

УДК 524.82

© Сажина О. С., Капаччиоли М., 2019

КОСМОЛОГИЯ: НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ОСНОВЫСажина О. С.^{a,1}, Капаччиоли М.^{b,2}^a Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, 119234, Россия.^b Университет Федерико II, Неаполь, 80126, Италия.

Работа представляет собой обзор современных наблюдательных методов космологии. Обсуждаются основные наблюдательные тесты Стандартной космологической модели: открытие расширения Вселенной и современного ускоренного расширения Вселенной, открытие и исследование реликтового излучения и его анизотропии, открытие крупномасштабной структуры Вселенной, предсказания и наблюдения распространенности легких химических элементов. Кратко излагается современное состояние исследований в области изучения темной энергии и темной материи. Рассматривается проблема поиска космологических гравитационных волн.

Ключевые слова: наблюдательная космология.

OBSERVATIONAL BASICS OF COSMOLOGYSazhina O.S.^{a,1}, Capaccioli M.^{b,2}^a M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234, Russia.^b University Federico II, Naples, 80126, Italy.

The work is a review of modern observational methods of cosmology. The main observational tests of the Standard cosmological model are discussed: the discovery of the expansion of the Universe and the modern accelerated expansion of the Universe, the discovery and study of cosmic microwave background radiation and its anisotropy, the discovery of the large-scale structure of the Universe, and the prediction and observation of the abundance of light chemical elements. The current state of research in the field of dark energy and dark matter is briefly described. The problem of searching for cosmological gravitational waves is considered.

Keywords: observational cosmology.

PACS: 98.80.-k

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2019.4.125-138

Введение

Подобно тому, как живопись характеризуется тремя базовыми цветами – желтым, красным и синим – на заре человеческой цивилизации существовали три основные науки: медицина, геометрия и астрономия. Всё многообразие точных научных дисциплин дня сегодняшнего можно сравнить с разнообразием художественных направлений. Шедевры изобразительного искусства, как известно, обязаны своему существованию и искуснейшей технике, и изысканной палитре красок и, конечно, мастерству своих создателей. Космология обязана своим существованием высочайшим технологическим достижениям современности и объединению таких разделов наук как астрономия, теория гравитации, физика элементарных частиц сверхвысоких энергий. И, безусловно, мастерству выдающихся ученых – А.А. Фридмана, Э. Хаббла, Я.Б. Зельдовича, Я. Эйнасто,

¹E-mail: cosmologia@yandex.ru²E-mail: capaccioli@na.astro.it

А.Д. Линде, В.А. Рубакова, А.А. Старобинского и многих других, – которые заложили основы теоретической и наблюдательной космологии.

Космология – это наука, которая изучает нашу Вселенную как единое целое. Космологи разрабатывают теории и ведут наблюдения, дающие сведения о законах развития Вселенной от ее рождения до сегодняшнего времени и даже с экстраполяцией в далекое будущее; они исследуют структуру нашей Вселенной на масштабах, превышающих размеры скоплений галактик, изучают ее состав. Наконец, теоретическая космология задается вопросами о том, что могло быть до рождения нашей Вселенной, какие пространства и связи могли бы существовать тогда, и какие причудливые скопления бесконечных миров могли бы возникать. Конечно, следует помнить, что как и в любой другой науке, все космологические теории проверяются на жизнеспособность только экспериментами и наблюдениями, и, таким образом, отсеиваются абстрактные построения, даже несмотря на изящество их математических обоснований.

