

ПЛОТНОСТЬ ОКРУЖЕНИЯ vs. ПОКАЗАТЕЛЬ ЦВЕТА ГАЛАКТИК НА МАЛЫХ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЯХ

Д.В.ДОБРЫЧЕВА¹, О.В.МЕЛЬНИК², И.Б.ВАВИЛОВА¹, А.А.ЭЛЫИВ^{1,3}

Поступила 18 декабря 2015

Принята к печати 10 апреля 2015

Мы применили 3D метод мозаики Вороного для определения плотности окружения галактик выборки SDSS DR9 ($0.02 < z < 0.1$ и $m_r < 17.7$). Выборка была разделена на две группы: яркие центральные галактики с $M_r < -20.7$ ($N \sim 120000$) и слабые галактики-спутники с $M_r > -20.7$ ($N \sim 140000$). Плотность окружения галактик мы характеризовали величиной обратного объема ячейки Вороного. Мы подтвердили тенденцию эволюционного уменьшения относительного числа ранних типов галактик (с подавленным звездообразованием) с увеличением красного смещения. Было также показано, что, чем выше плотность окружения центральных галактик, тем более вероятно, что она имеет ранний морфологический тип. Доля ранних типов среди центральных галактик выше (78%) по сравнению с выборкой галактик-спутников (26%). Помимо этого, чем выше доля центральных галактик ранних типов в выборке, тем большая их доля находится в более плотном окружении.

Ключевые слова: *галактики: плотность окружения: морфология: показатель цвета: SDSS галактики: мозаика Вороного*

1. Введение. Морфология галактик, а также их светимость, цвет, масса и темп звездообразования зависит от окружения: в областях большей концентрации галактик доля галактик ранних типов значительно больше, чем в малонаселенных областях [1-3]. Спиральные галактики с высоким темпом звездообразования избегают густонаселенных областей скоплений [4-9]. При этом, влияние окружения таково, что спиральные галактики в скоплениях имеют более ранний тип, чем спиральные галактики поля [10-11], а запасов нейтрального водорода у них меньше [12]. Галактики в войдах, как правило, имеют более поздний тип и большее содержание газа на единицу светимости, чем галактики групп и скоплений (см., например, [13] и ссылки в ней). Темп звездообразования в центрах дисковых галактик ранних типов, находящихся в скоплениях, выше, чем у аналогичных галактик поля, при этом галактики скоплений имеют явные признаки возмущений [14]. Результаты [15] показали, что эволюционные изменения морфологии галактик из поздних типов в ранние обычно сопровождаются изменением их цвета в красную сторону, однако, изменение цвета галактики не всегда влечет за собой кардинальное изменение морфологического типа (см. также [16]). Кроме этого,

наблюдается эволюция бимодальности в распределении цветов галактик: доля красных массивных галактик в современную эпоху ($z \sim 0$) существенно выше, чем в более ранние эпохи [17-19].

Взаимосвязь свойств галактик и плотности их окружения проявляются не только в масштабах скоплений, но и в масштабах малонаселенных групп, пар и триплетов галактик. Караченцевым [20] для пар галактик, а также в серии наших работ [21-24], было показано, что доля галактик ранних типов в парах и триплетах больше, чем в изолированных галактиках. При этом, интересно, что оптический ($g-r$) и ближний инфракрасный ($J-H$) цвета галактик ранних типов не зависят от плотности окружения, а спиральные и поздние типы галактик в парах и триплетах значительно краснее, чем изолированные. Исключения составляют галактики, находящиеся в очень тесных парах (имеющие признаки взаимодействия) - эти галактики несколько голубее, чем изолированные [24,25].

Актуальным обсуждаемым вопросом является механизм подавления звездообразования в галактиках: почему спиральные галактики теряют газ, эволюционируя в красные эллиптические/линзовидные системы на $z < 2$? Какие физические процессы обуславливают изменение показателя цвета галактик с голубого на красный: внутренние причины, обусловленные массой галактики, в том числе наличием активных ядер галактик (АЯГ), и/или их окружение, и как эти внешние и внутренние факторы соотносятся [26-29]? Оказывается, что галактики с большими массами имеют красный цвет независимо от их окружения и морфологии. Менее массивные галактики обычно голубее и находятся в окружении низкой плотности, а с увеличением плотности окружения становятся краснее вне зависимости от их морфологического типа [30,31]. При этом, масса галактики является главным фактором в эволюции центральных (более массивных) галактик, а свойства галактик-спутников сильно зависят от влияния окружения. Под "влиянием окружения" понимают взаимодействие и слияние галактик, процессы выметания газа из галактики под действием гравитационного поля скопления; форма центральной галактики также может изменяться из-за гравитационного взаимодействия с меньшими галактиками-спутниками, а также из-за выметания холодного газа из галактик вследствие их высокоскоростных движений внутри скопления (см., например, [32-34]). Плотность окружения определяет также характер кластеризации галактик-спутников. Например, исследование распределения карликовых галактик низкой поверхностной яркости (НПЯ) в объеме Местного сверхскопления показало, что эти галактики, как обогащенные газом (dIr , dIm), так и с малым содержанием газа ($dSph$), имеют одинаковую тенденцию к скупиванию в поле сверхскопления [35,36]; при этом в областях с повышенной плотностью (скопления в Деве и Печи) карликовые НПЯ

галактики поздних типов (dSm, dIr, dIm) и яркие спиральные галактики избегают центров скоплений, в то время как плотность распределения карликовых (dE, dSph) и нормальных галактик (E-S0) ранних типов хорошо описывается профилем Кинга и линейные размеры dE-dSph галактик-спутников не зависят от плотности окружения [37,38]. Интересно также, что доля ранних галактик-спутников больше в гало центральной галактики раннего типа, чем в гало центральной галактики позднего типа той же массы [3]. Открытым остается также вопрос о корреляции свойств центральной галактики и галактик-спутников, поскольку результаты разных работ показывают противоречивые результаты (см., например, [39] и [23]).

