

ИЗМЕРЕНИЯ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ ГАЛАКТИК В СКОПЛЕНИЯХ МЕТОДОМ МНОГОЩЕЛЕВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА 1.5-м ТЕЛЕСКОПЕ РТТ-150

© 2020 г. И. М. Хамитов^{1,2*}, И. Ф. Бикмаев^{2,3}, Р. А. Буренин⁴,
М. В. Глушков^{2,3}, С. С. Мельников^{2,3}, А. Р. Ляпин⁴

¹Государственная обсерватория ТЮБИТАК, Анталья, Турция

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³Академия наук Татарстана, Казань, Россия

⁴Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 04.12.2019 г.

После доработки 04.12.2019 г.; принята к публикации 05.12.2019 г.

Представлен пример одновременного спектроскопического измерения красных смещений большого числа галактик в скоплении методом многообъектной спектроскопии, при помощи спектрографа среднего и низкого разрешения ТФОСК на 1.5-м Российско-Турецком Телескопе (РТТ-150). Получены измерения красных смещений галактик скопления 0301.6 + 0156, расположенного на $z = 0.17057 \pm \pm 0.0004$, обнаруженного ранее по наблюдению сигнала Сюняева–Зельдовича в обзоре всего неба обсерватории им. Планка. В одном наблюдении с экспозицией 3 ч получены спектры 16 галактик скопления, 9 из которых определены как эллиптические, и для них произведены высококачественные измерения красных смещений. Показано, что при помощи спектрографа ТФОСК с использованием многообъектных масок в одном наблюдении можно измерять красные смещения галактик с величинами до $m_r = 20.0$, число которых в поле спектрографа может составить до нескольких десятков в зависимости от богатства и расстояния до скопления. Такие измерения могут потребоваться для уточнения красных смещений скоплений, а также для оценок их масс динамическим способом.

Ключевые слова: скопления галактик, многообъектная спектроскопия, оптические наблюдения.

DOI: 10.31857/S0320010820010040

ВВЕДЕНИЕ

Исследование скоплений галактик занимает важное место в изучении крупномасштабной структуры Вселенной. Наблюдаемое число скоплений галактик определенной массы оказывается очень чувствительным к параметрам космологической модели, таким как средняя масса вещества во Вселенной и амплитуда возмущений плотности (см., например, Вихлинин и др., 2014). Поэтому скопления галактик представляют собой мощный инструмент в космологических исследованиях, который дает один из основных способов измерения космологических параметров (см., например, Боргани и др., 2001; Вихлинин и др., 2003, 2009; Манц и др., 2010; Розо и др., 2010; Пьер и др., 2011; Буренин, Вихлинин, 2012; Сообщество Планка, 2014б, 2016в).

На Российско-Турецком 1.5-м Телескопе (РТТ-150) проводится большой объем работ по оптическому отождествлению и измерению красных смещений богатых скоплений галактик в больших обзорах, таких как рентгеновский обзор площадью 400 кв. градусов по данным спутника ROSAT (Буренин и др., 2007), а также обзор скоплений галактик, обнаруженных по наблюдению сигнала Сюняева–Зельдовича (Сюняев, Зельдович, 1972) при помощи космической обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2014а, 2015а,б, 2016а,б; Воробьев и др., 2016; Буренин, 2017; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019).

Спектроскопические измерения красных смещений отождествленных скоплений галактик проводятся на 1.5-м телескопе РТТ150 в основном для систем с красным смещением $z < 0.4$. Оценки красного смещения определяются посредством спектральных наблюдений нескольких самых ярких членов в центре скопления, либо ограничиваясь

*Электронный адрес: irek_khamitov@hotmail.com

наблюдением одной ярчайшей галактикой в центре скопления регулярной формы. Такой подход обусловлен эффективностью использования наблюдательного времени телескопов среднего класса с диаметрами зеркал 1–2 м для таких объектов. Достижимая таким образом точность измерений красных смещений ($\delta z \sim 0.001$) изучаемых скоплений галактик достаточна для использования в исследованиях по ограничению космологических параметров.

Поскольку ярчайшая галактика находится практически в центре масс скопления, измеряемое красное смещение соответствует красному смещению скопления. Более слабые галактики используются только для подтверждения красной последовательности на диаграмме цвет–светимость, по которой проводится предварительное отождествление скопления и его членов. Однако если учесть индивидуальные лучевые скорости движения галактик по отношению к ярчайшей галактике, то характерные детали в спектрах эллиптических галактик скопления можно использовать для повышения эффективности и точности определения красного смещения системы. Выделяя из общего массива галактик эллиптические галактики красной последовательности, можно построить составной спектр с лучшим отношением сигнала к шуму, т.е. собрать фотоны скопления с большей площади. Таким образом, можно получить более точную оценку красного смещения скопления при значительно более эффективном использовании телескопного времени.

Кроме того, при одновременном спектральном наблюдении большого числа галактик скопления методом многощелевой спектроскопии может решаться задача оценки дисперсии скоростей членов скопления. Такие измерения требуются как для оценок полных гравитационных масс отдельных скоплений, так и для калибровки масштаба масс скоплений галактик при измерениях другими способами (см., например, Саро и др., 2013; Олд и др., 2014; Хо и др., 2019).

В этой статье приводится описание методики многообъектных спектроскопических наблюдений, которые можно проводить при помощи спектрографа среднего и низкого разрешения ТФОСК, на 1.5-м Российско-Турецком Телескопе (РТТ-150). В статье приводятся методическое описание выбора апертурных отверстий для построения маски исследуемого скопления, описание выбора апертурных отверстий для построения маски исследуемого скопления, описание спектрофотометрической обработки спектров многощелевого массива данных, а также измерение красного смещения и дисперсии скоростей галактик на примере наблюдения скопления галактик 0301.6 + 0156 из расширенного каталога скоплений галактик обзора обсерватории им. Планка (Буренин, 2017).

ОТБОР ГАЛАКТИК И ПОСТРОЕНИЕ МАСКИ

За последние несколько десятилетий активно развивается эффективная техника спектральных наблюдений одновременно большого числа внегалактических объектов с помощью мультиобъектных спектрометров (МОС). Например, наземные приборы, такие как OSIRIS 10-м телескопа GTC (Хорди, 1998) или SCORPIO 6-м телескопа БТА (Афанасьев и Моисеев, 2005), а также МОС готовящегося к запуску космического 6.5-м телескопа Джеймс Уэбб с управляемым микрозатворным массивом, основанным на технологии MEMS (Джабвала и др., 2008).

