

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ИЗМЕРЕНИЯМИ МАСС СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ И ПО ЭФФЕКТУ СЮНЯЕВА–ЗЕЛЬДОВИЧА

© 2019 г. А. Р. Ляпин^{1*}, Р. А. Буренин¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.11.2018 г.; после доработки 21.02.2019 г.; принята к публикации 01.04.2019 г.

Проводится исследование возможности переноса калибровок масштаба масс скоплений галактик по измерениям слабого линзирования на измерения масс скоплений в рентгеновском диапазоне, используя измерения масс скоплений в обзоре обсерватории им. Планка. Для этого проводится сравнение измерений масс для 47-ми скоплений галактик, которые одновременно входят в рентгеновскую выборку скоплений из работы Вихлина и др. (2009а,б) и в выборку скоплений галактик из второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обзора обсерватории им. Планка. Показано, что за исключением небольшого числа выбросов в измерениях, большинство из которых возникает вследствие эффектов проекции скоплений в данных обзора Планка, разброс отношения измерений масс оказывается небольшим и составляет величину около 15%, а точность определения среднего отношения масс для этой выборки — около 2%. Это позволяет практически без потери точности перенести существующие калибровки измерений масс скоплений в обзоре Планка на измерения масс в рентгеновском диапазоне по данным телескопа Чандра. Используя полученные соотношения, на основе новых калибровок масштаба масс по измерениям слабого линзирования в скоплениях, получены поправки на ограничения космологических параметров из работы Вихлина и др. (2009б). С учетом этих поправок значение σ_8 возрастает примерно на 4%, в пределах одного стандартного отклонения неопределенности ограничения на эту величину при постоянном Ω_m . Показано, что все имеющиеся в настоящее время данные по измерениям функции масс скоплений галактик с учетом систематических неопределенностей дают примерно одинаковые ограничения параметров σ_8 и Ω_m .

DOI: 10.1134/S0320010819070052

1. ВВЕДЕНИЕ

Точные измерения функции масс скоплений галактик, наряду с измерениями анизотропии реликтового излучения, барионных акустических осцилляций, различными наблюдениями сверхновых типа Ia, дают один из основных способов ограничения космологических параметров (см., например, Вихлинин и др., 2009а,б; Буренин и Вихлинин, 2012; Сообщество Планка, 2014б, 2016б). Основная неопределенность этих ограничений в настоящее время обусловлена неопределенностью калибровки масштаба масс скоплений. В настоящее время наиболее надежные калибровки масштаба масс получены по результатам измерений слабого линзирования в скоплениях для измерений масс по сигналу Сюняева–Зельдовича (Сюняев и Зельдович, 1972) в обзоре всего неба обсерватории им. Планка (см., например, Хокстра и др., 2015; Апплгейт и др., 2016).

Ниже проводится исследование возможности переноса этих калибровок масштаба масс на измерения масс скоплений в рентгеновском диапазоне. Для этого сравниваются измерения масс скоплений галактик в рентгеновском диапазоне, которые были получены ранее по данным наблюдений телескопа Чандра в работе Вихлинина и др. (2009а,б, далее — В09), с измерениями по данным наблюдений с помощью эффекта Сюняева–Зельдовича в обзоре обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2016в, далее — ПС32). Показано, что разброс измерений масс скоплений, полученных разными способами, является относительно небольшим. Это позволяет практически без потери точности перенести существующие калибровки измерений масс скоплений в обзоре Планка на измерения масс в рентгеновском диапазоне.

*Электронный адрес: lyapin@iki.rssi.ru

2. СРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ МАСС СКОПЛЕНИЙ

В работе В09 на основе высококачественных данных обсерватории Чандра были с высокой точностью измерены полные гравитационные массы для 36 далеких скоплений из выборки объектов с $z > 0.35$ обзора *400d* обсерватории РОСАТ (Буренин и др., 2007), а также для 49 скоплений из выборки близких скоплений на малых z — на основе обзора всего неба обсерватории РОСАТ путем измерения температуры, массы газа и тепловой энергии (параметр Y_X) в скоплениях. Оценки масс были откалиброваны по гидростатическим измерениям масс в близких успокоившихся скоплениях, а по данным измерений слабого линзирования в 10 скоплениях была получена оценка систематической ошибки этой калибровки.

Для того чтобы провести сравнение этих измерений с измерениями масс скоплений по наблюдению эффекта Сюняева—Зельдовича в обзоре ПС32, для всех скоплений из работы В09 был проведен поиск соответствующих источников в каталоге ПС32. Было обнаружено 47 источников, при этом оказалось, что 44 из них входят в выборку близких скоплений из обзора всего неба РОСАТ и всего 3 — в выборку далеких скоплений из обзора *400d*. Все остальные далекие скопления из обзора *400d* имеют массы ниже порога обзора Планка (см., например, ПС32, рис. 26).

