

УДК 524.7-732; 524.8

ПОВЫШЕННАЯ ПЛОТНОСТЬ ГАЛАКТИК ПОЛЯ ВОЗЛЕ КРАСНОГО СМЕЩЕНИЯ $z \sim 0.56$ В НАПРАВЛЕНИИ НА ГАММА-ВСПЛЕСК GRB 021004

© 2018 И. В. Соколов^{1*}, А.-Х. Кастро-Тирадо², О. П. Желенкова^{3,4},
И. А. Соловьев⁵, О. В. Верходанов³, В. В. Соколов³

¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

²Отделение звездной физики, Институт астрофизики Андалусии, Гранада, 18080 Испания

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁴Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101 Россия

⁵Астрономическое отделение, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

Поступила в редакцию 22 июня 2017 года; принята в печать 24 апреля 2018 года

Мы проверили по разным признакам достоверность кластеризации галактик поля в направлении на гамма-всплеск GRB 021004. Первым признаком является полученное по наблюдениям на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук распределение фотометрических красных смещений галактик в поле GRB 021004, определенных по многоцветной фотометрии, с пиком около $z \sim 0.56$ в направлении на этот гамма-всплеск. Вторым признаком оказался абсорбционный дублет Mg II 2796, 2803 Å на $z \approx 0.56$, обнаруженный в VLT/UVES-спектрах, полученных для послесвечения GRB 021004. Третий признак — это кластеризация галактик в большей области (порядка $3^\circ \times 3^\circ$) вокруг GRB 021004 с эффективным пиком около $z \sim 0.56$ по распределениям и спектральным, и фотометрическим красным смещениям, взятых из нескольких каталогов скоплений на основе Sloan Digital Sky Survey (SDSS) и Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) как части SDSS-III. По данным этих каталогов размер всей неоднородности в распределении скопления галактик с пиком $z \approx 0.56$ был оценен как 6° – 8° или 140–190 Мпс. Возможная неоднородность (скопление галактик) около направления на GRB 021004 также может подтверждаться неоднородностью космического микроволнового фона, связанной с эффектом Сюняева–Зельдовича.

Ключевые слова: космология: наблюдения — крупномасштабная структура Вселенной — галактики: расстояние и красное смещение — гамма-всплески: индивидуальные: GRB 021004

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной мотивацией к выполнению данной работы стало появление новых исследований сверхскоплений «великих стен» (Great Walls) в порядке возрастания красного смещения z :

- В статье [1] речь идет о сверхскоплениях в диапазоне красных смещений $0.04 < z < 0.12$. Авторы исследуют, насколько необычными являются сверхскопление Шепли (Shapley Supercluster) с $z = 0.046$ и Великая стена Слоуна (Sloan Great Wall), рассматривая последнюю как комплекс сверхскоплений с коллапсирующим ядром [2]. В этих статьях подробно

изучается распределение групп галактик этого комплекса на небесной плоскости.

- Сверхскопления Великая стена BOSS (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey of the Sloan Digital Sky Survey) в диапазоне красных смещений $0.43 < z < 0.71$ были исследованы в статье [3], где речь идет об открытии системы массивных сверхскоплений на $z \sim 0.47$. BOSS Great Wall состоит из двух стен размерами 186 и 173 Мпк и двух других больших сверхскоплений с диаметрами около 64 и 91 Мпк. Этот комплекс включает 830 галактик со средним красным смещением $z = 0.47$ и полной массой $\sim 2 \times 10^{17} M_\odot$. Авторы подчеркивают, что мор-

*E-mail: sok334455@mail.ru

фология сверхскоплений в системе BOSS Great Wall похожа на морфологию сверхскоплений в Sloan Great Wall.

- Работа [4] посвящена громадной группе квазаров (Huge Large Quasar Group, Huge-LQG) на $z \sim 1.3$. Было исследовано распределение по небу 73 квазаров ($z = 1.27$) скопления Huge-LQG вместе с распределением 34 квазаров скопления Clowes-Campusano LQG (CCLQG) с $z = 1.28$ [5]. Huge-LQG — это область размерами $29^\circ 5' \times 24^\circ 0'$. Члены этой группы связаны на масштабе 100 Мпс.
- Здесь нужно сказать также о гигантской кольцеобразной структуре на красном смещении $0.78 < z < 0.86$, которую выявили гамма-всплески, о чем идет речь в статье [6]. Повидимому, это указывает на присутствие некоторого реального увеличения плотности на расстоянии около 2800 Мпс. Возможная структура в распределении гамма-всплесков по небу обсуждается также в работе [7]. Эта огромная структура из гамма-всплесков находится в десять раз дальше, чем сверхскопление Sloan Great Wall, на расстоянии примерно в десять миллиардов световых лет. Размер структуры, определенной по этим гамма-всплескам, равен 2000–3000 Мпс, что в шесть раз больше, чем размер Sloan Great Wall.
- В статье [8] речь идет о статистике сигнала CMB (Cosmic Microwave Background) по данным миссии Planck в направлении на гамма-всплески из каталогов миссий BATSE и ВерроSAX или о возможной неоднородности (негауссовости) распределения гамма-всплесков по небу. Хотя было доказано, что видимое распределение гамма-всплесков по небу изотропно [9] некоторые исследования указывают на возможную корреляцию с неоднородностью космического микроволнового фона [8], а также сообщалось о кластеризации гамма-всплесков на промежуточных красных смещениях [6]. Кроме того, обсуждалась возможная кластеризация нейтринных сигналов с гамма-всплесками [10].

Объекты с линией поглощения Mg II $\lambda\lambda 2796, 2798 \text{ \AA}$ в общем диапазоне красных смещений упомянутого скопления Huge-LQG были обнаружены в спектрах фоновых квазаров (с $z \gtrsim 1.4$) с помощью каталога объектов с линией поглощения Mg II, созданного Рагхунатханом и др. [11] в 2016 г. (В статье [12] представлена статистика из обзора промежуточных систем поглощения Mg II по направлению на 100 квазаров с эмиссионными (собственными) красными смещениями между

$z = 3.55$ и $z = 7.08$.) Таким образом, применяя метод квазарной спектроскопии, мы основываемся на использовании некоторых хорошо детектируемых скоплениях галактик, попадающих в направление на GRB 021004. И потому спектроскопия послесвечений гамма-всплесков также может выявить промежуточные системы по лучу зрения.

Кластеризация галактик и кластеризация по направлению на гамма-всплески обнаруживаются и исследуются тем же способом, который уже использовался для спектроскопии квазаров во многих статьях (см. [13] и ссылки там), ибо гамма-всплески возникают на космологических расстояниях с выбросом энергии $10^{51} - 10^{53}$ эрг в диапазоне красных смещений от 0.01 до более чем 9.2. А длинные гамма-всплески являются маяками для галактик со звездообразованием (см. ссылки в [14]) до очень больших красных смещений.

Галактики, порождающие системы линий поглощения в спектрах послесвечений гамма-всплесков, можно наблюдать и исследовать. Так что возможно обнаружить избыточную плотность галактик поля вокруг направления на гамма-всплески разными методами: спектроскопическими, фотометрическими (с использованием глубоких снимков и многоцветной фотометрии), а также поиском корреляции с космическим микроволновым излучением. Для оценки размера этих сверхскоплений галактик в областях возле направления на гамма-всплески можно также использовать данные из новых каталогов скоплений галактик. В частности, в этой статье по всем обнаруженным признакам мы проверили достоверность кластеризации галактик поля по лучу зрения на GRB 021004, а также и в более обширной области вокруг него.

2. О НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ И МЕТОДИКЕ ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Наши исследования основываются на наблюдательных данных, полученных на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН. Глубокие снимки полей, представленные в таблице 1, изучались с помощью БТА (до 2002 г.) по программе мониторинга гамма-всплесков, начиная с самых первых оптических отождествлений их послесвечений. Таким образом, все эти наблюдения выполнялись на БТА в ходе поиска и изучения родительских галактик GRB и сравнения их свойств со свойствами всех наблюдаемых галактик в глубоких снимках полей гамма-всплесков. В статьях [15, 16] описывается методика обработки и интерпретации этих наблюдений, которую можно теперь использовать для новых задач по изучению распределения галактических скоплений в направлении на гамма-всплески [13, 17–19].

