALFALFA; очень точные  $V_r$ ,  $\varepsilon_{V_r} < 2 \text{ км с}^{-1}$  [16].

**Таблица.** Каталог изолированных пар галактик UGC: пример (первые и последние пары). Полный каталог доступен в базе данных VizierR

UGC <sub>1</sub>	UGC <sub>2</sub>	V <sub>1</sub>	ε <sub>V<sub>1</sub></sub>	V <sub>2</sub>	ε <sub>V<sub>2</sub></sub>	ΔV <sub>r</sub>	ε <sub>ΔV</sub>	r <sub>p</sub>	ρ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	23	7864	51	7975	4	111	51.2	0.222	10.
20	12905	4153	22	4104	20	49	29.7	0.399	10.
34	36	6137	2	6299	24	162	24.1	0.243	3.9
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12906	12919	5366	6	5486	4	120	7.2	0.391	3.1
12908	12911	4903	30	4768	7	135	30.8	0.018	10.
12914	12915	4371	8	4336	7	35	10.6	0.019	10.

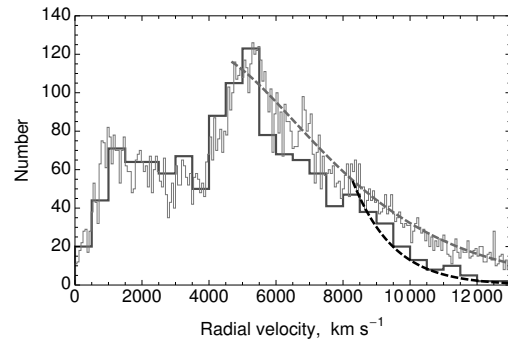
После исключения пар с потенциально перепутанными измерениями, пар с неточными  $V_r$  ( $\varepsilon_{V_r} > 100 \text{ км с}^{-1}$ ) и двух ложных пар ( $\{UGC6539, UGC6545\}$  и  $\{UGC11913, UGC11919\}$ , идентифицированных по очень большим разностям скоростей между компонентами), наш итоговый каталог стал содержать 1246 изолированных пар галактик с  $\Delta V_r < 500 \text{ км с}^{-1}$ . Неопределенность разностей лучевых скоростей компонентов пар составляет  $\varepsilon_{\Delta V_r} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}$ , где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — соответствующие ошибки лучевых скоростей компонентов.

## 5. ИТОГОВЫЙ КАТАЛОГ ПАР И ЕГО СВОЙСТВА

В таблице приведены первые и последние пункты из каталога изолированных пар галактик UGC в качестве примера. Полная версия каталога будет доступна в базе данных VizierR<sup>3</sup>. Для каждой пары (в порядке возрастания номера первого компонента в UGC) в каталоге содержится следующая информация: в колонке (1) — номер первого компонента в UGC; (2) — номер второго компонента в UGC; (3) — лучевая скорость  $V_1$  относительно Солнца первого компонента,  $\text{км с}^{-1}$ ; (4) — ошибка  $V_1$ ,  $\varepsilon_{V_1}$ ; (5) — лучевая скорость  $V_2$  относительно Солнца второго компонента,  $\text{км с}^{-1}$ ; (6) — ошибка  $V_2$ ,  $\varepsilon_{V_2}$ ; (7) — модуль  $|\Delta V_r|$  разности лучевых скоростей членов пары,  $\text{км с}^{-1}$ ; (8) — ошибка  $|\Delta V_r|$ ,  $\varepsilon_{\Delta V}$ ; (9) — проекция на картинную плоскость расстояния  $r_p$  между двумя компонентами пары, Мпс; (10) — соотношение  $\rho = d_3/r_p$  между проекцией расстояния  $d_3$  ближайшей UGC галактики до центра пары и расстоянием между компонентами  $r_p$  (значение 10. в таблице означает, что  $\rho \geq 10$ ).

Детальный анализ каталога, в частности, статистическое депроецирование разностей скоростей и расстояния между членами пар, будет осуществлен в последующих работах. Здесь мы представляем общие свойства каталога.