Массы близких скоплений из работы В09, напротив, находятся около или выше порога обзора Планка. Тем не менее в обзоре Планка не были обнаружены пять близких скоплений из работы В09. Ни одно из этих скоплений не попадает в маску пыли или маску точечных источников, которые были исключены в обзоре ПС32. Согласно картам параметра комптонизации обзора Планка (Сообщество Планка, 2016а), яркий источник Сюняева—Зельдовича, который отсутствует в каталоге ПС32, имеется только в случае скопления ZwCl 1215.1+0400. Причина, по которой этот источник не попал в каталог ПС32, остается неясной. В остальных случаях, т.е. для скоплений A 2052, EHO 0422–086, A 2634, Hydra A, согласно картам параметра комптонизации, имеются только, возможно, слабые источники Сюняева—Зельдовича. Отметим, что в последних двух случаях центральные галактики скоплений являются также яркими радиоисточниками (3C 465 и 3C 218 соответственно), что может затруднять обнаружение сигнала Сюняева—Зельдовича для этих скоплений.

В работе В09 измерения были выполнены в предположении космологической модели Λ CDM с параметрами $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $h = 0.72$. С другой стороны, измерения масс по сигналу Сюняева—Зельдовича, приведенные в каталоге ПС32, измерены для параметров $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $h = 0.70$

(ПС32). Для того чтобы сравнить эти измерения, их требуется привести к общему значению h . Это можно просто сделать для рентгеновских измерений масс скоплений, поскольку в этом случае легко получается соответствующее масштабное соотношение (Вихлинин, 2002; Воеводкин и Вихлинин, 2004). Действительно, в работе В09 приводится полная масса скопления, определенная по массе газа:

$$M_G = f_g^{-1} M_{\text{gas}},$$

где M_{gas} — масса газа скопления внутри радиуса, который соответствует контрасту плотности $\delta = 500$, а f_g — доля массы барионов в скоплении относительно полной гравитационной массы, при этом $f_g \propto h^{-1.5} \propto f_b = \Omega_b/\Omega_m$. В зависимости от h , масса газа внутри определенного углового радиуса масштабируется как $M_\theta \propto h^{-2.5}$, а контраст плотности при постоянном значении Ω_m — как

$$\delta \propto M_\theta/r^3 \rho_{\text{gas}} \propto h^{-2.5}/h^{-3} h^{0.5} = \text{const}, \quad (1)$$

т.е. не зависит от h . Отсюда следует, что $M_G \propto h^{-1}$. Кроме того, в работе В09 приводится также полная масса скопления, оцененная по температуре, M_T , и по полной тепловой энергии, M_Y . Зависимость этих измерений масс от постоянной Хаббла следующая: $M_T \propto h^{-1}$, $M_Y \propto h^{0.5}$ (Кравцов и др. 2006, В09).

Соотношение масс для скоплений галактик, которые одновременно входят в выборку из работы В09 и в выборку скоплений из каталога ПС32, показано на рис. 1–3. Массы, вычисленные в работе В09 по массе газа M_G , температуре M_T и тепловой энергии M_Y , приведены к постоянной Хаббла $h = 0.7$, как обсуждалось выше. На рис. 1–3 можно отметить согласованное смещение точек в сторону больших значений измерений масс M_G , M_T и M_Y относительно измерений масс в обзоре Планка M_{SZ} . Распределение логарифма отношения этих масс может быть приближено логнормальным распределением (см. рис. 1–3, справа). Параметры логарифмированного распределения отношений масс и аппроксимирующего его логнормального распределения приведены в табл. 1.

ВЫБРОСЫ В ИЗМЕРЕНИЯХ МАСС СКОПЛЕНИЙ

В соотношениях между измерениями масс M_G , M_Y (В09) и M_{SZ} (ПС32) имеются выбросы в измерениях масс скоплений (см. рис. 2–3). Например, для скоплений A 133, A 1736, A 3395, 1701+6414 и 1212+2733 измеренные массы отклоняются на величину больше 2σ от среднего отношения масс, согласно гауссовому приближению для распределения отклонений (см. правую часть рис. 2–3).