Космология (см. [1–6] и ссылки в этих работах) родилась в начале прошлого века¹, но утвердила себя в статусе уважаемой науки только с середины 1980-х годов², благодаря развитию теории и совершенствованию астрономических наблюдений. Несмотря на то, что космология вобрала в себя многие идеи и методы других разделов наук, теперь она стоит несколько особняком от них всех. Прежде всего, завораживают исследуемые ею масштабы – как временные, так и пространственные: космологи могут воссоздать развитие Вселенной на промежутке времени около 14 млрд. лет. Кроме того, космология (как и, например, содержащая эволюцию в явном виде наука биология) в своих основополагающих принципах отходит от изучения циклических, повторяющихся процессов, которые так характерны для окружающего нас мира: восходы и заходы Солнца, смены времен года, движения планет по замкнутым орбитам. Наблюдения говорят о том, что Вселенная постоянно расширяется – с разным темпом в разные эпохи своей эволюции, но расширяется всегда – и, следовательно, в прошлом она имела начало. Еще одно отличительное свойство космологии заключается в том, что изучаемая ей ранняя горячая Вселенная предоставляет ученым уникальную лабораторию для исследования процессов, требующих энергий настолько высоких, что они никогда не могут быть достигнуты даже на мощнейших земных ускорителях, как современных, так и будущих. Знаменитый советский ученый Я.Б. Зельдович метко называл Вселенную «ускорителем бедного человека». Другими словами, космологические исследования становятся ключом к науке будущего, к отысканию, в том числе, Единой теории всех физических взаимодействий, которая, как ожидается, должна проявлять себя при энергиях, близких к энергии Планка (10^{19} ГэВ; для сравнения, энергии современных ускорителей – 10 ТэВ, [7]).

Наконец, космология вносит в изучение окружающего нас мира принципиально новые кинематические понятия, например, *горизонт частиц*. В трехмерно-плоском пространстве-времени мы видели бы события только внутри шара, радиус R которого равен произведению скорости света на время, прошедшее с момента рождения Вселенной, т.е. около $R = 14 \cdot 10^9$ св. лет. От более далеких объектов или областей пространства световой сигнал до нас еще не дошел. Поскольку скорость света – это предельная скорость распространения информации, то нет способа узнать о том, что происходит вне радиуса R , который называется *радиусом горизонта частиц* во Вселенной. Очевидно, со временем до нас должны доходить сигналы от все более и более далеких объектов, горизонт частиц должен расширяться. Однако с другой стороны, Вселенная сама расширяется, «унося» от наблюдателя излучающие источники. Какой же эффект будет преобладать? Очевидно, ответ на этот вопрос сильно зависит от темпа расширения Вселенной. Таким образом, могут существовать области, принципиально ненаблюдаемые, и Вселенная может оказаться разделенной на причинно-несвязанные области, которые не могут обмениваться световыми сигналами,

¹ Упоминание об ученых-космологах, изучающих Вселенную, можно встретить в научно-фантастическом романе советского писателя Н. Муханова «Пылающие бездны», изданной журналом «Мир приключений» в 1924 году.

² Два лауреата Нобелевской премии по физике, Л. Ландау и Э. Резерфорд, соответственно шутили по этому поводу, «космологи часто ошибаются, но никогда не сомневаются» и «не дайте мне поймать кого-то из тех, кто говорит о Вселенной в моей лаборатории!»

и эволюция в которых протекает независимо друг от друга.

Говоря о «расширении» Вселенной, обратим внимание на то, что вне зависимости от пространственного положения наблюдателя, объекты будут удаляться от него так, как если бы он сам был в центре разлета частиц (двумерный аналог происходящего – удаление друг от друга точек, нарисованных на поверхности раздувающегося воздушного шарика; здесь «все улетают от всех» и нет никакого центра разлета). Специфика расширения Вселенной заключается в том, что далекие объекты так слаженно удаляются от нас не из-за наличия каких-то собственных свойств, но расширяется, «разлетается» само пространство, в отличие от обыденной картины центрально-симметричного взрыва. Другими словами, нельзя указать точку на небе, где началось расширение Вселенной; чем глубже в космос проникают телескопы, тем ближе к моменту зарождения Вселенной наблюдаемые ими процессы. Прошлое Вселенной – это гигантская сфера, в центре которой мы расположены, прошлое окружает нас со всех сторон.

1. Стандартная космологическая модель

Теоретический фундамент космологии был заложен советским ученым А.А. Фридманом, в 1922 году опубликовавшим в немецком журнале «*Zeitschrift für Physik*» статью «*O kривизне пространства*». Основным выводом этой работы заключался в том, что наша Вселенная эволюционирует: она расширяется и ее объем растет. Модель Фридмана была основана на решении уравнений общей теории относительности А. Эйнштейна для случая изотропного и однородного распределения плотности, температуры и давления вещества. *Изотропия* означает симметрию относительно выбора направления, а *однородность* – одинаковость при перемещении от места к месту. Привычная нам неоднородность космоса – наличие планет, звезд, галактик – справедлива только на локальных масштабах (размер типичного скопления галактик порядка $9 \cdot 10^6$ парсек (пк)). Так, мысленно передвигая по Вселенной куб с ребром около $3 \cdot 10^8$ пк, мы обнаружили бы, что Вселенная действительно очень однородна и изотропна.