В скоплении основной массив галактик сосредоточен в области до 1 Мпк с максимумом около 0.5 Мпк (Капассо и др., 2019). Таким образом, на $z > 0.17$ максимальное количество членов скопления сосредоточено на расстояниях менее 3 угл. мин от ярчайшей галактики скопления (BCG). Техника спектральных наблюдений скоплений галактик с помощью МОС является наиболее эффективной в смысле затрат телескопного времени. Масштаб изображения в фокальной плоскости 1.5-м российско-турецкого телескопа РТТ150 в фокусе Кассегрена (F/7.7) составляет 17.8"/мм (Аслан и др., 2001). Таким образом, в исследовании скоплений галактик методом МОС на РТТ-150 возможно использование только коротких щелей в стационарной маске.

Действительно, установка оптоволоконного забора света от одновременно большого количества источников из-за геометрических размеров оптоволоконных головок физически не осуществима. Размер щелей поперек дисперсии спектрометра также ограничивает число источников для спектроскопии. Понятно, что максимальное число одновременно наблюдаемых объектов с неперекрывающимися дисперсионными кривыми достигается в случае, когда вертикальный и горизонтальный размеры щели совпадают. То есть когда используется либо квадратная, либо округлая апертуры.

В наших наблюдениях мы изготовили маску с округлыми апертурами. Используемый размер отверстий в маске (200 мк), устанавливаемой в фокальной плоскости телескопа РТТ-150, соответствует 3.5" в поле зрения светоприемника системы ТФОСК. Кандидаты подбирались по красной последовательности в пределах $2'$ от ярчайшей галактики скопления таким образом, чтобы цвет $r' - i'$ был менее 0.05 от линейной подгонки, и чтобы в маску попали по возможности самые яркие галактики.

Апертуры маски определялись согласно следующему алгоритму. Центр маски выбирается центром изображения ПЗС приемника и соответствует положению ярчайшей галактики скопления

0301.6 + 0156 — таким образом, выбирается первая апертура. Оставшиеся апертуры определяются следующим образом:

1. Используя фотометрический каталог SDSS DR12 (Алам и др., 2015), отбираются все галактики, отличающиеся от BCG по цвету $r' - i'$ не более 0.05^m и находящиеся на угловых расстояниях в пределах $1'$ по склонению и $3'$ по прямому восхождению от нее и блеском не слабее 21^m в полосе r' .
2. Из полученной выборки исключаются все источники, лежащие в пределах 1.5 радиуса отверстий по прямому восхождению от BCG. Таким образом, исключались все источники, спектр от которых мог бы частично перекрывать спектр ярчайшей галактики скопления.
3. Из оставшегося списка выбиралась ярчайшая галактика, и ее положение определяло следующее положение отверстия.
4. Из списка исключались все источники, лежащие в пределах 1.5 радиуса отверстий по прямому восхождению по отношению к выбранному в пункте 3 источнику.
5. Пункты 3–4 выполняются до тех пор, пока не будет исчерпана вся выборка.
6. В поле скопления галактик выбираются как минимум две опорные звезды по возможности раннего спектрального класса, чтобы в области сильных теллурических линий поглощения спектр звезды был гладким, без особенностей. Спектры этих звезд используются в качестве опорных для суммирования спектров объектов, полученных в разные эпохи наблюдений, а также для учета теллурических линий поглощений.
7. Поскольку в округлую апертуру попадает как свет от источника, так и фона неба, то стоит задача учета уровня последнего. Она решается добавлением в список к отобранному источникам апертур в областях неба без ярких источников в радиусе 10 угл.сек, расположенных на тех же самых значениях координат по прямому восхождению, что и отобранные источники. Для отбора апертур неба использовалось суммарное изображение поля SDSS, полученного в фильтрах $g'r'i'$. Вначале из изображения исключались все области, лежащие в полосе 3 радиусов отверстий по прямому восхождению по отношению к отобранному источнику. Центры полос соответствуют координатам этих

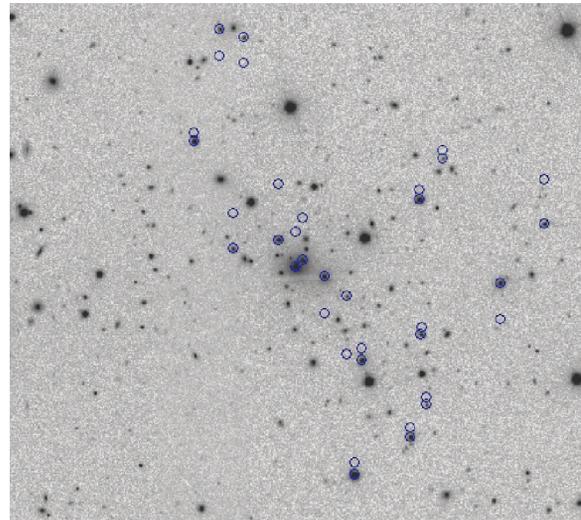


Рис. 1. Изображение скопления 0301.6 + 0156 в поле зрения ТФОСК. Север (N) слева, восток (E) вверху. Синими кружочками показаны отобранные источники для построения маски МОС и соответствующие им дополнительные отверстия для учета фона неба.

источников. Далее определялись и маскировались все области радиусом $5''$ вокруг всех идентифицированных источников поля на уровне 3 стандартных отклонений фона неба. Из оставшегося немаскированного изображения выбирались положения апертур фона неба наименее удаленные от отобранного источника.

8. Используя масштабный множитель между угловой мерой в поле зрения изображений ТФОСК и линейной мерой в фокальной плоскости телескопа, строится таблица положений апертур в микронах. Определенный из наблюдений масштабный множитель равен 54.3 микрон/угл.сек.
9. С помощью таблицы апертур составляется файл в формате “.dxf” системы автоматизированного проектирования с заданным шаблоном маски, пригодной для установки в колесо апертур системы TFOSC.

На рис. 1 кружочками показаны отобранные вышеописанным алгоритмом апертуры источников и соответствующие им дополнительные апертуры для учета фона неба скопления 0301.6 + 0156.

НАБЛЮДЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ МОС

Наблюдения скопления 0301.6 + 0156 с маской из 18 источников (16 кандидатов в члены скопления и две звезды поля: одна — как опорная, а вторая —

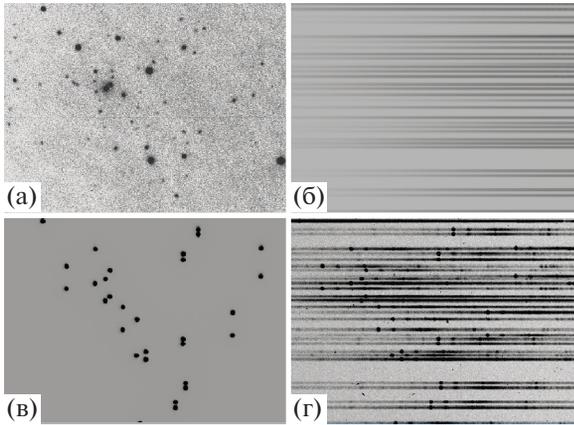


Рис. 2. Поле зрения скопления c10301.6 + 0156 (а). Снимок поля через маску (б). Спектр галогеновой лампы, полученной с маской и гризмой 15 (в). Спектр скопления, полученный с маской и гризмой 15 (г).

