

Хамитов И.М.<sup>1,2</sup>, Бикмаев И.Ф.<sup>2,3</sup>, Буренин Р.А.<sup>4</sup>,

Глушков М.В.<sup>2,3</sup>, Ляпин А.<sup>4</sup>, Мельников С.С.<sup>2,3</sup>

1. TÜBİTAK National Observatory, Antalya, 07058 Turkey

2. Казанский Федеральный Университет, Казань, Республика Татарстан, Россия

3. Академия наук РТ, Казань, Республика Татарстан, Россия

4. Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

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 (например, Vikhlinin et al., 2014). Поэтому скопления галактик представляют собой мощный инструмент в космологических исследованиях, который дает один из основных способов измерения космологических параметров (например, Borgani et al., 2001; Vikhlinin et al., 2003, 2009; Mantz et al, 2010; Rozo et al., 2010; Pierre et al., 2011; Burenin & Vikhlinin 2012, Planck Collaboration 2014, 2016).

На Российско-Турецком 1.5-м Телескопе (РТТ-150) с 2012 года проводится большой объем работ по оптическому отождествлению и измерению красных смещений богатых скоплений галактик, обнаруженных космической обсерваторией им. Планка. Спектроскопические измерения красных смещений отождествленных скоплений галактик проводятся на РТТ150, в основном, для систем с красным смещением  $z < 0.4$ .

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

В скоплениях галактик основное количество галактик сосредоточено в области до 1 Мпс с максимумом около 0.5 Мпс (Carasso et al., 2019). Таким образом, на красных смещениях более 0.17 максимальное количество членов скопления, как правило, сосредоточено внутри 3' вокруг ярчайшей галактики скопления (BCG). Техника спектральных наблюдений скоплений галактик с помощью многообъектных спектрометров (МОС) является наиболее эффективной по затратам телескопного времени.

В данной работе мы представляем результаты наблюдений членов скопления галактик спутника ПЛАНК из расширенного каталога под номером 412 (Буренин, 2017) на телескопе РТТ150 с использованием многощелевой маски. Спектроскопически отождествлены и измерены красные смещения для 9 членов скопления 0301.6+0156. Определено, что за 10000 сек суммарной экспозиции точность определения красных смещений 0.001 (достаточная для космологических исследований), достигается для эллиптических галактик с блеском в g-полосе до 20<sup>m</sup>.

Масштаб изображения в фокальной плоскости телескопа РТТ-150 в фокусе Кассегрена (F/7.7) составляет 17.8 "/мм (Aslan et al., 2001). Следовательно, 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. Использованный размер отверстий в маске (200 микрон), устанавливаемой в фокальной плоскости телескопа РТТ-150, соответствует 3.5" в поле зрения светоприёмника системы ТФОСК. Кандидаты подбирались по красной последовательности в пределах 2' от ярчайшей галактики скопления, таким образом, чтобы цвет g'-i' был менее 0.05 от линейной подгонки (Рис.1), и выбирались с приоритетом, чтобы в маску попали по-возможности самые яркие галактики. Кроме того, 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. Также в округлую апертуру попадает как свет от источника, так и фона неба.