Целью данной работы является изучение влияния окружения на показатель цвета (морфологию) галактик, а также эволюцию бимодальности их показателей цвета на малых красных смещениях ($z < 0.1$) на основе большой выборки галактик из Sloan Digital Sky Survey 9th release (SDSS DR9). Для определения относительной пространственной плотности галактик мы используем метод мозаики Вороного, который хорошо зарекомендовал себя для изучения крупномасштабной структуры и выделения групп и скоплений галактик [21,40-44].

2. Выборка. Подробное описание процедуры компиляции выборки дано в работе [45], здесь мы ограничимся описанием ключевых этапов отбора галактик в выборку и ее основных характеристик.

Первоначальная выборка SDSS DR9 состояла из 724 тысяч объектов с $z < 0.1$. После удаления из выборки звезд и дубликатов, а также ограничения выборки по красному смещению и видимой звездной величине,

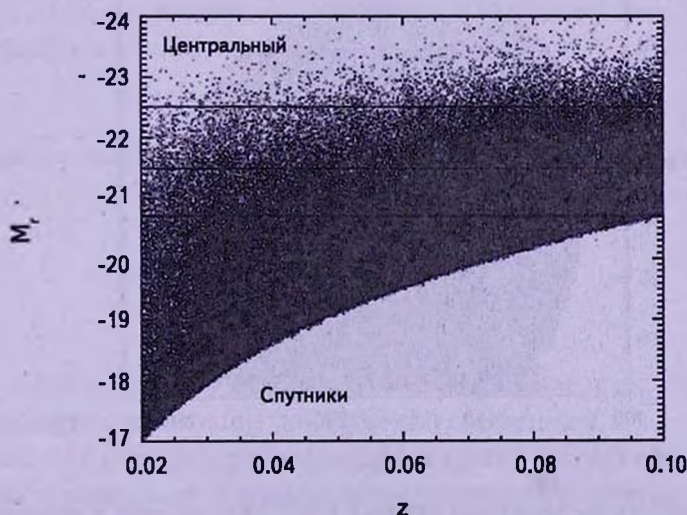


Рис.1. Зависимость абсолютной звездной величины галактики от красного смещения для центральных галактик и их слабых спутников.

$0.02 < z < 0.1$ и $m_r < 17.7$, соответственно, в ней осталось 260 000 галактик. Для применения метода мозаики Вороного выборка должна быть однородной, насколько это возможно. Поэтому сначала мы применили метод мозаики Вороного к выборке ярких центральных галактик с $M_r < -20.7$ ($N \sim 120000$), а затем рассмотрели свойства окружения центральных галактик, состоящего из их более слабых спутников - галактик с $M_r > -20.7$ ($N \sim 140000$). На рис.1 представлена зависимость абсолютной звездной величины от красного смещения для ярких центральных галактик и их более слабых спутников исследуемой выборки. Абсолютная величина:

$$M_r = m_r - 5 \log(V/H_0) - 25 - K(z) - \text{ext}$$

была скорректирована за галактическое поглощение ext, согласно [46], и K -поправку $K(z)$, согласно [47,48]. В работе мы использовали CDM модель Вселенной с космологическими параметрами WMAP7 ($\Omega_M = 0.27$, $\Omega_\Lambda = 0.73$, $\Omega_k = 0$, $H_0 = 0.71$) [34].

После применения метода мозаики Вороного (см. следующий раздел) к выборке центральных галактик, мы удалили из рассмотрения граничные галактики выборки, поскольку метод мозаики Вороного чувствителен к граничным эффектам. Распределение центральных галактик по небу представлено на рис.2, а соответствующие распределения центральных галактик и их более слабых спутников по красному смещению - на рис.3. Можно видеть, что при $z = 0.07$ количество центральных галактик соизмеримо с количеством спутников по причине естественного уменьшения слабых галактик с красным смещением.

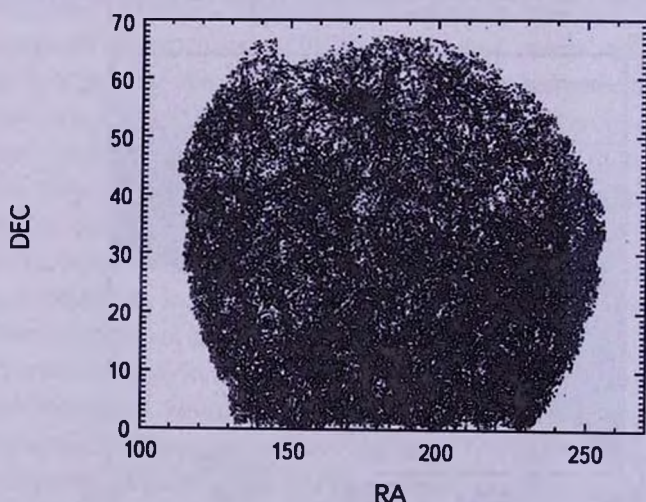


Рис.2. Распределение центральных галактик с $M_r < -20.7$ по небу в экваториальной системе координат.