Модель Фридмана, в которой Вселенная с необходимостью должна была иметь начало, была воспринята со скепсисом Эйнштейном, который был сторонником стационарной модели Вселенной, бесконечной как в прошлом, так и в будущем (для принудительного согласования условия стационарности и собственных уравнений релятивистской гравитации Эйнштейн даже ввел новую фундаментальную постоянную – Λ -член). Чуть позже, назвав свою космологическую постоянную «самой большой ошибкой в жизни», Эйнштейн от нее отказался, признав модель Фридмана и тот факт, что Вселенная действительно расширяется. Примечательно, что выброшенному Λ -члену суждено было торжественно вернуться в уравнения Эйнштейна, но уже совсем по другому поводу, чтобы дать одно из возможных объяснений феномена ускоренного расширения Вселенной, которое мы наблюдаем.

Первым наблюдательным подтверждением однородной и изотропной модели Фридмана и поступательного характера эволюции Вселенной стало открытие в 1929 году американским ученым Э. Хабблом расширения Вселенной. Закон расширения справедлив для внегалактических масштабов и в случае малых скоростей имеет простой вид:

$$\bar{v} = H \cdot \bar{r},$$

где \bar{v} – скорость далекого объекта (например, галактики), $H_0 = 67.8$ км/с/Мпк – современное значение параметра Хаббла (по данным на 2015 год, [8]), \bar{r} – расстояние до объекта. Параметр Хаббла определяет рост объема Вселенной, значит, его обратная величина примерно равна возрасту Вселенной. (Обратим закон расширения и формально отсчитаем время, необходимое для того, чтобы Вселенная сжалась до нулевого размера – это время равно $1/H$.) Параметр Хаббла не зависит ни от направления на исследуемую галактику, ни от положения последней, но зависит от времени: $H = H(t)$.

Из вида закона расширения очевидно, что чем дальше от наблюдателя находится объект, тем быстрее он удаляется от наблюдателя. Важно отметить, что скорость и расстояние определяются независимым образом. Для вычисления скорости измеряется спектр удаляющегося объекта, который сравнивается с лабораторным спектром соответствующих химических элементов (метод, основанный на эффекте Доплера). По разнице наблюдаемых и лабораторных линий ($\Delta\lambda$) определяется *красное смещение* z и скорость v :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = z.$$

Для определения расстояния r широко используется метод *фотометрического* (или *болометрического*) *параллакса*: измеряется поток света F от объекта, обладающего известной светимостью (мощностью) L :

$$r = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}.$$

Для определения расстояний используются источники типа «стандартных свечей», обладающие известной светимостью. Сначала это были *цефеиды* – пульсирующие переменные звезды, период изменения блеска которых возрастает вместе с их светимостью, с и помощью определяли расстояния до соседних галактик. Но на огромных космологических масштабах лучшие кандидаты для определения фотометрического параллакса – это сияющие ярче целых галактик *сверхновые* звезды (SN Ia). В силу физической природы вспышки, такие звезды обладают одинаковой и хорошо известной светимостью L в максимуме блеска. Измеряя идущий от них поток F , легко определить расстояние до галактики r , которой они принадлежат. Сверхновые помогли измерить не только темп расширения, но и определить удивительный факт, что наша Вселенная около $5 \cdot 10^9$ лет назад начала расширяться с ускорением.

Наблюдательный факт *расширения Вселенной* – это краеугольный камень космологии, обособившей ее в отдельную науку. Помимо этого факта, современную Стандартную космологическую модель (или модель *Большого взрыва*) составляют следующие фундаментальные открытия:

1. *реликтовое излучение* (теоретически предсказано Г.А. Гамовым в 1948 году, [9] случайно обнаружено А. Пензиасом и Р. Вильсоном, и обосновано Р. Дикке в 1965 году, [10]);
2. *анизотропия реликтового излучения* (обнаружена советским космическим проектом «Реликт», [11] и американским проектом COBE (COsmic Background Explorer – Исследователь космического фона) в 1992 году, [12]);
3. *крупномасштабная структура Вселенной* (Д. Джинс, Е.М. Лифшиц, Я.Б. Зельдович [13], А.Г. Дорошкевич, С.Ф. Шандарин, Д. Пиблс, Р. Киршнер, [14] и др.; обнаружена в 1981 году);
4. *ускоренное расширение Вселенной* (С. Перлмуттер [15], Б. Шмидт, А. Рис [16]; обнаружено в 1998 году);
5. *распространение легких химических элементов* [17].