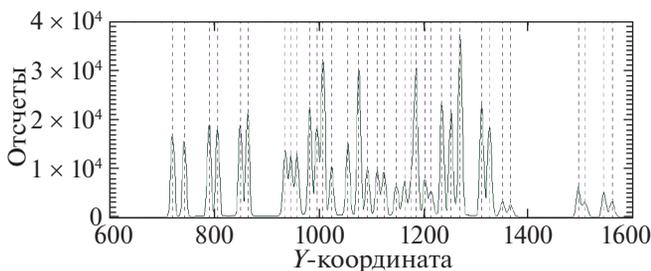


Рис. 3. Профиль поперек дисперсии для определения положения спектров.

в качестве звезды-сравнения) проводились 13 ноября 2018 г. Получено 6 спектральных кадров с экспозицией по 1800 с и на воздушных массах от 1.3 до 2.4. Ввиду слабо накопленного сигнала и сильного отклонения поглощения в атмосфере от закона Бугера на воздушных массах более 2, последний кадр был исключен из анализа. Для дисперсионной калибровки снимались спектры лампы Fe–Ag с линейчатым эмиссионным спектром, а для учета в длинноволновой части спектров интерференционных структур и нахождения положений дисперсионных кривых — спектры галогеновой лампы. Все спектральные кадры как от источников, так и калибровочные были исправлены за ток смещения, и после из них вычитались темновые снимки, масштабированные на время экспозиции кадра.

Извлечение спектров. Процедура поиска положений и извлечение спектров проводились по следующему алгоритму:

1. Регистрируется спектр галогеновой лампы с маской и дисперсионным элементом (рис. 2в).

2. В центральной зоне снимка выделялась полоса шириной 10 пикселей и высотой во всю длину изображения поперек направления дисперсии. По медианным значениям на данной высоте полосы строится профиль, который является вертикальным разрезом регистрируемых спектров (рис. 3)

3. На профиле определяются положения локальных максимумов.

4. Интервал с центром с наибольший из максимумов подгоняется гауссианой. Центр записывается в список положений дисперсионных кривых, и из профиля вычитается полученная подгонка, чтобы уменьшить влияние крыльев на соседние максимумы при определении точного положения. Также запоминается полная ширина на половине максимума гауссианы ($FWHM$).

5. Из оставшихся локальных максимумов профиля выбирается наибольший, и повторяется процедура 4 до тех пор, пока из списка не будут уточнены все положения дисперсий на вертикальном разрезе (рис. 3).

6. Далее процедуры 2–5 выполняются для зон в сторону уменьшения и увеличения по оси ординат относительно центрального положения с шагом по 100 пикселей.

7. Центральное положение дисперсии (Y_c) для данной апертуры по координате Y хорошо описывается полиномом второй степени от координаты X .

8. Находится среднее значение $FWHM_{avg}$ по всем значениям $FWHM$, определяемым в процедуре 4.

9. Поток $F(X, Y_c)$ на данной координате X и центрального положения Y_c для каждой дисперсионной кривой, который определяется из полиномиальной подгонки в процедуре 7, определялся как полный поток изображения $Im(X, Y)$ на вертикальном интервале $[Y_1, Y_2]$ средневзвешенного по гауссиане G с полной шириной на середине максимума, равной $FWHM_{avg}$ и centered на Y_c :

$$F(X, Y_c) = \frac{\sum_{Y_1}^{Y_2} (Im(X, Y_i) G_i W_i(X, Y_i))}{\sum_{Y_1}^{Y_2} (G_i W_i(X, Y_i))},$$

где Y_1 и Y_2 есть целые значения выражений $Y - FWHM_{avg}$ и $Y + FWHM_{avg}$ соответственно. Такое взвешивание целесообразно для уменьшения

влияния крыльев сильных теллурических линий на соседние спектры при наблюдении слабых объектов со смещенными друг относительно друга дисперсионными кривыми. Смещение имеет место из-за того, что от разных апертур свет попадает на диспергирующий элемент под разными углами. Для учета того, что реальный интервал, внутри которого происходит суммирование потока, попадает на дробное значение пиксела, введена функция $W(Y_i)$, которая определяется следующим образом:

$$W(Y) = \begin{cases} 1, & \text{если } Y_1 < Y_i < Y_2, \\ 1 - \{Y - FWHM_{avg}\}, & \text{если } Y_i = Y_1, \\ \{Y + FWHM_{avg}\}, & \text{если } Y_i = Y_2, \end{cases}$$

где выражение, заключенное в фигурные скобки $\{ \}$, — дробная часть числа.

ДИСПЕРСИОННАЯ КАЛИБРОВКА

В зависимости от положения отверстия маски в поле зрения приемника излучения видимые спектры регистрируются в различных диапазонах длин волн. Рисунок 2б соответствует положению отверстий, а на рис. 2г изображены полученные спектры небесных источников, соответствующие этим отверстиям. На каждом спектре явно выделяется сильная эмиссионная теллурическая линия нейтрального кислорода (5577.2 Å, [OI]). Хорошо видно, что она смещается в зависимости от положения отверстия. Как уже было отмечено выше, данное смещение имеет место из-за того, что от разных апертур свет попадает на диспергирующий элемент под разными углами.

На основе спектров калибровочной лампы Fe–Ag, полученных с использованием маски с отверстиями и гризмы #15 системы ТФОСК и веб-ресурса обсерватории NOAO¹, измерялись положения некоторых самых ярких и малоблендированных линий железа и аргона для спектров соответствующего отверстия. Оказалось, что в первом приближении, с точностью 1–2 пикселя, положение линий лампы описывается линейной зависимостью от координаты X отверстия. Это позволило написать программу автоматической дисперсионной калибровки спектров, которой мы и пользовались в дальнейшем. В табл. 1 приведены отождествления использованных нами линий лампы Fe–Ag, их длины волн и соответствующие коэффициенты линейной зависимости от координаты X отверстия.