В частности, для изучения поля GRB 021004 мы использовали методику, которая уже была

Таблица 1. Глубокие поля вокруг гамма-всплесков, которые наблюдались на БТА в 1987–2002 гг

GRB	Фильтры	Время экспозиции, с
970508	<i>BVRI</i>	600 × 7, 500 × 4, 600 × 5, 400 × 5
971214	<i>VR</i>	600 × 1, 600 × 1
980613	<i>BVRI</i>	700 × 1, 600 × 1, 600 × 3
980703	<i>BVRI</i>	480 × 1, 320 × 1, 300 × 1, 360 × 1
990123	<i>BVRI</i>	600 × 1, 600 × 1, 600 × 1, 600 × 1
991208	<i>BVRI</i>	300 × 6, 300 × 5, 180 × 7, 180 × 2
000926	<i>BVRI</i>	500 × 5, 300 × 5, 180 × 25, 120 × 15
021004	<i>BVRI</i>	600 × 6, 450 × 13, 180 × 15, 120 × 14

разработана для глубокого *BVRI*-поля гамма-всплеска GRB 000926 (см. таблицу 1), который исследовался на БТА, и результаты были опубликованы в статье [15], где представлены наблюдения поля размером $3'6 \times 3'$ с центром в родительской галактике гамма-всплеска GRB 000926 RA(J2000) = $17^{\text{h}}04^{\text{m}}11^{\text{s}}$, Dec(J2000) = $+51^{\circ}04'09''.8$ (далее используются обозначения RAJ и DecJ).

Наблюдения были выполнены на БТА с использованием прибора SCORPIO [20]. Каталог галактик, обнаруженных в этом поле, содержит 264 объекта, для которых отношение сигнал-шум больше 5 в каждой фотометрической полосе. Были получены следующие предельные звездные величины: $26^{\text{m}}6$ (*B*), $25^{\text{m}}0$ (*V*), $25^{\text{m}}8$ (R_c) и $24^{\text{m}}5$ (I_c). Дифференциальные подсчеты галактик хорошо согласуются с ранее опубликованными наблюдениями глубоких полей. Были получены фотометрические красные смещения для всех объектов каталога и соответствующие вариации цвета галактик как функции красного смещения. В результате для ярких спиральных галактик с $M_B < 18$ не было обнаружено никакой заметной эволюции их линейного размера до $z \sim 1$.

Для исследования глубоких полей из таблицы 1 имеющиеся данные были дополнены наблюдениями, полученными на других инструментах, — для GRB 021004, GRB 970508 и других источников, включая исследование окружения радиоисточника RC J0311+0507 [21].

Как было сказано выше, исследование поля GRB 021004 было частью программы наблюдений гамма-всплесков [15, 16]. Время экспозиции этого поля составило около 1 часа в каждой из оптических полос *BVRI* (см. таблицу 1). Для получения объектов по суммированным *BVRI*-кадрам мы использовали программный пакет SExtractor [22]. Каталог галактик, обнаруженных в этом поле

Таблица 2. Фотометрические красные смещения с вероятностью R оценки z для семи галактик с известной морфологией (см. рис. 3 и текст)

Num	R , mag	z	%	Type
227	20.60	0.44	82	S0
311	21.82	0.40	94	Burst
121	21.16	0.42	84	Sa
123	21.41	0.40	98	E
147	21.61	0.44	86	E
314	21.58	0.46	95	Burst
295	20.60	0.41	92	S0

размером $4' \times 4'$, содержит 935 объектов, для которых ошибка фотометрии не превосходит $0^{\text{m}}1$ (см. рис. 1, слева). Таким образом, для этих БТА-наблюдений поля GRB 021004 были достигнуты следующие предельные величины: $26^{\text{m}}9$ (*B*), $27^{\text{m}}2$ (*V*), $26^{\text{m}}0$ (R_c) и $25^{\text{m}}5$ (*I*).

Одна из целей данной работы — понять, что можно получить с помощью 6-метрового телескопа БТА для этих актуальных и трудных задач, дополняя эти исследования данными с других инструментов. Мы также убедились, что наши результаты по глубокой фотометрии согласуются с соответствующими данными HST ACS¹ для поля GRB 021004. На рис. 1 (справа) показаны данные, полученные на камере ASC в оптических полосах *F475W*, *F606W* и *F814W* с ошибкой фотометрии, не превышающей $0^{\text{m}}1$, для тех же протяженных объектов, для которых на БТА была выполнена *BVRI*-фотометрия. На рис. 2 показаны кривые пропускания фильтров оптических полос БТА *BVRI*, а также, для сравнения, — полос *F475W*, *F606W*, *F814W* камеры HST ACS. Но мы не использовали прямо данные HST ACS (рис. 1, справа) для оценок фотометрического красного смещения, так как кривые пропускания оптических полос БТА *BVRI* и HST ACS перекрываются. Но главное — это то, что данные HST ACS можно использовать для получения информации о морфологии HST/БТА-объектов (см. далее).

HST-фотометрия протяженных объектов в поле GRB 021004 приводится здесь для сравнения с данными *BVRI*-фотометрии БТА тех же протяженных объектов. В частности, как видно на рис. 1, диаграмма («зв. величина—ошибка») для объектов, полученных для поля GRB 021004 в оптических

¹Hubble Legacy Archive, <http://hla.stsci.edu/hlaview.html>

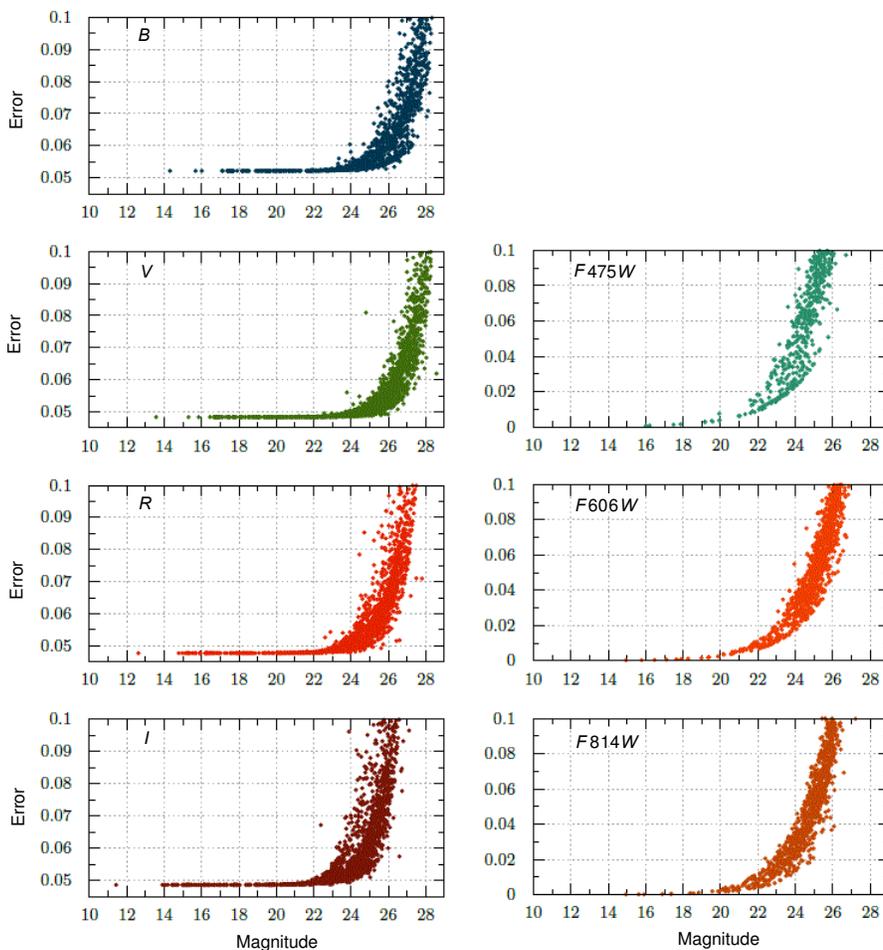


Рис. 1. Диаграмма «зв. величина—ошибка фотометрии» для объектов, извлеченных из поля GRB 021004. Графики в левой колонке показывают данные *BVRI*-полос телескопа БТА. На графиках справа представлены данные из тех же полей, полученные с *ACS*-камерой на телескопе *HST* в оптических полосах *F475W*, *F606W* и *F814W* (Hubble Legacy Archive, <http://hla.stsci.edu/hlaview.html>).

полосах БТА *R*, *I* (слева) и *HST ACS F606W*, *F814W* (справа) согласуются удовлетворительно. Это соответствует тому, что кривые пропускания оптических полос, упомянутых выше, близки друг к другу по центральной длине волны, полуширине и максимуму (рис. 2).

Помимо исследования родительских галактик, быстрая спектроскопия послесвечений гамма-всплесков выявила (в оптике) такие же промежуточные системы поглощения, какие были обнаружены ранее при спектроскопии квазаров. Одна из таких систем — это Mg II ($\lambda\lambda 2796, 2798 \text{ \AA}$ в системе покоя), которая является сильной, и ее легко обнаружить в спектрах с умеренным отношением сигнал/шум. На основе большой выборки послесвечений гамма-всплесков была обнаружена повышенная (в 2–4 раза) плотность систем сильных линий поглощения на луче зрения [17–19]. Мы использовали эти данные здесь для прямого подтверждения избыточной

плотности галактик поля с пиком на $z \sim 0.56$ вокруг положения GRB 021004.

