

## ГАЛАКТИКИ ВТОРОГО БЮРАКАНСКОГО ОБЗОРА В ТЕСНЫХ ПАРАХ

Т.А. НАЗАРЯН

Поступила 20 ноября 2013

Принята к печати 6 декабря 2013

Мы отобрали 418 пар, содержащих галактики Второго Бюраканского Обзора (SBS), с  $dV < 800 \text{ км с}^{-1}$  и  $Dp < 100 \text{ кпк}$ , и исследовали зависимость звездообразования и активности ядер от кинематики пар, морфологий и масс галактик в парах. Были получены следующие основные результаты: SBS галактики с соседями не отличаются по спектральным типам от изолированных SBS галактик. Галактики SBS ярче соседей в среднем на  $0^m.5$ , однако имеют статистически не отличающиеся цвета, морфологии и темпы звездообразования. Существует слабая, но статистически значимая корреляция между морфологиями галактик в парах. Соседи SBS галактик имеют меньшую долю звездообразующих галактик, и большую долю галактик всех остальных спектральных типов. Относительный темп звездообразования (SSFR) увеличивается у галактик с уменьшением расстояния до соседней галактики для галактик всех морфологических типов. Он максимален для галактик более ранних типов (на 1 порядок), и меньше у галактик более поздних морфологических типов. Также существует увеличение SSFR у галактик во всех категориях по массе. Как мажорные, так и минорные взаимодействия могут увеличивать SSFR на 0.7 порядка, однако в случае мажорных взаимодействий эффект сильнее, а в случае минорных только более массивные члены пар имеют прирост к SSFR. Наличие соседней галактики с более ранним морфологическим типом не увеличивает SSFR, соседние галактики с такими же морфологическими типами увеличивают SSFR умеренно, а соседние галактики с более поздними морфологическими типами увеличивают SSFR значительно.

**Ключевые слова:** *галактики: взаимодействия: звездообразование: активные: пекулярные*

1. *Введение.* Взаимодействия галактик представляют большой интерес в контексте исследования эволюции галактик. В работах [1,2] было показано, что взаимодействия галактик, особенно со сравнимыми по массе соседями, могут возбуждать активные ядра галактик (AGN). Во многих работах, например [2-4], было показано, что тесные взаимодействия и слияния галактик также могут увеличивать темп звездообразования (SFR) в разы. В работе [5] был представлен каталог 359 близких соседей 274 галактик Маркаряна, отобранных согласно проецированному расстоянию и небольшой разнице лучевых скоростей. Комбинируя данные из каталога [5] и каталога галактик Маркаряна [6], а также фотометрические и спектроскопические параметры этих галактик из 9-го выпуска данных (DR9) Слоуновского Цифрового Обзора Неба (SDSS, [7]), в [8] представлены результаты статистического исследования пар с компонентами, являющимися галактиками

Маркаряна. Исследование выявило ряд интересных закономерностей, в основном, касающихся связей между динамическими параметрами пар, интегральными и спектральными параметрами галактик Маркаряна и их соседей. В частности, было показано, что SSFR галактик в парах с меньшими проецированными расстояниями  $D_p$  или с меньшей разницей по лучевым скоростям  $dV$  в среднем на 0.5 порядка выше, чем в парах с большими  $D_p$  или  $dV$ . Также было выявлено, что доля ятивных ядер в морфологически более возмущенных парах и в парах с меньшим  $D_p$  более высокая.