Таблица 1. Определение координаты (X_{line}) эмиссионной линии калибровочного спектра FeAg, полученного с гризмой 15 системы ТФОСК, по линейной зависимости от X -координаты отверстия X_{pinhole} : $X_{\text{line}} = a_0 + a_1 X_{\text{pinhole}}$

Линия	Длина волны (Å)	a_0	a_1
ArI	4158.6	−697.8	1.00649
ArII	4481.8	−559.3	1.00451
ArII	4545.1	−530.4	1.00308
ArII	4657.6	−481.2	1.00090
ArII	4764.9	−436.1	1.00031
ArII	4806.0	−418.7	0.99989
ArII	4879.9	−387.3	0.99967
ArII	4965.1	−352.2	0.99902
ArII	5062.0	−312.0	0.99823
FeI	5269.5	−226.1	0.99707
FeI	5328.0	−201.5	0.99693
ArI	5495.9	−131.7	0.99528
ArI	6032.1	87.1	0.99072
ArII	6114.9	117.1	0.99062
FeI	6172.3	141.6	0.99009
ArII	6416.3	240.0	0.98782
ArI	6677.3	343.0	0.98733
ArI	6871.3	421.7	0.98395
ArI	6965.4	459.0	0.98305
ArI	7067.2	499.5	0.98197
ArI	7147.0	531.3	0.98100
ArI	7272.9	580.8	0.98005
ArI	7384.0	624.4	0.97933
ArI	7635.1	723.5	0.97673
ArI	7948.2	846.0	0.97393
ArI	8264.5	969.5	0.97071
ArI	8521.4	1069.1	0.96849
ArI	8667.9	1126.0	0.96694

Более точное положение линий рассчитывается с использованием непосредственно спектров Fe–Ag. Для определения точного максимума соответствующей линии было использовано параболическое приближение в районе ± 4 пиксел вокруг предвычисленного по коэффициентам линейной зави-

¹ <http://iraf.noao.edu/specatlas/fear/fear.html>

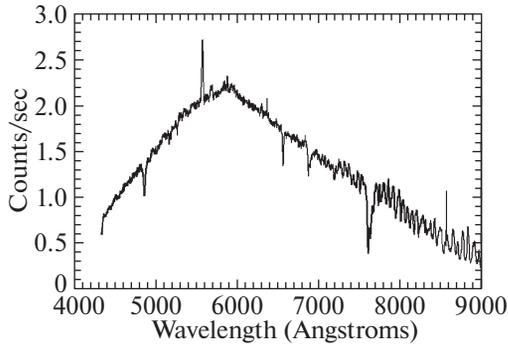


Рис. 4. Инструментальный спектр опорной звезды.

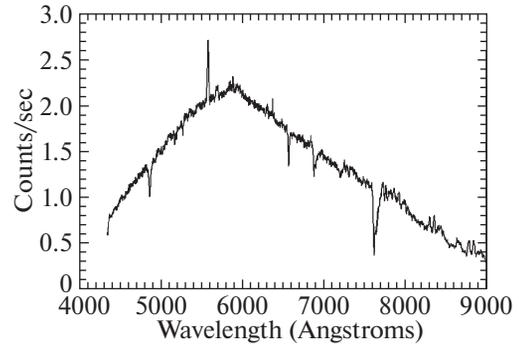


Рис. 5. Инструментальный спектр опорной звезды после учета интерференции.

симости из табл. 1 приближенного значения по X -координате отверстия. Для всех спектров дисперсионное решение описывается полиномом третьей степени, среднеквадратичное отклонение составило менее 2 \AA .

УЧЕТ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ НА СТРУКТУРЕ ПЗС-МАТРИЦЫ

В использованном нами ПЗС-приемнике DW436N-BV Andor наблюдается интерференция на структуре ПЗС-матрицы в красной области спектра на длинах волн более 7000 \AA . Вариации регистрируемого сигнала из-за интерференции значительно осложняют обработку спектров в ближнем инфракрасном диапазоне электромагнитного излучения. Для учета влияния интерференции нами был использован стандартный подход, основанный на использовании спектра галогеновой лампы (S_{hal}). Получаемый спектр галогеновой лампы для данного отверстия сглаживался скользящим средним с окном 30 пиксел, который в области длин волн более 7000 \AA подгонялся полиномом 5-й степени (P_5). Искажение спектра за счет интерференции (K_{fringe}) определяется как отношение подгонки и спектра галогеновой лампы:

$$K_{\text{fringe}} = \frac{P_5}{S_{\text{hal}}}.$$

В дальнейшем все спектры для данной апертуры исправлялись простым домножением на K_{fringe} . На рис. 4 и рис. 5 показаны инструментальный спектр звезды сравнения и результат исправления интерференционной картины в красной области этого же спектра соответственно. Видно, что значительное уменьшение вариаций потока в спектре звезды в этой области спектра.

УЧЕТ ФОНА НЕБА

В отличие от спектральных наблюдений с длинной щелью в спектрах, полученных от апертур с

малым отверстием, фон неба не может быть учтен непосредственно его оцениванием в окрестностях источника. Поэтому мы сделали дополнительные отверстия в маске, которые расположены на тех же координатах вдоль дисперсии, что и источники, но смещены поперек дисперсии. Также имеются ограничения по точности в изготовлении одинаковых по размеру отверстий. Кроме того, возможно наличие микропылинок на краях отверстий. Эти вариации в площади отверстий приводят к различному регистрируемому потоку фона неба, что ставит задачу масштабирования регистрируемых спектров.

Поскольку фон неба равномерно заполняет отверстие, и исследуемые источники достаточно слабы — на уровне фона неба или слабее, то полный поток в сильной теллурической эмиссионной линии нейтрального кислорода OI (5577.2 \AA) можно использовать для учета вариаций потока фона из-за отличия в площади отверстий и соответствующего масштабирования двух различных спектров. Для оценки потока в линии OI спектр подгонялся гауссианой и линейной зависимостью от длины волны в области на расстояниях менее 80 \AA от центра этой линии. Поток принимался как интеграл от гауссианы в выбранной области, в то время как члены линейной зависимости являются оценкой континуума спектра. Все спектры от дополнительных отверстий были пересчитаны на целочисленные значения длин волн в ангстремах и приведены к единому потоку. В качестве опорного спектра для масштабирования по потоку был выбран спектр фона неба с наибольшим значением потока в линии OI. Далее строился составной спектр фона неба следующим образом:

$$Sky(\lambda) = \begin{cases} F_1(\lambda), & \text{если } N = 1, \\ 0.5(F_1(\lambda) + F_2(\lambda)), & \text{если } N = 2, \\ \text{median}(F_{(1,N)}(\lambda)), & \text{если } N > 2, \end{cases}$$

где λ пробегает все значения от наименьшей до наибольшей длины волны из всех спектров с шагом 1 \AA ; N — общее число спектров на данной длине

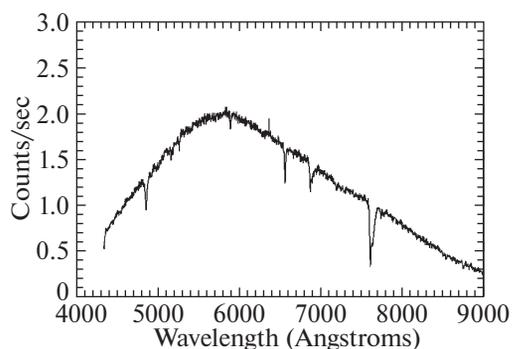


Рис. 6. Инструментальный спектр опорной звезды после учета фона неба.