Кроме фотометрических и спектральных методов, мы используем данные для скоплений из новых каталогов скоплений галактик, чтобы подтвердить таким образом пик в распределении красного смещения и оценить угловой размер всей неоднородности в распределении скоплений галактик, т.е. сверхскопления с $z \sim 0.56$.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ ГАЛАКТИК ПОЛЯ GRB 021004 И АБСОРБЦИОННЫЙ ДУБЛЕТ Mg II 2796, 2803 \AA НА $z \approx 0.56$ В СПЕКТРЕ ПОСЛЕСВЕЧЕНИЯ GRB 021004

Основная идея фотометрических оценок красного смещения состоит в следующем [23] — многоцветную фотометрию объекта можно рассматривать как спектр очень низкого разрешения (точнее,

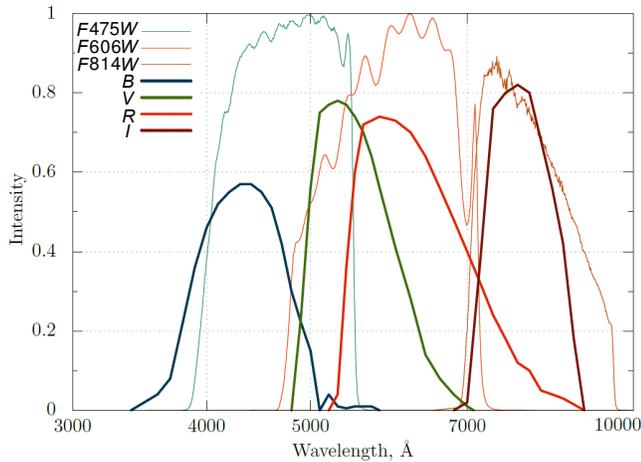


Рис. 2. Кривые пропускания оптических полос БТА (*BVRI*) и HST ACS (*F475W*, *F606W*, *F814W*).

как распределение энергии в нескольких полосах), что используется для оценки красных смещений сразу многих (до нескольких сотен) объектов.

Мы получили фотометрические красные смещения протяженных объектов нашей БТА-выборки с помощью пакета Hyperz — общедоступной программы для оценки фотометрических красных смещений [24]. Метод основан на наилучшей подгонке шаблонных спектров различных типов галактик, используемых для вычисления фотометрического красного смещения. Шаблонные спектры, использованные в наших вычислениях, были взяты из работы [2].

Входные данные для программы Hyperz были следующие: видимая величина объектов в четырех *BVRI*-полосах, закон внутренней экстинкции, диапазон красных смещений, в котором применялось решение (мы рассматривали красное смещение z от 0 до 4). Мы использовали закон экстинкции для галактик со звездообразованием из работы Цалзетти и др. [3], который чаще всего применяется для исследований, подобных нашим, как в упомянутой работе [26], где применение метода Hyperz описывается более подробно, и где он был применен для анализа наблюдательных данных БТА.

Для семи ярких галактик ($R = 20^m6 - 21^m8$) в БТА-поле GRB 021004 мы обнаружили, что модели, использующие спектры из [24] и приписанные этим галактикам, хорошо согласуются с данными камеры HST ACS. Последняя выявляет морфологии этих объектов непосредственно благодаря лучшему угловому разрешению изображений HST (см. рис. 3). Таблица 2 содержит оцененную вероятность фотометрического красного смещения $z \approx 0.4$, таким образом показывая важность применения шаблонных спектров (или спектрального

Таблица 3. Абсорбционный дублет Mg II 2796, 2803 Å, отождествленный в спектре GRB 021004 в работе [18]

GRB	z_{GRB}	z_{abs}	$W_r(\lambda 2796), \text{Å}$
GRB 021004		0.5550	0.248 ± 0.025
	2.3295	1.3800	1.637 ± 0.020
		1.6026	1.407 ± 0.024

распределения энергии — SED) разных типов галактик, когда морфологию галактик по наблюдениям на БТА для более слабых объектов можно определить только по их спектральному распределению энергии и т.д. (стандартные SED для процедуры подгонки в Hyperz можно взять из <http://webast.ast.obs-mip.fr/hyperz> [24]).

Таким образом, используя БТА-наблюдения поля GRB 021004 в *BVRI*-полосах для пространственного (по красному смещению) распределения галактик поля, мы обнаружили большую неоднородность с максимумом в распределении фотометрических красных смещений (см. рис. 4) на $z \approx 0.56$ для 246 объектов (из 935, рис. 1) в поле этого гамма-всплеска с вероятностью оценки красного смещения [26] около 90% и более (до 99%). Здесь наблюдательные данные были получены в 4 фотометрических *BVRI*-полосах БТА. Отличие этих оценок красного смещения от спектрального z составляет около 10% (см. следующий раздел), по крайней мере, для $z < 1$, — этого достаточно для статистического исследования свойств объектов, кроме того, нас интересуют объекты с красным смещением $0 < z < 0.7$ (см. далее).

Конечно, сравнение наших данных с данными HST (рис. 1 и 3) еще не является значащим тестом определения красного смещения пика $z \approx 0.56$ на рис. 4. Поэтому мы используем еще данные VLT/UVES спектральных наблюдений послесвечения GRB 021004. Спектр послесвечения этого гамма-всплеска был измерен двумя командами [18, 19]. Спектр из [19] показывает признаки дублета Mg II 2796 2803 Å, сдвинутого в красную сторону на $z = 1.3820$ и $z = 1.6020$ (см. рис. 1 в [19]). Этот спектр содержит также две линии, которые можно отождествить как дублет Mg II (на луче зрения на GRB 021004), сдвинутый в красную сторону на $z \approx 0.5550 - 0.5570$ (см. рис. 5 из [19] и результаты отождествления более ранних спектров этого всплеска из [18] в таблице 3).

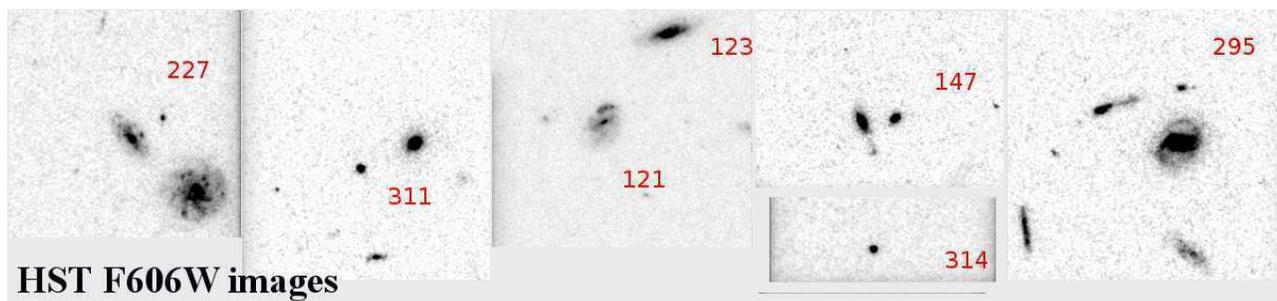


Рис. 3. Изображения 7 галактик по снимкам HST ACS F606W (HST Legacy Archive, <http://hla.stsci.edu/hlview.html>) возле положения GRB 021004 в поле размером $3'.5 \times 3'.5$. Указаны номера объектов из каталога HST ACS. В таблице содержатся оценки фотометрических z и вероятности оценок фотометрических z для этих 7 галактик с известной морфологией, см. текст.

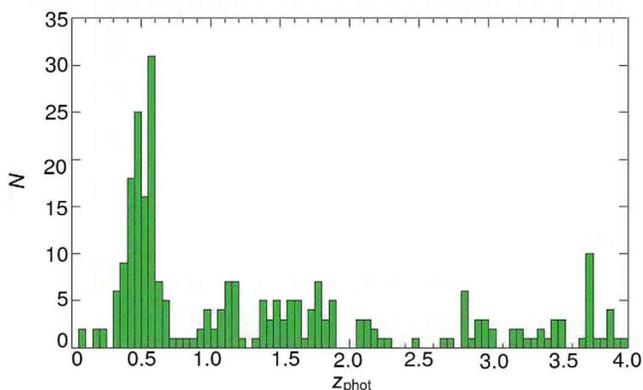


Рис. 4. Распределение фотометрических красных смещений для 246 объектов с пиком возле $z \approx 0.56$ по *BVR*-данным БТА.