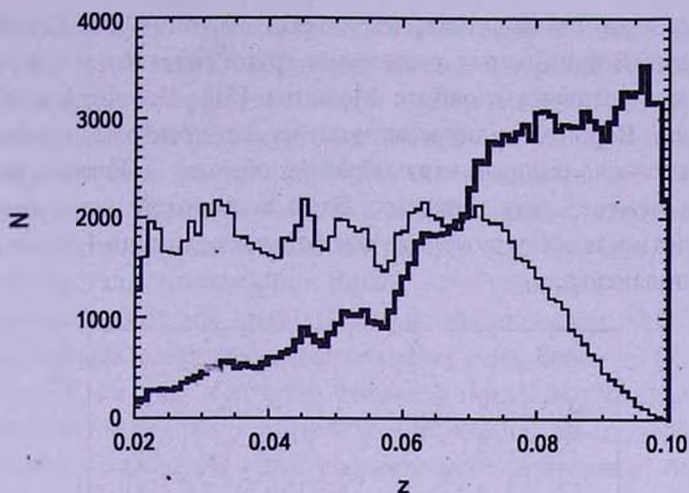


Рис.3. Распределение центральных галактик (толстая линия) и галактик-спутников (тонкая линия) по красному смещению.

3. Метод мозаики Вороного. Для применения метода мозаики Вороного мы перешли от экваториальных координат и скоростей в сопутствующие x , y , z координаты для каждой центральной галактики из нашей выборки ($M_r < -20.7$). Для этого мы преобразовали величину красного смещения z в сопутствующее расстояние $\chi(z)$ для каждой галактики, интегрируя:

$$\chi(z) = D_H \int_0^z \frac{dz'}{E(z')},$$

где $D_H = c/H_0$ - расстояние Хаббла и $E(z')$ - параметр Хаббла, определяющийся как:

$$E(z') = \sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \Omega_k(1+z')^2 + \Omega_\Lambda}.$$

Координаты галактик x , y , z в сопутствующем пространстве рассчитываются как:

$$x = \chi(z) \cos(\theta) \cos(\phi),$$

$$y = \chi(z) \cos(\theta) \sin(\phi),$$

$$z = \chi(z) \sin(\theta),$$

где θ - склонение каждой галактики, ϕ - прямое восхождение и $\chi(z)$ - сопутствующее расстояние для красного смещения z .

После получения трехмерных декартовых координат галактик, мы разбили геометрическое пространство, занимаемое галактиками выборки, на ячейки мозаики Вороного (объемы, V , в 3D случае). Каждая ячейка имеет ядро-галактику и состоит из элементарных объемов пространства,

которые ближе к данной галактике, чем к любой другой [49,50]. Применение метода мозаики Вороного для выделения групп галактик в трехмерном случае описано детально в работе Мельник [51]. На рис.4 изображен пример мозаики Вороного в двумерном случае для простоты визуализации. На рис.5 представлено распределение обратных объемов ($1/V$) ячеек Вороного для выборки центральных галактик. Этой величиной далее мы будем описывать плотность их окружения: чем больше величина $1/V$, тем менее изолирована галактика.

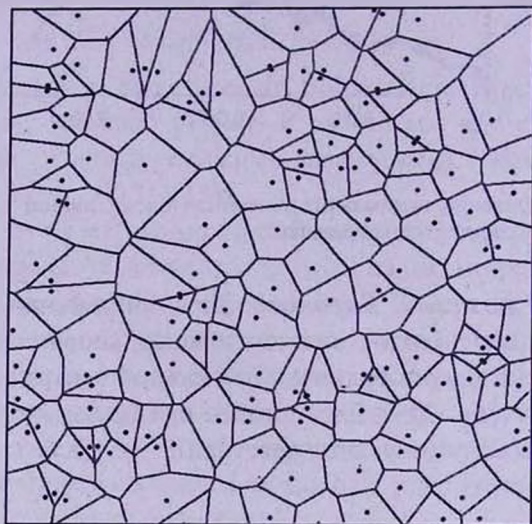


Рис.4. Пример построения мозаики Вороного в двумерном случае.

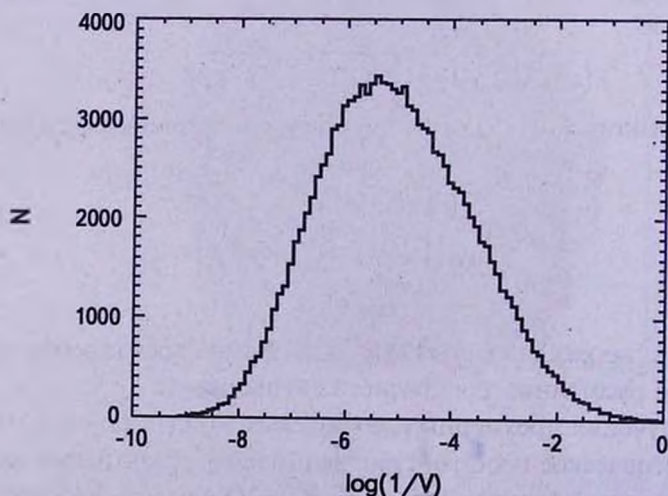


Рис.5. Количественное распределение обратных объемов $1/V$ ячеек Вороного для центральных галактик с $M_r < -20.7$.

