

НАБЛЮДЕНИЕ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК ОЧЕНЬ БОЛЬШОЙ МАССЫ НА $z = 0.76$ В ОБЗОРЕ ВСЕГО НЕБА СРГ/еРОЗИТА

© 2021 г. Р. А. Буренин^{1*}, И. Ф. Бикмаев^{2,3}, М. Р. Гильфанов^{1,4},
А. А. Гроховская⁵, С. Н. Додонов⁵, М. В. Еселевич⁶, И. А. Зазнобин¹,
Э. Н. Иртуганов^{2,3}, Н. С. Лыскова¹, П. С. Медведев¹, А. В. Мещеряков¹,
А. В. Мойсеев^{1,5}, С. Ю. Сазонов¹, А. А. Старобинский⁷, Р. А. Сюняев^{1,4},
Р. И. Уклеин⁵, И. И. Хабибуллин^{1,4}, И. М. Хамитов^{2,8}, Е. М. Чуразов^{1,4}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³Академия наук Татарстана, Казань, Россия

⁴Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

⁵Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

⁶Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

⁷Институт теоретической физики им. Ландау РАН, Черногоровка, Россия

⁸Государственная обсерватория ТУБИТАК, Анталья, Турция

Поступила в редакцию 04.06.2021 г.

После доработки 29.06.2021 г.; принята к публикации 29.06.2021 г.

Обсуждаются результаты многоволновых наблюдений очень массивного скопления галактик SRGe CL2305.2–2248, которое было обнаружено в рентгеновских лучах в ходе первого обзора всего неба телескопа еРОЗИТА на борту космической обсерватории СРГ. Ранее это скопление галактик было обнаружено также в мм-диапазоне в обзорах Южнополярного телескопа (SPT-CL J2305–2248) и Атакамского космологического телескопа (ACT-CL J2305.1–2248) по наблюдению эффекта Сюняева–Зельдовича. По результатам наблюдений на 6-м телескопе БТА было получено спектрально-скопическое измерение красного смещения скопления, $z = 0.7573$, в хорошем согласии с фотометрическими оценками, включая очень точную оценку, полученную на основе методов машинного обучения. Кроме того, на Российско-Турецком 1.5-м телескопе выполнены глубокие фотометрические измерения галактик, которые позволили исследовать красную последовательность галактик скопления и их распределение в картинной плоскости. Совместное использование данных в рентгеновском и микроволновом диапазонах показывает, что это скопление может быть классифицировано как далекий и массивный объект только на основе этих данных. Оценка массы скопления по данным еРОЗИТА составляет $M_{500} = (9.0 \pm 2.6) \times 10^{14} M_{\odot}$. Показано, что это скопление входит в число нескольких десятков наиболее массивных скоплений в наблюдаемой Вселенной и в число всего нескольких наиболее массивных скоплений галактик на $z > 0.6$.

Ключевые слова: скопления галактик, обзоры неба.

DOI: 10.31857/S0320010821070044

1. ВВЕДЕНИЕ

Предполагается, что в рентгеновском обзоре всего неба телескопа еРОЗИТА на борту обсерватории Спектр Рентген Гамма (СРГ) будут обнаружены порядка 100 тысяч скоплений галактик, включая все скопления с массами выше $M_{500} \approx 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ в наблюдаемой части Вселенной

(Сюняев и др., 2021; Предель и др., 2021). Ясно, что эта выборка будет представлять огромный интерес для различных космологических исследований. Так, например, эти данные позволят получить новые ограничения на параметры космологической модели и зависимость $\sigma_8(z)$ по измерениям функции масс скоплений галактик (см., например, Вихлинин и др., 2009b; Сообщество Планка, 2014, 2016b), что, в свою очередь, дает независимый метод определения зависимости параметра Хаб-

*Электронный адрес: rodion@hea.iki.rssi.ru

бла $H(z)$ от красного смещения (см., например, Л'Уиллие и др., 2020).

Обзор всего неба был начат в декабре 2019 г., после успешного запуска космической обсерватории СРГ в июле того же года. В настоящее время телескопами обсерватории выполнены два полных обзора всего неба. Имеющиеся данные телескопа eРОЗИТА позволяют получить обзор всего неба, глубина которого почти на порядок превосходит глубину рентгеновского обзора спутника РОСАТ. Это дает возможность уже сейчас обнаружить все наиболее массивные скопления галактик в наблюдаемой Вселенной, с массами выше $M_{500} \approx 6 \times 10^{14} M_{\odot}$, расположенные на красных смещениях до $z \approx 1$.

Такие скопления наблюдаются также в обзоре всего неба обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2016а, PSZ2), однако оказывается, что не все очень массивные скопления на высоких красных смещениях вошли в каталог источников сигнала Сюняева–Зельдовича этого обзора. Некоторые из этих скоплений были позже отождествлены в оптическом диапазоне среди объектов каталога PSZ2 (см., например, Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019). Кроме того, оказывается, что некоторые такие скопления галактик не вошли в каталог PSZ2.

В этой статье обсуждается наблюдение очень массивного скопления галактик SRGe CL2305.2–2248, которое было обнаружено в обзоре всего неба телескопа eРОЗИТА на борту космической обсерватории СРГ. С помощью наблюдений в оптическом диапазоне на Российско–Турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150) и на 6-м телескопе САО РАН (БТА) были получены глубокие фотометрические данные для поля этого скопления, а также спектроскопическое измерение красного смещения скопления. Это скопление ранее наблюдалось в обзорах в мм-диапазоне Южнополярного телескопа (Блим и др., 2020) и Атакамского космологического телескопа (Хилтон и др., 2021). Оценки массы скопления, полученные разными способами, хорошо согласуются между собой. Показано, что это скопление является одним из немногих наиболее массивных скоплений в наблюдаемой Вселенной на красном смещении выше $z > 0.6$.