Полученные результаты явились стимулом для проведения аналогичного исследования тесных пар галактик, одна из компонент которых является объектом SBS, (см. [9,10]). Несмотря на то, что галактики SBS и галактики Маркаряна являются схожими объектами, в частности 188 SBS галактик одновременно включены в каталог галактик Маркаряна [9], SBS объекты в среднем имеют сравнительно большие красные смещения и слабые визуальные звездные величины [10]. SBS галактики были обнаружены в ходе "комбинированного" обзора неба, используя, подобно обзору Маркаряна, наличие сильного ультрафиолетового континуума (UVC) и/или присутствие сильных эмиссионных линий (EL) в спектрах [9,10]. Оказалось, что эти два метода обзора одинаково полезны для обнаружения галактик с разным уровнем активности ядер, но в то же время способствуют обнаружению объектов, которые по некоторым параметрам и свойствам немного отличаются друг от друга [11]. Например, UVC метод более эффективен для обнаружения Сейфертовских активных ядер, а EL метод для обнаружения карликовых галактик со вспышкой звездообразования [11]. Что касается темы настоящего исследования, то галактики в UVC и EL выборках одинаково часто встречаются в тесных парах галактик, но среди взаимодействующих систем наиболее часто представлены UVC галактики с наиболее сильным ультрафиолетовым континуумом [11]. В настоящей работе мы постарались исследовать свойства SBS галактик и их соседей в тесных парах. В частности, представляет интерес сравнение свойств компонентов в паре: галактик SBS, отобранных по критериям UVC и EL, и их соседей, отобранных без критериев наличия данных спектральных характеристик. Зависимость свойств SBS галактик и их соседей от динамических параметров пар поможет ответить на вопрос: взаимодействия с какими по свойствам соседями наиболее сильно возбуждают звездообразование или AGN в галактиках. Сравнительная оценка вкладов от взаимодействий галактик и собственных свойств галактик, таких как морфология, масса и т.д., поможет выявить, какие процессы больше влияют на звездообразование и/или AGN в галактиках: внутренние или внешние.

Структура настоящей работы следующая: в разделе 2 представлены выборка пар, критерии отбора соседей, параметры, используемые в исследовании, а также различие между данной работой и работой [8]. В разделе 3 описываются

результаты статистического исследования выборки и проводится их дискуссия. Раздел 4 - заключение настоящей работы. Значение константы Хаббла было принято равным  $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ .

2. *Выборка.* Для настоящей работы мы использовали каталоги [9,10] объектов SBS, откуда взяли координаты и красные смещения, а также информацию о критериях (UVC и/или EL) обнаружения каждого отдельного SBS объекта. Всего каталог [10] содержит 1676 SBS объектов. Далее мы исключили звездные объекты и галактики с красными смещениями меньше 0.005, а также выбрали родительские галактики как SBS объекты, если в каталоге [10] SBS объектами являлись регионы III. Красные смещения SBS галактик были проверены, используя наиболее последний SDSS DR10 [12], который содержит новую спектральную информацию, полученную спектрографом BOSS. В результате были выяснены красные смещения для 20 галактик, также уточнены красные смещения для 197 галактик (исправлены на более чем  $300 \text{ км с}^{-1}$ ).

В работе [5] поиск соседей галактик Маркаряна был проведен с помощью базы данных внегалактических объектов NASA/IPAC (NED) и SDSS. Были использованы три критерия: 1) Красное смещение галактик Маркаряна должно быть больше, чем 0.005. 2) Разница лучевых скоростей галактик Маркаряна и соседей должна быть не более, чем  $800 \text{ км с}^{-1}$ . 3) Проецированное расстояние между галактикой Маркаряна и соседом должно быть менее 60 кпк. В настоящей работе мы изменили третий критерий, увеличив лимит по расстоянию до 100 кпк, учитывая, что галактики SBS более удалены, чем Маркаряновские, также учитывая результаты некоторых последних работ, например [13], уточнивших предельные расстояния, с которых воздействие соседей может возбуждать звездообразование. Также, при визуальном исследовании мы поместили SBS галактики, показывающие явные признаки слияния с близкими соседями (значительные морфологические возмущения, такие как приливные рукава, мосты и т.д.), и, в случаях, если один компонент пары не имеет спектр, но его фотометрическое красное смещение согласуется со спектроскопическим красным смещением второго, добавили пару в список. Это было сделано с целью не пропустить наиболее тесно взаимодействующие пары, учитывая то, что SBS галактики в среднем находятся вдвое дальше, чем Маркаряновские, и влияние эффекта "столкновения" оптических волокон (*fiber collision*) на неполноту выборки пар сильнее, также, что галактики имеют более слабые звездные величины, и спектроскопическая неполнота SDSS ощущается сильнее. Всего было найдено 418 пар с SBS галактиками, из которых 38 были найдены по красным смещениям из NED, а 33 визуально и по фотометрическим красным смещениям, остальные были найдены по их красным смещениям из SDSS. В списке пар имеются 53 случая, когда оба компонента пары

являются SBS галактиками.