4. *Результаты.* Поскольку показатель цвета и индекс концентрации света к центру галактики коррелируют с ее морфологическим типом, то удобно проводить морфологическую классификацию большой выборки, используя только эти параметры (см., например, [52,53]. Мы использовали подобный подход ранее [23,54,55] и показали, что визуальная и "автоматическая" морфологические классификации с помощью показателя цвета и обратного индекса концентрации $R50/R90$ для подавляющего большинства галактик выборки (более 80%) совпадают.

В данной работе мы визуально классифицировали 5000 центральных галактик, которые имеют наименьшие объемы ячеек Вороного (т.е. наибольшие значения $1/V$, см. [55] в печати). На рис.6 показана зависимость $R50/R90$ от показателя цвета $g-i$ для ранних E-S0 и поздних Sa-Irr морфологических типов галактик. Области 1 и 2 соответствуют критериям, полученным в

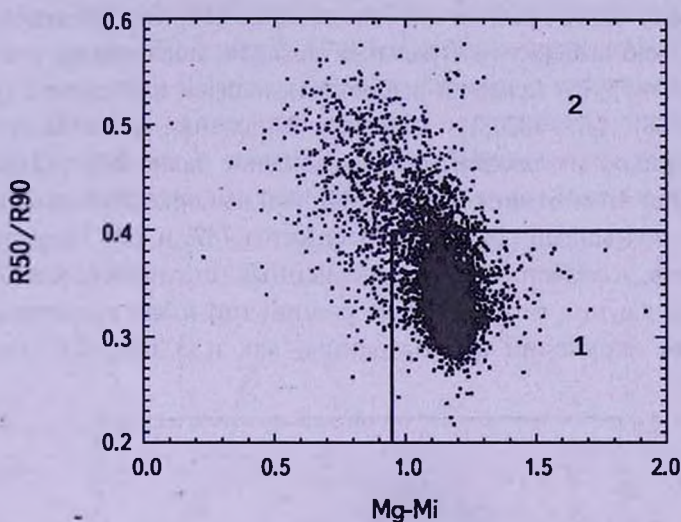


Рис.6. Зависимость обратного индекса концентрации от показателя цвета для 5000 ярких галактик выборки с наименьшими объемами ячеек Вороного. Черными точками показаны визуально классифицированные галактики E-S0 типов, серыми точками - Sa-Irr типов. Большинство галактик вышеуказанных типов находятся в соответствующих областях 1 и 2 (в согласии с критерием, предложенным нами в [23]).

работе Мельник [23] для классификации галактик, а именно: $0.95 < g-i < 1.5$ и $0 < R50/R90 < 0.4$ для E+S0 типов; ($0 < g-i < 0.95$, $0 < R50/R90 < 0.6$) и ($0.95 < g-i < 1.5$, $0.4 < R50/R90 < 0.6$) для S+Irr типов галактик. В табл.1 приведены процентные оценки соответствия (попадания) объединенных типов тестовой выборки 5000 центральных галактик в "свои" области 1 и 2. Так, около 95% галактик типа E+S0 попадают в область 1. 1.78% Sa-Irr попадают в область 2. Это свидетельствует, что выбранный критерий хорошо описывает морфологические типы исследуемой выборки. Заметим, что в данной работе

Таблица 1

ДОЛЯ ВИЗУАЛЬНО ОПРЕДЕЛЕННЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ТИПОВ E-S0 И Sa-Irr В ОБЛАСТЯХ 1 И 2 (см. рис.7) ДЛЯ 5000 ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЯРКИХ ГАЛАКТИК, ИМЕЮЩИХ НАИМЕНЬШИЕ ОБЪЕМЫ ЯЧЕЕК ВОРОНОГО. ОБЛАСТИ 1 И 2 ОПРЕДЕЛЕНЫ СОГЛАСНО ЗНАЧЕНИЯМ ПОКАЗАТЕЛЯ ЦВЕТА $Mg - Mi$ И ОБРАТНОГО ИНДЕКСА КОНЦЕНТРАЦИИ $R50/R90$

Выборка	N	Область 1 (E-S0), %	Область 2 (Sa-Irr), %
E-S0	3876	95.1	4.9
Sa-Irr	1124	21.6	78.4

галактики имеют более красное смещение, чем в [23]. Экстраполяция этих критериев на всю выборку центральных галактик показана на рис.7. Как видно, 61% ($N=75973$) галактик выборки находится в области 1 (ранних типов E+S0), 39% ($N=48248$) - в области 2 (поздних типов Sa-Scd). Для галактик-спутников это процентное соотношение равно 26% и 74%, соответственно. При этом отметим, что в тестовой выборке 5000 центральных галактик с наименьшими объемами содержится 78% и 22% галактик E-S0 и Sa-Irr типов, соответственно. Полученные статистические оценки свидетельствуют о том, что, чем более ранний тип имеет галактика, тем в более плотном окружении она находится, как и о том, что, чем ярче