2. НАБЛЮДЕНИЯ В ОБЗОРЕ СРГ/eРОЗИТА

По состоянию на начало июня 2021 г. поле скопления галактик SRGe CL2305.2–2248 наблюдалось в обзоре всего неба СРГ/eРОЗИТА три раза — в июне и в декабре 2020 г., а также в мае 2021 г. Полная экспозиция, исправленная за виньетирование, составила около 250 с. Данные телескопа eРОЗИТА были обработаны с помощью

ПО eSASS¹ с использованием предполетных калибровочных данных. Рентгеновское изображение поля скопления SRGe CL2305.2–2248 в диапазоне 0.5–2 кэВ показано на рис. 2 вверху слева. Всего в течение первого года обзора СРГ/eРОЗИТА от этого источника было зарегистрировано около 140 фотонов. Поиск источников в обзоре всего неба проводился при помощи вейвлет-разложения рентгеновских изображений (Вихлинин и др., 1998) и далее расчет различных характеристик источников проводился методом максимального правдоподобия при помощи ПО *ermlDET* из пакета eSASS. В этом поле в обзоре всего неба был обнаружен неизвестный ранее протяженный рентгеновский источник с координатами центра $\alpha = 23^{\text{h}}05^{\text{m}}11^{\text{s}}.6$, $\delta = -22^{\text{d}}48^{\text{m}}54^{\text{s}}$. В предположении о том, что радиальный профиль поверхностной яркости протяженного источника описывается β -моделью: $I = I_0(1 + r^2/r_c^2)^{-3\beta+0.5}$ (Кавалиере, Фуско-Фемиано, 1976), с $\beta = 2/3$, значимость протяженности источника соответствует $\delta\chi^2 = 30.66$, т.е. является высокой, радиус β -модели составляет $r_c = 20''$. Рентгеновский поток источника в диапазоне 0.5–2 кэВ, рассчитанный с помощью *ermlDET*, исправленный за межзвездное поглощение в Галактике с колонкой $N_{\text{H}} = 2.2 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$, составляет $6.62 \pm 0.61 \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

Отметим, что центральная часть протяженного рентгеновского источника выглядит возмущенной, что может быть результатом истечения горячего газа из активного ядра одной из центральных галактик скопления. С другой стороны, это может быть также следствием крупномасштабных движений газа.

На рис. 1 показан спектр протяженного рентгеновского источника по данным обзора СРГ/eРОЗИТА. Спектр был извлечен из кружка радиусом $5'$, центрированного на скопление. Фон детектора, наведенный заряженными частицами, был удален, используя калибровочные наблюдения, в которых детектор был закрыт фильтром, непрозрачным для рентгеновских фотонов. Рентгеновский фон неба в направлении на скопление был оценен в кольце $5\text{--}50'$ вокруг скопления и вычтен. Статистическая значимость данных не позволяет поставить верхний предел на температуру газа, но исключает температуру ниже 3 кэВ, на уровне 2σ . На рис. 1 показана модель спектра излучения оптически тонкой плазмы с температурой 11 кэВ, что примерно соответствует соотношению светимость–температура для данного красного смещения (см. ниже).

¹ <https://erosita.mpe.mpg.de/edr/DataAnalysis/>

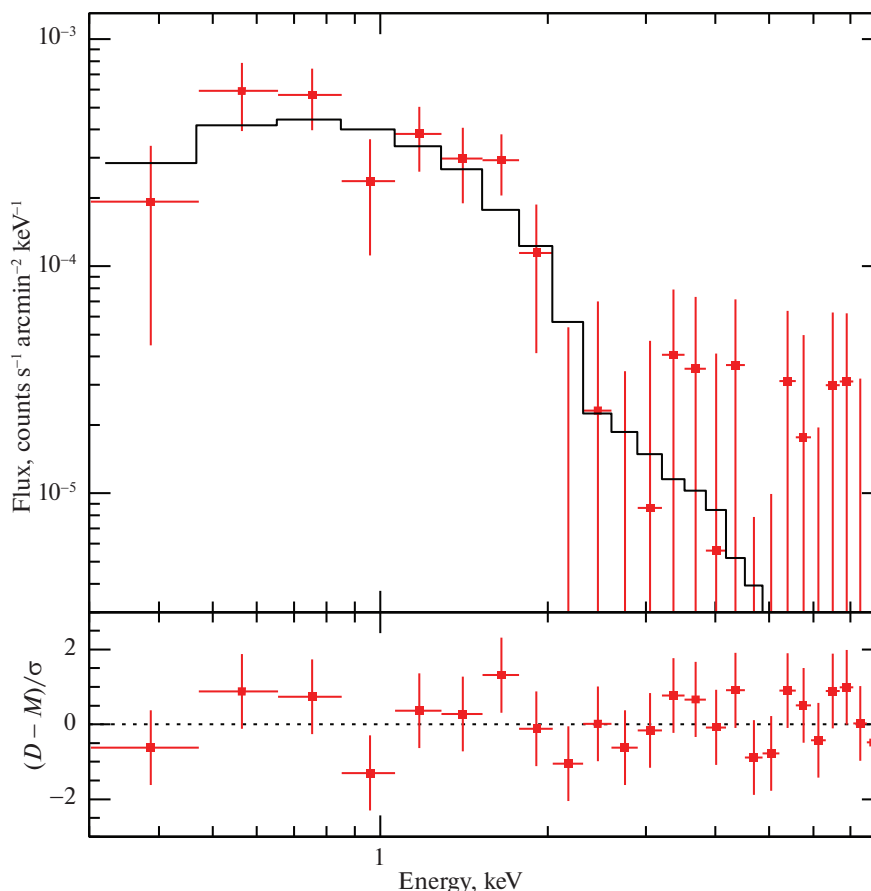


Рис. 1. Спектр протяженного рентгеновского источника SRGe CL2305.2–2248 по данным обзора СРГ/еРОЗИТА. Сплошная кривая показывает модельный спектр — излучение оптически тонкой плазмы с температурой $kT = 11$ кэВ. Статистическая значимость данных позволяет исключить температуру ниже 3 кэВ, на уровне 2σ . Поток нормирован на квадратную минуту и на один из семи модулей телескопа еРОЗИТА.

3. НАБЛЮДЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ И ИК ДИАПАЗОНАХ

3.1. Прямые изображения и фотометрия

С помощью автоматической процедуры отождествления скоплений галактик в оптическом и ИК-диапазонах по данным обзоров Pan-STARSS (Чамберс и др., 2016) и WISE (Райт и др., 2010), основанной на поиске красной последовательности галактик, в поле протяженного рентгеновского источника было обнаружено массивное скопление галактик. Для этого использовались сборки обзора всего неба, полученные по данным за полное время работы спутника WISE (Мейснер и др., 2017), версии NeoWISE-R6, доступные в сети². Использовалась принудительная фотометрия по этим данным обзора WISE для всех объектов из обзора Pan-STARSS, которая была получена с помощью полной модели функции рассеяния точки, которая правильно учитывает не только ее крылья на больших угловых масштабах, но и асимметрию относительно центра (Буренин и др., 2021).

² <http://unwise.me/>

Поиск красной последовательности проводился с помощью автоматической процедуры, аналогичной использованной в работе Буренина (2017). Фотометрическая оценка красного смещения по цветам красной последовательности составила $z_{\text{фот.}} = 0.70 \pm 0.04$.