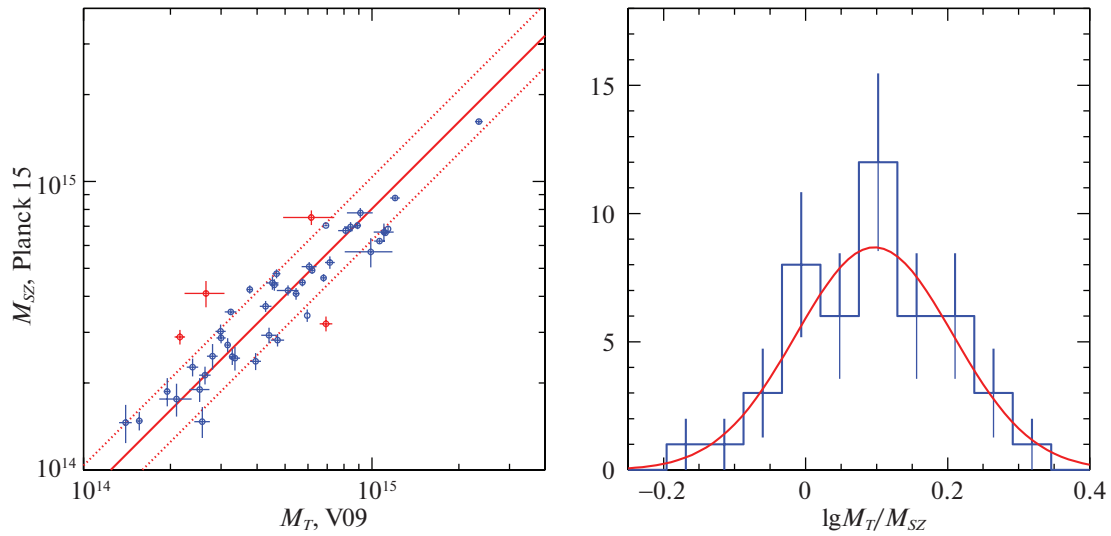


Рис. 1. Соотношение между массами M_T из V09 и M_{SZ} из ПС32. Слева: сплошной красной линией показано смещение масс, соответствующее калибровке масштаба масс; пунктирными линиями — стандартное отклонение калибровки масштаба масс. Справа: сплошной линией показано логнормальное распределение отношений масс M_T/M_{SZ} .

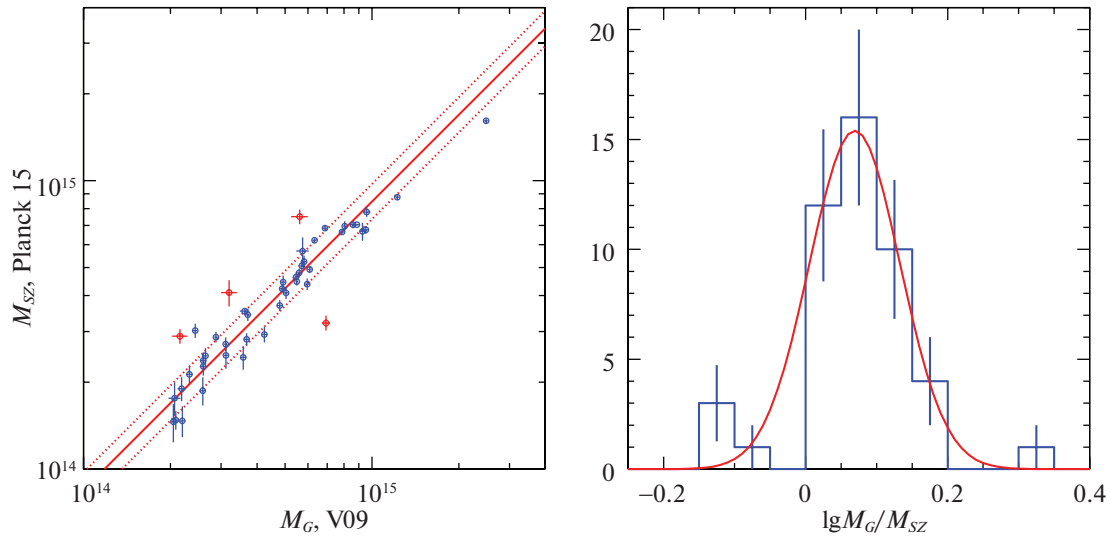


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для соотношения масс M_G из V09 и M_{SZ} из ПС32.

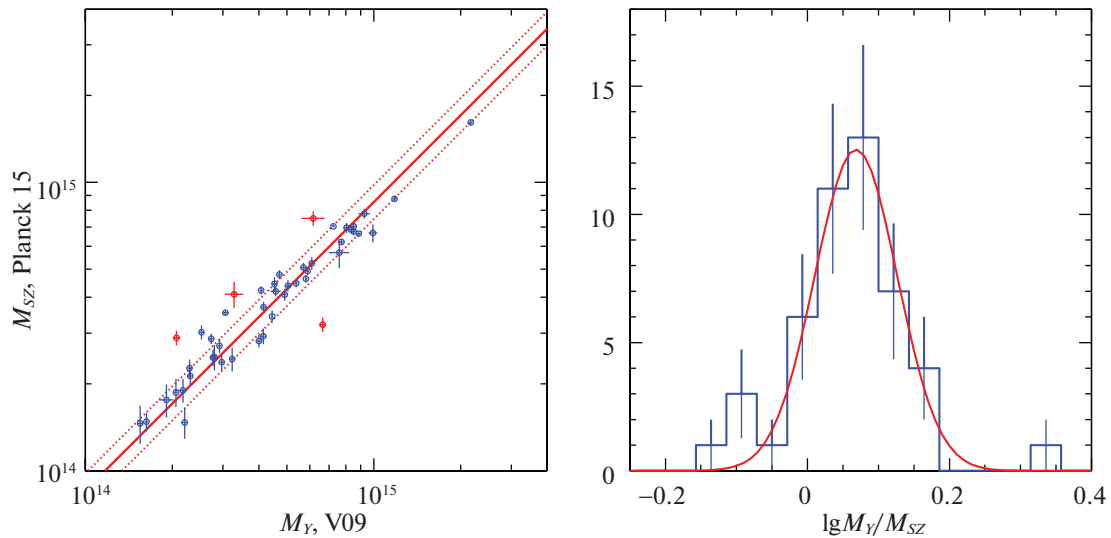


Рис. 3. То же, что и на рис. 1 и 2, но для соотношения масс M_Y из V09 и M_{SZ} из ПС32.