Координаты участков неба, на которых был выполнен обзор SBS (примерно  $8^h < RA < 17^h$  и  $+49^\circ < Dec < +61^\circ$ ) по большей части находятся внутри охвата SDSS, что позволяет наиболее полно использовать фотометрические и спектроскопические данные SDSS. Мы визуальнo проверили точное соответствие координат фотометрических объектов и оптических спектров SDSS центрам галактик. Мы использовали композитно-модельные звездные величины SDSS (*cmodel*) для светимостей и модельные звездные величины SDSS (*model*) для показателей цвета. Поправки из-за галактического поглощения и *K*-коррекции учтены. Пары галактик были сгруппированы по отношению масс компонент на мажорные ( $|\log(M_1/M_2)| \leq 0.6$ ) и минорные ( $|\log(M_1/M_2)| > 0.6$ ) [14].

Мы включили в статистику массы и SFR SBS галактик и их соседей в SDSS, которые были получены, используя разные модели звездного населения [15] для наилучшего приближения наблюдаемых звездных величин *ugriz* при данном спектроскопическом красном смещении. Как наиболее подходящие для взаимодействующих галактик, мы выбрали модели с каноническими модами звездообразования, включающими экспоненциально затухающие, постоянные с усечением и постоянные модели звездообразования с различными характеристическими периодами и металличностями. Мы использовали также BPT [16] классификацию галактик, полученных Портсмутской группой [17], которая основывается на параметрах эмиссионных линий ионизированного газа (после исключения вклада звездного непрерывного спектра, линий поглощения и эмиссии).

Морфологическая классификация SBS галактик и их соседей является намного более трудной задачей, чем классификация галактик Маркаряна, из-за большего среднего расстояния выборки. По этой причине в настоящей работе мы не имели возможность классифицировать галактики по степеням морфологических возмущений, в отличие от [8]. Также вместо стандартной классификации по Хабблу мы использовали фотометрические параметры, коррелирующие с морфологией галактик. Индекс концентрации *Cin*, определенный как отношение радиусов, включающих 50% и 90% Петросяновских потоков, является хорошим индикатором морфологий галактик [18]. Чем он меньше, тем более ранний тип имеет галактика. Другим параметром, характеризующим морфологию галактик, является доля де Вокулеровского профиля (*frac\_deV*) в композитной модели профилей яркости галактик. Данный параметр принимает значение от 0 (полностью экспоненциальный профиль) до 1 (полностью де Вокулеровский профиль). Оба параметра хорошо коррелируют как друг с другом, так и с показателями цветов и SSFR галактик выборки. Использование фотометрических параметров для морфологической классификации вместо визуальной классификации

позволяет определить морфологии галактик точнее и исключает селекционные эффекты при классификации из-за различных расстояний до галактик.

Мы исследовали влияние некоторых селекционных эффектов на выборку, которые могут влиять на результаты дальнейшей статистики. Среднее расстояние до пар равно 134 Мпк, однако 5% наиболее удаленных пар находятся от 400 до 800 Мпк. Более удаленные галактики выборки являются более яркими и массивными и имеют более ранние морфологические типы. Однако распределение галактик по  $D_p$  не зависит от красного смещения. Галактики с разными массами, светимостями и морфологическими типами имеют то же самое распределение по  $D_p$ .

3. *Статистика и обсуждение.* В работе [8] было показано, что выбор  $dV$  как параметра, связанного с интенсивностью/фазой взаимодействия галактик, неудачен. Изменения по данному параметру отражают изменения плотности окружения пар: пары с большими  $dV$  находятся в более плотных окружениях, и следовательно, имеют более ранние морфологические типы. Поэтому в настоящей работе мы использовали  $dV$  только для отбора соседей галактик SBS.

3.1. *Свойства галактик в парах.* Мы сравнили свойства галактик SBS и их соседей. Средняя абсолютная зв. вел.  $m_{model\ r}$  галактик SBS равна  $-20.2 \pm 1.8$ , соседей  $-19.6 \pm 1.8$ . Тест Колмогорова-Смирнова (КС) указывает, что распределения по звездным величинам разные. Показатели цвета  $u-g$  и  $g-r$ , индикаторы морфологии  $Cin$  и  $frac\_deV$ , а также SSFR статистически не отличаются у галактик SBS и их соседей. Существует слабая, но статистически значимая корреляция между морфологиями галактик в парах.  $\chi^2$  тест указывает на незначительную разницу в распределениях по спектральным типам между выборкой всех галактик SBS и подвыборкой SBS галактик с близким соседом. Из 292 SBS галактик с доступной спектральной классификацией 78% являются звездообразующими, 10% композитными, 2% Сейфертовскими, 10% типа LINER, и только одна галактика классифицирована как пассивная. Существует значительная статистическая разница в распределениях по спектральным типам между галактиками SBS в парах и соседними галактиками. Количественно она проявляется в меньшей доле звездообразующих галактик среди соседей и в большей доле галактик всех остальных типов.