Глубокие прямые изображения поля скопления SRGe CL2305.2–2248 были получены на Российско-Турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150) в квоте времени КФУ в период с 23 по 26 августа 2020 г. в фильтрах g , r , i , z Слоановского обзора. Суммарные экспозиции составили 13 200, 13 800, 8400 и 8400 с соответственно. Качество изображений составило около $1''.5$. Полная экспозиция в каждом фильтре разбивалась на экспозиции по 600 с, между которыми ось наведения телескопа смещалась на 10 – $20''$ в произвольном направлении. Обработка прямых изображений проводилась стандартным образом, при помощи ПО IRAF, а также с помощью собственного ПО, с применением стандартного набора калибровок. Псевдоцветное изображение этого поля в фильтрах i , r , g (RGB) показано на рис. 2 вверху справа. Красные

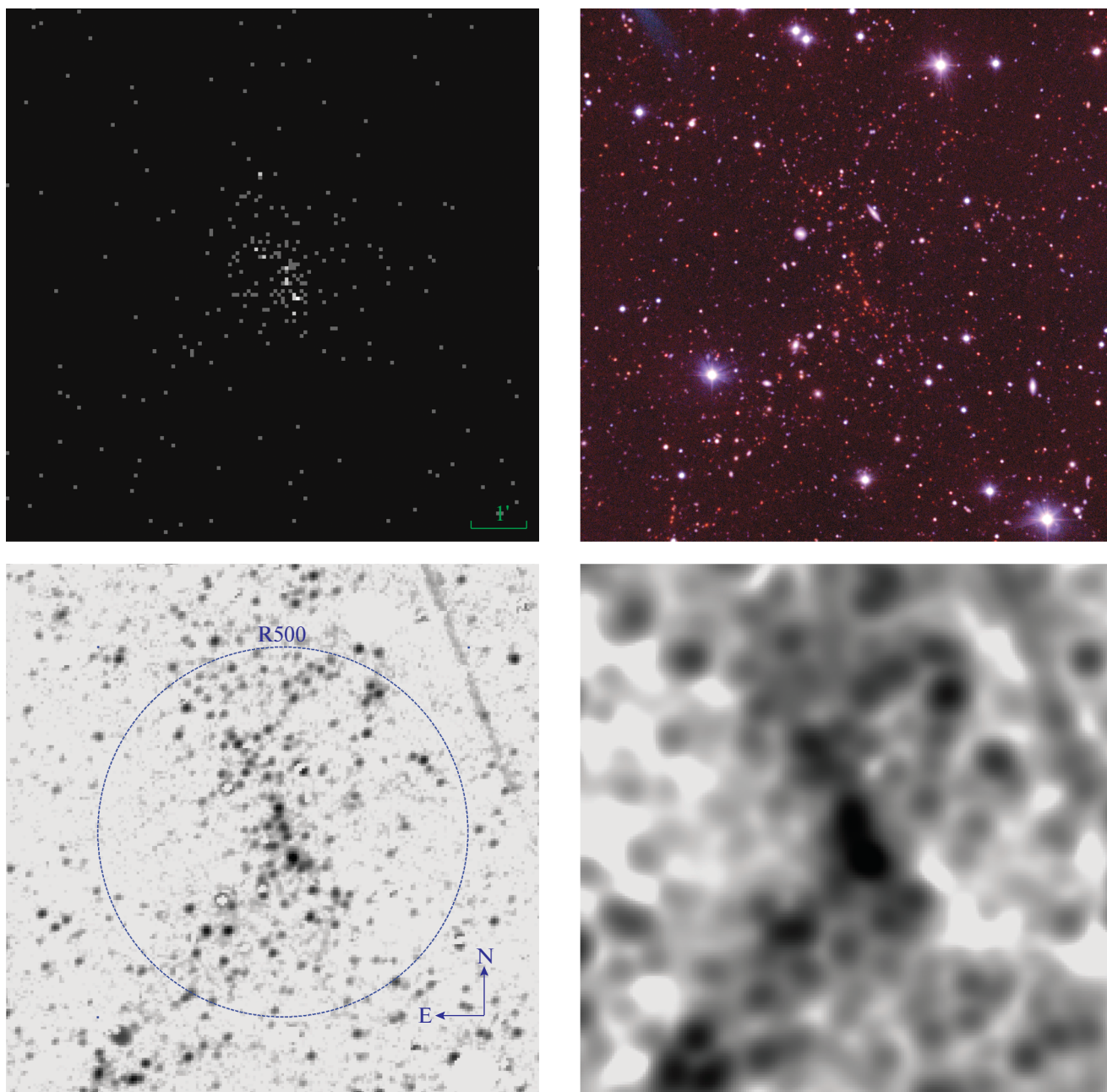


Рис. 2. Рентгеновское изображение поля скопления галактик SRGe CL2305.2–2248 по данным обзора СРГ/еРОЗИТА (вверху слева), псевдоцветное изображение в фильтрах i , r , g (RGB) по данным наблюдений на телескопе РТТ-150, качество изображения составило около $1''5$ (вверху, справа), изображение обзора спутника WISE в полосе 3.4 мкм, очищенное от звезд и галактик, не входящих в красную последовательность скопления (внизу, слева), это же изображение, сглаженное двумерной гауссианой, $\sigma = 8''$ (внизу, справа). На изображении внизу справа показан круг радиусом $R_{500} = 3'.3$. Все изображения представлены в одном масштабе, размер поля составляет $9'.4 \times 9'.4$, центр поля совпадает с рентгеновским центром скопления.

галактики в центре изображения являются членами скопления.

Фотометрическая калибровка изображений была получена при помощи наблюдений фотометрических стандартов (Смит и др. 2002), а также путем сравнения с фотометрическими измерениями в обзоре Pan-STARRS (Чамберс и др., 2016). На рис. 3 показана диаграмма цвет–величина для галактик

в поле скопления, расположенных на расстоянии меньше $3'$ от рентгеновского центра скопления. Для того чтобы построить эту диаграмму, при помощи ПО SExtractor (Бертин, Арну, 2016) был получен каталог объектов на оптических изображениях, из которого были исключены звезды ($CLASS_STAR > 0.8$). Величины галактик определялись внутри адаптивной апертуры по методу Крона