4. О КЛАСТЕРИЗАЦИИ ГАЛАКТИК С ЭФФЕКТИВНЫМ ПИКОМ ВОЗЛЕ $z \sim 0.56$ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ ИЗ КАТАЛОГОВ И О НЕОДНОРОДНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО МИКРОВОЛНОВОГО ФОНА НА КАРТЕ Planck И GRB 021004.

Наличие пика возле $z \approx 0.56$ в распределении красных смещений для скоплений галактик возле положения GRB 021004 было также проверено по данным из каталогов. Мы отобрали объекты в области размером $3^\circ \times 3^\circ$, с координатами центра RAJ = $00^h 22^m 44^s$, DecJ = $+17^\circ 40' 58''$ (рис. 6). Ниже приводится полный список использованных для этой цели каталогов с указанием их глубины и количества обнаруженных объектов.

- redMaPPer DR8 cluster catalog [31, 32]: глубина каталога $m_i < 21^m 0$ для фотометрических красных смещений, 44 скопления с z_{ph} ;
- Group catalogues of the local Universe [33]: глубина каталога $m_r < 17^m 77$ для фотометрических красных смещений, 44 скопления с z_{sp} ;

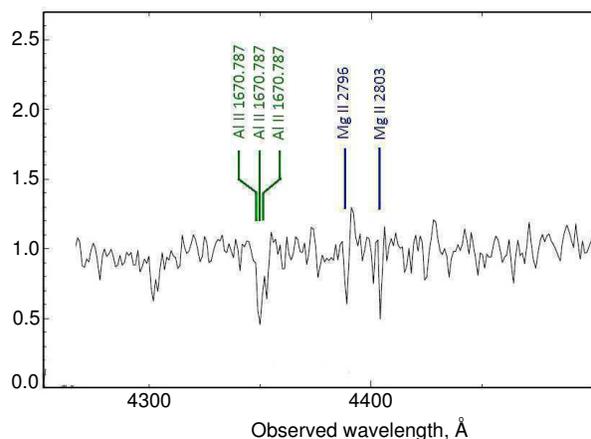


Рис. 5. Линии VLT/UVES-спектра около 4400 \AA с абсорбцией можно интерпретировать как дублет Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803 \text{ \AA}$, сдвинутый в красную сторону на $z \approx 0.56$.

- Rich Clusters of Galaxies [34]: глубина каталога $m_B < 23^m$ для спектральных красных смещений, два скопления с z_{sp} ;
- Newly rich galaxy clusters identified in SDSS-DR12 [35]: глубина каталога $m_r < 21^m 5$ для фотометрических красных смещений, 128 скоплений с z_{sp} и z_{ph} ;
- Northern Optical Cluster Survey III [32]: глубина каталога составляет $21^m 5$, $21^m 0$ и $20^m 3$ в g , r and i полосах для фотометрических красных смещений; 101 скопление z_{ph} ;
- Richness of galaxy clusters [38]: глубина каталога $m_i < 21^m 0$ для фотометрических красных смещений, 74 скопления с z_{ph} .

Мозаичное полутоновое изображение, показанное на рис. 6, получено суммированием 690 полей в полосе r из архива SDSS ². Поле

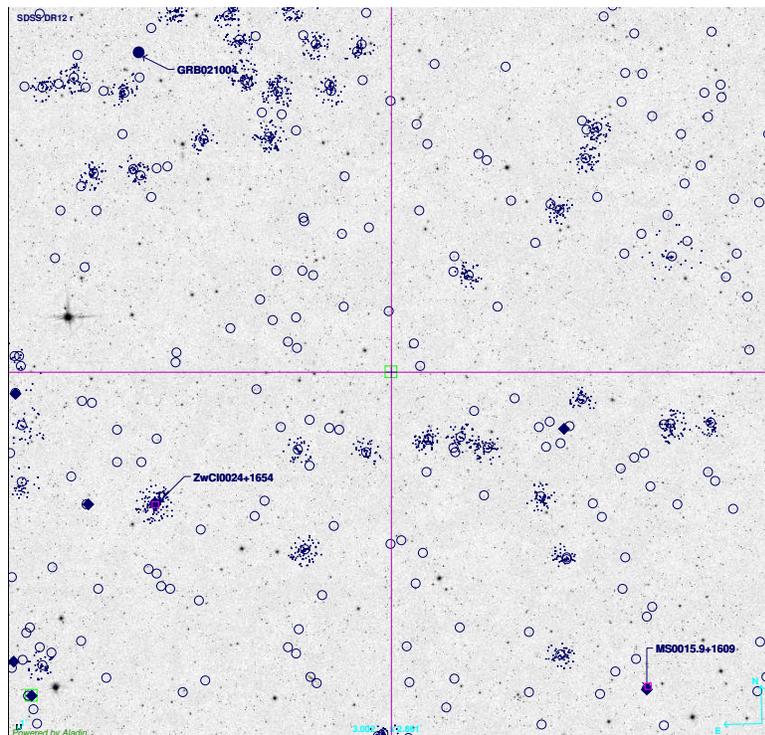


Рис. 6. Область размером $3^\circ \times 3^\circ$ возле положения гамма-всплеска GRB 021004 (отмечен закрашенным кружком). Указаны два известных богатых скопления — CL0024+1654 ($z = 0.390$) и MS0015.9+1609 ($z = 0.541$). Отмечены скопления галактик (всего 248) из используемых каталогов. Пустые кружки соответствуют центрам скоплений из каталогов redMaPPer [27], NOCS [32], WHL [35, 39] и статей Саулдера и др. [33], Огури [38] и Темпеля и др. [40]. Ромбами отмечены богатые скопления из каталогов Абеля и Цвикки [38]. Маленькими сгруппированными крестиками отмечены галактики — члены скоплений из каталога redMaPPer [31, 32].

включает два соседних рентгеновских скопления CL0024+1654 ($z = 0.390$) и MS0015.9+1609 ($z = 0.541$) на угловых расстояниях около одного—двух градусов от GRB 021004. На рис. 7 показана только северо-восточная часть (верхний левый квадрат) всей области, изображенной на рис. 6, а именно, область размером примерно $1.5^\circ \times 1.5^\circ$, содержащую GRB 021004.

На рис. 8 показаны гистограммы распределений фотометрических и спектральных красных смещений для скоплений галактик в этой области размером $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ возле GRB 021004 (рис. 7). Распределение красных смещений в этой области концентрируется по крайней мере к трем пикам при использовании новых каталогов.

На рис. 9а–9с показаны гистограммы с дифференциальными подсчетами красных смещений для скоплений галактик, обнаруженных во всей области размером $3^\circ \times 3^\circ$ с центром в RAJ = $5^\circ 68$ ($00^{\text{h}}22^{\text{m}}43^{\text{s}}$), DecJ = $17^\circ 68$ ($17^\circ 40'48''$) (см. рис. 6). Использовались все 6 каталогов (8 таблиц из базы данных Vizier), см. начало раздела.

²Science Archive Server, <https://dr12.sdss.org/mosaics>

Таким образом, оценка фотометрических красных смещений по глубокой *BVRI*-фотометрии БТА оказывается вполне приемлемой, что следует из сравнения с данными этих каталогов — мы видим тот же пик с $z \approx 0.56$ в распределении красных смещений для скоплений галактик около положения GRB 021004 и по данным каталогов в области размером $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ и даже больше — по крайней мере в области размером около $3^\circ \times 3^\circ$.

Практическое замечание. Следует отметить особенность, обнаруженную при построении этих распределений. Если данные каталога для этого поля (положение $5^\circ 68; +17^\circ 68$, размер бокса 3°) выбираются прямо из базы данных Vizier, то результаты запроса в действительности несколько превышают заданный размер — расстояние между крайними объектами по прямому восхождению составляет около $11192'' = 3^\circ 06'32''$. Так что Vizier выдает поле размером $3^\circ 1 \times 3^\circ 0$, т.е. мы получаем больше объектов. Это ведет к тому, что гистограммы, аналогичные тем, что показаны на рис. 9 и построены по каталогам, немного отличаются из-за включения этих объектов, что нужно учитывать при повторном вычислении таких распределений z .