волны. Перед вычитанием из спектра объекта составной спектр фона неба масштабировался к потоку спектра объекта в линии OI. На рис. 6 показан инструментальный спектр звезды сравнения с вычетом фона неба.

УЧЕТ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ H₂O, O₂, O₃

При спектральных наблюдениях небесных источников с Земли в спектрах присутствуют сильные теллурические линии поглощения, возникающие на молекулах земной атмосферы. Для высокогорных обсерваторий, в число которых входит Национальная обсерватория ТЮБИТАК, где расположен 1.5-м телескоп РТТ-150, основными источниками поглощения в теллурических линиях являются молекулы воды (H₂O), молекулярного кислорода (O₂) и озона (O₃). Если O₃ создает широкую от 5000 Å до 7000 Å гладкую линию поглощения и снижает поток приходящего излучения всего на несколько процентов, то влияние O₂ и H₂O имеет более сложный и выраженный характер. На рис. 7 показаны зависимости атмосферного пропускания для O₃, O₂ и H₂O соответственно. Зависимости построены на основе веб-ресурса TAPAS² (Берто и др., 2014) обсерватории Пик дю Миди на момент наших наблюдений.

Полученные с высоким спектральным разрешением зависимости атмосферного пропускания были свернуты с широкополосной гауссианой ($\sigma \sim 10$ Å), характеризующей аппаратную функцию системы ТФОСК. Сильное атмосферное поглощение в линиях O₂ и H₂O в области выше 6700 Å замывает спектральные особенности эллиптических галактик скопления, попадающие на эти линии. При определении красного смещения этих источников света методом кросс-корреляции с шаблонным спектром исключение хорошо выраженных особенностей, таких как линии поглощения G,

² <http://cds-espri.ipsl.fr/tapas/>

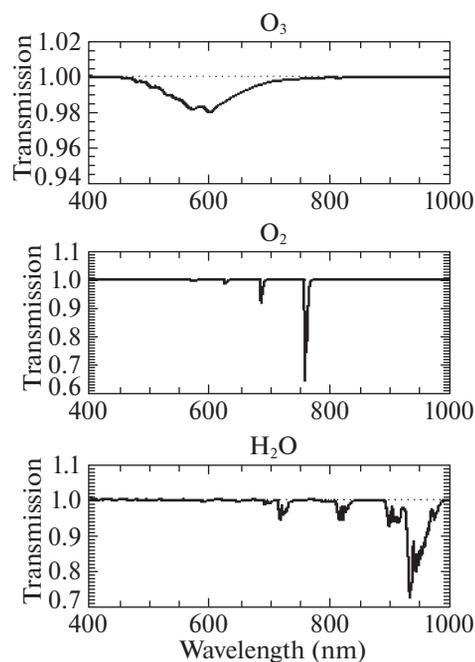


Рис. 7. Атмосферное пропускание в теллурических линиях O₃, O₂ и H₂O.

Mg и NaD, а также скачок около длины волны 4000 Å, несколько зашумляют оценки. В спектрах звезд главной последовательности спектрального класса F и более ранних в области окон прозрачности атмосферы и самих теллурических линий от 7000 Å до 9000 Å нет выраженных особенностей. Ввиду относительной узости этих линий изменение чувствительности ПЗС-приемника и влияние оптики телескопа и спектрографа можно принять линейными. Следовательно, можно уверенно построить континуум в данной спектральной области, а отклонения от него будут обусловлены только атмосферным поглощением. Таким образом, атмосферное пропускание в линиях H₂O и O₂ может быть получено путем сравнения спектров звезд класса F и зависимости, построенной на основе TAPAS.

При одновременных наблюдениях большого числа источников все спектры регистрируются в одинаковых атмосферных условиях. Поэтому наличие среди источников звезды соответствующего спектрального класса позволяет восстанавливать спектральное распределение всех исследуемых источников до входа излучения в атмосферу Земли в области теллурических линий H₂O и O₂. При выборе звезды сравнения мы использовали условие: $g-r < 0.34$, что соответствует звезде главной последовательности более ранней, чем F9V. Теллурическая линия O₃ является достаточно широкой, поэтому определение континуума в этой области затруднено из-за того, что предположе-

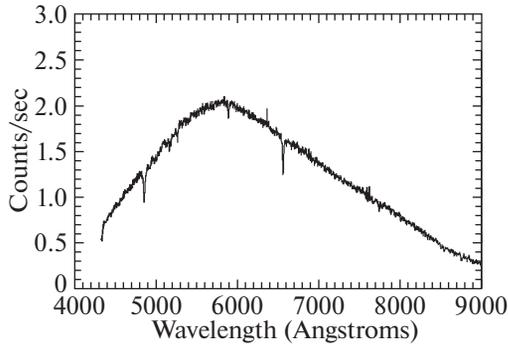


Рис. 8. Инструментальный спектр опорной звезды после учета теллурических линий поглощения.

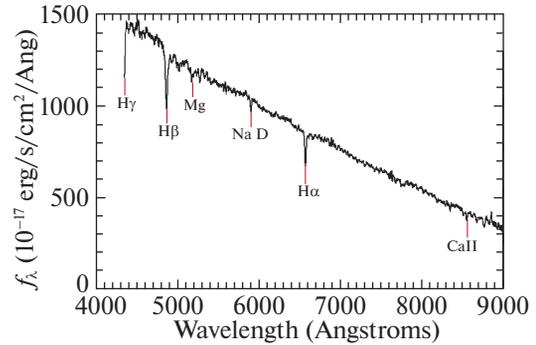


Рис. 9. Составной спектр опорной звезды.

ние о линейной зависимости инструментальной чувствительности оказывается неверным. Однако поскольку линия образуется в верхних слоях атмосферы Земли, то без большой потери точности можно принять эту зависимость как и для обсерватории Пик дю Миди. На рис. 8 показан инструментальный спектр опорной звезды после удаления вклада теллурических линий поглощения.

ПОСТРОЕНИЕ СОСТАВНОГО СПЕКТРА

При наблюдениях слабых источников требуется длительное накопление сигнала, следовательно, регистрируемые спектры будут соответствовать различным атмосферным условиям. Наличие среди источников опорной звезды позволяет получать коэффициенты учета инструментальной чувствительности и атмосферной прозрачности, даже если наблюдения проводились не в спектрофотометрических условиях. Для этого необходимо иметь спектральное распределение опорной звезды в энергетических единицах, которое получается стандартным способом с наблюдением спектрофотометрического стандарта с длинной щелью в благоприятных атмосферных условиях. В предположении, что за время наблюдений поток от опорной звезды не меняется, приведенные за атмосферу и с учетом инструментальной чувствительности спектры далее можно обрабатывать и получить составной спектр с лучшим отношением сигнала к шуму.