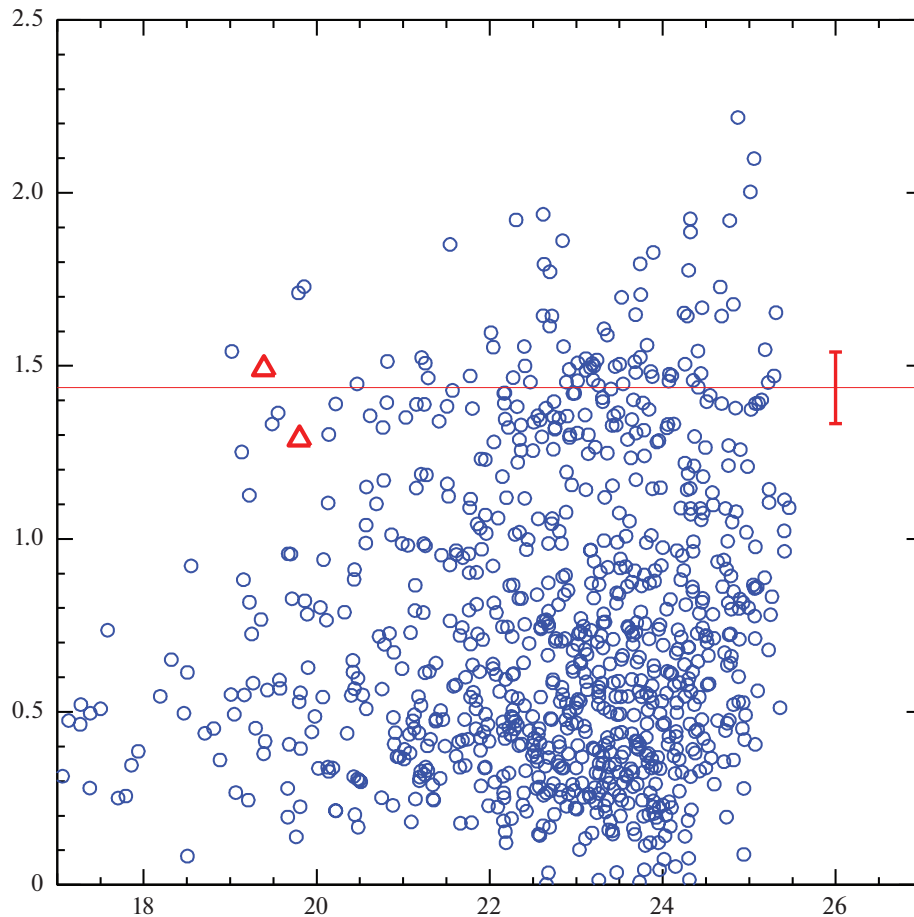


Рис. 3. Диаграмма цвет—величина для галактик расположенных на угловом расстоянии менее $3'3$ от центра скопления SRGe CL2305.2—2248. Положение красной последовательности галактик скопления отмечена горизонтальной прямой, вертикальным отрезком показан характерный размер ошибки измерения цвета для каждой отдельной галактики. Красными треугольниками обозначены центральные галактики скопления, для которых были получены спектроскопические измерения красных смещений.

(Крон, 1980, MAG_AUTO), цвета галактик определялись путем сравнения величин в одинаковых апертурах с размером, равным полной ширине на полувысоте ФРТ. На рис. 3 видна красная последовательность галактик — членов скопления. Она представляет собой сгущение точек около красной горизонтальной линии. Разброс точек около этой линии примерно соответствует фотометрическим ошибкам измерения цветов галактик. Из-за больших ошибок фотометрических измерений получить надежное измерение наклона красной последовательности, а также внутреннего разброса цвета, оказывается невозможно.

На рис. 2 внизу показаны изображения ИК-обзора всего неба спутника WISE, из которых вычтены модели всех объектов, которые не входят в красную последовательность скопления. Изображение внизу справа дополнительно сглажено двумерной гауссианой, $\sigma = 8''$. Эти изображения показывают распределение галактик скопления в картинной плоскости. Видно, что в центральной области скопления размером около угловой мину-

ты распределение галактик вытянуто в направлении NNE—SSW. На красном смещении скопления (см. ниже) такой размер соответствует размеру около 500 кпк. На больших расстояниях от центра распределение галактик скопления в картинной плоскости также остается неоднородным. В направлениях на восток и на запад галактики скопления не наблюдаются уже на расстоянии меньше угловой минуты от центра скопления, тогда как в направлении на север и юг поверхностная плотность галактик скопления остается значительной вплоть до расстояний порядка и больше радиуса $R_{500} \approx 3'$ (см. ниже). Форма распределения галактик в картинной плоскости напоминает песочные часы. Такая сильная центральная асимметрия распределения галактик в картинной плоскости может говорить о том, что динамическое состояние скопления является неустановившимся.

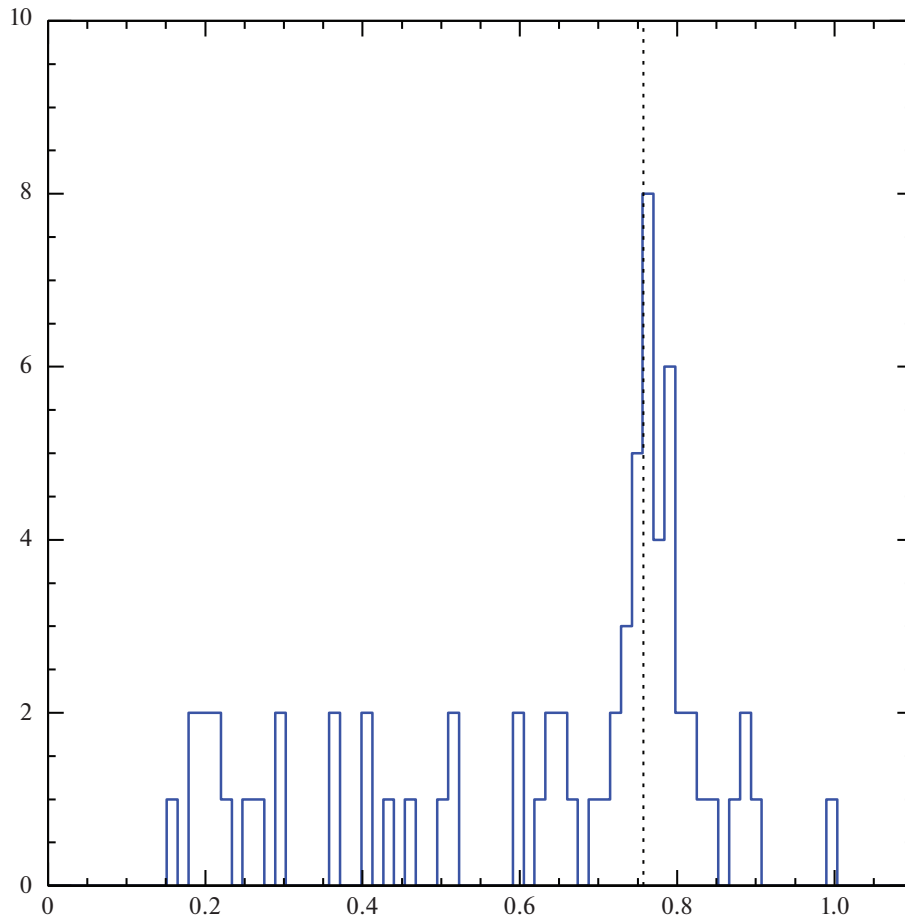


Рис. 4. Распределение галактик в поле скопления SRGe CL2305.2–2248, расположенных на расстоянии меньше $2'$ от рентгеновского центра скопления, по фотометрической оценке красного смещения, полученной по данным обзоров Pan-STARRS и WISE методом машинного обучения. Вертикальной пунктирной линией отмечено спектроскопическое измерение красного смещения, $z = 0.7573$.