<sup>3</sup><http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>



**Рис. 4.** Распределение пар в зависимости от космологического расстояния, измеренного по лучевым скоростям (жирная сплошная линия), в сравнении с распределением для всех галактик UGC (тонкая сплошная линия), после нормализации в диапазоне  $[0-5500] \text{ км с}^{-1}$ . Серая штриховая линия показывает аппроксимацию ожидаемой экспоненциальной функции диаметра для убывающей плотности числа галактик, которая наблюдается после примерно  $5500 \text{ км с}^{-1}$ . Черная штриховая кривая — аппроксимация ожидаемого убывания пар, относительное число которых быстро возрастает с расстоянием после приблизительно  $8000 \text{ км с}^{-1}$  (см. текст).

### 5.1. Распределение расстояний

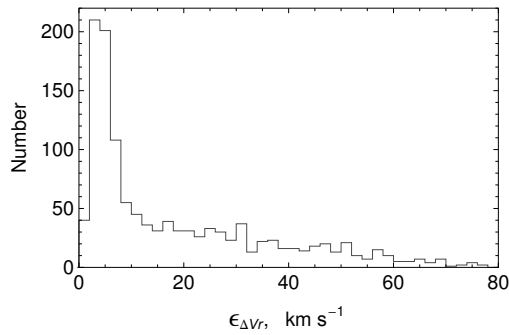
Распределение космологических лучевых скоростей (следовательно и расстояний) для компонентов пар показано на рис. 4, где также приведено сравнение с распределением расстояний для галактик каталога UGC.

Согласие между двумя распределениями в целом удовлетворительно, что предполагает, что пары были верно выбраны из родительского распределения каталога UGC, и что доля пар вплоть до  $13000 \text{ км с}^{-1}$   $200 \text{ Мпс}$  почти постоянна.

Однако можно заметить, что убывание числа UGC галактик на больших расстояниях ( $V_r > 6000 \text{ км с}^{-1}$ ) из-за введенного ограничения на видимый диаметр происходит медленнее, чем для пар галактик. Как было показано в Разделе 2.2, уменьшение числа галактик UGC находится в отличном соответствии с экспоненциальной функцией диаметров Хадсона и Линден-Белла при  $V_r > 7500 \text{ км с}^{-1}$ , на расстояниях, не подверженных влиянию сгущения галактик. С помощью этой функции можно также учесть более быстрое убывание распределения для пар на этих расстояниях. Действительно, плотность  $\rho(v)$  галактик UGC на расстояниях, измеренных с помощью космологической лучевой скорости  $v$ , составляет:

$$\rho(v) = \rho(0) \exp\left(-\frac{v}{v^*}\right) \quad (5)$$

из уравнения (3).



**Рис. 5.** Гистограмма ошибок измерений  $\varepsilon_{\Delta v_r} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}$  разностей лучевых скоростей компонентов пар. Ширина бина составляет  $2 \text{ km s}^{-1}$ .

Пусть  $\alpha$  будет долей видимых UGC галактик, которые состоят в парах на этих расстояниях. Только пары, у которых вторая галактика видима на этих расстояниях, можно идентифицировать как таковые, т.е. доля  $p$  реальных пар задается уравнением

$$p = \exp\left(-\frac{v}{v^*}\right), \quad (6)$$

в предположении того, что образование пар не зависит от линейных диаметров галактик (что также значит, что  $\alpha$  не меняется с расстоянием).

Таким образом, плотность видимых пар на расстоянии, заданном  $v$ , есть:

$$\rho_p = \alpha \rho(0) \exp\left(-2\frac{v}{v^*}\right), \quad (7)$$

откуда

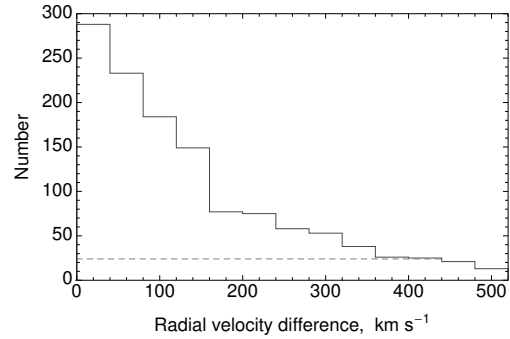
$$dN(v) = \alpha \times 4\pi f \frac{\rho(0)}{H_0^3} \exp\left(-2\frac{v}{v^*}\right) v^2 dv, \quad (8)$$

где  $f = 0.42$  для UGC (см. уравнение (3)).