3.2. *Зависимость SSFR от параметров взаимодействия.* Главными параметрами, описывающими взаимодействия, являются  $D_p$  и отношение масс (или светимостей) компонентов пары. На рис. 1 показана зависимость SSFR от  $D_p$ , сгруппированная по морфологиям, согласно индикатору  $frac\_deV$ . Общая вариация SSFR галактик выборки равна 0.7 порядка, изменение SSFR, обусловленное морфологиями, равно 0.5 порядка. Рис. 1

показывает, что существует увеличение SSFR у галактик всех морфологических типов с более близкими соседями. Оно максимальное для галактик более ранних типов (на 1 порядок), и меньше у галактик более поздних морфологических типов (на 0.3 порядка). Можно сделать вывод, что механизм индуцирования звездообразования через взаимодействия галактик работает лучше у галактик более ранних морфологических типов. А у галактик поздних морфологических типов собственный SSFR и так высок, и его относительное увеличение благодаря взаимодействию с соседом невелико.

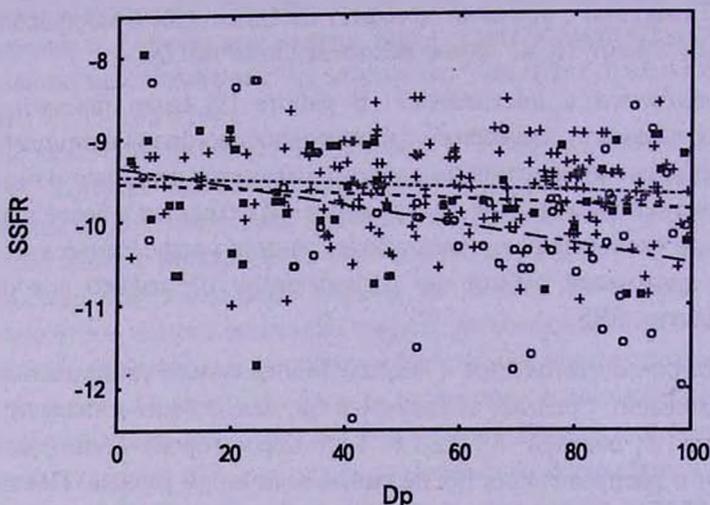


Рис.1. Зависимость SSFR ( $M_{\odot}$  в год, в логарифмическом масштабе) от  $D_p$  (кпк), сгруппированная по значениям индикатора морфологии  $frac_{deV}$  для галактик более ранних типов (полые круги, штрих-пунктирная линия наилучшего приближения), средних типов (заполненные квадраты, штриховая линия), и для более поздних типов (крестики, пунктирная линия).

Нормирование SFR по массе не полностью исключает зависимость от массы, потому что галактики с разными массами имеют разные распределения по морфологическим типам. Поэтому целесообразно также проследить изменение в SSFR у галактик с разными массами. На рис.2 показана зависимость SSFR от  $D_p$ , сгруппированная по массам галактик. Изменение SSFR, обусловленное различными массами галактик, велико: от  $\log(SSFR) = -8.5$  для  $\log(M/M_{\odot}) = 8$  до  $\log(SSFR) = -11$  для  $\log(M/M_{\odot}) = 11$ . Рис.2 показывает, что существует увеличение SSFR (на 0.3-0.5 порядка) у галактик во всех категориях по массе.