3.2. Фотометрическая оценка красного смещения скопления с помощью машинного обучения

Как было показано (см., например, Мещеряков и др., 2015), методы машинного обучения позволяют измерять фотометрические красные смещения ($photo-z$) скоплений с высокой точностью по отдельным галактикам (в частности, точность $\sigma \sim \sim 1\%$ была получена для скоплений с $z < 0.45$ по данным обзора SDSS, Мещеряков и др., 2015). Мы обучили модель $photo-z$ галактик на основе квантового случайного леса, описанную в работе Мещерякова и др. (2018), на тренировочной выборке объемом 1 млн галактик из спектрального обзора SDSS DR16. Фотометрическими признаками для модели случайного леса выступали величины из каталога Pan-STARRS1 DR2, полученные подгонкой функции размытия точки (ФРТ) и по методу Крона (1980), величины W1 и W2, полученные из принудительной фотометрии WISE в соответствующих фильтрах (Буренин и др., 2021), а также всевозможные цвета на основе этих оптических и ИК-величин. С помощью полученной таким образом

модели фотометрических оценок z были сделаны прогнозы красного смещения для всех оптических галактик в поле скопления SRGe CL2305.2–2248. Далее были отфильтрованы только объекты с надежными прогнозами по параметру уверенности $zConf > 0.6$, при этом параметр $zConf$ определялся стандартным образом как вероятность прогноза фотометрической оценки z в окрестности $z_{\text{фот.}} \pm \pm 0.06(1 + z_{\text{фот.}})$.

На рис. 4 показано распределение галактик, расположенных на расстоянии меньше $2'$ от рентгеновского центра скопления по фотометрической оценке красного смещения. Распределение имеет хорошо различимый пик, по которому можно получить фотометрическую оценку красного смещения скопления: $z_{\text{фот.}} = 0.766 \pm 0.012$.

3.3. Спектроскопия

Спектры ярчайших галактик далеких скоплений были получены на 6-м телескопе САО РАН с помощью прибора SCORPIO-2 (Афанасьев и др., 2011). Наблюдения проводились в течение ночи

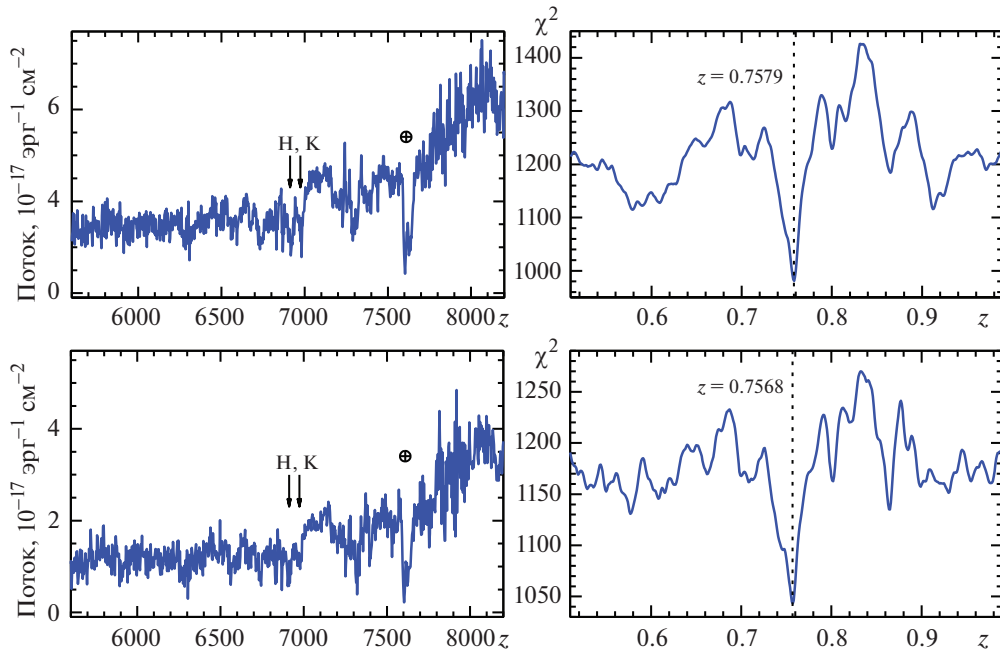


Рис. 5. Спектры двух центральных галактик скопления 2305.2–2248, полученные на 6-м телескопе САО РАН с помощью прибора SCORPIO-2 (слева). Зависимость χ^2 от красного смещения при сравнении спектра с шаблоном эллиптической галактики (справа).

17 августа 2020 г. Позиционный угол длинной щели был выбран таким образом, чтобы в щель попали две центральные галактики с координатами $\alpha = 23^{\text{h}}05^{\text{m}}10^{\text{s}}.6$, $\delta = -22^{\text{d}}49^{\text{m}}11^{\text{s}}$ и с величинами $i = 19.39$ и $i = 19.80$. Ширина щели составила $1''.97$ при качестве изображений $1''.8$. Спектр был получен при помощи решетки VPHG940@600 в спектральном диапазоне 3500–8500 Å, спектральное разрешение составило около 14 Å. Полная экспозиция составила 4800 с, она была разбита на четыре экспозиции по 1200 с, между которыми объекты сдвигались вдоль щели на $14''$.

Обработка спектральных данных проводилась стандартным образом, при помощи пакета IRAF³, а также при помощи собственного ПО. Изображения двумерных спектров были исправлены за смещение и плоское поле, преобразованы в шкалу длин волн по спектрам калибровочных ламп. Далее двумерные спектры совмещались и складывались, одномерные спектры галактик и спектры фона извлекались из двумерного спектра стандартным образом. Калибровки плотности потока в спектрах проводились с помощью наблюдений спектрофотометрических стандартов из списка Европейской южной обсерватории⁴.

Спектры двух ярчайших галактик скопления показаны на рис. 5, слева. Здесь хорошо видны линии

поглощения дуплета кальция H, K и скачок около длины волны 4000 Å. Справа, на этом же рисунке показана зависимость χ^2 от красного смещения при сравнении спектра с шаблоном эллиптической галактики. Измеренные значения красных смещений двух галактик в щели оказываются близкими, $z_1 = 0.7579 \pm 0.0007$ и $z_2 = 0.7568 \pm 0.0009$, а красное смещение, определенное по сумме спектров, составляет $z = 0.7573 \pm 0.0006$. Поскольку эти галактики входят в красную последовательность галактик скопления, и находятся близко к его центру, можно с высокой степенью надежности считать это измерением красного смещения всего скопления галактик. Спектроскопическое измерение красного смещения скопления, полученное по результатам наблюдений на 6-м телескопе БТА, хорошо согласуется с фотометрическими оценками, полученными выше.