Помимо перечисленного, Стандартная космологическая модель пополнилась такими понятиями как *темная материя* [18–22], *темная энергия* [23] (получив название Λ CDM – Стандартная космологическая модель Фридмана с новой фундаментальной космологической постоянной Λ -членом и нерелятивистской (холодной) темной материей), а также совсем недавним непосредственным детектированием гравитационных волн (К. Торн, Р. Вайсс, Р. Драйвер, Б. Бариш 2015 год, [24]).

2. Ускоренное расширение Вселенной

При небольших расстояниях до галактик закон расширения Вселенной определяется линейным законом Хаббла. Однако при на больших расстояниях (при больших красных смещениях z , когда расстояния определяются по сверхновым SN Ia) хаббловская зависимость становится нелинейной, [16].

До 1998 года считалось, что Вселенная расширяется с замедлением. Этот факт казался очевидным из простых физических соображений. Действительно, пусть в шаре с радиусом от наблюдателя до некоторой галактики, движение которой измеряют, находится вещество. Со стороны этого шара на галактику действует сила притяжения, обусловленная всем веществом, находящимся в шаре. Галактика движется по инерции из-за наличия некоего начального «затравочного» движения. Поскольку на нее действует сила притяжения, она должна замедляться. Но оказалось, что галактики разбегаются от нас во все стороны с ускорением, которое началось примерно $5 \cdot 10^9$ лет назад. Этот факт с неизбежностью приводит нас к существованию какого-то принципиально другого типа вещества, создающего *антигравитацию*, т. е. взаимное отталкивание объектов. Этот экзотический тип вещества получил название *темная энергия*.

Ускоренное расширение Вселенной было открыто по данным анизотропии реликтового излучения, наблюдениям сверхновых звезд типа SN Ia и другим исследованиям.

Остановимся на открытии ускоренного расширения по сверхновым звездам. Такие объекты известны давно. Одно из первых дошедших до нас свидетельств – описание звезды-госты в китайских хрониках³.

Сверхновая звезда – это взрывающаяся звезда, которая моделируется термоядерным взрывом белого карлика с массой, примерно равной пределу Чандрасекара (около 3 масс Солнца). По мере приближения массы белого карлика к своей допустимой верхней границе, вещество в нем теряет гидростатическую устойчивость, что происходит из-за нейтронизации вещества. Эта неустойчивость приводит к термоядерному взрыву, а не к коллапсу. Энергия, которая выделяется при взрыве белого карлика, вполне достаточна, чтобы объяснить энергию SN Ia. Масса сброшенного в виде оболочки вещества составляет примерно одну массу Солнца, а его скорость в расширяющейся оболочке достигает несколько десятков тысяч километров в секунду. Быстрое и адиабатическое расширение оболочки ведет к ее охлаждению, но тут вступает в действие реакция радиоактивного распада никеля ^{56}Ni , образовавшегося в результате термоядерных реакций. Процесс распада этого элемента и определяет форму кривой блеска SN Ia.

Светимость сверхновой SN Ia в максимуме блеска определяется только массой выброшенного никеля. При выбросе половины солнечной массы светимость соответствует абсолютной звездной величине $M = -19^m.2$. Наблюдения также показали, что вариация светимости в максимуме блеска зависит от скорости спада звездной величины после максимума. Этот эффект был открыт замечательным советским и российским астрономом Ю.П. Псковским и сейчас носит название *эффект Псковского-Филлипса*. С его помощью можно точнее определить светимость в максимуме блеска. Сейчас светимость звезд SN Ia измеряется с точностью до одной десятой звездной величины.

Эти два свойства – яркость сверхновой, сравнимая в максимуме блеска с яркостью целой галактики, а также прецизионное измерение светимости звезды в максимуме – позволяет использовать SN Ia как «стандартную свечу» в космологии. По эффекту Псковского-Филлипса измеряют расстояние до сверхновых звезд, по смещению спектральных линий определяют скорость движения звезды и материнской галактики, которой принадлежит звезда. Это позволяет астрономам построить шкалу космологических расстояний с большой точностью.