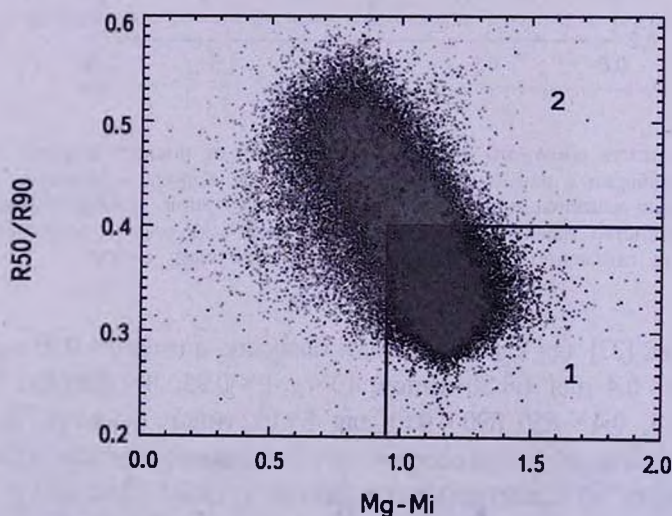


Рис.7. Зависимость обратного индекса концентрации от показателя цвета для центральных ярких галактик выборки. Линиями показаны галактики в областях 1 и 2, которые, согласно нашему критерию (см. рис.6), соответствуют морфологическим типам E-S0 и Sa-Irr.

галактика (а, значит, массивнее), тем вероятнее, что она имеет ранний тип. Выборка центральных ярких галактик содержит довольно высокое количество галактик ранних типов E+S0 (в силу ограничения по $M_r < -20.7$), что уменьшает присутствие в ней галактик поздних типов Sa-Img. Далее в работе мы используем критерии для морфологической классификации, принятые в [23], проиллюстрированной на рис.6 и 7, т.е. галактики, попавшие в области 1 и 2, называем, соответственно, ранними E-S0 и поздними Sa-Img.

На рис.8 показаны распределения галактик E-S0 и Sa-Img типов в зависимости от величины обратных объемов ячеек Вороного, в которых они находятся, объединенных в 4 логарифмических интервала $1/V < 0.001$, $0.001 < 1/V < 0.01$, $0.01 < 1/V < 0.1$, $1/V > 0.1$, для четырех диапазонов красных смещений $0.02 < z < 0.04$, $0.04 < z < 0.06$, $0.06 < z < 0.08$ и $0.08 < z < 0.1$ (в строках) и для разных диапазонов абсолютной звездной величины: $-21.5 < M_r < -20.7$, $-22.5 < M_r < -21.5$ и $M_r < -22.5$ (в столбцах). Количество галактик в каждом бине для E-S0 и Sa-Img типов нормализовано на общее количество галактик E-Img в данной подвыборке и показано на каждом из рисунков. Из рис.8 видно, что, чем больше красное смещение, тем доля галактик спиральных и поздних типов увеличивается, а ранних типов, наоборот, уменьшается. То есть прослеживается известное эволюционное

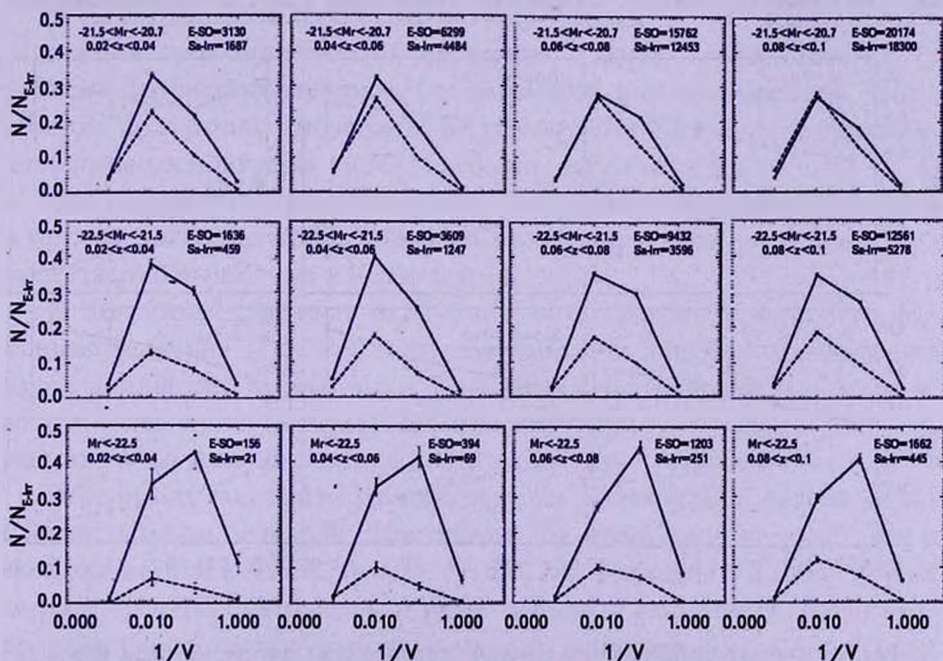


Рис.8. Распределение количества галактик по обратным объемам ячеек Вороного: E-S0 (сплошная линия) и Sa-Img типов (пунктир) для разных диапазонов красных смещений и светимостей. Количество галактик в каждом бине нормализовано на общее количество E-Img в данной подвыборке. Количество центральных ярких галактик E-S0 и Sa-Img отмечено на каждом из рисунков.

