

УДК 524.82, 524.83, 524.7–732

КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТИЧЕСКИЕ ТЕСТЫ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНЫХ THESEUS–БТА НАБЛЮДЕНИЙ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ

© 2020 С. И. Широков^{1*}, И. В. Соколов^{2**},
В. В. Власюк³, Л. Амати⁴, В. В. Соколов³, Ю. В. Барышев⁵

¹Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук, Санкт-Петербург, 196140 Россия

²Институт астрономии Российской академии наук, Москва, 119017 Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁴Институт космической астрофизики и физики космоса, Болонья, I-40129 Италия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

Поступила в редакцию 10 апреля 2019 года; после доработки 5 июля 2020 года; принята к публикации 5 июля 2020 года

Современная многоканальная (multimessenger) астрономия — это мощнейший инструмент для проведения критических тестов стандартной космологической модели в широком интервале красных смещений до $z \sim 10$. Эта проверка принципиально важна в контексте дискуссии, связанной с расхождением локальных и глобальных оценок космологических параметров. Мы представляем обзор многоканальных наблюдений гамма-всплесков, осуществляемых в настоящее время и планируемых в рамках программы кооперации THESEUS–БТА. Такие наблюдения предоставляют уникальную возможность проверки фундаментальных оснований космологических моделей: теории гравитации, космологического принципа однородности и изотропности крупномасштабного распределения материи и парадигмы расширения пространства. Обсуждается важная роль различных селекционных эффектов, ведущих к систематическим искажениям реальных космологических соотношений.

Ключевые слова: космология: наблюдения — крупномасштабная структура Вселенной — гамма-всплески

1. ВВЕДЕНИЕ

Недавняя дискуссия о стандартной космологической модели, включающей доминирующую темную энергию и холодную небарионную темную материю (Λ CDM) вскрыла «возможный кризис в космологии» (Baryshev 2015, Di Valentino et al. 2020a; b, Handley 2019, Lin et al. 2019, Riess et al. 2020, Verde et al. 2019), который демонстрирует, что крупномасштабная космологическая физика содержит несколько принципиальных неопределенностей. Среди них особенно важны следующие проблемы: отсутствие ключевого решения о геометрии Вселенной (закрытая, плоская и открытая модели, т.е. параметр кривизны $k = +1, 0, -1$) (Di Valentino et al. 2020a; b, Handley 2019), природа и величина динамически доминирующей темной энергии и небарионной темной материи (Ω_{de} , w и Ω_m) (Colin et al. 2019,

Demianski et al. 2019, Di Valentino et al. 2020a, Makarov and Karachentsev 2011), различие между локальным и глобальным значениями постоянной Хаббла H_0 (Lin et al. 2019, Riess et al. 2018; 2020, Tully et al. 2016, Verde et al. 2019). Наблюдаемые разногласия в оценках базисных параметров стандартной космологической модели (СКМ) могут указывать на необходимость новой физики и, возможно, на существенные изменения в Λ CDM-сценарии (Di Valentino et al. 2020a; b, Handley 2019, Lin et al. 2019, Riess et al. 2020, Verde et al. 2019).

Эта новая ситуация в космологии стимулирует тщательную проверку фундаментальных физических законов на микро- и макромасштабах одновременно. Современная физика использует наблюдаемую Вселенную как часть физической лаборатории, где должны быть проверены фундаментальные физические законы. Такие базовые теоретические предположения как: постоянство фундаментальных констант c , G , m_p и m_e , Лоренц-

*E-mail: arhath.sis@yandex.ru

**E-mail: ilia.v.sokolov@gmail.com

инвариантность, принцип эквивалентности и квантовые принципы теории гравитации — теперь могут быть исследованы теоретической физикой (de Rham 2014, Rubakov and Tinyakov 2008, Uzan 2003) и современными астрофизическими наблюдениями (Cardoso and Pani 2019, Clifton et al. 2012, De Rham et al. 2017, Giddings 2017, Ishak 2018, Uzan 2010).

Современная теоретическая физика и экспериментальная физика проверяют основания стандартной космологической модели. В частности, модифицированные теории гравитации меняют теорию формирования космических структур (Bartelmann et al. 2019, Clifton et al. 2012, Ishak 2018, Slosar et al. 2019) (обзор Ishak (2018) содержит 900 ссылок).

Фактически в начале 21 века возникла новая космология, в которой появились новые вопросы. В частности, известный список космологических проблем Тёрнера содержит такие вопросы: Какая физика лежит в основе инфляции? Как возникла барионная асимметрия? Какова природа частиц небарионной темной материи? Почему состав нашей Вселенной выглядит так «абсурдно» по сравнению с лабораторной физикой? Какова природа темной энергии? Ответы на эти вопросы открывают глубокую взаимосвязь между фундаментальной физикой и космологией: «нас могут ожидать большие сюрпризы — изменение констант со временем или новая теория гравитации, в которой исчезает необходимость существования темной материи и темной энергии» (Turner 2002).

Та видимая материя Вселенной, которую мы можем действительно наблюдать, является неожиданно малой (около 0.5%) частью предсказываемого содержания материи, и это выглядит как «абсурдная Вселенная» (Turner 2003). Более того, около 95% космологической материи (темная энергия и небарионное темное вещество), определяющих динамику целой Вселенной, имеет неизвестную физическую природу. Тёрнер подчеркивает, что «современная СКМ предсказывает с высокой точностью значения темной энергии и небарионной холодной темной материи, но мы должны всё это наполнить смыслом» (Turner 2002).

Появление многоканальной астрономии (multimessenger astronomy), включающей наблюдения гамма-всплесков (gamma-ray burst — GRB), открывает новые возможности для развития критических космологических тестов СКМ, особенно в свете предстоящей миссии Transient High Energy Sky and Early Universe Surveyor (THESEUS) (Amati et al. 2018, Strata et al. 2018). Предыдущие обзоры GRB-космологии были сделаны в работах Petrosian et al. (2009), Wang et al. (2015). В настоящей работе мы показываем, что

важный вклад в GRB-космологию может быть получен в совместных оптических наблюдениях на базе 6-м БТА САО РАН (Vlasyuk 2018).

В нашей статье мы принимаем подход «практической космологии» Сэндэйджа (Sandage 1995, Sandage 1997), берущий начало в работах Hubble (1937), Hubble and Tolman (1935). Согласно ему, следует проверять начальные принципы космологических моделей, применяя новые астрономические возможности. Мы приводим обзор приложения многоканальных наблюдений GRB для проведения классических космологических тестов, описанных в Baryshev and Teerikorpi (2012). Акцент делается на те наблюдательные космологические тесты, с помощью которых можно проверить базовые принципы, лежащие в основе СКМ. В частности, мы рассматриваем многоканальную астрономию как инструмент для проверки теории гравитации, космологического принципа и парадигмы расширения пространства.

В разделе 2 формулируются базисные принципы СКМ, которые рассматриваются для наблюдательной проверки средствами THESEUS—БТА. Такая проверка может укрепить обоснованность СКМ или указать на ограниченность ее применения. Теория гравитации в сильных полях и ее проверка с помощью GRB-наблюдений рассматриваются в разделе 3. Раздел 4 описывает GRB в приложении к проверке космологического принципа. В разделе 5 обсуждается диаграмма Хаббла GRB как инструмент для проверки парадигмы расширения пространства и тест Вилсона на космологическое замедление времени. Заключение дается в разделе 6.

2. ПРОВЕРКА БАЗИСА СКМ С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ GRB

Общепризнанно, что СКМ успешно объясняет главные космологически важные наблюдения (Baryshev and Teerikorpi 2012, Peacock 1999, Peebles 1993). Следующие положения СКМ являются фундаментальными физическими принципами:

- общая теория относительности (ОТО): гравитация описывается метрическим тензором g_{ik} в искривленном римановом пространстве \mathcal{R} ;
- космологический принцип Эйнштейна: строгая математическая однородность для динамически важной материи, т.е. $\rho(\vec{r}, t) = \rho(t)$, $p(\vec{r}, t) = p(t)$, $g_{ik} = g_{ik}(t)$ (на всех масштабах r плотность материи ρ , давление p и пространственная метрика g_{ik} зависят только от времени);

- расширение пространства: расстояние между галактиками зависит от времени $r(t) = S(t)\chi$, где $S(t)$ — масштабный фактор, а χ — сопутствующее расстояние, которому соответствует наблюдаемое космологическое красное смещение, интерпретируемое как эффект Леметра, т.е. растяжение пространства (не эффект Доплера).

В начале 21 века профессиональное космологическое сообщество стало активно обсуждать обоснованность и возможность проверки этих трех концептуальных «столпов» СКМ (Baryshev 2015).