Сверхновые наблюдались двумя научными группами. С. Перлмуттер возглавил группу астрономов в США, начавшую наблюдения еще в 1988 г. Б. Шмидт руководил группой, приступившей

³Сверхновая, которая вспыхнула в нашей Галактике в 1054 г. и была видна днем в течение одного месяца. В настоящее время на месте звезды-госты находится Крабовидная туманность, в центре которой расположен миллисекундный пульсар.

к исследованиям в конце 1994 г., одним из членов этой группы был А. Рис, которому принадлежит ключевая роль в сделанном открытии. Обе группы изучали сверхновые звезды и накапливали наблюдения. Необходимая точность последних стала возможной благодаря новейшим телескопам, установленным как на поверхности Земли, так и в космическом пространстве, а также мощным компьютерам и сверхчувствительным ПЗС-матрицам, появившимся в 90-е гг. прошлого века.

Полученный результат был представлен в виде диаграмма Хаббла, представляющей собой зависимость скорости удаления внегалактического объекта (в данном случае – сверхновой звезды, принадлежащей другой галактике) от расстояния до этого объекта. Для сверхновых звезд диаграмма диаграмма традиционно строится следующим образом. По горизонтальной оси откладывается красное смещение внегалактического объекта, которое эквивалентно скорости, по вертикальной оси – видимая звездная величина, которая эквивалентна логарифму расстояния до объекта. Такая диаграмма была опубликована коллективом под руководством С. Перлмуттера в 1998 г. Наблюдения охватывали область вплоть до $z = 1$. Это соответствует охвату расстояний примерно до 2 Гпк. При больших значениях красного смещения появилось значимое отклонение от прямой зависимости на диаграмме Хаббла. Это соответствовало тому, что наша Вселенная заполнена веществом подобному обычному на 28.7%, а остальное наполнение соответствовало необычному виду материи, которое позже было названо *темной энергией*. В том же году и примерно в то же время свои результаты опубликовала группа А. Риса и Б. Шмидта.

Полученные результаты означали, что после эпохи, соответствующей красному смещению $z = 0.65$, Вселенная начала расширяться ускоренно. Диаграмма Хаббла для сверхновых была построена с исчерпывающей полнотой, и факт ускоренного расширения Вселенной не подвергается сомнению. Однако остался и до сих пор остается открытым вопрос о причине ускоренного расширения, о составе того, что было названо *темной энергией*. В природе должна присутствовать либо новая фундаментальная постоянная (“ Λ -член”), либо принципиально новый вид материи.

3. Крупномасштабная структура Вселенной

До начала 1980-х годов крупнейшими объектами Вселенной считались галактики и их скопления. Но оказалось, что иерархия космологических систем на них не заканчивается.

Крупномасштабная структура Вселенной была предсказана в работах выдающегося советского ученого, академика Я.Б. Зельдовича, а также его учеников – А.Г. Дорошкевича и С.Ф. Шандарина. Анализируя законы эволюции малых возмущений плотности в расширяющейся Вселенной, Яков Борисович сделал любопытный прогноз: если в молодой и почти однородной Вселенной малые возмущения плотности и скорости не обладали сферической симметрией (а в природе идеальной симметрии и не бывает), то по мере их роста под действием гравитации отклонения формы от сферической будут возрастать. В конце концов, образовавшиеся объекты сформируют трехмерные структуры с тремя неравными поперечными размерами, причем один из этих размеров должен быть значительно меньше двух других. Такие структуры напоминают блины. Свою теорию Зельдович так и назвал – *«теория блинов»*, [13].

Предсказания «теории блинов» блестяще подтвердились следующими наблюдениями. На небе было выбрано три поля галактик, отстоящие друг от друга на угловое расстояние примерно 5°. В каждом из полей было посчитаны галактики и измерены их красные смещения (расстояния до них). Распределение зависимости числа галактик от расстояния до них демонстрировало два четко выраженных пика, разделенных почти пустым пространством – другими словами, лучи прошли сквозь два «блина» крупномасштабной структуры Вселенной.