На рис. 10 объекты используемых каталогов скоплений (см. рис. 6) наложены на карту

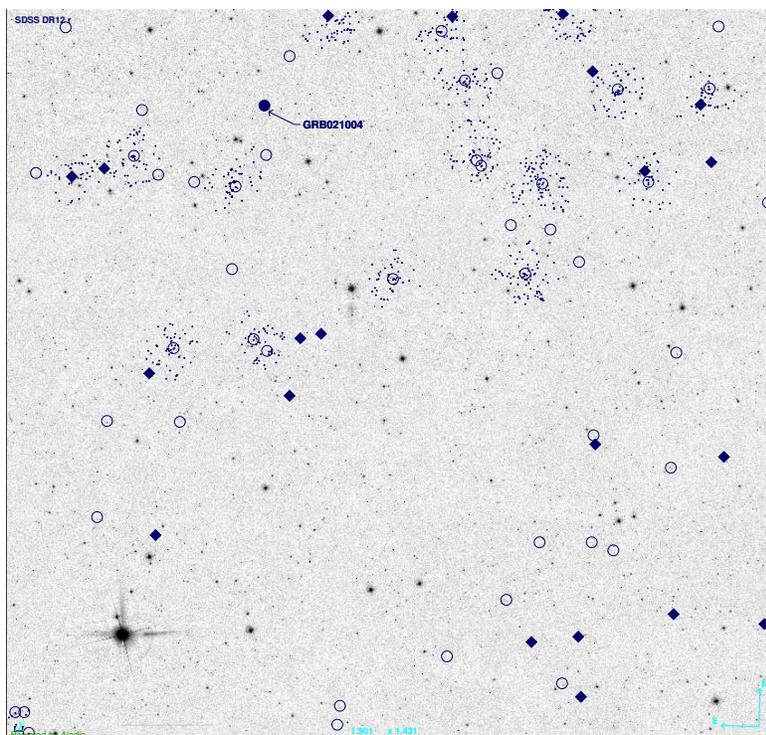


Рис. 7. Северо-восточная часть области, изображенной на рис. 6 (верхний левый квадрат). Размер области — около $1^{\circ}5 \times 1^{\circ}5$. Обозначения те же, что на рис. 6.

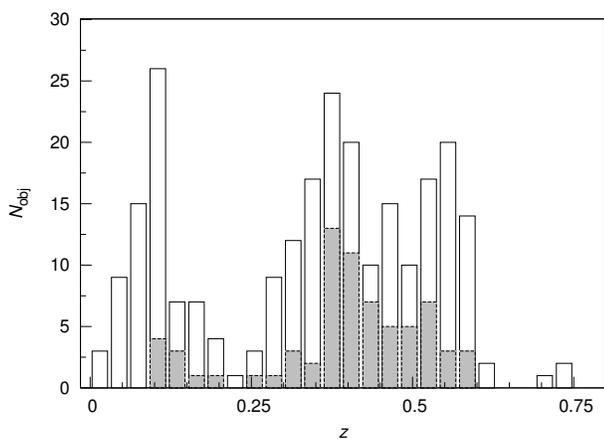


Рис. 8. Гистограммы с распределением красных смещений для галактик в области около положения GRB 021004 (рис. 7): распределение с фотометрическими и спектральными красными смещениями и только со спектральными обозначены светлыми и серыми барами, соответственно.

Planck CMB (SMICA)³. На ней отмечено положение GRB 021004, а также двух скоплений CL 0024+1654 и MS 0015.9 с рентгеновским источником в них. Эти два скопления находятся возле светлых областей на рис. 6, соответствующих

³<http://pla.esac.esa.int/pla>

минимуму потока космического фонового микроволнового излучения, что может быть связано с эффектом Сюняева—Зельдовича, наблюдаемого в таких рентгеновских скоплениях.

Таким образом, используя данные SDSS DR12, мы исследовали также большую область $3^{\circ} \times 3^{\circ}$, содержащую эти два рентгеновских скопления. Глубина SDSS составляет около 22^m , а его каталог включает фотометрические z (их распределение показано на рис. 9а) и определения спектральных красных смещений для достаточно ярких объектов обзора (распределение показано на рис. 9б). Во всей области (около $3^{\circ} \times 3^{\circ}$), как и в области с GRB 021004, изображенной на рис. 7 ($1^{\circ}5 \times 1^{\circ}5$), распределение галактических скоплений также демонстрирует очевидный пик на $z \sim 0.56$ (см. рис. 7 и 6 а–с) для фотометрических и спектральных красных смещений.

Как видно на рис. 7 и 9, два рентгеновских скопления CL 0024+1654 ($z = 0.39$) и MS 0015.9+1609 ($z = 0.541$) находятся очень близко по z к двум пикам $z \sim 0.4$ и $z \sim 0.56$ во всей области размером $3^{\circ} \times 3^{\circ}$ с центром в RAJ = $5^{\circ}68$ ($00^h 22^m 43^s$), DecJ = $17^{\circ}68$ ($17^{\circ}40'48''$).

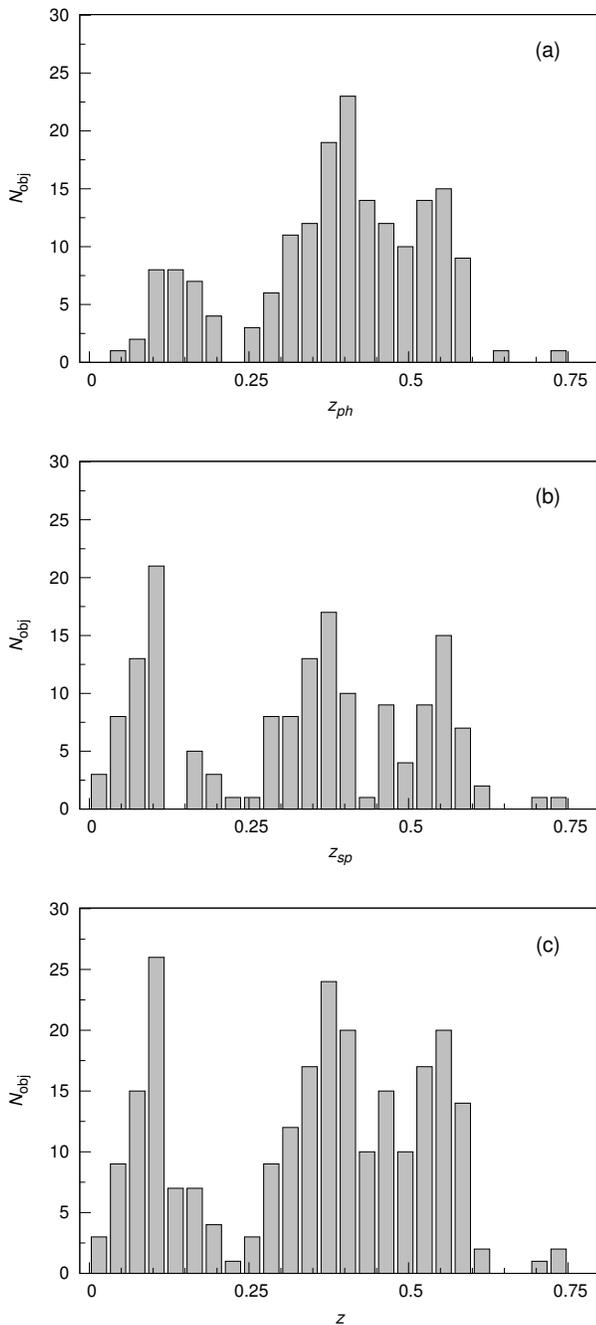


Рис. 9. Дифференциальные подсчеты красных смещений для скоплений галактик по данным шести каталогов, упомянутых в начале раздела, для области размером $3^\circ \times 3^\circ$ с центром в RAJ = $5^\circ 68$ ($00^h 22^m 43^s$), DecJ = $17^\circ 68$ ($17^\circ 40' 48''$): а) фотометрические красные смещения (180 скоплений), б) спектральные красные смещения (160 скоплений) и в) спектральные и фотометрические красные смещения (248 скоплений).

5. ОЦЕНКА РАЗМЕРА НЕОДНОРОДНОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ СКОПЛЕНИЙ С ПИКОМ ОКОЛО $z \approx 0.56$

Для исследования пространственного поведения избыточной плотности галактик поля около $z \sim 0.56$ вокруг положения гамма-всплеска GRB 021004 мы рассмотрели распределение красных смещений в прилегающих областях. Относительное расположение рассматриваемых областей показано на схеме (рис. 11). Центральная часть В2 размером $3^\circ \times 3^\circ$ практически совпадает в область на рис. 6. Она окружена восемью полями такого же размера.

Используя те же 6 упомянутых каталогов [27, 29–33], мы отобрали все скопления галактик с известным средним (фотометрическим и спектральным) красным смещением в 8 областях, окружающих центральную область В2. Применяя метод, описанный в разделе 4 для центральной области В2 (с самым высоким пиком на $z \approx 0.56$), мы построили распределения красных смещений (z) скоплений галактик аналогично тому, что показано на рис. 9, для каждой из этих 8 областей.