Современные достижения теоретической физики, в особенности различные модификации ОТО и квантовый аспект теории гравитации, требуют более широкой наблюдательной проверки базовых принципов СКМ.

Сегодня физики рассматривают наблюдаемую Вселенную как часть «космической лаборатории», где необходимо проверять фундаментальные законы в широком интервале красных смещений со все большей точностью. Наблюдения GRB по программе THESEUS (Amati et al. 2018, Strata et al. 2018) предоставят такую возможность до красных смещений $z \sim 10$. Возможности миссии THESEUS в гамма-, рентгеновском и инфракрасном диапазонах и оптические наблюдения на 6-м БТА САО РАН (Sokolov et al. 2018b, Vlasyuk 2018) могут играть ключевую роль в проверке базиса СКМ. В частности, новые наблюдения позволяют проверить космологический принцип, ОТО и ее модификации, а также парадигму расширения пространства.

Наша стратегия:

- проверка теории гравитации с помощью наблюдений массивных коллапсирующих ядер сверхновых (длинные GRB) и слияний двойных нейтронных звезд (короткие GRB) в широком диапазоне длин волн: от гамма до ИК;
- проверка космологического принципа однородности и изотропности пространственного распределения родительских галактик GRB и распределения галактик вдоль луча зрения в направлении на GRB;
- проверка парадигмы расширения пространства с помощью построения диаграммы Хаббла для GRB до больших красных смещений, а также с помощью анализа эффекта замедления времени в импульсах GRB, послесвечениях GRB и кривых блеска коллапсирующих ядер SN.

Эти тесты фундаментально важны для построения адекватной космологической модели, которая включает современные многоканальные наблюдения GRB.

2.1. Проверка теории гравитации с помощью наблюдений GRB

Наиболее важное базовое предположение Λ CDM-модели — ОТО. Она была успешно проверена в слабых гравитационных условиях. Но сегодня теоретическая физика предлагает ряд новых возможностей для модификации ОТО (см. Cardoso and Pani 2019, Clifton et al. 2012, Giddings 2017, Ishak 2018). Поэтому критические космологические тесты должны включать проверку современных альтернативных теорий гравитации как в сильных полях, так и на космологических масштабах. Фактически космологическая модель является решением уравнений гравитационного поля для случая космологического крупномасштабного распределения материи.

2.2. Проблема объединения гравитации с другими фундаментальными силами

Будучи прототипом геометрического подхода к гравитации, ОТО не является квантовой теорией, и потому не подчиняется квантовым принципам современной физики. Наиболее фундаментальная проблема современной теоретической физики — это построение квантовой теории гравитации, которая объединит её с другими фундаментальными квантовыми взаимодействиями: сильным, слабым и электромагнитным (Amelino-Camelia 2000, Giddings 2017, Hawking 2014, Wilczek 2015).

В целом есть два альтернативных подхода для включения гравитации в единую теорию: 1) модификация существующих теорий фундаментальных взаимодействий на принципах искривленной геометрии (Rovelli 2004) и 2) развитие квантовой полевой теории гравитации, основанной на общих принципах с другими фундаментальными физическими взаимодействиями (пространство–время Минковского, локализуемость положительной плотности энергии поля, законы сохранения энергии–импульса, квантовый принцип неопределенности и кванты энергии гравитационного поля).

Ожидается, что будущая «единая теория» физики объединит фундаментальные силы (электромагнитные, слабые, сильные и гравитационные), а также свяжет силы (бозоны) и вещество (фермионы) через преобразования суперсимметрии (Wilczek 2015). Feynman et al. (1995) рассматривал построение квантовой полевой теории гравитации, основанной на общих принципах с другими фундаментальными силами, как поля симметричного тензора второго ранга в пространстве Минковского. Развитию фейнмановского подхода посвящены работы Baryshev (2017), Baryshev and Teerikorpi (2012), Baryshev and Oschepkov (2019), Sokolov (2015; 2016; 2019), Sokolov and Baryshev (1980),

в которых были рассмотрены новые предсказания для структуры релятивистских компактных объектов (РКО) и для космологического решения уравнений гравитационного поля. Необходимо более тщательно изучать и проверять предсказания обоих подходов (геометрического и квантово-полевого) с помощью астрофизических наблюдений РКО и космологических процессов.

2.3. Проверка эффектов сильной гравитации через наблюдения GRB

Космические и наземные многоканальные наблюдения GRB могут наложить ограничения на список возможных теорий гравитации. Мы инициируем международную наблюдательную программу по мониторингу GRB, детектируемых космическими миссиями Swift, Fermi, INTEGRAL, Lomonosov и др. Программа ставит своей целью поиск оптических/электромагнитных источников, ассоциируемых с GRB, с сигналами нейтрино и гравитационно-волновых (ГВ) событий, которые регистрируются the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) и экспериментом Virgo. В этой коллаборации мы развиваем будущий проект космической миссии THESEUS, которая направлена на максимально полное использование уникальных особенностей GRB для задач космологии и многоканальной астрофизики. Международная наблюдательная программа мониторинга GRB уже осуществляется посредством оптических наблюдений на 6-м БТА САО (Sokolov et al. 2018b, Vlasyuk 2018). Мы наблюдаем за быстрой переменностью оптических потоков послесвечения GRB как в режиме прямых изображений, так и в спектроскопическом режиме. На основе возможностей быстрой фотометрии БТА–MANIA можно обнаружить очень короткую оптическую переменность ($\tau = R/c$). Таким образом, эти наблюдения особенно важны для проверки сильной гравитации, потому что она определяет размер РКО. Наблюдаемая поляризация и возможные эффекты на поверхности РКО (магнитные поля, горячие пятна) могут дать ключевую информацию о природе РКО.

В частности, ОТО предсказывает существование черных дыр с массами $M > 3 M_{\odot}$, в то время как в квантовом полевом подходе к гравитации критическая масса составляет $6.7 M_{\odot}$ для кварковых РКО (Sokolov 2015; 2016; 2019). Рисунок 1 представляет «необъяснимый» наблюдаемый провал масс (mass gap) на интервале $2-5 M_{\odot}$ между нейтронными звездами и кандидатами в черные дыры (Ozel et al. 2012). Природа РКО с массами $M > 5 M_{\odot}$ является лабораторией для критической проверки гравитационной теории.

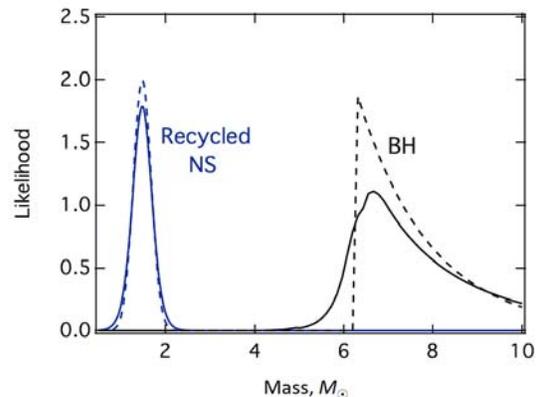


Рис. 1. Предполагаемое распределение масс РКО для разных популяций нейтронных звезд (слева) и кандидатов в черные дыры (справа), обсуждаемое Ozel et al. (2012). Пунктирные линии соответствуют наиболее вероятным значениям параметров. Для популяции нейтронных звезд пик на $M_0 = 1.48 M_{\odot}$ и $\sigma = 0.20 M_{\odot}$. Для случая кандидатов в черные дыры пик на $M_c = 6.32 M_{\odot}$ с разбросом $M_{scale} = 1.61 M_{\odot}$. Сплошные линии представляют взвешенное распределение масс для каждой популяции.

На данный момент только для события GW 170817/GRB 170817A зарегистрирован ГВ-сигнал от слияния двух РКО с массами нейтронных звезд и электромагнитное событие, что дает возможность прямой регистрации внутренней структуры нейтронных звезд (Abbott et al. 2017). Эти наблюдения подтверждают гипотезу, что событие GW 170817 было результатом слияния двух нейтронных звезд в NGC 4993 с последующим коротким GRB 170817A. Будущие наблюдения GRB с помощью THESEUS–БТА существенно увеличат статистику подобных событий и, следовательно, внесут ключевой вклад в проверку теории гравитации как базиса космологических моделей.

3. ПРОВЕРКА КОСМОЛОГИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА С ПОМОЩЬЮ GRB-НАБЛЮДЕНИЙ

Источниками GRB являются взрывы массивных сверхновых и слияния двойных РКО в их родительских галактиках (Sokolov et al. 2018b). Они «маркируют» галактики до больших красных смещений, следовательно, наблюдения GRB могут использоваться для изучения очень больших пространственных масштабов распределения видимой материи.