Мы исследовали влияние отношения масс галактик в паре на увеличение SSFR у более тесных пар, разделив все галактики на две подвыборки пар: мажорные и минорные. На рис.3 показана зависимость SSFR от  $D_p$  для мажорных и минорных пар. Видно, что существует увеличение SSFR у обоих членов мажорных пар, также у более массивных членов минорных

пар примерно на 0.7 порядка. Однако SSFR менее массивных членов минорных пар не увеличивается, а наоборот, антикоррелирует с  $D_p$ . Данный результат находится в согласии с предыдущими работами [13,14,19] и указывает на то, что как мажорные, так и минорные взаимодействия могут

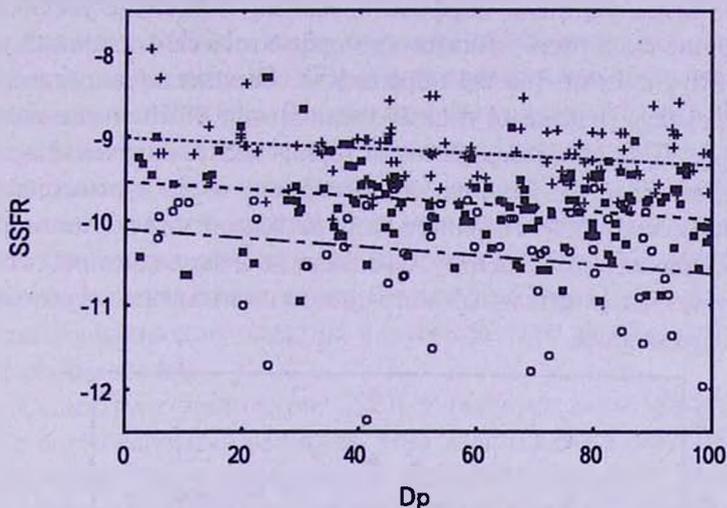


Рис.2. Зависимость SSFR ( $M_{\odot}$  в год, в логарифмическом масштабе) от  $D_p$  (кпк), сгруппированная по значениям массы галактик для галактик с массами  $\log(M/M_{\odot}) > 10$  (полые круги, штрих-пунктирная линия),  $10 \geq \log(M/M_{\odot}) > 9$  (заполненные квадраты, штриховая линия),  $\log(M/M_{\odot}) < 9$  (крестики, пунктирная линия).

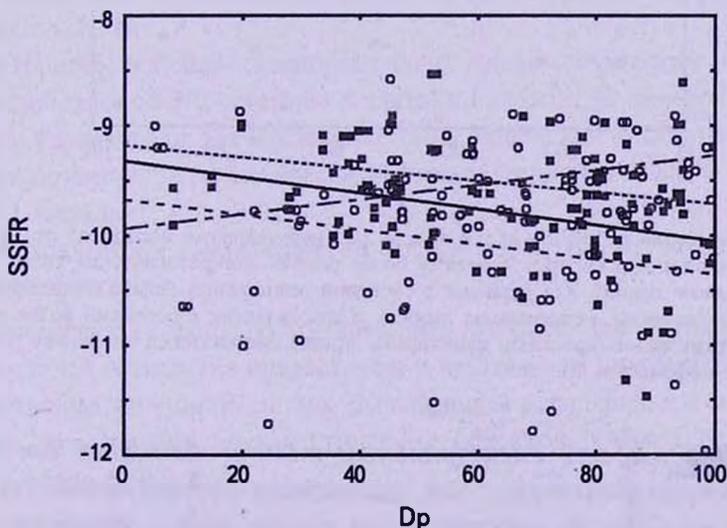


Рис.3. Зависимость SSFR ( $M_{\odot}$  в год, в логарифмическом масштабе) от  $D_p$  (кпк), сгруппированная по отношению масс: более массивные галактики мажорных пар (заполненные темные квадраты, непрерывная линия), менее массивные галактики мажорных пар (заполненные светлые квадраты, пунктирная линия), галактики минорных пар (полые круги, штриховая линия для более массивных членов, штрих-пунктирная линия для менее массивных).

увеличивать SSFR, однако в случае мажорных взаимодействий эффект сильнее, а в случае минорных только более массивные члены пар имеют прирост к SFR.

Влияние морфологии соседней галактики показано на рис.4. Соседние галактики с более ранними морфологическими типами не увеличивают SSFR, соседние галактики с такими же морфологическими типами увеличивают SSFR умеренно (на 0.3 порядка), а соседние галактики с более поздними морфологическими типами увеличивают SSFR значительно (на 1.1 порядка). В предыдущих работах [8,20] также получены похожие результаты, которые согласуются со сценарием, когда взаимодействие с соседней галактикой более позднего типа не только может инициировать приток межзвездного газа к центру галактики, но и сама соседняя галактика может являться дополнительным источником свежего газа, необходимого для звездообразования.