Таблица 1. Параметры логнормального распределения отношений масс

Параметры	$\lg M_T/M_{SZ}$	$\lg M_G/M_{SZ}$	$\lg M_Y/M_{SZ}$
Медиана	0.087	0.070	0.061
Подгонка функцией Гаусса (среднее значение и стандартное отклонение)	0.097 ± 0.111	0.069 ± 0.064	0.068 ± 0.058
Среднее значение и стандартное отклонение	0.092 ± 0.107	0.072 ± 0.084	0.059 ± 0.079
Среднее значение и стандартное отклонение, без выбросов	0.102 ± 0.085	0.079 ± 0.057	0.065 ± 0.057

Можно показать, что, скорее всего, отклонения в сторону более высоких значений M_{SZ} , относительно измерений M_G и M_Y , в большинстве случаев возникают из-за проекции других скоплений галактик или структур на рассматриваемое скопление. Так, например, в поле скопления А 1736 помимо галактик на красном смещении около $z = 0.045$, которые находятся близко к центру протяженного рентгеновского источника, имеется также целый набор эллиптических галактик на красных смещениях около $z = 0.035$, наиболее яркими из которых являются галактики ESO 509–G 008 и IC 4255. Эти галактики расположены на угловом расстоянии около $18'$ от центра рентгеновского источника (в направлении S–SE), положения этих галактик согласуются с областями, в которых также наблюдается рентгеновское излучение низкой поверхностной яркости, согласно данным обзора всего неба ROSATa. Отметим, что скопление А 1736 имеет большой угловой размер, $>10'$, поэтому галактики на разных красных смещениях не разделены пространственно в проекции, что приводило ранее к ошибочному измерению красного смещения для скопления А 1736 (Квинтана и др., 2000). Имеющиеся данные, по-видимому, не позволяют достоверно оценить долю массы, которая могла бы принадлежать группе на $z = 0.035$. Однако ясно, что масса этой группы входит в измерение массы скопления А 1736 по данным обзора Планка и, наоборот, не должна входить в измерение массы по рентгеновским данным.

Согласно данным обзора *400d*, на рентгеновских изображениях обсерватории ROSAT рядом со скоплением 1701+6414 ($z = 0.453$) на угловом расстоянии $4.6'$ наблюдается скопление 1700+6412, расположенное на красном смещении $z = 0.225$. На расстоянии около $7.6'$ имеются еще два скопления меньшей рентгеновской светимости (1702+6419 и 1701+6421), также расположенные на красном смещении около $z = 0.22$. Скопление 1700+6412 имеет рентгеновскую светимость около 6×10^{43} эрг с^{-1} (0.5–2 кэВ), что составляет

около 26% от рентгеновской светимости скопления 1701+6414. Поэтому, согласно соотношению масса–светимость из работы B09, масса скопления 1700+6412 соответствует примерно 17% массы скопления 1701+6414. Эта масса не входит в рентгеновское измерение массы по данным телескопа Чандра, но из-за недостаточно высокого углового разрешения телескопа обсерватории им. Планка, которое составляет величину от $5'$ до $10'$ в полосах 100–215 ГГц (Сообщество Планка, 2014a), по данным обзора Планка невозможно измерить массы всех этих скоплений по отдельности, и масса скопления PSZ2 G094.44+36.13, таким образом, оказывается завышенной.

Таким же образом масса скопления PSZ2 G207.88+81.31, измеренная по данным обзора Планка, должна быть завышена относительно массы скопления 1212+2733 ($z = 0.3533$), измеренной в рентгеновском диапазоне, поскольку на угловом расстоянии около $10'$ в обзоре *400d* наблюдается еще одно скопление 1212+2727 ($z = 0.1786$), рентгеновская светимость которого составляет около 15% светимости скопления 1212+2733, а масса соответственно около 10%.

В сторону более низких значений M_{SZ} , относительно измерений M_G и M_Y , заметно отклоняется измерение массы всего одного скопления — А 3395. Масса этого скопления, измеренная как по его температуре, так и по массе газа, в работе B09 оказывается более чем в два раза выше по сравнению с массой, измеренной в обзоре Планка. Однако отметим, что масса M_{SZ} хорошо согласуется с оценкой массы из рентгеновской светимости для этого скопления. С другой стороны, скопление с массой, равной M_G из работы B09, должно иметь примерно в три раза более высокую светимость в рентгеновском диапазоне, что, учитывая разброс соотношения масса–светимость, не согласуется с наблюдаемой рентгеновской светимостью на уровне около 2σ .