3.1. Крупномасштабное распределение галактик

Современный прогресс в спектральных и фотометрических обзорах красных смещений для широкоугольных (например, 2dF, SDSS, BOSS) и

глубоких полей (например, COSMOS) ведет к открытию очень больших структур на всех наблюдаемых красных смещениях. Прямые наблюдения пространственного распределения видимой материи (галактик) показывают неоднородность на масштабах много больше, чем стандартная корреляционная длина Пибблса $r_0 \sim 5$ Мпк.

Сегодня наблюдательно установленные масштабы неоднородности достигают нескольких сотен Мпк. Суперскопление галактик Laniakea (Tully et al. 2014) и Dipole Repeller вместе с Shapley Attractor (Hoffman et al. 2017) в локальной Вселенной достигают размера порядка 200 Мпк. Слоановская великая стена имеет размер примерно 100 Мпк на расстоянии около 200 Мпк (Einasto et al. 2016, Gott III et al. 2005). Обзор SDSS/CMAS открыл Великую стену BOSS с размерами порядка 300 Мпк на расстоянии $d \sim 2000$ Мпк (Lietzen et al. 2016). В ультраглубоком поле галактик (UDHF) при проведении фотометрического обзора красных смещений COSMOS были обнаружены свидетельства существования сверхбольших скоплений галактик с размерами около 1000 Мпк на $z \sim 1$ (Nabokov and Baryshev 2010b, Shirokov et al. 2016).

3.2. Крупномасштабное распределение GRB

Исследования пространственного распределения GRB с известными красными смещениями также выявили очень большие неоднородные структуры, хотя и с существенной ошибкой. Гигантское кольцо GRB диаметром 1720 Мпк на красном смещении $0.78 < z < 0.86$ было обнаружено Balázs et al. (2015). Вероятность того, что эта кольцеобразная структура образовалась случайно, равна 2×10^{-6} . Пространственное распределение 244 GRB было проанализировано как составляющая часть миссии Swift с использованием метода ξ -функции Пибблса (Li and Lin 2015). Данные авторы нашли корреляционную длину $r_0 \approx 388 h^{-1}$ Мпк, $\gamma = 1.57 \pm 0.65$ (при уровне значимости 1σ), а масштаб однородности составил $r \approx 7700 h^{-1}$. Эти факты требуют пересмотра базовых принципов Λ CDM-модели об однородности и изотропности распределения материи и ее эволюции с космическим временем.

3.3. Фрактальные свойства пространственного распределения GRB

В общей физике фрактальные структуры естественно возникают в фазовых переходах, динамическом хаосе, странных аттракторах и других физических феноменах. Фракталы характеризуются корреляциями по степенному закону в широком

интервале масштабов. Фрактальная модель пространственного распределения галактик с фрактальной размерностью, близкой к критическому значению $D = 2$, хорошо описывает наблюдательные данные для множества обзоров красных смещений (Baryshev and Teerikorpi 2012, Gabrielli et al. 2005).

Как показано Gabrielli et al. (2005) и Baryshev and Teerikorpi (2012), приведенная корреляционная функция Пибблса (Peebles 1993) $\xi(r)$ сильно искажается границами реальной выборки. Для получения робастных статистических характеристик пространственного распределения галактик следует использовать полную корреляционную функцию, называемую также функцией условной плотности $\Gamma(r)$. В частности, для фрактального пространственного распределения наклон степенной функции $\Gamma(r) \propto r^{-\gamma}$ дает робастную оценку фрактальной размерности $D = 3 - \gamma$ (для однородного распределения $\gamma = 0$ и $D = 3$).

Условная плотность и попарные расстояния как методы фрактального анализа были предложены Grassberger (1983a; b). Анализу условной плотности в главных выборках галактик были посвящены работы Gabrielli et al. (2005), Baryshev and Teerikorpi (2012) и Sylos Labini et al. (2014). Метод попарных расстояний был развит в работах Raikov and Orlov (2011), Shirokov et al. (2017). В статьях Gerasim et al. (2015), Raikov et al. (2010) была оценена фрактальная размерность выборки GRB методом попарных расстояний. Они определили значение фрактальной размерности в интервале $D = [2.2; 2.7]$, но только на масштабах 50 Мпк.

В статье Shirokov et al. (2017) были представлены новые модифицированные методы условной плотности и попарных расстояний, которые позволяют оценить фрактальную размерность на полном интервале масштабов для данной выборки. В качестве верификации результатов нормализованная условная плотность и попарные расстояния для фрактальных модельных каталогов источников GRB дают оценки фрактальной размерности $D \approx 2.0$, $D \approx 2.5$ и $D \approx 3$, на которых незначительно сказываются (закладываемые в метод) эффекты наблюдательной селекции (после учета селекции методы давали завышенную оценку на $\Delta D \approx 0.1$). Для случая полной небесной сферы метод условной плотности дает фрактальную размерность наблюдаемых источников GRB $D = 2.6 \pm 0.12$ на масштабах $r = [1.5; 2.5]$ Гпк и $D = 2.6 \pm 0.06$ на масштабах $r = [1.5; 5.5]$ Гпк. Метод попарных расстояний дает устойчивую степенную зависимость с $D = 2.6 \pm 0.06$ и незначительно меняется на интервале линейных масштабов $l = [1.5; 5.5]$. Следовательно, на масштабах около $[1.5; 5]$ Гпк оба метода

анализа пространственной структуры источников GRB дают одинаковую степень корреляции, которая после внесения поправки за учет селекции составляет $D \approx 2.5$. Однако количество GRB с измененными красными смещениями в анализируемых выборках все еще очень мало ($N < 300$), и приведенные выше оценки являются предварительными результатами, а сами методы показали себя перспективным инструментом исследования крупномасштабного распределения источников GRB.

3.4. Изотропность распределения GRB

Изотропность распределения GRB на небесной сфере по данным Fermi, BATSE и Swift анализировалась в статье Ripa and Shafieloo (2018). Авторы рассмотрели наблюдаемые свойства GRB и сделали вывод о том, что «...результаты подтверждают изотропность». Однако анизотропность распределения GRB была выявлена рядом исследователей: Balázs et al. (2015), Gerasim et al. (2015), Raikov et al. (2010), Shirokov et al. (2017). Например, была обнаружена пространственно изолированная группа из пяти GRB с координатами $23^{\text{h}}50^{\text{m}} < \alpha < 0^{\text{h}}50^{\text{m}}$ и $5^{\circ} < \delta < 25^{\circ}$ на красном смещении $0.81 < z < 0.97$, а также найдены группы GRB в нескольких направлениях на небе.

Следует подчеркнуть, что однородность и изотропность пространственного распределения вещества представляют различные свойства крупномасштабной структуры (Baryshev and Teerikorpi 2012, Gabrielli et al. 2005, Sylos Labini et al. 2014). Например, фрактальное распределение материи может иметь статистическую изотропность и одновременно быть сильно неоднородным, при этом принцип Коперника будет выполняться везде (Sylos Labini and Baryshev 2010). Наши результаты по оценке фрактальной размерности D близки к ее критическому значению $D_{\text{crit}} = 2$ на очень большом интервале масштабов и демонстрируют, что такая ситуация может также реально существовать и в пространственном распределении GRB. Будущие наблюдения THESEUS–BTA существенно увеличат количество GRB с известными красными смещениями и, следовательно, позволят наложить ограничения на космологический принцип однородности и изотропности видимого и темного пространственного (вдоль луча зрения) распределения материи.

3.5. Космическая томография через наблюдения GRB

3.5.1. Глубокие узкоугольные обзоры галактик

Важная цель космологии заключается в установлении наблюдательного предела на размеры круп-

нейших структур в видимом распределении галактик. Недавние глубокие спектральные и мультиполосные фотометрические обзоры галактик предоставили новую возможность оценки масштаба однородности, после которого распределение видимой материи становится равномерным. Статистический анализ флуктуаций числа галактик для ряда узкоугольных глубоких обзоров (COSMOS, HUDF, ALHAMBRA) был рассмотрен Nabokov and Baryshev (2010a; b), Shirokov et al. (2016).

Наблюдательный тест «космической томографии» реальных крупномасштабных структур (имеющих огромный угловой размер на небе) был предложен Nabokov and Baryshev (2010b). Он станет возможным при большом числе узкоугольных (в несколько угловых минут) очень глубоких многополосных фотометрических обзоров в узлах сетки, покрывающих небо (с ячейками в несколько градусов и более). Увеличение числа узлов сетки может увеличивать разрешение сверхбольшой структуры в угловом масштабе. Преимущество этого метода в том, что очень глубокие обзоры слабых галактик позволяют достигнуть высокого углового разрешения, необходимого для наблюдений сверхбольших пространственных структур.