соотношения уменьшения галактик с подавленным звездообразованием с увеличением красного смещения (см., например, [18,41,19]) даже на сравнительно небольших красных смещениях до $z < 0.1$. Кроме этого, чем ярче галактики в выборке, тем доля галактик ранних типов становится выше, поскольку, в среднем, ранние типы имеют большую светимость (известная зависимость тип/показатель цвета - светимость) [2,56,57]. При этом, самые яркие галактики ранних типов с $M_r < -22.5$ предпочитают находиться в более плотном окружении: пик в распределении обратных объемов ячеек Вороного для E-S0 типов приходится на интервал $0.01 < 1/V < 0.1$, в то время как в других интервалах M_r для типов Sa-Irr пик в распределении всегда приходится на $0.001 < 1/V < 0.01$ (соотношение морфология-плотность, [1,2,23,31,57]).

Мы также определили плотность галактик в ячейке Вороного, учитывая их слабые спутники, т.е. галактики с $M_r > -20.7$: $(n+1)/V$, где n - количество слабых галактик, находящихся в ячейке Вороного, V - объем ячейки Вороного. На рис.9 представлено распределение ранних E+S0 (сплошная линия) и Sa-Irr типов (пунктир) по параметру $(n+1)/V$ в четырех интервалах: $(n+1)/V < 0.01$, $0.01 < (n+1)/V < 0.1$, $0.1 < (n+1)/V < 1$, $(n+1)/V > 1$. Количество галактик нормировано на количество E-Irr галактик в данном диапазоне $(n+1)/V$. Мы рассмотрели плотность галактик только в первых двух интервалах красных смещений, поскольку из-за увеличивающейся

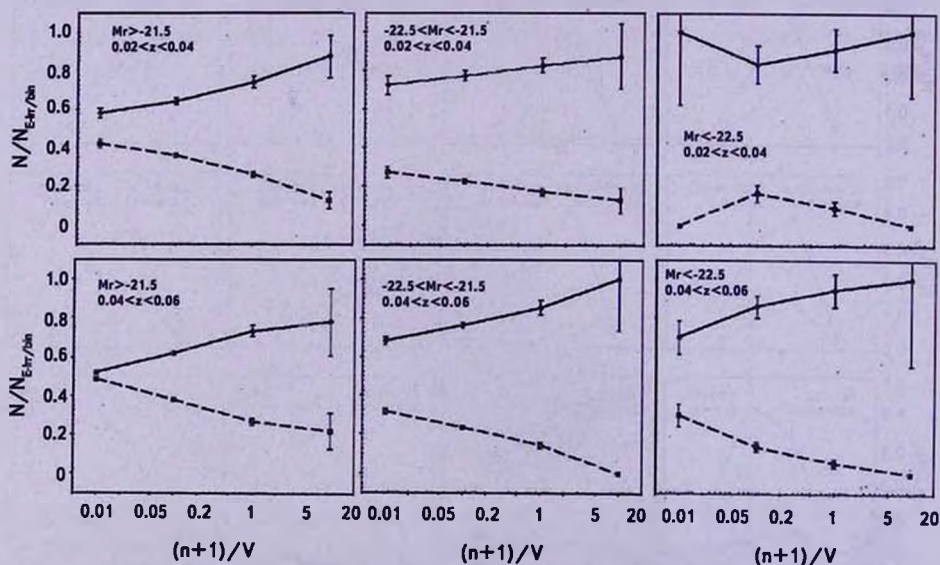


Рис.9. Распределение количества галактик по плотности галактик в ячейках Вороного: $(n+1)/V$, где n - количество слабых галактик с $M_r > -20.7$, V - объем ячейки Вороного, для разных диапазонов красных смещений и светимостей. Типы E-S0 (сплошная линия) и Sa-Irr (пунктир) соответствуют центральным галактикам, которые являются ядрами соответствующих ячеек Вороного. Количество галактик в каждом бине нормировано на суммарное количество центральных галактик E-Irr в данном бине $(n+1)/V$.

недостачи слабых галактик с увеличением z мы не можем делать выводы об эволюции их свойств (см. рис.3). Однако мы можем сравнить плотность окружения галактик в зависимости от абсолютной величины и морфологического типа центральной яркой галактики. Таким образом, как это видно из рис.9, с увеличением плотности окружения доля ранних типов центральных галактик увеличивается, а поздних типов, наоборот, уменьшается, т.е. ранние типы находятся в более плотном окружении, чем поздние. При этом, чем ярче центральная галактика, тем больше доля ранних типов в подвыборке.

5. *Выводы.* К выборке галактик [45], составленной на основе SDSS DR9 ($0.02 < z < 0.1$ и $m_r < 17.7$), был применен 3D метод мозаики Вороного с целью определения плотности окружения галактик выборки. При этом, галактики выборки были разделены на две группы: яркие центральные с $M_r < -20.7$ ($N \sim 120000$) и слабые галактики-спутники $M_r > -20.7$ ($N \sim 140000$). Чтобы избежать эффектов селекции, связанных с уменьшением количества слабых галактик с красным смещением, метод мозаики Вороного был применен к выборке центральных галактик. Плотность окружения галактик мы характеризовали обратным объемом ячейки Вороного $1/V$. Ниже представлены основные выводы:

1. На сравнительно малых красных смещениях до $z < 0.1$ прослеживается тенденция эволюционного уменьшения ранних типов галактик (с подавленным звездообразованием) с увеличением красного смещения. Таким образом, доля ранних типов галактик уменьшается с красным смещением, а спиральных и поздних типов, наоборот, увеличивается.