4. ОЦЕНКИ МАССЫ СКОПЛЕНИЯ SRGe J2305.2–2248

На красном смещении $z = 0.7573$ рентгеновский поток скопления, измеренный выше, соответствует рентгеновской светимости $(1.20 \pm 0.11) \times 10^{45}$ эрг с⁻¹. Используя калибровку соотношения рентгеновская светимость — масса из работы Вихлинина и др. (2009а), можно получить оценку массы скопления. Сравнение масс богатых скоплений на красных смещениях $z > 0.3$, полученных с помощью этого соотношения по измерениям рентгеновских светимостей в обзоре СРГ/еРОЗИТА

³ <http://iraf.noao.edu/>

⁴ <https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/>

с массами, измеренными по наблюдению эффекта Сюняева—Зельдовича в обзоре Планка, взятыми из каталога PSZ2, показывает, что оценки масс по рентгеновским данным оказываются в среднем на 12.8% выше. Масса скопления SRGe CL2305.2–2248, оцененная по его рентгеновской светимости и приведенная к массам измеренным в обзоре Планка с учетом этого смещения, оказывается равной $M_{500} = (9.03 \pm 2.56) \times 10^{14} M_{\odot}$, где основной вклад в ошибку оценки массы скопления дает разброс соотношения масса—светимость. Согласно масштабным соотношениям из работы Вихлинина и др. (2009а), скопление такой массы должно иметь температуру $T = 11.6 \pm 2.1$ кэВ. Скопление галактик такой массы входит в число всего нескольких наиболее массивных скоплений на красных смещениях $z > 0.6$ (см. обсуждение ниже).

Используя измерения параметров скоплений галактик для набора установившихся скоплений по данным телескопа Чандра (Вихлинин и др., 2006), можно получить для скопления SRGe CL2305.2–2248 оценку радиуса $R_{500} = 1430 \pm 120$ кпк, что соответствует угловому размеру около 3′3″.

Скопление SRGe CL2305.2–2248 не было обнаружено в обзоре всего неба обсерватории им. Планка по наблюдению эффекта Сюняева—Зельдовича (Сюняев, Зельдович, 1972) на уровне значимости, достаточно высоком для того, чтобы войти в каталог PSZ2. Однако источник в сигнала Сюняева—Зельдовича более низкой значимости был обнаружен нами в этом поле на картах параметра комптонизации обзора всего неба обсерватории им. Планка, которые были подготовлены так, как это было сделано в работе Буренина (2017). Это скопление было обнаружено ранее в обзоре Атакамского космологического телескопа (Хилтон и др., 2021), а также в обзоре Южнополярного телескопа (Блим и др., 2020). По данным Атакамского космологического телескопа, масса скопления, приведенная к массам каталога PSZ2, составила $M_{500} = (9.18 \pm 1.48) \times 10^{14} M_{\odot}$, тогда как такая же масса этого скопления по данным Южнополярного телескопа оказывается равной $M_{500} = (7.40 \pm 0.83) \times 10^{14} M_{\odot}$. В обоих случаях в каталогах этих обзоров приводятся только фотометрические оценки красных смещений этого скопления.

4.1. Совместное использование данных в рентгеновском и микроволновом диапазонах

Важность совместного анализа данных рентгеновских и микроволновых наблюдений горячего газа в скоплениях обсуждалась задолго до уверенного детектирования СЗ-эффекта. Так, например, измерения потока рентгеновского излучения

от горячего межгалактического газа в скоплении галактик (интенсивность излучения определяется мерой эмиссии, пропорциональной плотности газа в квадрате) и понижения яркости реликтового фона в направлении на скопление вследствие СЗ-эффекта (пропорциональной плотности газа) открывают возможность определения расстояния до скопления, т.е. его красного смещения (см. обсуждение в работе Сюняева и Зельдовича, 1980).

В свете появления масштабных и чувствительных обзоров в рентгеновском (СРГ/еРОЗИТА) и микроволновом (обзоры обсерватории им. Планка, Южнополярного телескопа, Атакамского космологического телескопа) диапазонах особый интерес представляют оценки параметров скоплений галактик, основанные лишь на измерениях F_X и Y (см., например, Чуразов и др., 2015). Такой подход не заменяет фотометрические или спектроскопические измерения z , но позволяет сразу сделать грубые оценки массы скоплений (или “кандидатов” в скопления) и оптимизировать программы оптических наблюдений, концентрируясь на наиболее массивных скоплениях. Конкретная процедура оптимизации будет опубликована отдельно. Для данного скопления мы знаем F_X , Y и z . Поэтому интересно проверить совместимость всех подходов.

Зная рентгеновский поток F_X и красное смещение z , можно использовать корреляционные соотношения светимость—температура и светимость—масса для определения параметров скопления⁵. Аналогичным образом можно использовать интегральный параметр комптонизации Y в сочетании с z .

Прежде всего для скоплений на красных смещениях $z \sim 0.6$ –2, масса может быть грубо оценена (с точностью до фактора ~ 2) непосредственно из значения рентгеновского потока F_X (формула 13 из работы Чуразова и др., 2015): $M_{500} \approx 1.2 \times 10^{14} \left(\frac{F_X}{10^{-14}} \right)^{0.57} \approx 1.3 \times 10^{15} M_{\odot}$. Это соотношение прямо не использует значение красного смещения, кроме предположения, что $z \gtrsim 0.6$. Полученная оценка массы действительно согласуется в пределах фактора 2 с оценкой по соотношению светимость—масса для известного z (см. выше).

Другая интересная возможность — это оценка z по измеренным F_X и Y . В простейшем варианте величина $R_{XSZ} = F_X/Y$ неплохо коррелирует с z

⁵ В случае если рентгеновские данные позволяют надежно измерить температуру T_X и массу газа M_g , можно использовать и такие величины, как, например, $Y_X \propto T_X \times M_g$ или непосредственно M_g для оценок полной массы скоплений (см., например, Кравцов и др., 2006).