3.5.2. Космическая томография THESEUS–BTA

Важным приложением этого метода является то, что направления на GRB могут быть рассмотрены как узлы сетки. В этом случае наблюдения глубоких полей, которые нужны для исследований родительских галактик GRB, играют роль узлов сетки (Baryshev et al. 2010, Sokolov et al. 2016). Результатом такой наблюдательной программы может быть построение 3D-карты «суперструктур» с помощью обработки корреляций между соседними радиальными распределениями красных смещений, например, с целью космической томографии наблюдаемой Вселенной. Примером такого узла возможной будущей сетки является глубокое поле BTA GRB 021004. На рис. 2 показан прямой снимок с BTA, центрированный на положение родительской галактики GRB 021004 (Baryshev et al. 2010, Sokolov et al. 2018a; 2016). Красное смещение измеряется для каждой слабой галактики в поле, где число галактик $dN(z)$ в бинах красного смещения dz представлено на рис. 3. Сглаженные пики соответствуют скоплениям галактик вдоль луча зрения в направлении на GRB.

Наблюдаемое распределение галактик вдоль луча зрения дает информацию о неоднородном распределении видимой материи в фиксированном направлении на небе. Статистический анализ сетки таких полей позволит провести томографию крупномасштабного распределения галактик на максимально оптически доступных масштабах (Nabokov

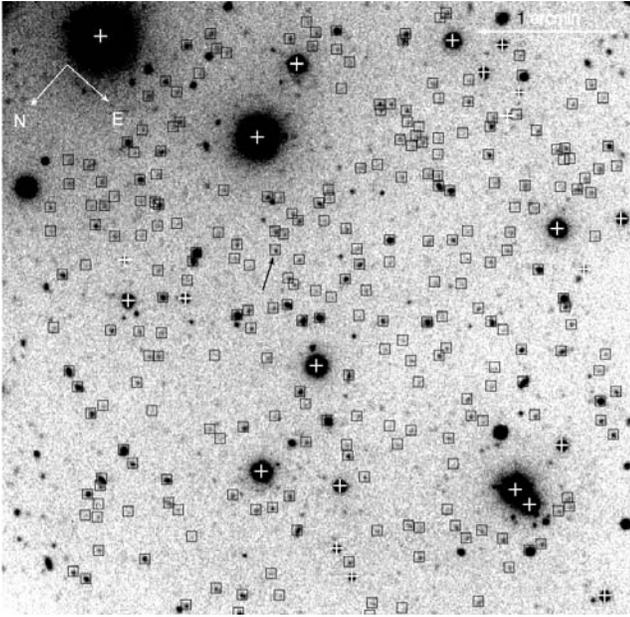


Рис. 2. Объекты, обнаруженные в четырех фильтрах (галактики заключены в квадраты, звездообразные объекты указаны крестами). Черная стрелка указывает на родительскую галактику GRB 021004.

and Baryshev 2010b, Shirokov et al. 2016, Sokolov et al. 2018a; 2016).

Этот тест может быть осуществлен шаг за шагом с помощью глубоких наблюдений на БТА в соседних направлениях на родительские галактики гамма-всплесков, находящихся вблизи некоторого начального направления на GRB.

Можно сказать, что в начале 20 века, используя крупнейшие на то время телескопы, Эдвин Хаббл открыл дверь в неизведанный «мир галактик — Метагалактику», а теперь, в начале 21 века, используя многоканальные гамма-, оптические, радио-, нейтринные и гравитационно-волновые детекторы, у нас появилась возможность наблюдательного исследования «мира Метагалактик».

4. ПРОВЕРКА ПАРАДИГМЫ РАСШИРЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА

Наиболее важный космологический факт, открытый в работе Hubble (1929), заключается в линейной (на малых масштабах) зависимости между наблюдаемым красным смещением z спектральных линий и расстоянием r до галактики. Реально наблюдаемый закон Хаббла — это зависимость «красное смещение–расстояние»

$$z(r) = \frac{H_0 r}{c} = \frac{r}{R_H} = \frac{V_{\text{app}}(r)}{c}, \quad (1)$$

где H_0 — постоянная Хаббла в настоящий момент, $R_H = c/H_0 \approx 4000 h_{75}^{-1}$ Мпк — радиус Хаббла,

$V_{\text{app}} = cd\lambda/\lambda$ — видимая спектроскопическая радиальная скорость галактики, c — скорость света, или

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}} = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}} - 1 = \frac{V_{\text{app}}(r)}{c}, \quad (2)$$

где λ_{obs} — наблюдаемая на телескопе длина волны фотона, а λ_{emit} — длина волны излученного фотона на расстоянии r в наблюдаемой галактике.

Для определения расстояния r до галактики Хаббл использовал концепт «стандартных свечей» — объектов с априори известной светимостью. Отметим, что Хаббл назвал красное смещение «видимой скоростью» (в единицах c), потому что он измерял расстояние до галактики r через измерение потока, а не физическую скорость галактики как изменение расстояния со временем (в случае эффекта Доплера). Парадигма расширяющегося пространства в СКМ является теоретической интерпретацией красного смещения как эффекта Леметра в расширяющейся фридмановской Вселенной, где скорость расширения пространства $V_{\text{exp}}(r) \equiv V_{\text{app}}(r)$.

Удивительно, что, спустя уже сотню лет после интерпретации Леметром космологического красного смещения как расширения пространства, вновь развернулась острая дискуссия в профессиональной космологической литературе о физическом смысле космологического красного смещения и взаимосвязи между геометрическими понятиями и измеренными астрономическими числами: Abramowicz (2009), Abramowicz et al. (2007), Baryshev (2015), Davis (2004; 2010), Francis et al. (2007), Harrison (1993; 1995; 2000), Kaiser (2014), Peacock (1999; 2008).

4.1. Теоретическая диаграмма Хаббла для разных космологических моделей

Космологическая диаграмма Хаббла (ХД) объединяет непосредственно наблюдаемые потоки (светимости галактик) и красные смещения в отдельный класс стандартных свечей. Поэтому ХД может быть использована для наблюдательной проверки основных теоретических соотношений космологических моделей.

4.1.1. Стандартные фридмановские модели

Согласно парадигме расширения пространства, собственное (внутреннее) метрическое расстояние r до галактики, имеющей фиксированную сопутствующую координату χ от наблюдателя, дается соотношением

$$r(t) = S(t)\chi \quad (3)$$

и увеличивается со временем t как масштабный фактор $S(t)$.

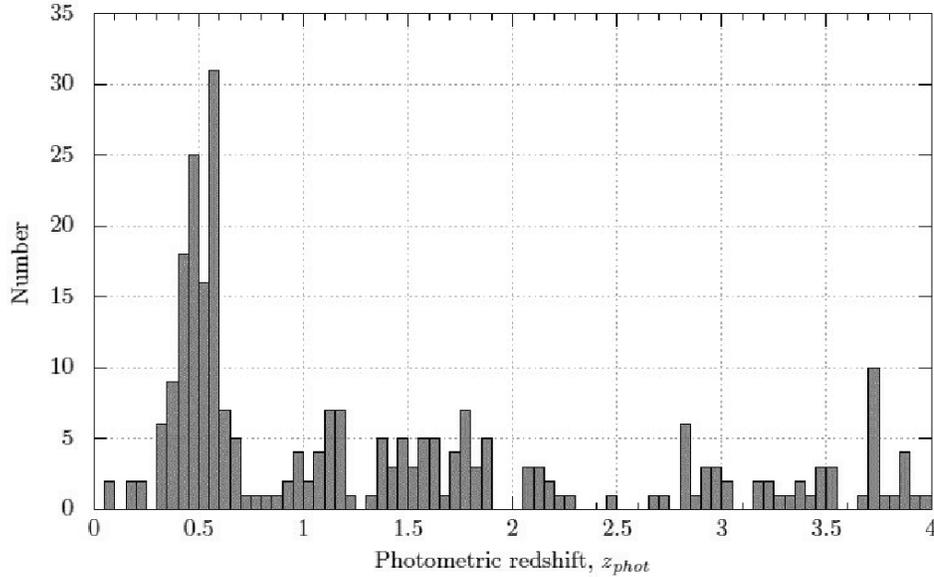


Рис. 3. Распределение фотометрических красных смещений, полученных на БТА в фильтрах $BVR I$, для 246 объектов с пиком на $z \approx 0.56$.