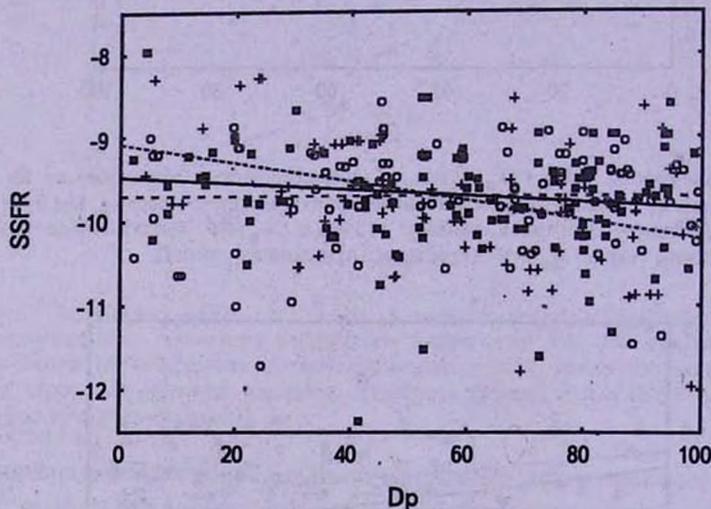


Рис.4. Зависимость SSFR ( $M_{\odot}$  в год, в логарифмическом масштабе) от  $D_p$  (кпк), сгруппированная для галактик с соседями более ранних морфологических типов (полые круги, штриховая линия), для галактик с соседями одинаковых морфологических типов (заполненные квадраты, непрерывная линия), и для галактик с соседями более поздних морфологических типов (крестики, пунктирная линия). Морфологии оценены с помощью индикатора морфологии *frac\_deV*.

**3.3. Зависимость спектральных типов галактик от параметров взаимодействия.** Мы исследовали распределения по  $D_p$  у галактик с различными спектральными типами ядер и обнаружили, что галактики с различными BPT типами имеют статистически неотличимые распределения по  $D_p$ . Этот результат не подтверждает увеличение доли AGN галактик среди более близких пар, полученное в работах [1,8,21]. Кроме того, не наблюдается избытка AGN галактик среди мажорных пар.

Оба результата не могут быть объяснены различными распределениями AGN и звездообразующих галактик по красным смещениям. Мы полагаем, что причиной вышеупомянутых двух отрицательных результатов является неоднородность выборки SBS галактик из-за использования различных UVC и EL методов.

4. *Заключение.* Мы выбрали пары, содержащие SBS галактики, и исследовали зависимости их SSFR и спектральных типов ядер от расстояния между компонентами пар  $D_p$ , получив следующие главные результаты.

а) SBS галактики с соседями не отличаются по спектральным типам от изолированных SBS галактик. Галактики SBS ярче соседей в среднем на  $0^m.5$ , однако имеют статистически не отличающиеся цвета, морфологии и SSFR. Существует слабая, но статистически значимая корреляция между морфологиями галактик в парах. Соседи SBS галактик имеют меньшую долю звездообразующих галактик, и большую долю галактик всех остальных спектральных типов.

б) Существует увеличение SSFR у галактик всех морфологических типов с более близкими соседями. Оно максимальное для галактик более ранних типов (на 1 порядок), и меньше у галактик более поздних морфологических типов (на 0.3 порядка). Также существует увеличение SSFR (на 0.3-0.5 порядка) у галактик во всех категориях по массе.

в) Как мажорные, так и минорные взаимодействия могут увеличивать SSFR на 0.7 порядка, однако в случае мажорных взаимодействий эффект сильнее, а в случае минорных только более массивные члены пар имеют прирост к SFR.

г) Наличие соседней галактики с более ранним морфологическим типом не увеличивает SSFR, соседние галактики с такими же морфологическими типами увеличивают SSFR умеренно (на 0.3 порядка), а соседние галактики с более поздними морфологическими типами увеличивают SSFR значительно (на 1.1 порядка).

д) Доля AGN не зависит ни от  $D_p$  пары, ни от отношения масс компонентов пары.