рисунок 4 показывает соответствующую кривую  $dN(v)$  для  $v > 7500 \text{ km s}^{-1}$ , находящуюся в хорошем согласии с наблюдаемым распределением пар.

### 5.2. Погрешность разности скоростей

На рисунке 5 показана гистограмма  $\varepsilon_{\Delta v_r}$ ; отметим большое число малых значений  $\varepsilon_{\Delta v_r}$ . Среднее значение  $\varepsilon_{\Delta v_r}$  составляет  $\varepsilon_{\text{med}} = 10 \text{ km s}^{-1}$ , что гораздо ниже среднего значения, приблизительно  $200 \text{ km s}^{-1}$ , разностей лучевых скоростей между компонентами пар. Виден острый пик точных измерений скоростей на  $4 \text{ km s}^{-1}$  (измерения в радио HI и SDSS), а также хвост менее точных оптических значений.



**Рис. 6.** Гистограмма разностей лучевых скоростей между компонентами пар галактик, при бинах в  $40 \text{ km s}^{-1}$ . Штриховая горизонтальная линия — оценка максимального вклада космологически ложных пар, которая становится 100% после примерно  $380 \text{ km s}^{-1}$ .

### 5.3. Распределение разностей лучевых скоростей компонентов пар

На рис. 6 мы приводим гистограмму разностей между лучевыми скоростями компонентов пар галактик, которая убывает с ростом лучевой скорости, как и предсказано теоретически [17]. Небольшое число значений за пределами каталога,  $500 \text{ km s}^{-1}$ , получено в связи с уточнениями лучевых скоростей, сделанными после выхода каталога. Полученная гистограмма подтверждает теоретическое ожидание монотонного убывания распределения вследствие эффекта проекции (для произвольно распределенных направлений векторов скорости).

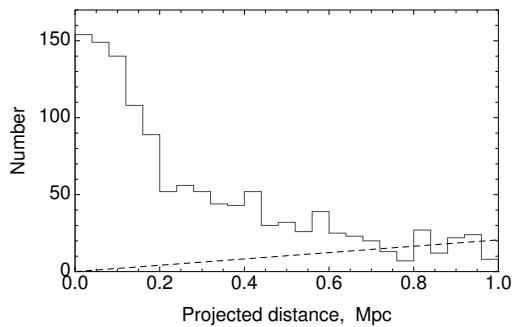
В последующей работе мы детально изучим это распределение скоростей и его депроекцию.

### 5.4. Распределение расстояний между компонентами пар

Распределение проекций расстояний между компонентами пар в нашем каталоге дано на рис. 7. Хорошо видны два различных типа популяции, с двумя разными распределениями численной плотности, одна с  $d < 0.2 \text{ Mpc}$ , другая с  $0.2 < d < 0.75 \text{ Mpc}$ . Плотность становится очень мала при значении  $0.75 \text{ Mpc}$ . Некоторые пары встречаются между  $d = 0.75 \text{ Mpc}$  и пределом нашего каталога,  $1 \text{ Mpc}$ ; их можно считать ложными (космологическими) «парами». Среднее значение проекции расстояния для всей выборки составляет  $\langle d \rangle = 0.29 \text{ Mpc}$ .

### 5.5. Ложные (космологические) «пары»

Некоторые пары ожидаемо являются результатом обычных эффектов проекции, при том что их компоненты на самом деле находятся на больших



**Рис. 7.** Гистограмма проекций расстояний между компонентами пар, в бинах по 0.04 Мпс. Штриховая линия — оценка максимального вклада космологических ложных пар.

относительных расстояниях. Действительно, критерий по лучевым скоростям,  $|\Delta V_r| < 500 \text{ км с}^{-1}$ , был выбран для того, чтобы включить в рассмотрение очень близкие пары, которые имеют высокие взаимные скорости, подчиняясь третьему закону Кеплера. Однако, такое ограничение на разность скоростей соответствует большому космологическому расстоянию,  $d_c = DV/H_0 = 7 \text{ Мпс}$  (при постоянной Хаббла  $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпс}^{-1}$ ). Оно превышает наш критерий взаимного расстояния  $r_p < 1 \text{ Мпс}$  при  $|\Delta V_r| = 70 \text{ км с}^{-1}$ .