Важно отметить, что из гипотезы однородности и изотропности пространства (космологический принцип) следует, что скорость удаления данной галактики пропорциональна расстоянию до этой галактики, т.е. является строго линейным соотношением скорость–расстояние (V_{exp} vs r) для всех метрик:

$$\frac{V_{\text{exp}}(r)}{c} = \frac{dr}{cdt} = \frac{dS}{cdt} \chi = \frac{H(t)r}{c} = \frac{r}{R_H}, \quad (4)$$

где $H = \dot{S}/S$ — параметр Хаббла и $R_H = c/H(t)$ — расстояние Хаббла на момент времени t . Отметим, что из уравнения (4) можно получить скорость больше, чем скорость света $V_{\text{exp}}(r) > c$ для $r > R_H$ (Baryshev and Teerikorpi 2012, Harrison 1993; 2000).

Следует подчеркнуть, что космологическая скорость расширения $V_{\text{exp}}(r)$ для наблюдаемой галактики является существенно отличной от пекулярной скорости галактики V_{pec} , которая не может быть больше скорости света, как, впрочем, и околосветовой. Космологическое красное смещение в расширяющемся пространстве не является эффектом Доплера, а есть эффект Леметра, определяемый как отношение масштабных факторов:

$$(1+z) = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{S_0}{S_1}, \quad (5)$$

В отличие от строго линейного уравнения (4) для $V_{\text{exp}}(r)$ соотношения «красное смещение–расстояние» $z(r)$ и «скорость расширения–красное

смещение» $V_{\text{exp}}(z)$ существенно нелинейны:

$$\frac{V_{\text{exp}}(z)}{c} = \frac{r(z)}{R_{H_0}} = \int_0^z \frac{dz'}{h(z')}, \quad (6)$$

где $h(z) = H(z)/H_0$.

4.1.2. Соотношение «звездная величина–красное смещение» в СКМ

Наблюдаемая через фильтр i видимая звездная величина объекта с абсолютной звездной величиной M_i равна

$$m_i(z) = 5 \lg(l(z)(1+z)) + C_i(z), \quad (7)$$

где $C_i(z) = 25 + M_i + K_i(z) + A_i + E_i(z)$, а $l(z)$ — внешнее метрическое расстояние: $l(r) = S(t)I_k(r/S)$.

Если для класса стандартных свечей известны K -поправка, поглощение и поправка за эволюцию, то уравнение (7) может быть использовано для определения соотношения «красное смещение–расстояние» по светимости $l_{\text{lum}}(z) = l(z)(1+z)$. Плоская модель «чистого вакуума» ($\Omega = \Omega_\Lambda = 1$) дает линейное уравнение $l(z) = r(z) = R_{H_0}z$ и, следовательно,

$$m_i(z) = 5 \lg(R_{H_0}z(1+z)) + C_i(z).$$

4.1.3. Классическая стационарная модель

Светимость и метрические расстояния связаны так же, как во фридмановских плоских моделях:

$$r(z) = l_{\text{lum}}(z)/(1+z).$$

Так как в классической стационарной модели $r(z) = R_H z$, то соотношение звездная «величина–красное смещение» будет

$$m_i(z) = 5 \lg(R_H z(1+z)) + C_i(z). \quad (8)$$

4.1.4. Фрактальная полевая космологическая модель

В рамках фрактальной полевой (ФП) космологической модели (Baryshev 2017, Baryshev and Teerikorpi 2012, Baryshev 2008) Вселенная изотропна и неоднородна с фрактальной размерностью $D \approx 2.0$. Такое значение фрактальной размерности гарантирует линейный закон «красное смещение–расстояние», если космологическое красное смещение интерпретируется как глобальное гравитационное красное смещение внутри фрактальной структуры. Согласно ФП, расстояние по светимости и метрическое расстояние связаны как $r_{lum}(z) = r(z)(1+z)$. Это соответствует потере энергии фотонов и уменьшению частоты их прибытия благодаря гравитационному замедлению времени. Соотношение «звездная величина–красное смещение» приобретает вид

$$m_i(z) = 5 \lg(R_H Y(z)(1+z)) + C_i(z), \quad (9)$$

где функция $Y(z)$ определена Baryshev and Teerikorpi (2012), Baryshev (2008).

4.1.5. Модель Цвикки «старения» света

Модель Цвикки «старения» света может быть использована как искусственный пример, где эффект космологического замедления времени исключен. В простейшей модели «старения» света с эвклидовым стационарным пространством (например, La Violette (1986)) звездная величина стандартной свечи зависит от красного смещения как

$$m_i(z) = 5 \lg(R_H \ln(1+z)) + 2.5 \lg(1+z) + C_i(z). \quad (10)$$

4.2. Наблюдаемая диаграмма Хаббла для длинных GRB на больших красных смещениях

4.2.1. Построение диаграммы Хаббла для длинных GRB

Диаграмма Хаббла — это непосредственно наблюдаемое соотношение между потоком и красным смещением для выборки стандартных свечей. ХД для GRB, выраженная как модуль расстояния в зависимости от красного смещения, использует светимость «стандартного» GRB, откалиброванного через «соотношения Амати»:

$$\mu = 5 \lg \frac{d_L}{\text{Mpc}} + 25, \quad (11)$$

где μ — модуль расстояния, а d_L — расстояние по светимости, которое дается уравнением

$$d_L = \left(\frac{(1+z)E_{iso}(E_{p,i})}{4\pi S_{\text{bolo}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

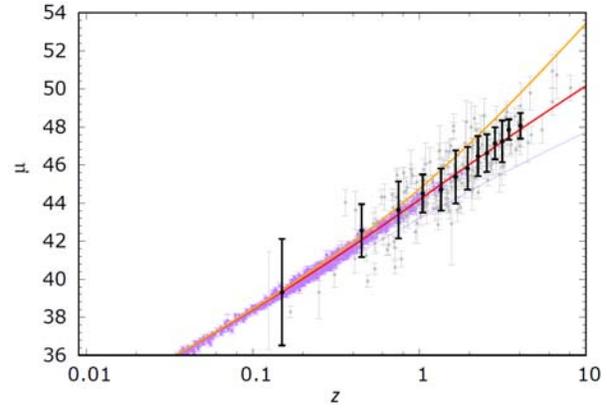


Рис. 4. Диаграмма Хаббла (ХД) для каталога сверхновых Ia Pantheon из работы Scolnic et al. (2018) (фиолетовые точки), для каталог GRB из исследования Amati et al. (2019) (серые точки), медианные значения GRB в бинах $\Delta z = 0.3$ (черные точки), предсказания Λ CDM-модели (красная кривая) и два примера других моделей (чистого вакуума и модели без замедления времени).

где S_{bolo} — поток GRB, а $E_{iso}(E_{p,i})$ — изотропная энергия GRB, вычисленная через «соотношение Амати» $E_{p,i} = K \times E_{iso}^m$ (Amati et al. 2009). Космологическая спектральная пиковая энергия в наблюдаемой полосе частот задается выражением $E_{p,i} = E_{p,obs} \times (1+z)$.

Метод ХД основан на применении теоретических соотношений, задаваемых уравнениями (7), (8), (9), (10). Детальный анализ ХД для GRB как космологический тест для больших красных смещений представлен Shirokov et al. (2020). Пример современной проверки основных космологических зависимостей с помощью ХД ($z(r)$, $F(z)$) приведен на рис. 4, где взят модуль расстояния в выборке 193 длинных GRB из работы Amati et al. (2018) и вычислены медианные значения модуля расстояния в бинах красного смещения.

Рисунок 4 демонстрирует, что предсказания разных моделей имеют существенно разные звездные величины в интервале красных смещений программы THESEUS ($z \sim 10$). Таким образом, будущие наблюдения THESEUS существенно расширят и уточнят наблюдаемый закон Хаббла и, следовательно, установят новые сильные ограничения на космологические модели.

4.2.2. Влияние гравитационного линзирования и эффекта Малмквиста на ХД

Существует множество эффектов наблюдательной селекции (например, пределы чувствительности детектора, влияние мешающей материи, гравитационное линзирование, релятивистское уярчение, эволюция), которые потенциально искажают

измеренный болометрический поток и, следовательно, вычисленное расстояние до GRB. Поэтому для построения правильной ХД следует принять во внимание известные селекционные эффекты. Однако до точного ответа на этот фундаментальный вопрос все еще далеко, пока не будет получено больше данных по GRB с известными красными смещениями.