Автор считает своим долгом выразить глубокую благодарность А.Р.Петросяну и А.А.Акопяну за предложения и критические комментарии, которые существенно улучшили статью. В настоящем исследовании была использована база данных внегалактических объектов NASA/IPAC (NED), а также обзор SDSS.

THE SECOND BYURAKAN SURVEY GALAXIES  
IN CLOSE PAIRS

T.A. NAZARYAN

We selected 418 pairs with  $dV < 800 \text{ km s}^{-1}$  and  $D_p < 100 \text{ kpc}$  containing galaxies from the Second Byurakan Survey (SBS), and studied the dependence of star formation rates and nuclear activity on kinematics of pairs, morphologies and masses of paired galaxies. The following main results were obtained: SBS galaxies with neighbors do not differ from isolated SBS galaxies by their spectral types. SBS galaxies are brighter than their neighbors by 0.5 mag averagely, however the colors, morphologies and star formation rates of SBS galaxies and their neighbors are statistically the same. A weak, but statistically significant correlation exists between morphologies of galaxies in pairs. The fraction of starforming galaxies within the neighbors of SBS galaxies is less than that within the SBS galaxies, but the neighbors have larger fraction of galaxies of all the other spectral types. Galaxies within all morphological types have an enhancement of specific star formation rates (SSFR) when the distance from the neighbor galaxy decreases. The enhancement is maximal for galaxies of earlier types (by 1 dex) and is less for galaxies of later morphological types. There is an increase of SSFR of galaxies within all ranges of masses. Both major and minor interactions can increase SSFR by 0.7 dex, however in case of major interactions the effect is more intensive, while in case of minor interactions only more massive members of pairs have an increase of SSFR. The existence of neighbor galaxy with more earlier morphological type does not increase SSFR, neighbor galaxies with the similar morphological types increase SSFR moderately, while neighbor galaxies with later morphological types increase SSFR significantly.

Key words: *galaxies: interactions: starburst: active: peculiar*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *M.Sol Alonso, D.G.Lambas, P.Tissera, G.Coldwell*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 375, 1017, 2007.
2. *S.L.Ellison, D.R.Patton, L.Simard, A.W.McConnachie*, Astron. J., 135, 1877, 2008.
3. *E.J.Barton, M.J.Geller, S.J.Kenyon*, Astrophys. J., 530, 660, 2000.
4. *C.Scott, S.Kaviraj*, astro-ph, arXiv: 1310.5148, 2013.

5. *T.A.Nazaryan, A.R.Petrosian, B.J.McLean*, *Astrophysics*, **55**, 448, 2012.
6. *A.Petrosian, B.McLean, R.J.Allen, J.W.MacKenty*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **170**, 33, 2007.
7. *C.P.Ahn, R.Alexandroff, C.Allende Prieto et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **203**, 21, 2012.
8. *T.A.Nazaryan, A.R.Petrosian, A.A.Hakobyan et al.*, *astro-ph, arXiv: 1310.0241*, 2013.
9. *J.A.Stepanian*, *Rev. Mex. Astron. Astrophys.*, **41**, 155, 2005.
10. *M.Gyulzadyan, B.McLean, V.Z.Adibekyan et al.*, *Astrophysics*, **55**, 448, 2012.
11. *A.Petrosian, R.J.Allen, C.Leitherer et al.*, *Astron. J.*, **125**, 86, 2003.
12. *C.P.Ahn, R.Alexandroff, C.Allende Prieto et al.*, *astro-ph, arXiv: 1307.7735*, 2013.
13. *J.M.Scudder, S.L.Ellison, P.Torrey et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **426**, 549, 2012.
14. *T.J.Cox, P.Jonsson, R.S.Somerville et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **384**, 386, 2008.
15. *C.Maraston*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **362**, 799, 2005.
16. *J.A.Baldwin, M.M.Phillips, R.Terlevich*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **93**, 5, 1981.
17. *D.Thomas, O.Steele, C.Maraston et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **431**, 1383, 2013.
18. *C.J.Conselice*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **147**, 1, 2003.
19. *D.G.Lambas, S.Alonso, V.Mesa, A.L.O'Mill*, *Astron. Astrophys.*, **539**, A45, 2012.
20. *C.Park, Y.-Y.Choi*, *Astrophys. J.*, **691**, 1828, 2009.
21. *S.L.Ellison, D.R.Patton, J.T.Mendel, J.M.Scudder*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **418**, 2043, 2011.