В настоящее время теория крупномасштабной структуры подробно и хорошо разработана, [28], наблюдения охватывают уже десятки тысяч галактик, подготавливаются программы наблюдений сотен тысяч галактик. Исследователи планируют построить полное трехмерное распределение галактик во Вселенной на глубину, превышающую сотни Мпк.

4. Реликтовое излучение

Реликтовое излучение (в англоязычной литературе СМВ – cosmic microwave background) предсказал Г. Гамов в 1948 году [9], используя для своей теории горячей Вселенной название *Илем*, которую сейчас общепринято называть теорией *Большого взрыва*. В горячем и плотном веществе ранней Вселенной должны были происходить термоядерные реакции, приводящие к наблюдаемому распространению химических элементов в настоящее время. Одним из результатов этой теории и было предсказание реликтового излучения. Сам Гамов вычислил его характеристики, в частности, определил его температуру. Поскольку к моменту создания работы большинство сечений термоядерных реакций еще были секретными величинами (это была эпоха создания ядерного оружия), то Гамов получил результат примерно вдвое расходящийся с измеренным – его вычисления предсказывали температуру реликтового излучения около 6 К.

Реликтовое излучение – это свет от «самых первых», «самых старых» фотонов, которые получили возможность распространяться свободно, выделившись из плазмы первичного огненного шара ранней Вселенной по мере его расширения и остывания. Местоположение возникшего реликтового излучения называется *поверхностью последнего рассеяния*, а соответствующее время – *моментом рекомбинации*. Температура реликтового излучения на момент рождения составляла около $3 \cdot 10^3$ К. Современное реликтовое излучение, с высокой степенью однородности заполняющее космическое пространство, из-за расширения Вселенной приобрело температуру 2.725 К (по данным космического аппарата СОВЕ, [12]), сместившись в микроволновую область спектра. Реликтовое излучение дает изображение юной Вселенной всего через $3.8 \cdot 10^5$ лет после ее рождения – небольшое время, по сравнению с современным космологическим возрастом.

Интересно отметить, что по причине расширения Вселенной ученым далекого будущего вряд ли довелось бы вообще зарегистрировать реликтовое излучение, потому что его интенсивность упала бы слишком сильно даже для сверхчувствительных приборов, и картина ранней эволюции Вселенной для ученых будущего осталась бы принципиально непознаваемой. Когда говорят о «золотом веке космологии», то подразумевают, прежде всего, развитие научно-технической мысли, ошеломительное совершенствование технологий ведения наблюдений. Однако наше преимущество еще и в том, что реликтовое излучение – и что еще более важно, его анизотропия, – не успело истаять бесследно и донесло до нас историю ранней Вселенной.

Обнаружили реликтовое излучение А. Пензиас и Р. Вильсон в 1965 г, не радиоастрономы, а инженеры корпорации «Bell», которые испытывали новый радиометр для целей спутниковой связи и обнаружили избыточный шум. Инженеры отождествили этот шум с неизвестным космическим излучением, не связанным ни с каким конкретным космическим объектом. Особенность реликтового излучения состоит в том, что его мощность не зависит от направления на небе, оно обладает большой степенью изотропии (что подтверждает однородность и изотропию космологической модели Фридмана) и, как следствие изначального термодинамического равновесия всех частиц в плазме, планковским тепловым спектром абсолютно черного тела. Пензиас и Вильсон написали статью об открытии нового излучения и направили ее в научный журнал. К тому времени профессор Р. Дикке из Принстонского университета, на основе теоретических исследований, уже готовил специальную аппаратуру для поиска реликтового излучения. Статья инженеров попала к нему на рецензию, он мгновенно оценил ее, дал добро на опубликование, и сам написал короткую заметку с интерпретацией полученных результатов [10].

Интенсивность реликтового излучения при его открытии была измерена только на одной длине волны. Для доказательства того, что реликтовое излучение обладает тепловым спектром, были проведены многочисленные дополнительные наблюдения в более широком диапазоне длин волн. Помимо подтверждения модели горячего Большого взрыва, реликтовое излучение – и его анизотропия – содержит огромное количество космологической информации, о составе и параметрах ранней Вселенной.