Гравитационное линзирование длинных GRB посредством гравитирующей материи, расположенной вдоль луча зрения «источник—наблюдатель», создает видимое увеличение потока и интегрального по времени потока (fluence) S_{bolo} . Уярчение GRB гравитационной линзой не изменяет частоту (и E_p) линзируемого излучения. Видимое изменение светимости GRB может быть неверно истолковано как эволюция светимости GRB.

Согласно Ji et al. (2018), светимости GRB могут быть искажены гравитационным линзированием, произведенным разными гравитирующими структурами Вселенной, такими как объекты с темной и светящейся звездной массой, туманности и скопления темной звездной массы, галактики и объекты темной материи с массой галактик. Следовательно, гравитационное линзирование может сильно влиять на длинные GRB на больших красных смещениях. Например, согласно Kurt and Ougolnikov (2000), Ougolnikov (2001), в каталоге BATSE есть несколько GRB, которые линзированы межгалактическими шаровыми звездными скоплениями.

Необходимо также принять во внимание тот факт, что существует предел чувствительности по видимой яркости всплеска. Вследствие гравитационного линзирования одни всплески, находящиеся выше этого предела, могут быть обнаружены, в то время как другие всплески, находящиеся ниже этого предела, не попадут в выборку (эффект Малмквиста).

Как продемонстрировали Shirokov et al. (2020), объединение эффекта гравитационного линзирования и эффекта Малмквиста оказывает значительное влияние на наблюдаемую диаграмму Хаббла. Если принять во внимание возможную поправку светимости на ХД для GRB на больших красных смещениях, то наблюдаемая хаббловская диаграмма может быть согласована с Λ CDM-моделью, имеющей параметр плотности вакуума $\Omega_\Lambda \rightarrow 0.9$ и параметр плотности темной материи $\Omega_m \rightarrow 0.1$. Этот результат очень важен в свете недавней дискуссии о значении темной энергии и темной материи (Colin et al. 2019, Demianski et al. 2019, Di Valentino et al. 2020a, Makarov and Karachentsev 2011).

Таким образом, имеющий принципиальную важность фундаментальный вопрос о роли гравитационного линзирования в данных длинных

GRB на больших красных смещениях нуждается в более широких наблюдательных и теоретических исследованиях. В частности, наблюдения на 6-м БТА (Sokolov et al. 2018a; 2016) галактик вдоль луча зрения в направлении на GRB (рис. 3) важны для оценки вероятности линзирования потоков длинных GRB и его влияния на ХД на больших красных смещениях. Следовательно, объединенная программа THESEUS—БТА даст важнейшую информацию о темной материи и темной энергии.

4.3. Космологический тест на замедление времени

Одним из критических космологических тестов на природу космологического красного смещения является измерение длительности известных физических процессов у объектов на больших красных смещениях (космологическое замедление времени).

4.3.1. Тест Вилсона на замедление времени сверхновых

Wilson (1939) предложил использовать сверхновые в качестве теста на природу космологического красного смещения: в расширяющейся вселенной кривая блеска SN, приходящая от удаленной галактики, должна растягиваться вдоль временной оси в соотношении $(1+z):1$ относительно стандартной локальной кривой блеска. Этот тест на временное растяжение также обсуждался Rust (1974) и Teerikorpi (1981).

Недавние наблюдения SN Ia предоставили возможность провести этот тест (Goldhaber et al. 2001, Leibundgut 2001). Наблюдаемая ширина τ_{obs} кривой блеска SN может быть записана как

$$\tau_{\text{obs}}(z) = \tau_{\text{em}}(1+z)^p, \quad (13)$$

где $p = 1$ для локальных эффектов Доплера и гравитационного смещения, а также для эффекта Леметра в расширяющемся пространстве и для глобального гравитационного эффекта де Ситтера—Бонди. Однако $p = 0$ для всех моделей без космологического замедления времени.

Кривые блеска для 35 сверхновых типа Ia с красными смещениями до $z \approx 1$ были проанализированы Goldhaber et al. (2001), где оценка параметра замедления составила $p = 1.0 \pm 0.1$. Согласно работе Blondin et al. (2008), в которой авторы измерили спектральный возраст в системе отсчета SN Ia, оценка замедления времени близка к фактору $(1+z)^1$. Таким образом, эти данные согласуются с оценкой параметра замедления времени, который ожидается для расширяющегося пространства, а также в случае гравитационной природы космологического красного смещения.

Отметим, что тест на замедление времени дал хорошее свидетельство против гипотезы «старения» света, но с его помощью нельзя различить модели с расширяющимся пространством и модели с привлечением космологического глобального гравитационного красного смещения.

4.3.2. Тест на растяжение импульсов GRB

Наблюдательным тестом на эффект замедления времени может служить корреляция $T_{90} \propto (1+z)^\alpha$ для профилей импульсов GRB. Kocevski and Petrosian (2013) и Zhang et al. (2013) рассмотрели зависимость длительности импульсов GRB от красного смещения и пришли к выводу, что наклон $\alpha \approx 1$. Аналогичный результат $T \propto (1+z)^{1.4 \pm 0.3}$ был получен для выборки радио-громких GRB-всплесков в статье Lloyd-Ronning et al. (2019).

Тест на замедление времени может быть разделен для длинных и коротких GRB. Длинные GRB являются взрывами сверхновых, в то время как короткие GRB являются слияниями двойных нейтронных звезд. Эти события имеют одинаковую физическую природу — результат релятивистского гравитационного коллапса, но отличаются кривыми блеска из-за внешней материи вокруг коллапсирующего ядра (Dado and Dar 2018, Sokolov et al. 2018b). GRB обычно делят на длинные–мягкие ($T_{90} > 2$ с) и короткие–жесткие ($T_{90} < 2$ с), которых, например, в выборке GRB Swift (Shirokov et al. 2019) меньше 10%.

На самом деле наблюдательные селекционные эффекты могут оказывать сильное влияние на наблюдаемую длительность GRB на разных красных смещениях. В частности, оценка длительности GRB зависит от инструментального разрешения и спектральной чувствительности, а также от спектральных особенностей источника (Castro-Tirado et al. 2018, Kocevski and Petrosian 2013). Таким образом, надежный тест на замедление времени с помощью длительности GRB трудно осуществить.

4.3.3. Новый космологический тест замедления времени по GRB+SN

Замедление времени всех физических процессов, наблюдаемых на больших красных смещениях, предсказывается двумя космологическими моделями, основанными на расширении пространства и на гравитационном механизме красного смещения. На малых красных смещениях этот эффект сложно измерить, потому что он смешивается с другими конкурирующими физическими процессами.

Наблюдения импульсов GRB в рамках программы THESEUS, дополняемые наблюдениями кривых блеска послесвечений GRB на 6-м BTA CAO (Amati et al. 2018, Sokolov et al. 2018b, Vlasjuk 2018), сделают возможным применение

космологического теста Вилсона на замедление времени.

Возможность проведения такого теста обусловлена связью длинных GRB с коллапсом ядер взрывов SN. Если рассмотреть одновременно форму импульса GRB и форму послесвечения в разных полосах, можно, например, в кривой блеска послесвечения GRB увидеть кривую блеска SN, а, значит, исследовать эффект замедления времени в разных процессах для одного и того же гамма-всплеска. Статистика выборок GRB на разных каналах и на разных красных смещениях позволит получить робастные оценки эффекта замедления времени. Совместные наблюдения THESEUS–BTA будут важны для проведения этого космологического теста фундаментальной физики.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В духе подхода «практической космологии» Сандэйджа (Sandage 1995, Sandage 1997) мы рассмотрели текущее состояние космологии, которое характеризуется общей тенденцией к проверке фундаментальных принципов, лежащих в основе космологических моделей. Особенно важно, что в настоящее время проходит острая дискуссия о значении для космологии недавно обнаруженного несоответствия между результатами анализа флуктуаций космического микроволнового фонового излучения Planck-2018 и локальными измерениями космологических параметров СКМ. Такие трудности как природа и значение темной энергии и темной материи, степень гравитационного линзирования на крупномасштабной структуре и значение постоянной Хаббла H_0 для локальной Вселенной теперь обсуждаются как новый кризис космологии (см. ссылки во Введении).

Наблюдения GRB в эпоху многоканальной астрономии открывают новые возможности для проверки фундаментальной физики, лежащей в основе СКМ. Сюда относятся тесты классической ОТО, тесты однородности распределения материи и природы леметровского расширения пространства.

Современные достижения теоретической физики, особенно разные модификации ОТО и квантовые аспекты гравитационной теории, вместе с рядом концептуальных проблем СКМ также требуют нового анализа и более широкой наблюдательной проверки исходных принципов СКМ.