Мы попытались оценить присутствие космологических ложных «пар», используя их ожидаемую зависимость от лучевых скоростей и проекций расстояний между компонентами. Объем, задаваемый нашими критериями, является практически цилиндром с осью вдоль луча зрения, так что число ложных пар зависит от  $|\Delta V_r|$  линейно. Следовательно, их доля в интервале  $[|\Delta V_r|, |\Delta V_r| + d|\Delta V_r|]$  постоянна (см. рис. 6). Что касается проекций взаимных расстояний, то зависимость объема от них квадратична, а следовательно ожидаемая зависимость от  $r_p$  на гистограмме линейна,  $N \propto r_p$ . Мы провели численное моделирование, которое подтвердило ожидаемые зависимости.

Наблюдаемое распределение  $|\Delta V_r|$  подтверждает этот результат, становясь почти плоским после примерно  $380 \text{ км с}^{-1}$  (затем падает вблизи  $500 \text{ км с}^{-1}$ ). Значение  $380 \text{ км с}^{-1}$  — правдоподобное значение для максимальной разности скоростей членов реальных пар. Отождествляя плоский хвост гистограммы (содержащий примерно 60 пар) с ожидаемым плоским распределением для космологических пар, можно наложить верхний предел вклада ложных пар. Так как наблюдаемая постоянная доля в диапазоне  $380\text{--}500 \text{ км с}^{-1}$  составляет примерно 20 пар при бинах в  $40 \text{ км с}^{-1}$  (см. рис. 6), мы оцениваем максимальное число ложных пар около 250, т.е. приблизительно 25% нашего каталога. Такое достаточно большое число

является следствием выбора критериев: (1) использовать большое ограничение для лучевых скоростей  $|\Delta V_r| < 500 \text{ км с}^{-1}$ , а также (2) учитывать космологическое «загрязнение». Мы предпочли применить описанную стратегию, чем рисковать, пропустив подходящие пары.

Наблюдаемое распределение проекций взаимных расстояний также соответствует ожидаемому линейному вкладу ложных пар (см. рис. 7). Действительно, гистограмма показывает явное изменение поведения, убывая до минимума на 0.75 Мпс, а затем снова возрастая к пределу каталога 1 Мпс. Считая все пары за этим пределом ложными космологическими парами, мы получаем еще одну оценку максимального числа этих пар — 210 объектов, что находится в приемлемом согласии с определением по скоростям (250). Наконец, число ложных пар в сокращенном каталоге  $|\Delta V_r| < 380 \text{ км с}^{-1}$  и  $r_p < 0.75$  (содержащем 860 пар) составляет не более  $90 \pm 20$ , так что доля упала до менее чем 10%.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе мы составили выборку изолированных пар галактик, пользуясь Упсальским каталогом галактик (UGC). Для этой цели мы выбрали точные количественные критерии для определения изолированных пар галактик, а именно: (1) малая разность лучевых скоростей между компонентами пар:  $|\Delta V_r| < 500 \text{ км с}^{-1}$ ; (2) малая проекция расстояния между компонентами пар:  $r_p < 1 \text{ Мпс}$ ; (3) обоюдность, позволяющая исключить мультиплетные системы; (4) относительная изоляция: в каталоге приводится отношение  $\rho$  расстояния до ближайшей UGC галактики (с разностью скоростей с парой менее  $500 \text{ км с}^{-1}$ ) к расстоянию между компонентами для  $\rho > 2.5$ , таким образом позволяющее применять любые критерии изоляции после этого значения; (5) дополнительный критерий изоляции для исключения пар с близкими CGCG галактиками.

Финальный каталог содержит 1005 пар галактик с  $\rho > 2.5$ , из которых 509 изолированы с  $\rho > 5$ ; эта подвыборка содержит примерно 50% пар, т.е. около 10% галактик UGC. Эта доля та же, что и полученная Караченцевым и Макаровым [5] для изолированных пар (с использованием разных критериев). Наконец, 273 пары — сильно изолированы с  $\rho > 10$  (около 25% пар, т.е. приблизительно 5% галактик в каталоге UGC), что составляет ту же долю, что и в основополагающем каталоге Караченцева [3].