5. Анизотропия реликтового излучения

Анизотропия реликтового излучения – это разница температуры этого излучения в различных направлениях на небе. Реликтовые фотоны идут к нам со всех направлений небесной сферы, поэтому адекватный математический аппарат для анализа углового распределения реликтового излучения – это разложение сигнала по сферическим функциям, или по мультипольным гармоникам. Результаты исследований представляются в виде графика – *углового спектра анизотропии реликтового излучения*, – на котором отложены амплитуды измеренных гармоник в угловом спектре анизотропии реликтового излучения в зависимости от номера гармоники.

При анализе спектра реликтового излучения самую низкую гармонику – *дипольную* – выделяют особо. Дипольная анизотропия реликтового излучения, обусловленная движением наблюдателя сквозь реликтовое излучение, была открыта еще в 1972 г. Современное значение амплитуды дипольной гармоники – около 3 мК. Для дальнейшего исследования анизотропии реликтового излучения радиоастрономы 20 лет улучшали радиометры, после чего были обнаружены предсказанные теорией и более высокие гармоники. Они связаны с первичными флуктуациями гравитационных полей, которые содержат в себе информацию о ранней Вселенной.

Крупномасштабная анизотропия реликтового излучения была открыта в 1992-м г. с помощью советского космического аппарата серии «Прогноз», [11]. Эксперимент назывался «Реликт». Рабочая группа в составе руководителя эксперимента И.А. Струкова, а также Д.П. Скулачева, А.А. Брюханова и М.В. Сажина в январе 1992 г. на научном семинаре в ГАИШ МГУ сообщила об обнаружении анизотропии. Отношение полученного сигнала к шуму было не очень велико, порядка 3. Одновременно с этим была послана статья на русском языке в научный журнал «Письма в Астрономический Журнал», а также в англоязычный научный журнал «Monthly Notices of Royal Astronomical Society». Статью в последнем журнале задержали с публикацией. В конце апреля 1992-го г. научный руководитель проекта DMR, который был установлен на космическом аппарате COBE [12], Дж. Смут объявил на специальной пресс-конференции об открытии анизотропии реликтового излучения. Аппарат COBE, аналогичный спутнику «Реликт» был более совершенный: он имел три частотных канала, по два радиометра в каждом. Репортеры посвятили этому событию огромное количество статей в средствах массовой информации, назвав радиокарты COBE «лицом господ бога»; за свою работу Дж. Смут был в последствие удостоен Нобелевской премии. Однако первыми «лик господ бога» увидели все-таки советские ученые. Многочастотность позволила группе COBE уверенно выделить анизотропию на поверхности последнего рассеяния от анизотропии галактического и внегалактического радиоизлучения. Этот факт, а также большее отношение сигнала к шуму (после завершения эксперимента COBE работал на орбите свыше 4 лет), позволил американским исследователям связывать открытие анизотропии реликтового излучения с результатами своего аппарата.

Далее последовали серии баллонных экспериментов: беспилотный воздушный шар BOOMERang [25], проект «Archeops» [26] и др. В результате чего были уверенно определены первый, второй и третий доплеровские пики. По угловому спектру реликтового излучения определили спектр флуктуаций во Вселенной, а также глобальные космологические параметры, такие как полная плотность Вселенной и ее составляющие (плотность обычного вещества и темной материи, плотность, соответствующая космологической постоянной, и др.). Так, по положению первого доплеровского пика достаточно точно определяется полная плотность Вселенной и, следовательно, ее геометрия, а по его амплитуде – содержание барионов. Было доказано, что наша Вселенная трехмерно-плоская.

Наиболее точные результаты по наблюдению анизотропии (и поляризации) реликтового излучения были получены на космических аппаратах WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, запущен в 2001 году, [27]) и «Планк» (запущен в 2009 году, [8]). Для сравнения, на аппарате WMAP несколько радиометров работали уже на пяти частотах, а на «Планке» на трех низких частотах

(30 – 70 Ггц) и шести высоких (100 – 857 Ггц), что дало возможность построить комбинированную карту анизотропии реликтового излучения, исключив из нее вклады от разных типов излучений нашей Галактики (синхротронное, излучение пыли, свободно-свободное излучение электронов и др.).