Даже если наблюдения проводились в различных ноци, уровень потока опорной звезды можно контролировать фотометрически с помощью дополнительных наблюдений в широкополосных фильтрах. Для спектрофотометрической калибровки опорной звезды использовался спектрофотометрический стандарт HR718³. При получении составного спектра мы использовали медианные значения из 5 спектров, полученных при воздушных

массах менее 2. На рис. 9, 10 и 11 приведены составные спектры опорной звезды, звезды сравнения и BCG.

Спектр опорной звезды соответствует звезд-гиганту спектрального класса F. Наблюдаются хорошо выраженная серия поглощения Бальмера, а также триплет CaII и линия поглощения Mg. Судя по полученному спектру, температура звезды, определенная по данным GAIA DR2 ($T_{\text{eff}} = 5112 \text{ K}$, $d = 500 \text{ пк}$), была определена ошибочно. На расстоянии опорной звезды в линию поглощения NaD существенный вклад добавляет межзвездное поглощение — в направлении на скопление оно составляет $A_V = 0.243$ (Шлегель и др., 1998).

Спектры звезды сравнения показывают переменный характер — наблюдается изменение потока континуума примерно в 1.5 раза за время наблюдений порядка 3 ч. Также зарегистрировано смещение в линии H α — источник приближается со скоростью порядка 300 км/с. Определенный по данным GAIA параллакс дает оценку порядка 10 кпк с такой же ошибкой. Возможно, большая ошибка связана с двойственностью системы. С другой стороны, на таком расстоянии звезда сравнения была бы на 2–3 звездной величины слабее наблюдаемой ($\sim 20^m$ для звезды класса G). Вопрос о двойственности звезды сравнения остается открытым.

Спектр BCG получен с хорошим накоплением, и основные детали — линии поглощения — отчетливо видны. Причем оказалось, что линия NaD практически в точности попадает на сильную теллурическую линию O₂. Видно, что, несмотря на это обстоятельство, ее удалось эффективно восстановить. В кружочке отмечена узкая линия поглощения NaD, образованная веществом Млечного Пути на луче зрения в направлении на ярчайшую галактику скопления. Также видны сильные эмиссионные линии H α и однажды ионизованного азота NII, указывающие на процессы звездообразования в галактике.

³ <https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/hr718.html>

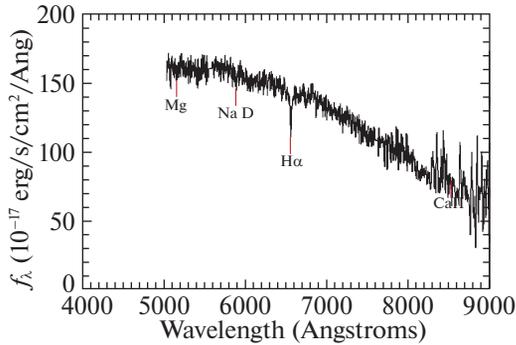


Рис. 10. Составной спектр звезды сравнения.

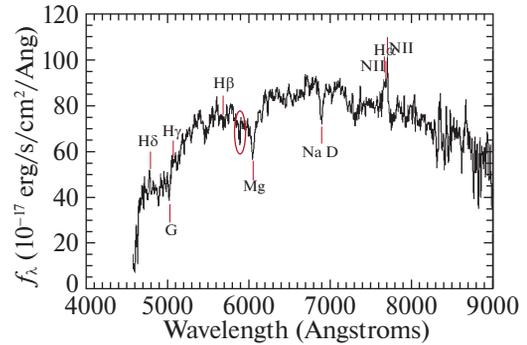


Рис. 11. Составной спектр BCG.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ГАЛАКТИК — ЧЛЕНОВ СКОПЛЕНИЯ, ИЗМЕРЕНИЕ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ И ДИСПЕРСИИ СКОРОСТЕЙ

Визуальной инспекцией из кандидатов в члены скопления были выделены 9 галактик E-типа. Измерение красного смещения проводилось тем же способом, что мы использовали в нашей работе по измерению красных смещений скоплений галактик из обзора Планка (Сообщество Планка, 2015a; Воробьев и др., 2016; Зазнобин и др., 2019) — методом кросс-корреляции с шаблонным спектром. В качестве шаблона можно взять спектр близкой эллиптической галактики с высоким отношением сигнал—шум, либо воспользоваться синтетическим спектром. Спектр-шаблон смещается относительно спектра интересующей нас галактики с определенным шагом, на каждом этапе вычисляется значение χ^2 как квадрат разницы спектра галактики и смещенного спектра-шаблона. Таким образом, величина χ^2 определяется как функция от смещения спектра-шаблона. Вычисляя минимум χ^2 , находим искомое смещение и ошибку его измерения.

В табл. 2 приведены высококачественные измерения красного смещения и соответствующие им ошибки для этих объектов. Точность определения красных смещений $\delta z/z \approx 0.001$ достигается для эллиптических галактик с блеском до $19^m.5$ в полосе r Слоановской фотометрической системы. Кроме эллиптических галактик, 4 идентифицированы как спиральные галактики, а 2 объекта из-за недостаточности накопленного сигнала отождествить не удалось. Один спектр оказался зашумлен линиями неба от соседнего отверстия из-за технологической неточности при производстве маски. Видно, что при помощи спектрографа ТФОСК с использованием многообъектных масок в одном наблюдении можно измерять красные смещения галактик с величинами до $m_r = 20.0$.

На основе полученных измерений красного смещения мы оценили дисперсию скоростей искомого скопления как $\sigma_v = 530 \pm 60$ км/с.

Оценка красного смещения ярчайшей галактики скопления, которое мы принимаем за красное смещение скопления, составляет $z_{BCG} = 0.16987 \pm 0.0005$. Красное смещение скопления можно уточнить по многообъектным данным. Для этого надо просуммировать все спектры эллиптических галактик скопления, т.е. собрать фотоны с большей площади и тем самым увеличить отношение сигнала к шуму составного спектра. В итоге строится средневзвешенный по яркости спектр по большому количеству галактик с усреднением их лучевых скоростей. По этому спектру получается более точное измерение z скопления, которое, как и ожидалось, получилось с лучшей точностью $z_{cl} = 0.17057 \pm 0.0004$.