Это скопление отличается от всех остальных скоплений из выборки B09 тем, что на рентгеновском изображении центральной области этого скопления имеется два ярко выраженных максимума рентгеновского излучения (см., например, Альварез и др., 2018). Измерения массы газа в работе B09 были выполнены по данным о радиальном профиле поверхностной яркости, где вся сложная структура скопления усреднялась. При этом для учета того, что динамическое состояние этого скопления сильно отличается от установившегося, в работе B09 для этого скопления применялась большая поправка на оценку массы по температуре газа. Скорее всего, все это и является причиной завышенного измерения массы для этого скопления в работе B09.

Таким образом, учитывая соображения, изложенные выше, скопления A 1736, A 3395, 1212+2733 и 1701+6414 следует исключить из рассмотрения при сравнении измерений масс в работе B09 и каталоге PC32. Эти скопления показаны на рис. 1–3 красным цветом. Среднее значение логарифма отношения масс и его стандартное отклонение, для всех скоплений без учета выбросов в измерениях масс, даны в табл. 1. Эти значения соответствуют разбросу примерно 14% для отношений масс M_G/M_{SZ} и M_Y/M_{SZ} , при этом рентгеновские измерения масс M_G оказываются в среднем примерно на 20%, а M_Y — на 16% выше, по сравнению с измерениями масс в обзоре Планка, M_{SZ} .

3. КАЛИБРОВКА ИЗМЕРЕНИЙ МАСС СКОПЛЕНИЙ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Основная неопределенность космологических ограничений по измерениям функции масс скоплений галактик обусловлена неопределенностью калибровки масштаба масс скоплений. С помощью полученных выше соотношений между рентгеновскими массами M_T , M_G и M_Y (B09) и массами M_{SZ} из обзора Планка (PC32) можно перенести новые калибровки масштаба масс скоплений Планка на рентгеновские измерения масс скоплений из работы B09 и далее, исходя из этих калибровок, получать поправки на космологические ограничения из работы B09. Ниже, в качестве примера, эти поправки рассчитаны, исходя из двух часто используемых калибровок масс скоплений по слабому линзированию для скоплений из PC32 (вон дер Линден и др. 2014, далее — *WtG*, и Хокстра и др. 2015, далее — *X15*). Однако таким же образом можно исправить ограничения из B09 и при помощи любых других новых калибровок.

Для этого, в первую очередь, при помощи калибровок масштаба масс скоплений из обзора PC32, надо исправить калибровку масштаба масс скоплений из работы B09. Это можно сделать при помощи соотношений, полученных выше (см. табл. 1). Для измерений масс по эффекту Сюняева–Зельдовича в обзоре Планка и по слабому линзированию в работах *WtG* и *X15* были получены соотношения $\langle M_{SZ}/M_{WL} \rangle = 0.698 \pm 0.062$ и $\langle M_{SZ}/M_{WL} \rangle = 0.76 \pm 0.05$ (стат.) ± 0.06 (сист.), соответственно. Исходя из этого, можно получить оценки соотношений масс скоплений, измеренных в рентгеновском диапазоне в работе B09 и по слабому линзированию в работах *WtG* и *X15*, которые представлены в табл. 2.

Отметим, что оценки на соотношения измерений масс скоплений, представленные в табл. 2, очень хорошо согласуются с такими же оценками, которые были получены другим способом в работе Хаана и др. (2016). Отметим также, что такого систематического смещения в измерениях масс скоплений в работе B09 недостаточно для того, чтобы устранить рассогласования данных из работы B09 с другими космологическими данными по измерениям линейной амплитуды возмущений плотности материи, σ_8 , которые приводили ранее к измерению ненулевой суммы масс нейтрино по объединенным космологическим данным (Буренин и Вихлинин, 2012; Буренин, 2013).

Напомним, что подобные результаты получались ранее также по данным о функции масс скоплений из обзора Южнополярного телескопа (Хоу и др., 2014) и по данным каталога скоплений галактик обзора Планка (Сообщество Планка, 2014b, 2016b). Современное положение дел с ограничениями на массу нейтрино по данным о функции масс скоплений галактик подробно обсуждается в работе Буренина (2018).

Таблица 2. Соотношения измерений масс в рентгеновском диапазоне (B09) и по слабому линзированию (*WtG* и *X15*)

$1 - b$	<i>WtG</i>	<i>X15</i>
$\langle M_T/M_{WL} \rangle$	0.883 ± 0.083	0.961 ± 0.103
$\langle M_G/M_{WL} \rangle$	0.837 ± 0.076	0.912 ± 0.095
$\langle M_Y/M_{WL} \rangle$	0.811 ± 0.073	0.883 ± 0.092

4. ПОПРАВКИ НА КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ИЗ РАБОТЫ B09