Мы рассмотрели возможные критические космологические тесты СКМ на основе многоканальных наблюдений GRB в широком интервале космологических красных смещений до $z \sim 10$. Космологические тесты, использующие наблюдения THESEUS–BTA, вносят существенный вклад в понимание физических процессов в сильных гравитационных полях, в изучение пространственного

распределении галактик, в анализ закона Хаббла и замедления времени физических процессов на больших красных смещениях. Были рассмотрены перспективы применения этих космологических тестов в наблюдениях GRB методами многоканальной астрономии и предложены несколько новых тестов. Важная часть космологических тестов связана с аккуратным учетом разных селекционных наблюдательных эффектов, которые искажают истинные космологические соотношения.

Будущие наблюдения GRB с помощью космических миссий, включая THESEUS (Amati et al. 2018, Strata et al. 2018), и соответствующие многоканальные наблюдения, включая большие телескопы, такие как БТА и GTC (и даже телескопы класса 1-м) (Castro-Tirado et al. 2018, Sokolov et al. 2016; 2018b, Vlasyuk 2018), могут дать ключевую информацию для проверки теоретических космологических моделей.

Наш анализ возможных приложений наблюдательных космологических тестов для планируемой миссии THESEUS демонстрирует ее потенциальный фундаментальный вклад в космологию, поскольку GRB являются наиболее удаленными астрофизическими объектами с измеренными спектральными красными смещениями (см. рис. 4).

Перспективными критическими космологическими тестами базиса СКМ в рамках планируемых наблюдений GRB средствами THESEUS и БТА являются:

- Поиск и мониторинг на БТА быстрых переменных оптически двойников GRB, обнаруженных THESEUS, вместе с нейтрино и гравитационно-волновыми сигналами позволит проверить теорию гравитации в сильных полях как базис СКМ. Проблема перехода РКО в нейтронные звезды, кварковые звезды и черные дыры может быть исследована и расширена космологическими решениями уравнений гравитационного поля.
- Большое число GRB благодаря THESEUS и оптическим наблюдениям родительских галактик на БТА позволит проверить космологический принцип однородности и изотропности на максимальных пространственных масштабах до $r \sim 10$ Гпк. Крупномасштабная структура Вселенной может быть исследована с помощью метода космической томографии на основе использования распределений галактик вдоль луча зрения из наблюдений глубоких полей БТА в направлениях на GRB.
- Диаграмма Хаббла на больших красных смещениях для длинных GRB, обнаруженных THESEUS, вместе с наблюдениями на БТА позволит проверить космологические соотношения поток—расстояние—красное смещение

до $z \sim 10$. Совместные гамма-, оптические, ИК-наблюдения THESEUS—БТА профилей кривых блеска дадут возможность применить новую форму теста Вилсона замедления времени для физических процессов на больших красных смещениях.

Объединенный проект THESEUS—БТА по наблюдениям GRB вместе с другими многоканальными наблюдениями даст новую информацию о фундаментальной космологической физике.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы признательны О. В. Верхованову, Д. И. Нагирнеру и А. J. Castro-Tirado за полезные обсуждения и комментарии. Мы благодарим Т. Н. Соколову за редакторские коррективы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al., *Astrophys. J.* **848**, L12 (2017).
2. M. A. Abramowicz, *Acta Astronomica* **59**, 131 (2009).
3. M. A. Abramowicz, S. Bajtlik, J.-P. Lasota, and A. Moudens, *Acta Astronomica* **57**, 139 (2007).
4. L. Amati, R. D'Agostino, O. Luongo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (1), L46 (2019).
5. L. Amati, F. Frontera, and C. Guidorzi, *Astron. and Astrophys.* **508**, 173 (2009).
6. L. Amati, P. O'Brien, D. Götz, et al., *Advances Space Research* **62** (1), 191 (2018).
7. G. Amelino-Camelia, *Nature* **408**, 661 (2000).
8. L. G. Balázs, Z. Bagoly, J. E. Hakkila, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **452**, 2236 (2015).
9. M. Bartelmann, E. Kozlikin, R. Lilow, et al., *Annalen der Physik*, **531** (11), 1800446 (2019).
10. Y. Baryshev, arXiv:1702.02020 (2017).
11. Y. Baryshev and P. Teerikorpi, *Fundamental Questions of Practical Cosmology: Exploring the Realm of Galaxies* (Springer-Verlag, Berlin, 2012).
12. Y. V. Baryshev, in *Problems of Practical Cosmology*, Ed. by Y. V. Baryshev, I. N. Taganov, and P. Teerikorpi (Russian Geographical Society, St. Petersburg, 2008) Vol. 2, p. 60.

13. Y. V. Baryshev, in *Particle and Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology: Predictions, Observations and New Projects*, Ed. by R. A. Ryutin and V. A. Petrov (World Scientific Press, Singapore, 2015), p. 297.
14. Y. V. Baryshev and S. A. Oschepkov, arXiv:1906.07014 (2019).
15. Y. V. Baryshev, I. V. Sokolov, A. S. Moskvitin, et al., *Astrophysical Bulletin* **65**, 311 (2010).
16. S. Blondin, T. M. Davis, K. Krisciunas, et al., *Astrophys. J.* **682**, 724 (2008).
17. V. Cardoso and P. Pani, *Living Reviews in Relativity*, **22** (1), id. 4 (2019).
18. A. J. Castro-Tirado, V. V. Sokolov, and S. S. Guziy, in *Proc. Int. Conf. on SN1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhnij Arkhyz (SAO RAS), 2017*, Ed. by V. V. Sokolov, T. N. Sokolva, V. B. Petkov, et al. (INR RAS, Moscow, 2018), p. 41.
19. T. Clifton, P. G. Ferreira, A. Padilla, and C. Skordis, *Physics Reports* **513**, 1 (2012).
20. J. Colin, R. Mohayaee, M. Rameez, and S. Sarkar, *Astron. and Astrophys.* **631**, L13 (2019).
21. S. Dado and A. Dar, arXiv:1810.03514 (2018).
22. T. Davis, *Publ. Astron. Soc. Australia* **21**, 97 (2004).
23. T. Davis, *Scientific America* **303**, 38 (2010).
24. C. De Rham, J. T. Deskins, A. J. Tolley, and S.-Y. Zhou, *Reviews Modern Physics* **89**, id. 025004 (2017).
25. M. Demianski, E. Piedipalumbo, D. Sawant, and L. Amati, arXiv:1911.08228 (2019).
26. E. Di Valentino, A. Melchiorri, and J. Silk, arXiv:2003.04935 (2020a).
27. E. Di Valentino, A. Melchiorri, and J. Silk, *New Astronomy* **4**, 196 (2020b).
28. M. Einasto, H. Lietzen, M. Gramann, et al., *Astron. and Astrophys.* **595**, A70 (2016).
29. R. Feynman, F. Morinigo, and W. Wagner, *Feynman Lectures on Gravitation* (Addison-Wesley Publ. Comp., 1995).
30. M. J. Francis, L. A. Barnes, J. B. James, and G. F. Lewis, *Publ. Astron. Soc. Australia* **24**, 95 (2007).
31. A. Gabrielli, F. Sylos Labini, M. Joyce, and L. Pietronero, *Statistical Physics for Cosmic Structures* (Springer-Verlag, Berlin, 2005).
32. R. V. Gerasim, V. V. Orlov, and A. A. Raikov, *Astrophysics* **58**, 204 (2015).
33. S. B. Giddings, *New Astronomy* **1**, 67 (2017).
34. G. Goldhaber, D. E. Groom, A. Kim, et al., *Astrophys. J.* **558**, 359 (2001).
35. J. R. Gott, III, M. Juric, D. Schlegel, et al., *Astrophys. J.* **624**, 463 (2005).
36. I. Grassberger and P. Procaccia, *Physical Review Letters* **50**, 346 (1983a).
37. I. Grassberger and P. Procaccia, *Physica D: Nonlinear Phenomena* **9**, 189 (1983b).
38. W. Handley, arXiv:1908.09139 (2019).
39. E. R. Harrison, *Astrophys. J.* **403**, 28 (1993).
40. E. R. Harrison, *Astrophys. J.* **446**, 63 (1995).
41. E. R. Harrison, *Cosmology: the Science of the Universe*, 2nd ed. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2000).
42. S. Hawking, arXiv:1401.5761 (2014).
43. Y. Hoffman, D. Pomarede, R. B. Tully, and H. Courtois, *New Astronomy* **1**, 36 (2017).
44. E. Hubble, *Proc. Nat. Academy Sci. USA* **15**, 168 (1929).
45. E. Hubble, *The Observational Approach to Cosmology* (Clarendon, Oxford, 1937).
46. E. Hubble and R. Tolman, *Astrophys. J.* **82**, 302 (1935).
47. M. Ishak, *Living Reviews in Relativity* **22**, 1 (2018).
48. L. Ji, E. D. Kovetz, and M. Kamionkowski, *Physical Review D* **98**, id. 123523 (2018).
49. N. Kaiser, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **438**, 2456 (2014).
50. D. Kocevski and V. Petrosian, *Astrophys. J.* **765**, 116 (2013).
51. V. G. Kurt and O. S. Ougolnikov, *Cosmic Research* **38**, 213 (2000).
52. P. A. La Violette, *Astrophys. J.* **301**, 544 (1986).
53. B. Leibundgut, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **39**, 67 (2001).
54. M.-H. Li and H.-N. Lin, *Astron. and Astrophys.* **582**, A111 (2015).
55. H. Lietzen, E. Tempel, L. J. Liivamagi, et al., *Astron. and Astrophys.* **588**, L4 (2016).
56. W. Lin, K. J. Mack, and L. Hou, arXiv:1910.02978 (2019).
57. N. M. Lloyd-Ronning, A. Aykutalp, and J. Johnson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **488**, 5823 (2019).
58. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
59. N. V. Nabokov and Y. V. Baryshev, *Astrophysics* **53**, 91 (2010a).
60. N. V. Nabokov and Y. V. Baryshev, *Astrophysics* **53**, 101 (2010b).
61. O. S. Ougolnikov, arXiv:astro-ph/0111215 (2001).
62. F. Özel, D. Psaltis, R. Narayan, and A. Santos Villarrreal, *Astrophys. J.* **757**, id. 55 (2012).
63. J. A. Peacock, *Cosmological Physics* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1999).
64. J. A. Peacock, astro-ph/0809.4573 (2008).
65. P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton Univ. Press, Princeton, 1993).
66. V. Petrosian, A. Bouvier, and F. Ryde, arXiv:0909.5051 (2009).
67. A. A. Raikov and V. V. Orlov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418**, 2558 (2011).
68. A. A. Raikov, V. V. Orlov, and O. B. Beketov, *Astrophysics* **53**, 396 (2010).
69. C. de Rham, *Living Reviews in Relativity* **17**, 7 (2014).
70. A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, et al., *Astrophys. J.* **855** (2), id. 136 (2018).
71. A. G. Riess, *Nature Reviews Physics* **2**, 10 (2020).
72. J. Řípa and A. Shafieloo, arXiv:1809.03973 (2018).
73. C. Rovelli, *Quantum Gravity* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2004).