УТОЧНЕНИЕ КРАСНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ЧИСЛО КАНДИДАТОВ

На основе отождествленных членов скопления также можно уточнить зависимость красной последовательности. Для данного скопления она описывается выражением:

$$r' - i' = 0.704 - 0.009r'.$$

Измеренное среднеквадратичное отклонение положений галактик от красной последовательности составляет $0^m.02$ по цвету $r' - i'$. На рис. 12 показана диаграмма блеск (r') — цвет ($r' - i'$) всех галактик до 22^m в радиусе $3'$ от BCG. Кружочками отмечены галактики, которые вошли в список источников, для которых были получены спектры. Кружочками большего размера отмечены отождествленные галактики скопления E-типа. Пунктиром отмечены зоны на расстоянии 3 стандартных отклонений от центральной линии красной последовательности. Ограничиваясь блеском $m_r \leq 21.0$, было подсчитано общее число галактик в зависимости от разности между заданным блеском и блеском BCG. Данная зависимость хорошо подгоняется показательной функцией с показателем,

Таблица 2. Результаты измерений красных смещений кандидатов в члены скопления c10301.6 + 0156. Фотометрические оценки красного смещения объектов (z_{phot}) взяты из каталога SDSS DR12

RA(J2000)	DEC(J2000)	r	$g - r$	$r - i$	z_{phot}	z	z_{err}	Примечание
03 01 31.20	+01 56 26.1	18.65	1.29	0.54	0.214	0.17026	0.0008	
03 01 34.36	+01 55 55.7	18.31	1.29	0.56	0.197	0.17591	0.0006	
03 01 37.54	+01 57 21.9	18.17	1.21	0.52	0.182	0.16543	0.0009	
03 01 37.80	+01 55 32.3	18.08	1.29	0.52	0.212	0.16523	0.0006	
03 01 38.20	+01 55 14.6	16.55	1.31	0.56	0.175	0.16987	0.0005	BCG
03 01 38.48	+01 55 18.9	17.49	1.26	0.52	0.176	0.16902	0.0005	
03 01 38.96	+01 54 35.5	19.50	1.34	0.53	0.233	0.17309	0.0008	
03 01 39.33	+01 55 04.0	18.69	1.25	0.58	0.195	0.16918	0.0006	
03 01 40.98	+01 56 31.6	18.21	1.34	0.53	0.192	0.17004	0.0006	
03 01 32.52	+01 56 36.0	20.39	0.97	0.55	0.298			faint
03 01 35.43	+01 56 32.6	19.41	1.23	0.55	0.222			S-type
03 01 36.99	+01 55 46.4	20.23	1.33	0.52	0.257			S-type
03 01 39.97	+01 57 49.4	19.16	1.25	0.53	0.202			bad pinhole position
03 01 42.67	+01 56 46.3	20.76	1.09	0.54	0.362			faint
03 01 47.67	+01 54 42.3	20.04	1.36	0.54	0.241			S-type
03 01 48.01	+01 54 27.4	19.34	1.34	0.55	0.247			S-type
RA(J2000)	DEC(J2000)	r	$g - r$	$r - i$	Star			
03 01 29.62	+01 55 51.0	15.31	0.32	0.11	опорная			
03 01 43.38	+01 54 11.4	17.09	0.33	0.15	сравнения			

близким к $3/2$. На рис. 13 показан результат подгонки общего числа галактик, лежащих в пределах 3σ внутри красной последовательности, функцией $N_{\text{gal}} = 10\Delta m_r^{\frac{3}{2}}$. Используя данную зависимость, можно оценить потенциальное число кандидатов в маске в поле зрения ТФОСК.

Оптимальное расстояние между отверстиями по оси, перпендикулярной направлению дисперсии, для того чтобы получать неперекрывающиеся спектры, — это $6''$. Таким образом, на размере

поля зрения $11'$ можно потенциально получить до 100–110 спектров. Причем для оценки фона неба необязательно делать отверстие, соответствующее объекту. Достаточно по всему полю равномерно определить десяток апертур и по ним построить составной спектр фона неба, как было определено в настоящей статье в разделе по учету фона неба. С другой стороны, скопление галактик — это компактное образование, которое ограничено в среднем размером области 1 Мпк, а также в ви-

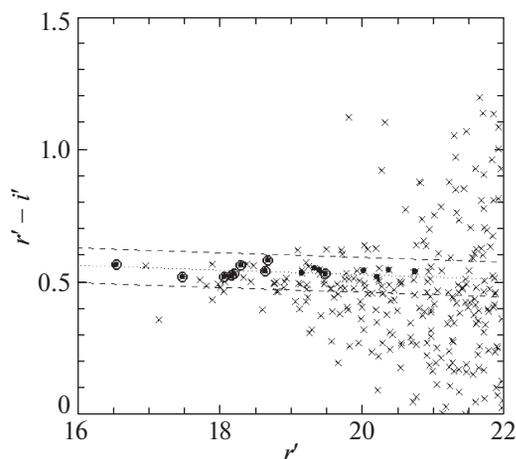


Рис. 12. Красная последовательность в области скопления s10301.6 + 0156 и спектрально идентифицированные эллиптические галактики скопления (отмечены кружочками).

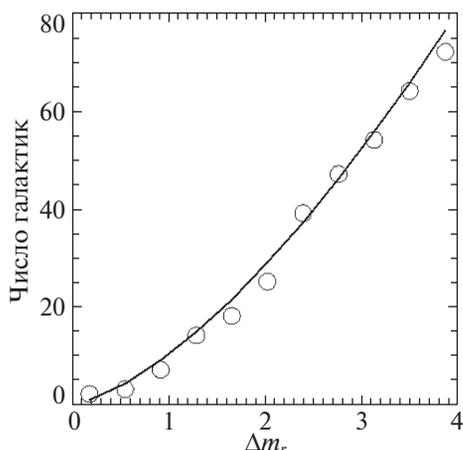


Рис. 13. Общее число галактик, определенное по красной последовательности, скопления s10301.6 + 0156 в зависимости от разности между заданным блеском и блеском VCG.

димой нами проекции галактики распределены по обеим координатам. Следовательно, общее число галактик в одной маске будет вдвое меньше общего числа. Либо посредством двух масок можно покрыть значительную часть кандидатов. Начиная с $z < 0.1$, угловой размер 1 Мпк более $10'$, и может быть использовано все поле матрицы. Общее число галактик в этом случае составляет около 100 кандидатов. Для скоплений с $z > 0.3$ угловой размер скопления уменьшается до 2 угл. мин и общее число галактик ниже установленного нами предела для РТТ-150 ($m_r \leq 20.0$) ограничивается 30 кандидатами. Таким образом, можно заключить, что в случае массивных скоплений галактик на красных смещениях $z < 0.3$, по данным наблюдений РТТ-150, выполненных с использованием только одной

маски, возможно провести высокоточные измерения красных смещений от 15 до 50 галактик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен пример одновременного спектроскопического измерения красных смещений большого числа галактик в скоплении методом многообъектной спектроскопии. Получены измерения красных смещений галактик скопления 0301.6 + 0156, расположенного на $z = 0.17057 \pm 0.0004$, обнаруженного ранее по наблюдению сигнала Сюняева–Зельдовича в обзоре всего неба обсерватории им. Планка (Буренин, 2017).