Из нормировки функции масс близких скоплений галактик в работе B09 было получено ограничение на амплитуду линейных возмущений плотности материи, σ_8 , и параметр плотности материи, Ω_m :

$$\sigma_8 = (S_8 \pm \delta S_8) (\Omega_m/0.3)^{-\gamma}, \quad (2)$$

где $\gamma = 0.47$, $S_8 = 0.746$, а неопределенность $\delta S_8 = 0.027$ является квадратической суммой статистической ($\delta S_8^{\text{стат.}} = 0.013$) и систематической ($\delta S_8^{\text{сист.}} = 0.024$) погрешностей. Используя сетки правдоподобия из работы B09 (см. также работу Буренина и Вихлинина, 2012, далее БВ12), для скоплений на всех красных смещениях можно получить такое же по форме ограничение с параметрами: $\gamma = 0.40$, $S_8 = 0.740$, $\delta S_8 = 0.026$, где неопределенность складывается также из статистической ($\delta S_8^{\text{стат.}} = 0.011$) и систематической ($\delta S_8^{\text{сист.}} = 0.024$) погрешностей. Отметим, что в работе B09 для того чтобы получить эти ограничения были использованы массы скоплений, измеренные по массе газа M_G .

Для того чтобы получить оценки систематических неопределенностей ограничений космологических параметров, связанных с неопределенностью калибровки масштаба масс скоплений, в работе БВ12 были представлены сетки правдоподобия по данным из работы B09, но в предположении, что массы в работе B09 недооцениваются на 9%, т.е. на величину оценки систематической ошибки измерений масс скоплений, полученной в работе B09. Оказывается, что в этом случае ограничение по данным о всех скоплениях из B09 остается таким же, как выше, отличие состоит только в том, что в этом случае $S_8 = 0.760$.

Обычно систематическое смещение измерений масс скоплений определяют как $1 - b = \langle M_{\text{изм.}}/M_{\text{ист.}} \rangle$, где $M_{\text{изм.}}$ — измерения массы, а $M_{\text{ист.}}$ — ее истинные значения. В предположении малости смещения в измерениях масс, связь между этим смещением и величиной S_8 для скоплений из работы B09 должна быть близка к линейной. Из сказанного выше следует, что коэффициент пропорциональности при этом должен быть

$$\frac{dS_8}{db} \approx 0.237. \quad (3)$$

Используя это соотношение, ограничение (1) может быть исправлено для любого смещения в калибровке масштаба масс скоплений, в частности для смещений из табл. 2.

Исходя из этого, были исправлены ограничения по данным о близких ($z < 0.3$) скоплениях, а также по данным о скоплениях на всех красных

смещениях из работы B09, о которых говорилось выше. Результаты представлены в табл. 3. Для вычисления неопределенности величины S_8 , статистическая ошибка была взята из работы B09, а в качестве систематической была использована неопределенность калибровки масштаба масс, взятая из табл. 2 и пересчитанная в неопределенность S_8 при помощи соотношения (2). Согласно этим исправленным ограничениям, при том же значении Ω_m , значение σ_8 увеличивается по сравнению с ограничениями из работы B09, что обусловлено систематической недооценкой рентгеновских масс M_G в работе B09 по отношению к значениям масс M_{WL} , измеренных по наблюдениям слабого линзирования в работах WtG и X15.

Ограничения из табл. 3, заданные в виде гауссовой априорной вероятности для величины S_8 , показаны на рис. 4. Они объединены с ограничениями по данным обзора Планка о спектре мощности анизотропии температуры реликтового излучения (РИ) на мультиполях $\ell < 1000$. Спектр анизотропии температуры РИ по данным обзора Планка на более высоких мультиполях не рассматривается, поскольку из этих данных получается независимое измерение σ_8 , которое не согласуется с другими космологическими данными, в частности с данными по функции масс скоплений галактик (Буренин, 2018, см. также рис. 4). Для сравнения, на рис. 4 также показаны доверительные области, полученные по данным измерений функции масс скоплений галактик в обзоре Южнополярного телескопа (де Хаан и др., 2016) и в обзоре Планка (Сообщество Планка, 2016б), объединенные с данными обзора Планка об анизотропии температуры реликтового излучения на мультиполях $\ell < 1000$.

Расчеты этих ограничений были выполнены методом исследования апостериорных распределений на основе марковских цепочек значений параметров при помощи моделирований Монте-Карло. В расчетах использовалось стандартное программное обеспечение САМВ (Льюис и др., 2000) и CosmoMC версии ноября 2016 г., (Льюис и Брилл, 2002).

Таблица 3. Исправленные значения ограничений $S_8 \pm \delta S_8$

Выборка	WtG	X15
B09, $z < 0.3$, $\gamma = 0.47$	0.785 ± 0.023	0.767 ± 0.026
B09, все z , $\gamma = 0.40$	0.779 ± 0.021	0.761 ± 0.025