74. V. A. Rubakov and P. G. Tinyakov, *Physics Uspekhi* **51**, 8 (2008).
75. B. W. Rust, PhD Thesis (Oak Ridge National Lab., TN, 1974).
76. A. Sandage, *The Deep Universe* (Springer, Berlin, 1995).
77. A. Sandage, in *The Universe at Large: Key Issues in Astronomy and Cosmology*, Ed. by G. Munch, A. Mampaso, and F. Sanchez (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1997), pp. 1–63.
78. D. M. Scolnic, D. O. Jones, A. Rest, et al., *Astrophys. J.* **859**, 101 (2018).
79. S. I. Shirokov, N. Y. Lovyagin, Y. V. Baryshev, and V. L. Gorokhov, *Astronomy Reports* **60**, 563 (2016).
80. S. I. Shirokov, A. A. Raikov, and Y. V. Baryshev, *Astrophysics* **60**, 4 (2017).
81. S. I. Shirokov, A. A. Raikov, Y. V. Baryshev, et al., in *Proc. Int. Conf. on The multi-messenger astronomy: gamma-ray bursts, search for electromagnetic counterparts to neutrino events and gravitational waves, Nizhny Arkhyz, Russia, 2018*, Ed. by V. V. Vlasuk, V. B. Petkov, and V. V. Sokolov (SNEG, Pyatigorsk, 2019), p. 198.
82. S. I. Shirokov, I. V. Sokolov, N. Y. Lovyagin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **496** (2), 1530 (2020).
83. A. Slosar, R. Mandelbaum, D. Eisenstein, *BAAS* **51** (3), id. 97 (2019).
84. I. V. Sokolov, A. J. Castro-Tirado, O. P. Zhelenkova, et al., *Astrophysical Bulletin* **73**, 111 (2018a).
85. I. V. Sokolov, A. J. Castro-Tirado, O. V. Verkhodanov, et al., in *Proc. Int. Conf. on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Nizhny Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), 2015*, Ed. by V. V. Sokolov, V. V. Vlasuk, and V. B. Petkov (Sneg, Pyatigorsk, 2016), p. 111.
86. V. V. Sokolov, *Int. J. Astron. Astrophys. Space Science* **2**, 51 (2015).
87. V. V. Sokolov, in *Proc. Int. Conf. on Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy: Neutrino Signals, Supernovae and Gamma-Ray Bursts, Nizhny Arkhyz (SAO RAS), Terskol (BNO INR RAS), 2015*, Ed. by V. V. Sokolov, V. V. Vlasuk, and V. B. Petkov (Sneg, Pyatigorsk, 2016), p. 121.
88. V. V. Sokolov, *Gravidynamics and Quarks* (URSS, Moscow, 2019).
89. V. V. Sokolov and Y. V. Baryshev, *Gravitation and Relativity Theory*, No. 17, 34 (Kazan State Univ., 1980) [in Russian].
90. V. V. Sokolov, A. J. Castro-Tirado, T. N. Sokolova in *Proc. Int. Conf. on SN1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhny Arkhyz (SAO RAS), 2017*, Ed. by V. V. Sokolov, T. N. Sokolova, V. B. Petkov, et al. (INR RAS, Moscow, 2018b), p. 190.
91. G. Stratta, R. Ciolfi, L. Amati, et al., *Advances Space Research* **62** (3), 662 (2018).
92. F. Sylos Labini and Y. Baryshev, *J. Cosmology Astroparticle Physics* **6**, 21 (2010).
93. F. Sylos Labini, D. Tekhanovich, and Y. Baryshev, *J. Cosmology Astroparticle Physics* **7**, 35 (2014).
94. P. Teerikorpi, *Acta Cosmologica* **10**, 21 (1981).
95. R. B. Tully, H. M. Courtois, and J. G. Sorce, *Astron. J.* **152**, 50 (2016).
96. R. B. Tully, H. Courtois, Y. Hoffman, and D. Pomarède, *Nature* **513**, 71 (2014).
97. M. Turner, *Int. J. Modern Physics A* **17**, 180 (2002).
98. M. Turner, *Astronomy* **31**, 44 (2003).
99. J.-P. Uzan, *Reviews Modern Physics* **75**, 403 (2003).
100. J.-P. Uzan, arXiv:1009.5514 (2010).
101. L. Verde, T. Treu, and A. Riess, *New Astronomy* **3**, 891 (2019).
102. V. V. Vlasyuk, in *Proc. Int. Conf. on SN1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy Russia, Terskol (BNO INR RAS), Nizhny Arkhyz (SAO RAS), 2017*, Ed. by V. V. Sokolov, T. N. Sokolova, V. B. Petkov, et al. (INR RAS, Moscow, 2018), p. 217.
103. F. Y. Wang, Z. G. Dai, E. W. Liang, *New Astronomy Reviews* **67**, 1 (2015).
104. F. Wilczek, arXiv:1512.02094 (2015).
105. O. C. Wilson, *Astrophys. J.* **90**, 634 (1939).
106. F.-W. Zhang, Y.-Zh. Fan, L. Shao, D.-M. Wei, *Astrophys. J.* **778**, L11 (2013).

THESEUS–BTA Cosmological Crucial Tests Using Multimessenger Gamma-Ray Bursts Observations

S. I. Shirokov, I. V. Sokolov, V. V. Vlasyuk, L. Amati, V. V. Sokolov, and Yu. V. Baryshev

Modern Multimessenger Astronomy is a powerful instrument for performing crucial tests of the Standard Cosmological Model in the wide redshift interval up to $z \sim 10$. This testing is principally important for discussion related to discrepancies between local and global measurements of cosmological parameters. We present a review of multimessenger gamma-ray burst observations currently performed and planned for THESEUS–BTA cooperative program. Such observations provide a unique opportunity to test the fundamental foundations of cosmological models: gravitation theory, cosmological principle of homogeneity and isotropy of large-scale distribution of matter, and space expansion paradigm. Important role of various selection effects leading to systematic distortions of true cosmological relations is discussed.

Keywords: *cosmology: observations—large-scale structure of the Universe—gamma-ray bursts*