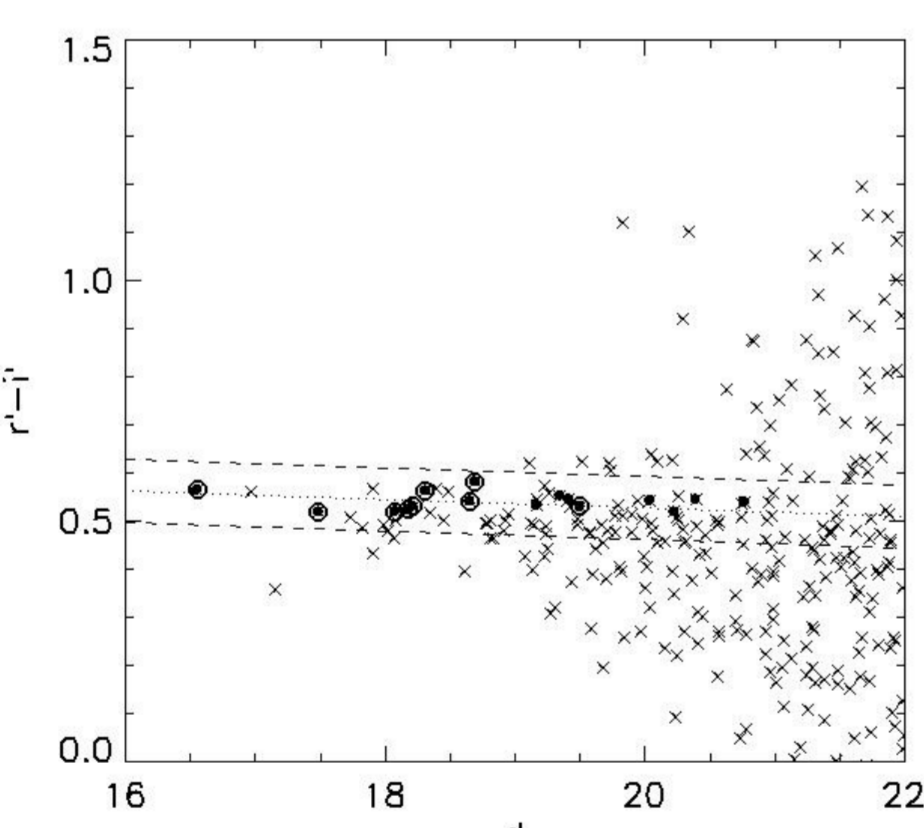
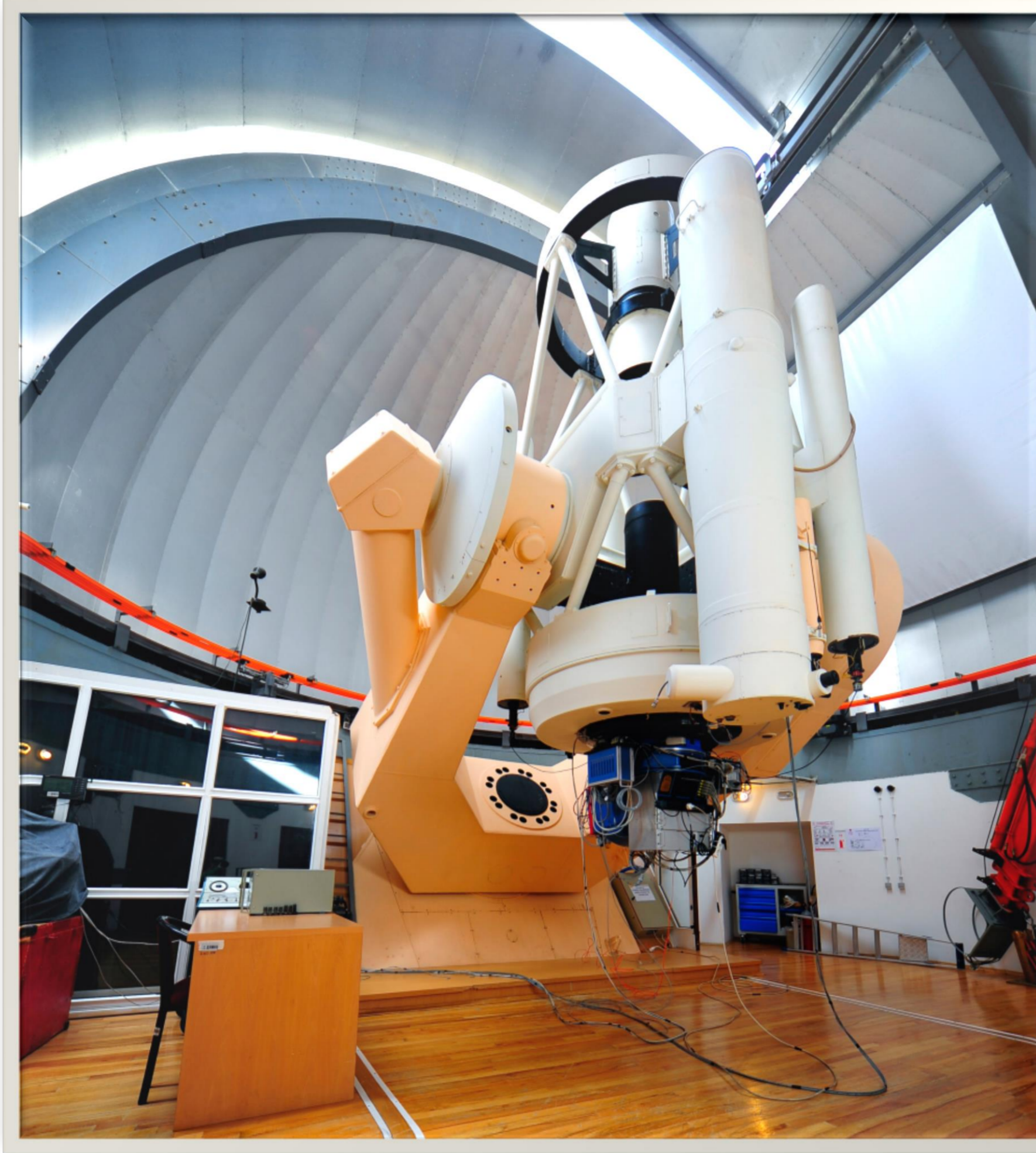