На рис. 12 показаны гистограммы распределений по z только для четырех полей из девяти (В1, В2, С1, С2), в которых количество обнаруженных скоплений возле $z \sim 0.56$ является наибольшим (северо-восточный квадрат на рис. 10). Видно, что пик около $z \sim 0.56$ в этих распределениях имеется только в областях В2, С1 и С2. В области В1 количество скоплений галактик с таким z меньше.

На рис. 13 показано изображение четырех полей В1, В2, С1, С2 (квадрат размером $6^\circ \times 6^\circ$), соответствующие схеме (рис. 11) и гистограммам (рис. 12), в которых количество скоплений галактик около $z = 0.56$ является наибольшим. На рис. 13 отмечены объекты из каталогов — центры скоплений галактик — с красным смещением около пика на $z \approx 0.56$.

Таким образом, по данным каталогов (конечно, с учетом их глубины) размер области с избыточной плотностью в распределении галактических скоплений с пиком на $z \approx 0.56$ можно оценить как $6^\circ - 8^\circ$.

6. ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основная цель этой статьи состоит в том, чтобы показать признаки кластеризации галактик поля на луче зрения на GRB 021004. Также мы проверяем надежность всех имеющихся признаков кластеризации в направлении и возле положения этого гамма-всплеска.

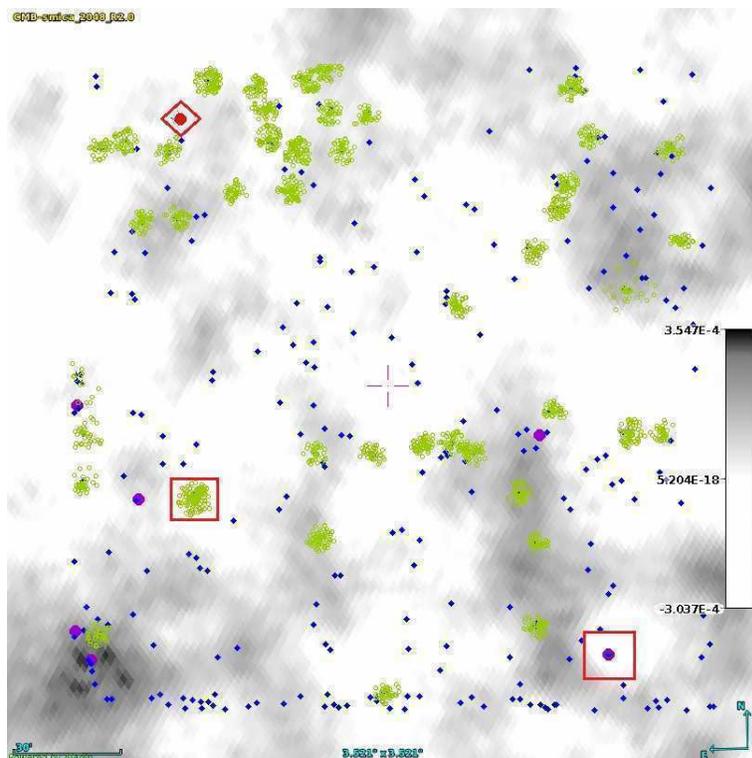


Рис. 10. Та же область, что изображена на рис. 6, но размером $3.5^\circ \times 3.5^\circ$. Фоновое изображение — это карта СМВ (SMICA) из архива миссии Planck. Отмечены два известных богатых скопления CL 0024+1654 ($z = 0.390$) and MS 0015.9+1609 ($z = 0.541$) и другие галактические скопления из каталогов. Кружок, обведенный ромбом, — это GRB 021004. Закрашенными кружками показаны скопления из каталога Абеля и Цвикки, ромбами отмечено положение скоплений из каталогов redMaPPer, NOCS, WHL и статей Саулдера и др., Огури и Темпеля и др.

- Первый признак — это распределение фотометрических красных смещений с пиком на $z \sim 0.56$ на глубоких снимках поля GRB 021004 (размером $4' \times 4'$), полученных на БТА; оценка была сделана по многоцветной *BVRI*-фотометрии БТА в направлении на этот гамма-всплеск.
- Второй признак — абсорбционный дублет Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803 \text{ \AA}$ на $z \approx 0.56$ в VLT/UVES спектрах послесвечения GRB 021004 и родительской галактики этого гамма-всплеска.
- Третий признак — кластеризация галактик в большей ($3^\circ \times 3^\circ$) области вокруг GRB 021004 с эффективным пиком возле $z \sim 0.56$ для распределений спектральных и фотометрических красных смещений по каталогам SDSS и BOSS, являющемуся частью каталога SDSS-III.
- И четвертым признаком может быть некоторая неоднородность на карте Planck, которая, возможно, вызвана эффектом Сюняева—Зельдовича для скоплений галактик возле положения GRB 021004.
- Кроме того, по данным шести каталогов размер всей неоднородности в распределении скопле-

ний галактик с пиком возле $z \approx 0.56$ был оценен как $6^\circ - 8^\circ$.

Во всех распределениях красных смещений на рис. 7, 9 и 12 явно различим пик на $z \approx 0.1$, который соответствует известной Великой стене Слоуна как комплексу сверхскоплений огромного размера $\sim 7^h$ [1, 2]. На тех же рисунках виден еще пик с $z \approx 0.4$, что может указывать на неоднородность с $z \sim 0.4$ в распределении скоплений галактик возле направления на GRB 021004. То же сверхскопление может также включать рентгеновское скопление CL0024+1654 с $z = 0.39$ (см. рис. 6 и 7). Что касается рентгеновского скопления MS0015.9+1609 с $z = 0.541$ на рис. 13, видно, что это скопление тоже содержится в каталогах, которые мы использовали, где оно попадает как раз в диапазон $0.54 < z < 0.57$, соответствующий пиковому бину на рис. 9 с $z \sim 0.56$.

Родительская галактика GRB 021004 с $z_{ph} = 2.225$ также учтена в распределении фотометрических красных смещений на рис. 4. Эта оценка z_{ph} была получена по *BVRI*-фотометрии БТА для родительской галактики гамма-всплеска с $B = 24^m 434 \pm 0^m 132$,
 $V = 24^m 006 \pm 0^m 099$, $R = 24^m 174 \pm 0^m 154$,

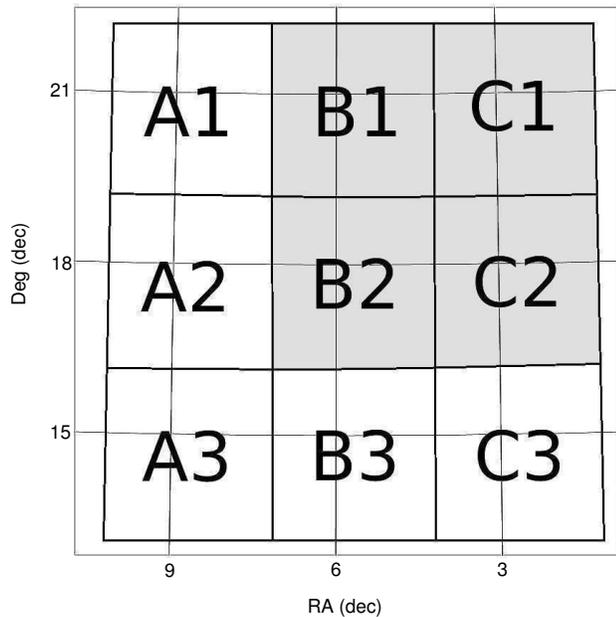


Рис. 11. Схема расположения восьми областей, окружающих центральную область B2.

$I = 23^m 437 \pm 0^m 170$. Спектроскопические измерения красного смещения для GRB 021004 составляют $z_{sp} = 2.3295$ [18] и 2.3304 [19]. Таким образом, фотометрическое красное смещение этой галактики z_{phot} , измеренное нами по наблюдениям на БТА, соответствует спектральному z с ошибкой 10%.

Здесь следует подчеркнуть, что оценки фотометрических красных смещений сразу для большой выборки галактик вплоть для предельной глубины (см. рис. 1) во всем поле гамма-всплеска можно получить при изучении свойств родительских галактик [16] гамма-всплесков. В настоящее время фотометрические красные смещения широко применяется во всех современных исследованиях скоплений галактик на разных z , что мы здесь и используем (см. разделы 4 и 5). В новой статье [36] речь идет о применении метода фотометрических красных смещений для 1227 галактик в Хаббловском сверхглубоком поле до 30-ой зв.вел. в полосе $F775W$ в диапазоне $0.4 < z < 1.5$. Здесь мы хотели бы также обратить внимание на другую новую статью [37], где речь идет о фотометрии в пяти фильтрах, а при оценках фотометрического красного смещения используется информация о морфологии галактик. В этой статье показано, что при использовании морфологических параметров галактик с $ugriz$ -фотометрией получается небольшое улучшение z_{ph} , в то время при меньшем количестве полос выигрыш получается существенный. Например, сочетание grz -фотометрии и морфологических параметров почти полностью покрывает

метрику фотометрических красных смещений по 5 полосам.