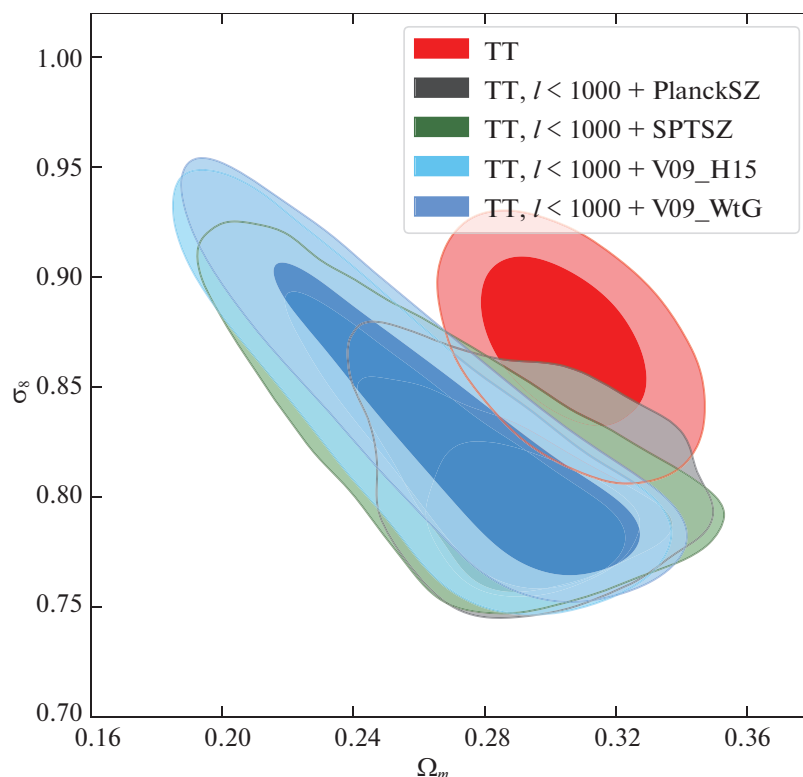


Рис. 4. Ограничения на значения параметров σ_8 и Ω_m : из температурного спектра мощности РИ по данным обсерватории им. Планка (TT), из температурного спектра мощности РИ обсерватории им. Планка с обрезанными мультиполями выше $l_{max} = 1000$, в объединении с ограничениями из табл. 3 (V09_H15, V09_WtG), а также с данными по измерению функции масс скоплений галактик по данным Южнополярного телескопа (SPTSZ, де Хаан и др., 2016) и обзора Планка (PlanckSZ, Сообщество Планка, 2016).

5. ОБСУЖДЕНИЕ

В этой работе проводится исследование возможности переноса калибровок масштаба масс скоплений галактик по измерениям слабого линзирования для скоплений из обзора обсерватории им. Планка, на измерения масс скоплений в рентгеновском диапазоне. Для этого проводится сравнение измерений масс скоплений галактик в рентгеновском диапазоне по данным телескопа Чандра в работе B09 и по эффекту Сюняева–Зельдовича в обзоре обсерватории им. Планка. Оказывается, что за исключением небольшого числа выбросов, разброс соотношения измерений масс составляет величину около 15%. Это говорит о том, что оба способа измерений масс скоплений являются надежными.

Отметим, что соотношение между амплитудой сигнала Сюняева–Зельдовича в обзоре Планка и рентгеновскими измерениями полной тепловой энергии газа в скоплениях, Y_X , исследовалось ранее, и было обнаружено хорошее согласие между этими измерениями (см., например, Розо и др., 2012; Сообщество Планка, 2011). Однако в нашей работе сравниваются окончательные измере-

ния масс, на которые влияет, в частности, оценка радиуса скоплений.

Для 4-х скоплений из 47-ми отличие в измерении масс разными способами оказывается относительно большим и достигает 30–50%. Выше показано, что в большинстве случаев это происходит из-за того, что массы измеренные по данным обзора Планка, оказываются завышенными из-за эффектов проекции скоплений, расположенных на разных красных смещениях. Отметим, что примерно такая же доля проекций была обнаружена ранее в работе по отождествлению скоплений галактик среди источников Сюняева–Зельдовича из обзора Планка в рентгеновском и оптическом диапазонах (Сообщество Планка, 2013, 2015).

Точность определения среднего соотношения масс по данным измерений масс в работе B09 и в обзоре обсерватории им. Планка составляет около 2%. Это позволяет практически без потери точности перенести существующие калибровки измерений масс скоплений в обзоре Планка на измерения масс в рентгеновском диапазоне по данным телескопа Чандра.

По-видимому, более точные калибровки измерений масс скоплений в рентгеновском диапазоне

можно получить, измеряя сигнал слабого линзирования внутри радиуса R_{500} , измерение которого берется из рентгеновских данных так, как это было сделано в работе де Хаана и др. (2016). Однако это требует гораздо более тщательного анализа всех данных, что не всегда возможно. В нашей работе не ставится задача получить более точные калибровки рентгеновских масс скоплений. Перенос калибровок, который обсуждается в нашей работе, позволяет применить новые калибровки масс скоплений из обзора Планка к измерениям масс скоплений в рентгеновском диапазоне.

Используя полученные поправки на калибровку масштаба масс скоплений из B09, получены также поправки на космологические ограничения из этой же работы. Смещение в измеряемом значении σ_8 составило примерно 3.7% в положительную сторону. С учетом этих поправок показано, что все данные по скоплениям галактик в настоящее время дают примерно одинаковые ограничения на σ_8 и Ω_m . Точность ограничений оказывается практически одинаковой, поскольку основной неопределенностью является систематическая ошибка калибровки масштаба масс скоплений. Это означает, что данные разных обзоров скоплений в настоящее время нельзя использовать независимо, так как все они основаны на одинаковых калибровках масштаба масс. Данные разных обзоров скоплений можно будет использовать независимо, только если в будущем масштаб масс скоплений будет откалиброван с точностью, которая будет превышать статистические ошибки измерений функции масс скоплений.