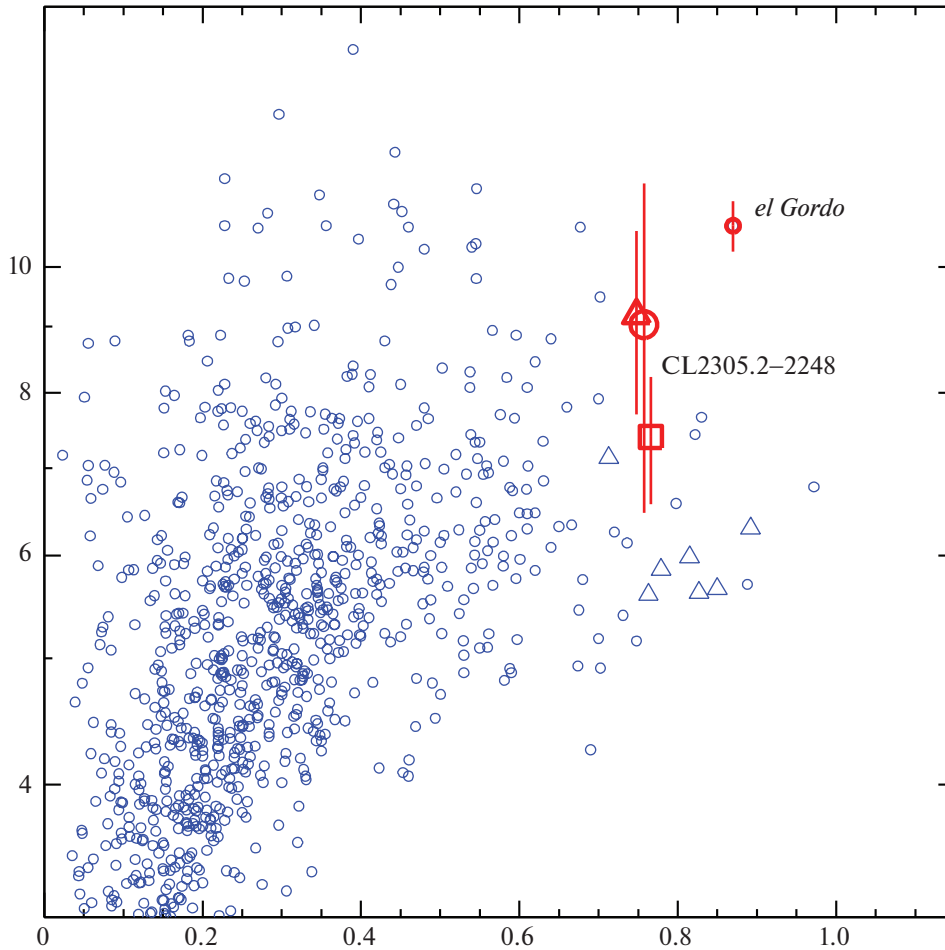


Рис. 6. Распределение скоплений галактик в плоскости красное смещение — масса M_{500} . Красными символами показаны оценки массы скопления SRGe CL2305.2–2248 по данным обзоров СРГ/еРОЗИТА (круг), Атакамского космологического телескопа (треугольник) и Южнополярного телескопа (квадрат). Для сравнения, красным кружком также показано измерение массы для очень массивного скопления галактик Ель Гордо (Менанто и др., 2012), взятое из второго каталога обзора Планка. Синими кружками показаны скопления галактик из каталога PSZ2, синими треугольниками — скопления из каталога PSZ2, отождествленные в работе нашей группы (Буренин и др., 2018).

для не очень близких ($z > 0.6$) скоплений (Сообщество Планка, 2012; Чуразов и др., 2015). Особенно привлекательным представляется сочетание данных обзора СРГ/еРОЗИТА с каталогами телескопа АСТ (Хилтон и др., 2021) из-за большого перекрытия осматриваемых областей неба.

Параметры корреляционного соотношения, связывающего красное смещение с рентгеновскими и микроволновыми данными, зависят от конкретного способа измерения интенсивности излучения скоплений. В частности, в каталогах телескопа АСТ приведено значение $y_{c, \text{fixed}}$, задающее нормировку сигнала tSZ от скопления для фиксированной геометрии пространственного фильтра. Выбор фиксированного фильтра фактически означает, что можно непосредственно сравнивать карты, полученные разными телескопами, после их свертки с заданными фильтрами. Оказывается, что в этом случае связь между z и отношением сигналов в рентгеновском и микроволновом диапазонах

можно, например, записать в виде

$$\frac{F_{X, \text{fixed}}}{y_{c, \text{fixed}}} \approx 2.9 \times 10^{-9} z^{-0.85} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}, \quad (1)$$

где $F_{X, \text{fixed}}$ — это поток в диапазоне 0.4–2 кэВ для фиксированного пространственного фильтра, использованного для поиска скоплений в рентгеновском диапазоне. Параметры этого соотношения были откалиброваны по набору скоплений, обнаруженных и в рентгеновском, и в микроволновом диапазонах с учетом конкретного алгоритма измерения потока. Применение этого соотношения к скоплению SRGe CL2305.2–2248 ($F_{X, \text{fixed}} \approx (1.25 \pm 0.15) \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$; $y_{c, \text{fixed}} \approx 3.14 \times 10^{-4}$) дает оценку красного смещения $z \approx 0.7 \pm 0.1$. Заметим, что для выбранного фиксированного пространственного фильтра рентгеновский поток от скопления SRGe CL2305.2–2248 оказывается примерно в два раза выше, чем прямые

измерения потока, обсуждавшиеся выше. Несмотря на неизбежную значительную неопределенность в измерении z таким способом, подобные оценки помогают сразу классифицировать это скопление как потенциально далекий объект.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Очень массивное скопление SRGe CL2305.2–2248 было обнаружено в обзоре всего неба SRG/ePOZITA и было отождествлено в оптическом и ИК диапазонах по данным обзоров Pan-STARRS1 и WISE. По результатам наблюдений на 6-м телескопе БТА, нами было получено спектроскопическое измерение красного смещения $z = 0.7573$, которое хорошо согласуется с фотометрическими оценками этой величины, включая очень точную оценку, полученную на основе методов машинного обучения. По рентгеновским данным обзора SRG/ePOZITA нами была получена оценка массы скопления $M_{500} = (9.03 \pm 2.56) \times 10^{14} M_{\odot}$. Согласно масштабному соотношению масса–температура, скопление такой массы должно иметь температуру $T = 11.6 \pm 2.1$ кэВ. Высокая масса скопления подтверждается данными Атакамского космологического телескопа, которые дают измерение $M_{500} = (9.18 \pm 1.48) \times 10^{14} M_{\odot}$, а также данными Южнополярного телескопа — $M_{500} = (7.40 \pm 0.83) \times 10^{14} M_{\odot}$. Все эти оценки массы скопления приведены к массам скоплений второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка (PSZ2).

В рентгеновском диапазоне центральная часть скопления выглядит возмущенной, что может быть результатом воздействия всплывающих пузырей газа, которые надуются активным ядром одной из центральных галактик скопления (см., например, Чуразов и др., 2001). С другой стороны, это может быть следствием крупномасштабных движений газа, которые могут возникать, например, вследствие недавнего слияния со скоплением меньшей массы. Распределение галактик в картинной плоскости имеет форму, напоминающую песочные часы — в направлениях на восток и на запад галактик скопления не наблюдается уже на расстоянии меньше угловой минуты от центра скопления, тогда как в направлении на север и юг поверхностная плотность галактик скопления остается значительной вплоть до расстояний порядка и больше радиуса $R_{500} \approx 3'3$. Такая сильная центральная асимметрия распределения галактик в картинной плоскости может говорить о том, что динамическое состояние скопления является неустановившимся.