При анализе наших $BVRI$ -данных БТА мы используем диапазон красных смещений до $z = 4$, хотя число объектов с $z > 1$, достаточно ярких для такого анализа, становится все меньше (см. рис. 4). Соответственно, ошибки фотометрических красных смещений таких (и более далеких) объектов становятся больше, согласно [26], где ошибки оценок z исследовались специально. Пределы каталогов и $BVRI$ -данных БТА упоминаются в конце раздела 3.

Таким образом, многое зависит, в основном, от точности фотометрии (см. рис. 1). Здесь для отобранных для исследования объектов мы выбрали ошибку измерений $\sim 10\%$. Соответственно, для объектов на $z > 1$ требуемые времена экспозиции больше, чем те, что указаны в таблице 1. Кроме того, уже могут потребоваться и инфракрасные фильтры. Но, поскольку здесь нас интересует диапазон промежуточных красных смещений до $z < 0.7$, где уже есть каталоги с данными по z (см. конец раздела 3 и ссылки там же и начало раздела 4), для проверки наших вычислений мы используем эти фотометрические и спектральные z из каталогов.

Здесь нужно также сказать о спектроскопии в направлении послесвечения гамма-всплеска, о наших результатах и, в этой связи, о новых наблюдательных задачах.

Во всестороннем исследовании спектроскопических данных 73 GRB-послесвечения и обсуждение избыточной плотности галактик поля вокруг луча зрения на GRB/квазаров, проведенном в статье [17], также упоминается дублет $Mg\ II\ \lambda\lambda 2796, 2803\ \text{\AA}$, о котором шла речь выше.

Если избыток промежуточных систем действительно имеет место, то можно найти избыток галактик поля вокруг положений гамма-всплесков, хотя более ранние исследования не выявили аномальной кластеризации галактик (по сравнению с распределением квазаров) на $z \sim 0.3$ вокруг луча зрения на гамма-всплески [17]. Кроме того, было сделано предположение, что большинство коротких гамма-всплесков в галактиках ранних типов будет происходить в скоплениях, и три таких взаимосвязи уже было обнаружено [43].

Было убедительно доказано, что длинные гамма-всплески ассоциируются с коллапсом ядра очень массивных звезд [39–41]. Подобно массивным сверхновым, коллапс массивных звездных ядер из железа приводит к образованию компактного объекта (коллапсара), что сопровождается релятивистским выбросом большой доли массы

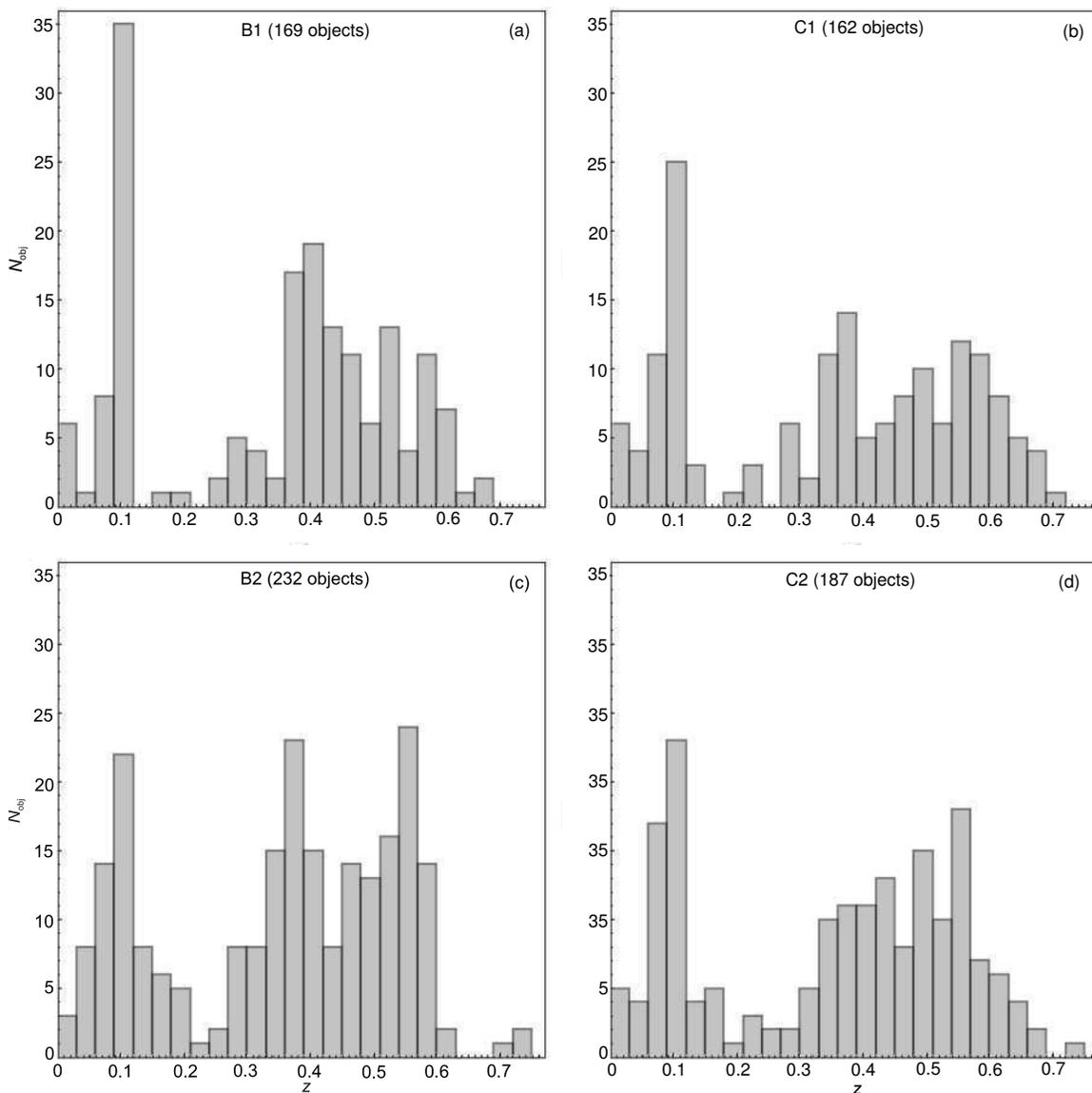


Рис. 12. Гистограммы распределений по z для четырех полей (B1, B2, C1, C2), в которых количество обнаруженных скоплений галактик около $z \sim 0.56$ является наибольшим — это северо-восточный квадрат на рис. 11. Над каждой гистограммой указано название поля, для которого она была построена, и количество объектов в нем с z , известным из каталогов.

звезды-прародителя, при этом возникают внутренние ударные волны, порождающие сам гамма-всплеск [5].

Известно [42], что измерения рентгеновской поверхностной яркости скоплений (включая такие скопления как CL0024+1654 с $z = 0.39$ и MS0015.9+1609 с $z = 0.541$) можно использовать для оценки углового диаметра и расстояния до этих структур. А именно, определение расстояния до сверхновых и гамма-всплесков, являющихся результатом коллапса компактных объектов звездных масс, становится главной наблюдательной задачей при определении основного параметра — полного выброса энергии, связанного с таким со-

бытием. Коллапс массивных звездных ядер может быть связан с кварковым фазовым переходом в компактных объектах, который приводит к нейтринным, гравитационным и фотонным сигналам от массивных сверхновых (например, SN 1987A) и гамма-всплескам. Также очевидно, что для малых и промежуточных красных смещений распределение электромагнитных и нейтринных сигналов, ассоциированных с коллапсом ядра, по небесной сфере может быть неизотропным [43], демонстрируя кластеризацию галактик, в которых образование компактных объектов происходит благодаря эволюции массивных звезд.