Применение этих критериев привело позволило собрать для галактик каталога наиболее точные



лучевые скорости на сегодняшний день. Распределение пар в зависимости от космологического расстояния почти идентично распределению галактик UGC, за исключением возможных ошибок расстояний. Доля «ложных» космологических пар, т.е. галактик, которые кажутся близкими из-за эффектов проекции, оценивается как менее чем 25% от полного каталога, и менее чем 10% сокращенного каталога  $|\Delta V_r| < 380 \text{ км с}^{-1}$  и  $r_p < 0.75$ .

Таким образом, у нас есть достаточно доброкачественная и большая выборка, которая позволяет получать статистически значимые результаты исследования. Составление каталога пар — первый шаг перед его расширением в будущих работах, в которых будут использованы доступные сегодня большие базы данных (используемые в данной статье для поиска точных красных смещений).

В последующей работе мы планируем выполнить исследование динамики отобранных пар галактик с целью получения масс их компонентов, соотношений масса—светимость и проверки возможного наличия у них массивных гало и темной материи. Такая работа нуждается в получении статистического распределения реальных разностей скоростей между членами пар и реальных расстояний между ними по их известным проекциям. Это задача, которая будет описана и решена в ходе дальнейшего анализа нашего каталога пар галактик.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В данной работе использовалась база данных HyperLeda (<http://leda.univ-lyon1.fr>), а также база данных внегалактических объектов NASA/IPAC (NED), поддержка которой осуществляется лабораторией реактивных двигателей Калифорнийского технического института, по контракту с национальной администрацией аэронавтики и космических

исследований (NASA). Мы благодарим анонимного рецензента за очень полезные комментарии по поводу критерия изоляции, которые позволили улучшить каталог.

### 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, *Soobshch. Spets. Astrofiz. Obs.* **7**, 92 (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. M. Sol Alonso, D. G. Lambas, P. Tissera, and G. Coldwell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367**, 1029 (2006).
7. P. Nilson, *Nova Acta Regiae Soc. Sci. Upsaliensis Ser. V* (1973).
8. M. J. Hudson and D. Lynden-Bell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **252**, 219 (1991).
9. D. da Rocha, PhD Thesis (2004).
10. F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild, et al., *Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies, Vol. 1* (California Inst. of Technology, Pasadena, 1961).
11. D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, A13 (2014).
12. NED, NASA/IPAC Extragalactic Database, <https://ned.ipac.caltech.edu/>.
13. H. Aihara, C. Allende Prieto, D. An, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **193**, 29 (2011).
14. J. P. Huchra, L. M. Macri, K. L. Masters, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 26 (2012).
15. C. M. Springob, M. P. Haynes, R. Giovanelli, and B. R. Kent, *Astrophys. J. Suppl.* **160**, 149 (2005).
16. M. P. Haynes, R. Giovanelli, A. M. Martin, et al., *Astron. J.* **142**, 170 (2011).
17. W. G. Tifft, *Astrophys. J.* **211**, 31 (1977).

Перевод Е. Чмыревой

### P. Chamaraux and L. Nottale

#### A Catalog of Isolated Galaxy Pairs with Accurate Radial Velocities

The present paper is devoted to the construction of a catalog of isolated galaxy pairs from the Uppsala Galaxy Catalog (UGC), using accurate radial velocities. The UGC lists 12 921 galaxies to  $\delta > -2^{\circ}30'$  and is complete to an apparent diameter of  $1'$ . The criteria used to define the isolated galaxy pairs are based on velocity, interdistance, reciprocity and isolation information. A peculiar investigation has allowed to gather very accurate radial velocities for pair members, from high quality HI and optical measurements (median uncertainty on velocity differences  $10 \text{ км с}^{-1}$ ). Our final catalog contains 1005 galaxy pairs with  $\rho > 2.5$ , of which 509 have  $\rho > 5$  (50% of the pairs, i.e. 8% of the UGC galaxies) and 273 are highly isolated with  $\rho > 10$  (27% of the pairs, i.e. 4% of the UGC galaxies). Some global properties of the pair catalog are given.

Keywords: *catalogues—galaxies:general—galaxies:groups:general*