Используя данные обзоров SRG/ePOZITA и АКТ, рассматривается пример совместного использования данных в рентгеновском и микроволновом диапазонах. Показано, что скопление SRGe

CL2305.2–2248 может быть классифицировано как далекий и массивный объект только на основе данных о его рентгеновском потоке и интегральном параметре комптонизации.

Массивные скопления галактик, с массами порядка $M_{500} \approx 10^{15} M_{\odot}$ являются чрезвычайно редкими объектами. Это показано на рис. 6, где приводится распределение массивных скоплений в плоскости красное смещение — масса M_{500} . Видно, что скопление галактик такой массы должно входить в число всего нескольких десятков наиболее массивных скоплений в наблюдаемой Вселенной, а также в число всего нескольких наиболее массивных скоплений на красных смещениях $z > 0.6$. На этом же рисунке отмечено также известное очень массивное скопление галактик Ель Гордо (Менанто и др., 2012). Отметим, что масса скопления SRGe CL2305.2–2248 оказывается сравнима с массой скопления Ель Гордо. Скопления настолько большой массы являются уникальными объектами в наблюдаемой Вселенной и заслуживают дальнейшего подробного исследования.

Настоящее исследование основано на наблюдениях телескопа ePOZITA на борту обсерватории SRG. Обсерватория SRG изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Рентгеновский телескоп SRG/ePOZITA изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной физики Общества им. Макса Планка (MPE) при поддержке DLR. Космический аппарат SRG спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субподрядчиками. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Исползованные в настоящей работе данные телескопа ePOZITA обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом ePOZITA, и программного обеспечения, разработанного российским консорциумом телескопа SRG/ePOZITA. Наблюдения на 6-м телескопе CAO РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение № 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука”. Авторы благодарны ТЮБИТАК, ИКИ, КФУ и АН РТ за частичную поддержку в использовании РТТ-150 (Российско-Турецкий 1.5-м телескоп в Анталии).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-12-00210. ААС был частично поддержан проектом 0033-2019-0005 Минобрнауки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *Baltic Astron.* **20**, 363 (2011).
2. Бертин, Арну (E. Bertin and S. Arnouts), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **117**, 393 (1996).
3. Блим и др. (L.E. Bleem, S. Bocquet, B. Stalder, M.D. Gladders, P.A.R. Ade, S.W. Allen, et al.), *astrophys. J. Suppl. Ser.* **247**, 25 (2020).
4. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **43**, 559 (2017) [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **43**, 507 (2017)].
5. Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Зазнобин И.А., Хорунжев Г.А., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Рубино-Мартин Х.А., Агханов Н., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **44**, 317 (2018) [R.A. Burenin et al., *Astron. Lett.* **44**, 297 (2018)].
6. Буренин и др., готовится к публикации (2021).
7. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, B.R. McNamara, W. Forman, C. Jones, H. Quintana, and A. Hornstrup), *Astrophys. J.* **502**, 558 (1998).
8. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, A. Kravtsov, W. Forman, C. Jones, M. Markevitch, S.S. Murray, et al.), *Astrophys. J.* **640**, 691 (2006).
9. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, C. Jones, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1033 (2009a).
10. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, A.V. Kravtsov, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1060 (2009b).
11. Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Коноплев Г.А., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Рубино-Мартин Х.-А., Агханов Н., Сюняев Р.А., Письма в Астрон. журн. **45**, 77 (2019) [I.A. Zaznobil et al., *Astron. Lett.* **45**, 49 (2019)].
12. Кавалиере, Фуско-Фемпиано (A. Cavaliere and R. Fusco-Femiano), *Astron. Astrophys.* **500**, 95 (1976).
13. Кравцов и др. (A.V. Kravtsov, A. Vikhlinin, and D. Nagai), *Astrophys. J.* **650**, 128 (2006).
14. Крон (R.G. Kron), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **43**, 305 (1980).
15. Л'Уиллие и др. (B. L'Huillier, A. Shafieloo, D. Polarski, and A.A. Starobinsky), *MNRAS* **494**, 819 (2020).
16. Мейснер и др. (A.M. Meisner, D. Lang, and D.J. Schlegel), *Astron. J.* **154**, 161 (2017).
17. Менанто и др. (F. Menanteau, J.P. Hughes, C. Sifon, M. Hilton, J. Gonzalez, L. Infante, et al.), *Astrophys. J.* **748**, 7 (2012).
18. Мещеряков А.В., Глазкова В.В., Герасимов С.В. и др., Письма в Астрон. журн. **41**, 339 (2015) [A.V. Meshcheryakov, V.V. Glazkova, S.V. Gerasimov, R.A. Burenin, and G.A. Khorunzhev, *Astron. Lett.* **41**, 307 (2015)].
19. Мещеряков А.В., Глазкова В.В., Герасимов С.В. и др., Письма в Астрон. журн. **44**, 801 (2018) [A.V. Meshcheryakov, V.V. Glazkova, S.V. Gerasimov, and I.V. Mashechkin, *Astron. Lett.* **44**, 735 (2018)].
20. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
21. Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, T. Jarrett, et al.), *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
22. Смит и др. (J.A. Smith, D.L. Tucker, S. Kent, M.W. Richmond, M. Fukugita, T. Ichikawa, et al.), *Astron. J.*, **123**, 2121 (2002).
23. Сообщество Планка (Planck Collaboration, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, F. Atrio-Barandela, J. Aumont, et al.), *Astron. Astrophys.* **543**, A102 (2012).
24. Сообщество Планка (Planck Collaboration, P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A20 (2014).
25. Сообщество Планка (Planck Collaboration, P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A27 (2016a).
26. Сообщество Планка (Planck Collaboration, P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A24 (2016b).
27. Сюняев, Зельдович (R.A. Sunyaev and Y.B. Zeldovich), *Comm. Astrophys. Space Phys.* **4**, 173 (1972).
28. Сюняев, Зельдович (R.A. Sunyaev and Y.B. Zeldovich), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **18**, 537 (1980).
29. Сюняев и др. (R.A. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2104.13267 (2021).
30. Хилтон и др. (M. Hilton, C. Sifon, S. Naess, M. Madhavacheril, M. Oguri, E. Rozo, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 3 (2021).
31. Чамберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:1612.05560 (2016).
32. Чуразов и др. (E. Churazov, A. Vikhlinin, and R. Sunyaev), *MNRAS* **450**, 1984 (2015).
33. Чуразов и др. (E. Churazov, A. Vikhlinin, and R. Sunyaev), *MNRAS*, **450**, 1984 (2015).