С помощью спектрографа среднего и низкого разрешения ТФОСК, на 1.5-м Российско-Турецком Телескопе (РТТ-150), используя многообъектные маски поля, в одном наблюдении с экспозицией 3 ч получены спектры 16 галактик скопления, 9 из которых определены как эллиптические, и для них произведены высококачественные измерения красных смещений. Еще 4 определены как спиральные галактики, 2 объекта из-за недостаточно накопленного сигнала отождествить не удалось, а один спектр оказался зашумлен линиями неба от соседнего отверстия.

Показано, что при помощи спектрографа ТФОСК с использованием многообъектных масок в одном наблюдении можно измерять красные смещения галактик с величинами до $m_r = 20.0$. В поле размером около $11' \times 11'$, в зависимости от богатства и расстояния до скопления, общее число одновременных спектральных измерений может составить от 15 до 50 галактик для скоплений на $z < 0.3$. Такие измерения могут потребоваться в будущем для уточнения красных смещений скоплений, а также для оценок их масс динамическим способом.

Авторы благодарят ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АН РТ за частичную поддержку в использовании РТТ150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп в Анталии). Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-22-00520. Работа С. Мельникова выполнена частично за счет средств субсидии 3.6714.2017/8.9, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алам и др. (S. Alam, F.D. Albareti, C.A. Prieto, F. Anders, S.F. Anderson, T. Anderton, B.H. Andrews, E. Armengaud, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **219**, 12 (2015).
2. Аслан и др., Письма в Астрон. журн. **27**, 464 (2001). [Z. Aslan, I.F. Bikmaev, E.A. Vitrichenko, R.I. Gumerov, L.A. Dembo, S.F. Kamus, V. Keskin, U. Kiziloglu, et al., *Astron. Lett.* **27**, 398 (2001)].

3. Афанасьев В.Л., Моисеев А.В. Письма в Астрон. журн. **31**, 214 (2005). [V.L. Afanasiev, A.V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005)].
4. Берто и др. (J.L. Bertaux, R. Lallement, S. Ferron, C. Boonne, and R. Bodichon, et al.), *Astron. Astrophys.* **564**, A46 (2014).
5. Боргани и др. (S. Borgani, P. Rosati, P. Tozzi, S.A. Stanford, P.R. Eisenhardt, C. Lidman, B. Holden, R.D. Ceca, et al.), *Astrophys. J.* **561**, 13 (2001).
6. Буренин и др. [R.A. Burenin, A. Vikhlinin, A. Hornstrup, H. Ebeling, H. Quintana, A. Mescheryakov] *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 561 (2007).
7. Буренин Р.А., Вихлинин А.А. Письма в Астрон. журн. **38**, 395 (2012). [R.A. Burenin, A.A. Vikhlinin, *Astron. Lett.* **38**, 395].
8. Буренин Р.А. Письма в Астрон. журн. **43**, 559 (2017). [R. A. Burenin, *Astron. Lett.* **43**, 507 (2017)].
9. Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Зазнобин И.А., Хорунжев Г.А., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н. и др. Письма в Астрон. журн. **44**, 297 (2018). [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **44**, 297 (2018)].
10. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, A. Voevodkin, C.R. Mullis, L. van Speybroeck, H. Quintana, B.R. McNamara, I. Gioia, A. Hornstrup, et al.), *Astrophys. J.* **590**, 15 (2003).
11. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, A.V. Kravtsov, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, C. Jones, S.S. Murray, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1060 (2009).
12. А.А. Вихлинин, А.В. Кравцов, М.Л. Маркевич, Р.А. Сюняев, Е.М. Чуразов, *Успехи физических наук* **57**, 317 (2014).
13. Воробьев В.С., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Додонов С.Н., Жучков Р.Я. и др., Письма в Астрон. журн. **42**, 81 (2016). [V.S. Vorobyev et al., *Astron. Lett.* **42**, 63 (2016)].
14. Джабвала и др. (M.D. Jhabvala, D. Franz, T. King, G. Kletetschka, A.S. Kutyrer, M.J. Li, S.E. Meyer, S. Moseley, et al.), *Proc. SPIE* **6959**, 17 (2008).
15. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Коноплев В.В., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л. и др., Письма в Астрон. журн. **45**, 2 (2019) [Zaznobin et al., *Astron. Lett.* **45**, 2 (2019)].
16. Капассо и др. (R. Capasso, J.J. Mohr, A. Saro, A. Biviano, N. Clerc, A. Finoguenov, S. Grandis, C. Collins, et al.), *MNRAS* **486**, 1594 (2019).
17. Манц и др. (A. Mantz, S.W. Allen, D. Rapetti, and H. Ebeling), *MNRAS* **406**, 1759 (2010).
18. Олд и др. (L. Old, R.A. Skibba, F.R. Pearce, D. Croton, S.I. Muldrew, J.C. Muñoz-Cuarteras, D. Gifford, M.E. Gray, et al.), *MNRAS* **441**, 1513 (2014).
19. Пьер и др. (M. Pierre, F. Pacaud, J.B. Juin, J.B. Melin, P. Valageas, N. Clerc and P.S. Corasaniti, et al.), *MNRAS* **414**, 1732 (2011).
20. Розо и др. (E. Rozo, R.H. Wechsler, E.S. Rykoff, J.T. Annis, M.R. Becker, A.E. Evrard, J.A. Frieman, S.M. Hansen, et al.), *Astrophys. J.* **708**, 645 (2010).
21. Саро и др. (A. Saro, J.J. Mohr, G. Bazin, and K. Dolag), *Astrophys. J.* **772**, 17 (2013).
22. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXIX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A29 (2014a); arXiv:1303.5089.
23. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A20 (2014b).
24. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **582**, A29 (2015a); arXiv:1407.6663.
25. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXXII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **581**, A14 (2015b); arXiv:1502.00543.
26. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **586**, A139 (2016a); arXiv:1504.04583.
27. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXVII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A27 (2016b); arXiv:1502.01598.
28. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A24 (2016в); arXiv:1502.01597.
29. Сюняев и Зельдович (R.A. Sunyaev and Ya.V. Zeldovich), *Comm. Astrophys. Sp. Phys.* **4**, 173 (1972).
30. Хо и др. (M. Ho, M.M. Rau, M. Ntampaka, A. Farahi, H. Trac and B. Póczos, et al.), *Astrophys. J.* in press (2019); arXiv:1902.05950.
31. Хорди (C. Jordi), *Astrophys. Space Sci.* **263**, 369 (1998).
32. Шлегель и др. (D.J. Schlegel, D.P. Finkbeiner, M. Davis), *Astrophys. J.* **500**, 525 (1998).