Соотношение (2) должно быть примерно одинаковым для обзоров скоплений, в которых массы скоплений приблизительно равны, а сами скопления расположены на примерно одинаковых красных смещениях. Поскольку в обзоре СРГ/еРОЗИТА будут обнаружены скопления, которые по своей массе будут похожи на скопления из работы B09, соотношение (2) можно использовать для того, чтобы приблизительно предсказать ограничения, которые могут быть получены по данным обзора СРГ/еРОЗИТА. Например, если статистическая ошибка будет уменьшена в 10 раз по сравнению с работой B09, а систематическая ошибка определения масштаба масс скоплений будет доведена до уровня 3%, ошибка на определение σ_8 при заданном Ω_m составит $\approx 1\%$.

Работа поддержана грантом РНФ 18-12-00520. В работе использовались вычислительные мощности архива данных проекта Спектр-Рентген-Гамма в ИКИ РАН, а также высокопроизводительная вычислительная система МВС-10П Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альварез и др. (G.E. Alvarez, S.W. Randall, H. Bourdin, C. Jones, and K. Holley-Bockelmann), *Astrophys. J.* **858**, 44 (2018).
2. Апплгейт и др. (D.E. Applegate, A. Mantz, S.W. Allen, A. von der Linden, R.G. Morris, S. Hilbert, P.L. Kelly, D.L. Burke, et al.), *MNRAS* **457**, 1522 (2016).
3. Буренин и др. (R.A. Burenin, A. Vikhlinin, A. Hornstrup, H. Ebeling, H. Quintana, and A. Mescheryakov), *Astrophys. J.* **172**, 561 (2007).
4. Буренин Р.А., Вихлинин А.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 395 (2012). [R.A. Burenin and A.A. Vikhlinin, *Astron. Lett.* **38**, 347 (2012)].
5. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **39**, 403 (2013). [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **39**, 357 (2013)].
6. Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. **44**, 714 (2018); arXiv:1806.03261. [R.A. Burenin, *Astron. Lett.* **44**, 653 (2018)]; arXiv:1806.03261.
7. Вихлинин А.А., Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Институт космических исследований РАН, 2002. http://hea.iki.rssi.ru/ru/PDF/dissertaciya_dfmn_vikhlinin.pdf
8. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, C. Jones, A.V. Kravtsov, S.S. Murray, et al.), *Astrophys. J.* **692**, 1033 (2009a).
9. 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 (2009b).
10. Воеводкин и Вихлинин (A. Voevodkin and A. Vikhlinin), *Astrophys. J.* **601**, 610 (2004).
11. Квинтана и др. (H. Quintana, E.R. Carrasco, and A. Reisenegger), *Astron. J.* **120**, 511 (2000).
12. Кравцов и др. (A. Kravtsov, A. Vikhlinin, and D. Nagai), *Astrophys. J.* **650**, 128 (2006).
13. вон дер Линден и др. (A. von der Linden, A. Mantz, S.W. Allen, D.E. Applegate, P.L. Kelly, R. G. Morris, et al.), *MNRAS* **443**, 1973 (2014).
14. Льюис и др. (A. Lewis, A. Challinor, and A. Lasenby), *Astrophys. J.* **538**, 473 (2000).
15. Льюис и Бридл (A. Lewis and S. Bridle), *Phys. Rev. D* **66**, 103511 (2002).
16. Розо и др. (E. Rozo, A. Vikhlinin, and S. More), *Astrophys. J.* **760**, 67 (2012).
17. Сообщество Планка (Planck early results. XI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **536**, A11 (2011).
18. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results IV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **550**, A130 (2013).
19. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A7 (2014a).
20. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), *Astron. Astrophys.* **571**, A20 (2014b).

21. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **582**, A29 (2015); arXiv:1407.6663.
22. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A22 (2016a).
23. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A24 (2016b).
24. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXVII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), *Astron. Astrophys.* **594**, A27 (2016b).
25. Сюняев и Зельдович (R.A. Sunyaev and Ya.B. Zeldovich), *Comm. Astrophys. Space Phys.* **4**, 173 (1972).
26. де Хаан и др. (T. de Haan, B.A. Benson, L.E. Bleem, S.W. Allen, D.E. Applegate, M.L.N. Ashby, et al.), *Astrophys. J.* **832**, 95 (2016).
27. Хокстра и др. (H. Hoekstra, R. Herbonnet, A. Muzzin, A. Babul, A. Mahdavi, et al.), *MNRAS* **449**, 685 (2015).
28. Хоу и др. (Z. Hou, C.L. Reichardt, K.T. Story, B. Follin, R. Keisler, K.A. Aird, et al.), *Astrophys. J.* **782**, 74 (2014).