Эти результаты согласуются с данными других авторов [17,18,41,19] о том, что доля красных массивных галактик в современную эпоху ($z \sim 0$) существенно выше, чем в более ранние эпохи.

2. Чем выше плотность окружения центральных галактик (т.е. чем меньше величина $1/V$), тем более вероятно, что центральная галактика имеет ранний тип. Кроме того, с увеличением плотности слабых галактик вокруг более яркой центральной галактики доля центральных галактик ранних типов увеличивается, а поздних, наоборот, уменьшается.

Этот вывод подтверждает классическое соотношение морфология-плотность о том, что доля галактик ранних типов существенно выше в скоплениях, чем в поле. Эта зависимость подтверждена в работах других авторов, где рассматривались иные выборки галактик и различные индикаторы плотности их окружения (см., например, [2,18,23,31,57] как и цитированные во *Введении* работы авторов по выборкам галактик Местного сверхскопления).

3. Чем ярче галактики в выборке, тем выше доля центральных галактик ранних типов в ней и тем большая их доля находится в более плотном

окружении. Кроме того, доля галактик ранних типов среди ярких центральных галактик больше (78%) по сравнению с выборкой галактик-спутников (26%). Это объясняется тем, что, в среднем, галактики ранних типов имеют большую светимость, и подтверждает, тем самым, что галактики с наибольшей светимостью находятся в более тесном окружении, чем менее яркие галактики [2,3,34,56-58].

В работах [15,19,27,28,31] было показано, что центральные галактики и галактики-спутники эволюционируют по-разному, в работах [3,39], наоборот, были найдены корреляции свойств центральных галактик и их спутников, что должно свидетельствовать об их совместной эволюции. Поэтому в следующей работе мы планируем проанализировать корреляции показателей цвета и других свойств центральных галактик и галактик-спутников (в том числе, карликовых НПЯ галактик) исследуемой выборки.

Мы благодарны научной группе, работающей над Sloan Digital Sky Survey <http://www.sdss3.org/>. Funding for SDSS-III has been provided by the Alfred P. Sloan Foundation, the Participating Institutions, the National Science Foundation, and the U.S. Department of Energy Office of Science. Работа выполнена в рамках проекта №299Ц "Исследование физических свойств галактик местной Вселенной" ГАО НАН Украины.

¹ Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Украина, e-mail: daria@mao.kiev.ua irivav@mao.kiev.ua

² Астрономическая обсерватория Киевского университета им. Тараса Шевченка, Украина, e-mail: melnykol@gmail.com

³ Кафедра физики и астрономии университета Болоньи, Италия, e-mail: andrii.elyiv@gmail.com

ENVIRONMENTAL DENSITY vs. COLOUR INDICES OF THE LOW-REDSHIFT GALAXIES

D.V.DOBRYCHEVA¹, O.V.MELNYK², I.B.VAVILOVA¹, A.A.ELYIV^{1,3}

We applied 3D Voronoi tessellation method to determine the environmental density of the low-redshift galaxies selected from SDSS DR9 ($0.02 < z < 0.1$ and $m_r < 17.7$). The sample was divided into two groups: the bright central galaxies with $M_r < -20.7$ ($N \sim 120000$) and the satellite galaxies with $M_r > -20.7$ ($N \sim 140000$). We characterized the environmental density of galaxies as the reverse volume of a Voronoi cell. We confirmed the tendency of evolutionary decrease of a relative number of early type galaxies (with quenching star

formation) with increasing redshift. It was also shown that the higher the environmental density near the central galaxy, the more likely that it has an early morphological type. The fraction of the early type galaxies among the bright central galaxies is higher (78%) than in the sample of satellite galaxies (26%). In addition, the higher percentage of the central early-type galaxies in the sample, the greater their share in the denser environments.

Key words: *galaxies: environmental density: morphology: color indices: the SDSS galaxies: Voronoi tessellation*

ЛИТЕРАТУРА

1. A.Dressler, *Astrophys. J.*, **236**, 351, 1980.
2. M.R.Blanton, D.Eisenstein, D.W.Hogg et al., *Astrophys. J.*, **629**, 143, 2005.
3. S.M.Weinmann, F.C. van den Bosch, X.Yang et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **366**, 2, 2006.
4. Y.Hashimoto, A.Jr.Oemler, H.Lin, *Astrophys. J.*, **499**, 589, 1998.
5. I.Lewis, M.Balogh, R. de Propris et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **334**, 673, 2002.
6. P.Gomez, R.C.Nichol, C.J.Miller et al., *Astrophys. J.*, **584**, 210, 2003.
7. M.Balogh, V.Eke, C.Miller et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **348**, 1355, 2004.
8. H.J.Martinez, A.Zandivarez, M.Domingues et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **333**, 31, 2002.
9. P.Serra, T.Oosterloo, R.Morganti et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **422**, 1835, 2012.
10. R.C.Jr.Kennicutt, *Astron. J.*, **88**, 483, 1983.
11. J.M.Gabor, R.Dave, arXiv:1405.1043, 2014.
12. G.Gavazzi, K.O'Neil, A.Boselli, W. van Driel, *Astron. Astrophys.*, **449**, 929, 2006.
13. A.A.Elyiv, I.D.Karachentsev, V.E.Karachentseva et al., *Astrophys. Bull.*, **68**, 1, 2013.
14. C.F.Bretherton, C.Moss, P.A.James, *Astron. Astrophys.*, **553**, 67, 2013.
15. R.A.Skibba, S.P.Bamford, R.C.Nichol et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **399**, 966, 2009.
16. K.Schawinski, C.M.Urry, B.D.Simmons et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **440**, 889, 2014.
17. I.K.Baldry, K.Glazebrook, J.Brinkmann et al., *Astrophys. J.*, **600**, 681, 2004.
18. O.Cucciati, A.Iovino, C.Marinoni et al., *Astron. Astrophys.*, **458**, 39, 2006.
19. T.Tal, A.Dekel, P.Oesch et al., *Astrophys. J.*, **789**, 11, 2014.
20. И.Д.Караченцев, Двойные галактики, М., Наука, 248, 1987.
21. О.В.Мельник, Письма в Астрон. ж., **32**, 338, 2006.
22. I.B.Vavilova, O.V.Melnyk, A.A.Elyiv, *Astron. Nachr.*, **330**, 1004, 2009.
23. O.V.Melnyk, D.V.Dobrycheva, I.B.Vavilova, *Astrophysics*, **55**, 293, 2012.
24. O.Melnyk, S.Mitronova, V.E.Karachentseva, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*,