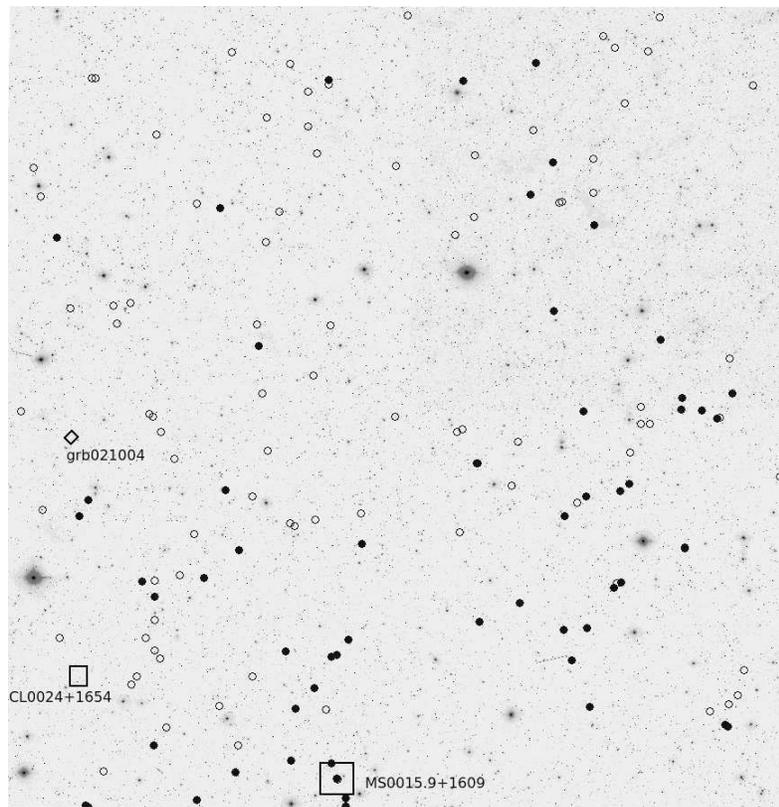


Рис. 13. Изображение 4 полей В1, В2, С1, С2, соответствующих схеме на рис. 11 и гистограммам на рис. 12 — квадрат размером $6^\circ \times 6^\circ$. Отмечены объекты из каталогов — центры скоплений галактик — с красным смещением возле пика на $z = 0.56$. Заполненные кружки обозначают объекты, попадающие в диапазон $0.54 < z < 0.57$, соответствующий пиковому бину. Пустые кружки — это объекты из смежных бинов $0.51 < z < 0.54$ и $0.57 < z < 0.6$.

В заключение мы хотели бы также подчеркнуть, что поскольку гамма-всплески обнаруживаются на все более и более далеких космологических расстояниях с красным смещением более 9.2 [13], это ставит новые дополнительные вопросы, которые крайне важны для наблюдательной космологии. Каковы красные смещения, на которых распределение гамма-всплесков по небу становится однородным? И каковы красные смещения, на которых такие всплески (которые теперь связывают с коллапсом компактных объектов звездных масс) уже не наблюдаются?

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Ю. В. Барышеву за плодотворную дискуссию и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. K. Sheth and A. Diaferio, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **417**, 2938 (2011).
2. M. Einasto, H. Lietzen, M. Gramann, et al., *Astron. and Astrophys.* **595**, A70 (2016).
3. H. Lietzen, E. Tempel, L. J. Liivamägi, et al., *Astron. and Astrophys.* **588**, L4 (2016).
4. R. G. Clowes, K. A. Harris, S. Raghunathan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 2910 (2013).
5. T. Piran, *Phys. Reports* **314**, 575 (1999).
6. L. G. Balázs, Z. Bagoly, J. E. Hakkila, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452**, 2236 (2015).
7. I. Horváth, J. Hakkila, and Z. Bagoly, *Astron. and Astrophys.* **561**, L12 (2014).
8. M. L. Khabibullina, O. V. Verkhodanov, and V. V. Sokolov, *Astrophysical Bulletin* **69**, 472 (2014).
9. C. A. Meegan, G. J. Fishman, R. B. Wilson, et al., *Nature* **355**, 143 (1992).
10. D. Fargion, arXiv:1408.0227 (2014).
11. S. Raghunathan, R. G. Clowes, L. E. Campusano, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **463**, 2640 (2016).
12. S.-F. S. Chen, R. A. Simcoe, P. Torrey, et al., *Astrophys. J.* **850**, 188 (2017).
13. V. Sudilovsky, J. Greiner, A. Rau, et al., *Astron. and Astrophys.* **552**, A143 (2013).
14. M. Arabsalmani, P. Møller, D. A. Perley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **473**, 3312 (2018).
15. T. A. Fatkhullin, A. A. Vasil'ev, and V. P. Reshetnikov, *Astronomy Letters* **30**, 283 (2004).

16. V. V. Sokolov, T. A. Fatkhullin, A. J. Castro-Tirado, et al., *Astron. and Astrophys.* **372**, 438 (2001).
17. G. E. Prochter, J. X. Prochaska, and S. M. Burles, *Astrophys. J.* **639**, 766 (2006).
18. S. D. Vergani, P. Petitjean, C. Ledoux, et al., *Astron. and Astrophys.* **503**, 771 (2009).
19. A. J. Castro-Tirado, P. Møller, G. García-Segura, et al., *Astron. and Astrophys.* **517**, A61 (2010).
20. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
21. Y. N. Parijskij, O. P. Zhelenkova, P. Thomasson, et al., *EAS Publ. Ser.* **61**, 439 (2013).
22. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
23. W. A. Baum, *IAU Symp.* **15**, 390 (1962).
24. M. Bolzonella, J.-M. Miralles, and R. Pelló, *Astron. and Astrophys.* **363**, 476 (2000).
25. D. Calzetti, L. Armus, R. C. Bohlin, et al., *Astrophys. J.* **533**, 682 (2000).
26. Y. V. Baryshev, I. V. Sokolov, A. S. Moskvitin, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 311 (2010).
27. E. S. Rykoff, E. Rozo, D. Hollowood, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **224**, 1 (2016).
28. E. S. Rykoff, E. Rozo, M. T. Busha, et al., *Astrophys. J.* **785**, 104 (2014).
29. C. Saulder, E. van Kampen, I. V. Chilingarian, et al., *Astron. and Astrophys.* **596**, A14 (2016).
30. G. O. Abell, H. G. Corwin, Jr., and R. P. Olowin, *Astrophys. J. Suppl.* **70**, 1 (1989).
31. Z. L. Wen and J. L. Han, *Astrophys. J.* **807**, 178 (2015).
32. R. R. Gal, P. A. A. Lopes, R. R. de Carvalho, et al., *Astron. J.* **137**, 2981 (2009).
33. M. Oguri, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **444**, 147 (2014).
34. Z. L. Wen, J. L. Han, and F. S. Liu, *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 34 (2012).
35. E. Tempel, A. Tamm, M. Gramann, et al., *Astron. and Astrophys.* **566**, A1 (2014).
36. J. Brinchmann, H. Inami, R. Bacon, et al., *Astron. and Astrophys.* **608**, A3 (2017).
37. J. Y. H. Soo, B. Moraes, B. Joachimi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **475**, 3613 (2018).
38. M.-S. Shin and E. Berger, *Astrophys. J.* **660**, 1146 (2007).
39. H. Yüksel and M. D. Kistler, *Phys. Let. B* **751**, 413 (2015).
40. M.-H. Li and H.-N. Lin, *Astron. and Astrophys.* **582**, A111 (2015).
41. T. N. Ukwatta and P. R. Woźniak, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455**, 703 (2016).
42. R. F. L. Holanda, V. C. Busti, L. R. Colaço, et al., *J. Cosmology Astroparticle Phys.* **8**, 055 (2016).
43. A. Gomboc, *Contemporary Physics* **53**, 339 (2012).

The Excess Density of Field Galaxies near $z \sim 0.56$ around the Gamma-Ray Burst GRB 021004 Position

I. V. Sokolov, A. J. Castro-Tirado, O. P. Zhelenkova, I. A. Solovyev, O. V. Verkhodanov, and V. V. Sokolov

We test for reliability any signatures of field galaxies clustering in the GRB 021004 line of sight. The first signature is the GRB 021004 field photometric redshifts distribution based on the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences observations with a peak near $z \sim 0.56$ estimated from multicolor photometry in the GRB direction. The second signature is the Mg II $\lambda\lambda 2796, 2803 \text{ \AA}$ absorption doublet at $z \approx 0.56$ in VLT/UVES spectra obtained for the GRB 021004 afterglow. The third signature is the galaxy clustering in a larger (of about $3^\circ \times 3^\circ$) area around GRB 021004 with an effective peak near $z \sim 0.56$ for both the spectral and photometric redshifts from a few catalogs of clusters based on the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) and Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) as a part of SDSS-III. From catalog data the size of the whole inhomogeneity in distribution of the galaxy cluster with the peak near $z \approx 0.56$ was also estimated as about 6° – 8° or 140–190 Mpc. A possibility of inhomogeneity (a galaxy cluster) near the GRB 021004 direction can be also confirmed by an inhomogeneity in cosmic microwave background related with the Sunyaev–Zeldovich effect.

Keywords: cosmology: observations—large scale structure of Universe—galaxies: distances and redshifts—gamma-ray burst: individual: GRB 021004