Рис.1 Красная последовательность в области скопления 0301.6+0156 и спектрально идентифицированные по данным РТТ-150 эллиптические галактики скопления (отмечены кружочками)

## Российско-Турецкий Телескоп РТТ150



Для учета фона неба в список апертур к отобраным источникам добавляются апертуры в поле скопления в областях без ярких источников. В алгоритме выбора апертур для источников и для учета фона неба предусмотрено определение положений отверстий таким образом, чтобы получались взаимно неперекрывающиеся спектры. На рис.2 кружочками показаны отобранные апертуры источников и соответствующие им дополнительные апертуры для учета фона неба скопления 0301.6+0156.

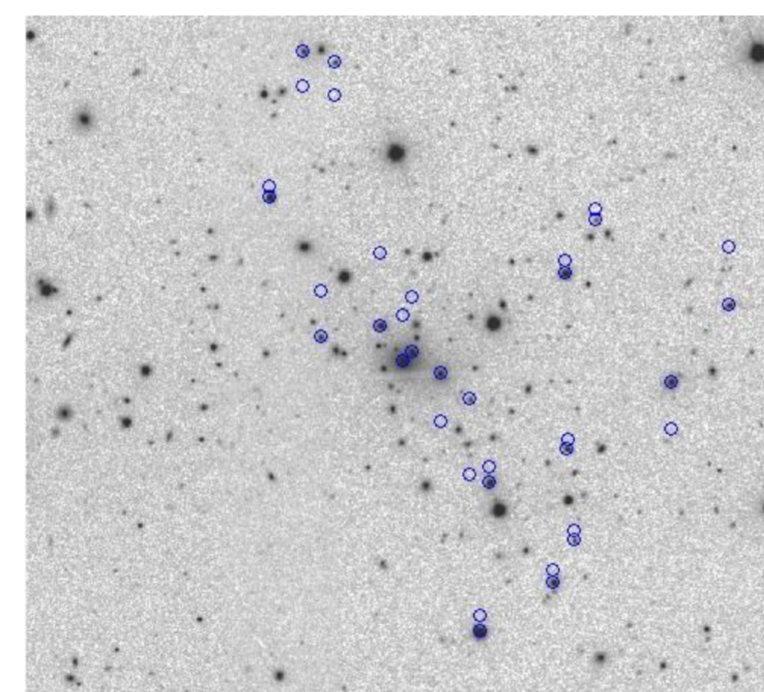


Рис.2 Изображение скопления 0301.6+0156 в поле зрения ТФОСК. Север (N) слева, восток (E) вверху. Синими кружочками показаны отобранные источники для построения маски МОС и соответствующие им дополнительные отверстия для учета фона неба

## 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 в качестве звезды-сравнения) проводились 13 ноября 2018 года. Получено 6 спектральных кадров с экспозицией по 1800 секунд и на воздушных массах от 1.3 до 2.4. Ввиду слабо накопленного сигнала на воздушной массе более 2 последний кадр был исключен из анализа. Для дисперсионной калибровки снимались спектры лампы Fe-Ar с линейчатым эмиссионным спектром, а для учета в длинноволновой части спектров интерференционных структур и нахождения положений дисперсионных кривых, спектры галогеновой