- 438, 548, 2014.
25. *M.Fernandez Lorenzo, J.Sulentic, L.Verdes-Montenegro et al.*, *Astron. Astrophys.*, **540**, A47, 2012.
 26. *G.Kauffmann, S.D.M.White, T.M.Heckman et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **353**, 713, 2004.
 27. *J.L.Tinker, A.Leauthaud, K.Bundy et al.*, *Astrophys. J.*, **778**, 18, 2013.
 28. *K.Kovac, S.J.Lilly, C.Knobel et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **438**, 717, 2014.
 29. *A.R.Wetzel, J.L.Tinker, C.Conroy et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **439**, 2687, 2014.
 30. *S.P.Bamford, R.C.Nichol, I.K.Baldry et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **393**, 1324, 2009.
 31. *Y.-J.Peng, S.J.Lilly, K.Kovac et al.*, *Astrophys. J.*, **721**, 193, 2010.
 32. *I.K.Baldry, M.L.Balogh, R.G.Bower et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **373**, 469, 2006.
 33. *A.Boselli, G.Gavazzi*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **118**, 517, 2006.
 34. *F.C. van den Bosch, D.Aquino, X.Yanget et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **387**, 79, 2008.
 35. *V.E.Karachentseva, I.B.Vavilova*, *Bulletin of the Special Astrophysical Observatory*, **37**, 98, 1994.
 36. *V.E.Karachentseva, I.B.Vavilova*, *ESO Conference and Workshop Proceedings*, **49**, 91, 1994
 37. *V.E.Karachentseva, I.B.Vavilova*, *Kinematics Phys. Celest. Bodies*, **11**, 38, 1995.
 38. *V.E.Karachentseva, I.B.Vavilova*, *Kinematics Phys. Celest. Bodies*, **11**, 49, 1995.
 39. *W.G.Hartley, C.J.Conselice, A.Mortlock et al.*, *arXiv1406.6058*, 2014.
 40. *A.Elyiv, O.Melnyk, I.Vavilova*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **394**, 1409, 2009.
 41. *N.Scoville, S.Arnouts, H.Aussel et al.*, *Astrophys. J. Suppl.*, **206**, 3, 2013.
 42. *R.Kim, M.Strauss, N.Bahcall et al.*, *ASP Conference Ser.*, **200**, 422, 2000.
 43. *M.Ramella, W.Boschin, D.Fadda et al.*, *Astron. Astrophys.*, **368**, 776, 2001.
 44. *Marcelle Soares-Santos, Reinaldo R. de Carvalho*, *Astrophys. J.*, **727**, 45, 2011.
 45. *D.V.Dobrycheva*, *Odessa Astron. Publ.*, **26**, 187, 2013.
 46. *D.J.Schlegel, D.P.Finkbeiner, M.Davis*, *Astrophys. J.*, **500**, 525, 1998.
 47. *I.Chilingarian, A.-L.Melchior, I.Zolotukhin*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **405**, 1409, 2010.
 48. *I.Chilingarian, I.Zolotukhin*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **419**, 1727, 2012.
 49. *T.Matsuda, E.Shima*, *Progress of Theor. Phys.*, **71**, 855, 1984.
 50. *R.Lindenbergh*, *PhD Thesis*, 2002.
 51. *O.Melnyk, A.Elyiv, I.Vavilova*, *Kinemat. Fiz. Nebesn. Tel*, **22**, 283, 2006.
 52. *T.Goto, C.Yamauchi, Y.Fujita et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **346**, 601, 2003.
 53. *C.Park, Y.-Y.Choi*, *Astrophys. J.*, **635**, 29, 2005.
 54. *D.Dobrycheva, O.Melnyk*, *Advances in Astron. Space Phys.*, **2**, 42, 2012.
 55. *D.Dobrycheva, O.Melnyk, A.Elyiv et al.*, *Proceedings IAU Symposium 308* (in press).
 56. *I.E.Segal*, *Astron. Soc. Japan, Publ. (ISSN 0004-6264)*, **37**, 499, 1985.
 57. *C.Park, Y.-Y.Choi, M.S.Vogele et al.*, *Astrophys. J.*, **658**, 898, 2007.
 58. *D.W.Hogg, M.R.Blanton, J.Brinkmann et al.*, *Astrophys. J.*, **601**, L29, 2004.