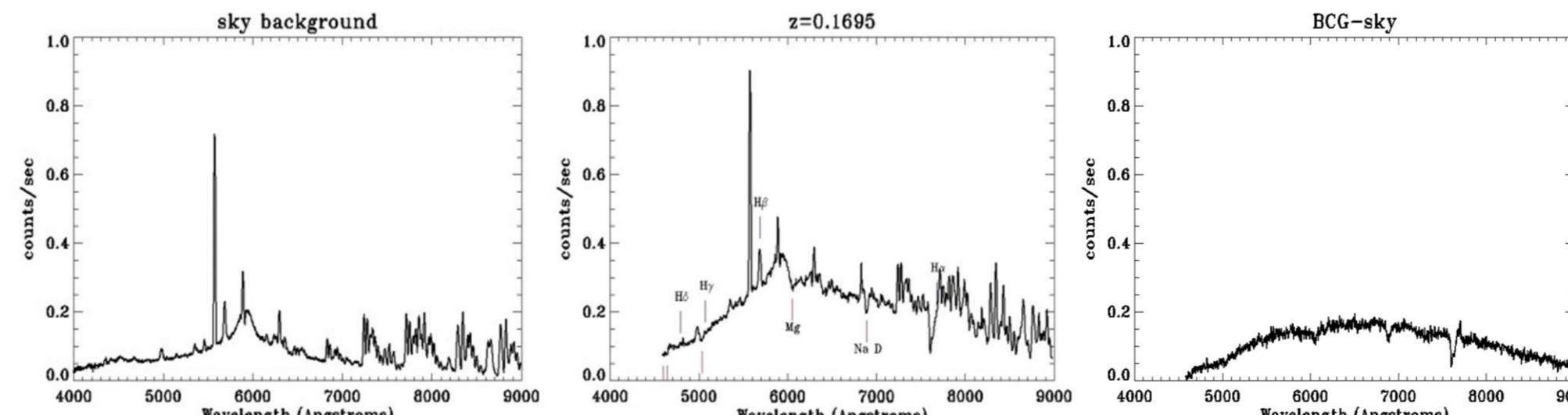


Рис.3 Инструментальный спектр фона неба. Хорошо выделяется сильная теллурическая линия OI.

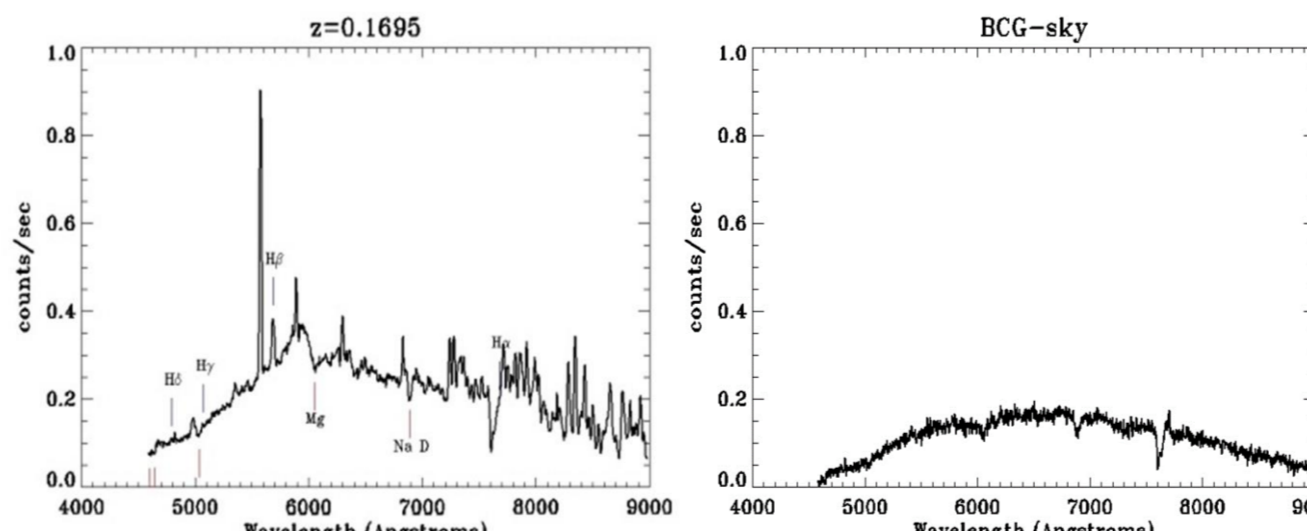


Рис.4 Инструментальный спектр BCG с фоном неба

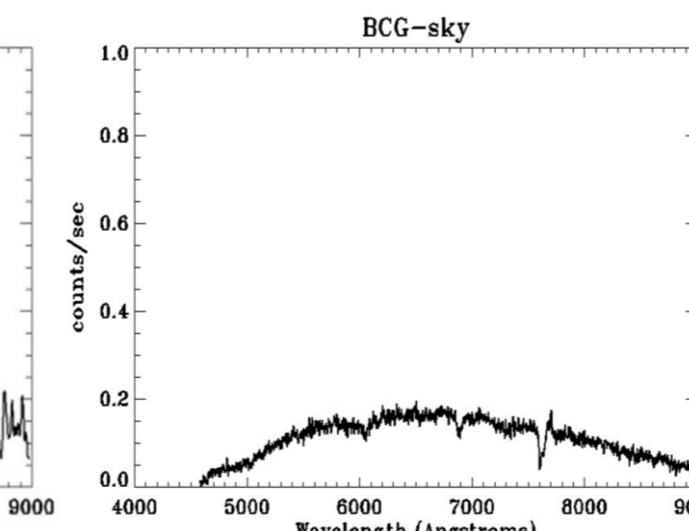


Рис.5 Инструментальный спектр BCG с вычетом фона неба. Хорошо видны сильные теллурические линии поглощения.

лампы. Поскольку фон неба равномерно заполняет отверстие и исследуемые источники достаточно слабы - на уровне фона неба и слабее, то полный поток в сильной теллурической эмиссионной линии нейтрального кислорода OI (577.2Å) можно использовать для учета вариаций потока фона из-за отличия в площади отверстий и соответствующего масштабирования двух различных спектров. На основе спектров от отверстий для фона неба был построен составной спектр фона неба одной из 30 минутных экспозиций. На рис. 4 и 5 спектр BCG с фоном неба и с его учетом, соответственно. При спектральных наблюдениях небесных источников с Земли в спектрах присутствуют сильные теллурические линии поглощения, возникающие на молекулах земной атмосферы. Сильное атмосферное поглощение в линиях O<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в области выше 6700 Å заывает спектральные особенности

эллиптических галактик скопления, попадающие на эти линии. При определении красного смещения этих источников света методом кросс-корреляции с шаблонным спектом, исключение хорошо выраженных особенностей, таких как линии поглощения G, Mg и NaD, а также скачок около длины волны 4000Å, несколько зашумляют оценки. Атмосферное пропускание в линиях H<sub>2</sub>O и O<sub>2</sub> может быть получено путем сравнения спектров звезд класса F и зависимости, построенной на основе веб-ресурса TAPAS (<http://cds-espri.ipsl.fr/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 H<sub>2</sub>O и O<sub>2</sub>. При выборе звезды сравнения мы использовали условие: g-r<0.34, что соответствует звезде главной последовательности более ранней, чем F9V. Теллурическая линия O<sub>3</sub> является достаточно широкой, поэтому определение континуума в этой области затруднено из-за того, что предположение о линейной зависимости инструментальной чувствительности оказывается не верным. 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.

При наблюдениях слабых источников требуются длительные накопления 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 наблюдения 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. При получении составного спектра от источников были использованы медианные значения из 5 спектров, полученных при воздушных массах менее 2. На рис.6 приведен окончательный составной спектр BCG скопления 0301.6+0156.



Рис.6 Составной спектр BCG скопления 0301.6+0156

Спектр BCG получен с хорошим накоплением и основные детали – линии поглощения отчетливо видны. Причем оказалось, что линия Na D практически в точности попадает на сильную теллурическую линию O<sub>2</sub>. Видно, что, не смотря на это обстоятельство, её удалось эффективно восстановить. Также видны сильные эмиссионные линии H<sub>α</sub> и однажды ионизованного азота NII, указывающие на процессы звездообразования в галактике.

**В результате**, при помощи спектрографа среднего и низкого разрешения ТФОСК, на 1.5-м Российско-Турецком Телескопе (РТТ-150), используя многообъектную маску поля, в одном наблюдении с экспозицией 3 часа получены спектры 16 галактик скопления, 9 из которых определены как эллиптические и для них произведены высококачественные измерения красных смещений. Ещё 4 определены как спиральные галактики, 2 объекта из-за недостаточного накопленного сигнала отождествить не удалось, а один спектр оказался зашумлен линиями неба от соседнего отверстия. На основе проведенного анализа, методом МОС на РТТ-150 в одном наблюдении можно измерять красные смещения галактик с величинами  $m_r = 20.0$ . В поле размером около 11'x11' 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.

## Благодарности

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.