6. Распространение легких химических элементов

Распространенность ${}^4\text{He}$ посчитана с точностью 0.4%, основной вклад в эту ошибку дает существующая экспериментальная точность определения времени жизни нейтрона, $t_n = 885.3 \pm 2$ с. Предсказание количества водорода H (75%) и гелия ${}^4\text{He}$ (25%), а также остальных легких элементов хорошо согласуется с наблюдениями, что является основным результатом теории нуклеосинтеза. Из последней, в частности, следует ограничение на общее число типов нейтрино (В. Шварцман). В настоящее время известны три типа нейтрино: электронное ν_e , мюонное ν_μ и тау-нейтрино ν_τ . Поскольку распространенность легких элементов зависит от числа нейтрино, то на основании наблюдений можно получить количество типов нейтрино: 3.13 ± 0.32 .

Теория горячего Большого взрыва дает правильное предсказание наблюдаемой распространенности химических элементов во Вселенной, [17].

В ранней Вселенной в результате первичного нуклеосинтеза образовались следующие элементы: дейтерий (D), тритий (T), ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ..., ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$. Более тяжелые элементы образовались позднее в звездах в результате ядерных реакций.

Современные измерения дейтерия выполняются по линиям поглощения квазаров при высоком красном смещении. Так, максимальное значение обилия дейтерия в разных квазарах считается его значением в результате первичного нуклеосинтеза, поскольку астрофизических источников дейтерия нет.

Распространенность гелия ${}^4\text{He}$ измеряется в областях HII в голубых компактных галактиках, которые претерпели очень мало процессов звездообразования; его величина в результате первичного нуклеосинтеза выводится (а) либо с помощью связанного с ним обилия азота или кислорода для отслеживания образования гелия в звездах, (б) либо просто усреднением по наиболее бедным металлами объектам.

Элемент ${}^3\text{He}$ может как образовываться, так и разрушаться в звездах, и поэтому он ненадежен для его использования в качестве характеристики ранней Вселенной.

Наблюдаемая равномерная распространенность лития ${}^7\text{Li}$ в самых горячих и самых бедных металлами звездах населения II в нашей Галактике, как полагают, отражает его изначальное количество, образованное в ранней Вселенной во время первичного нуклеосинтеза.

7. Темная материя

По классификации современной космологии вещество во Вселенной делится на три типа. К первому типу принадлежит «обычное» (или *видимое*) вещество, которое достаточно стабильно и подвержено электромагнитным взаимодействиям. Другими словами, его можно увидеть в телескоп или изучать в лаборатории. Второй тип – это *темная материя*, а третий тип – *темная энергия*.

Темная материя, открытая в 30-х годах прошлого века специалистами по внегалактической астрономии, получила свое название из-за того, что ее просто не видно в телескоп. Выявить ее присутствие удалось в многократных и разнообразных косвенных наблюдениях, прежде всего, по ее гравитационному влиянию на обычное вещество. Она проявляет себя в существенном отклонении от теоретических предсказаний кривых вращений галактик – звезды на периферии галактик движутся так, как будто на них влияет значительно большая масса, чем та, которую видно в телескопы. Аналогичное противоречие возникает и на более высоком иерархическом уровне, при расчете скоростей галактик в скоплениях.

На роль темной материи отчасти претендуют нейтрино, а также множество еще не обнару-

женных, но предсказываемых теорией, выходящей за рамки Стандартной модели физики частиц, стабильных или квазистабильных частиц (аксионы, WIMP-частицы и др.). Кроме того, темная материя может быть представлена и в виде гораздо более крупных образований: темных планет, остывших звезд – и в этом случае она состоит из обычного вещества; наконец, черные дыры тоже могут составлять часть темной материи.

Конкурирующая, хотя и менее перспективная теория, призванная объяснить скрытое гравитационное влияние на обычное вещество – это предположение о модификации законов гравитации на сверхбольших масштабах (М. Милгром, А.А. Старобинский и др. (см. [29–31] и ссылки в этих работах)).

При поисках темной материи всегда следует держать в уме поучительный пример из истории астрономии. Открытие новой планеты Нептун было осуществлено путем исследования гравитационных возмущений орбиты Урана. Возмущения оказались вызваны не изменением закона Ньютона, а наличием невидимого ранее притягивающего тела – Нептуна. Однако в другом случае, исследуя аномальное движение Меркурия, возмущения его орбиты таким способом объяснить не удалось – не оказалось никакой возмущающей планеты (которой даже поторопились придумать название Вулкан), оказалась неточна сама теория гравитации: общая теория относительности Эйнштейна «скорректировала» расчеты, проведенные по классической теории Ньютона. В случае Меркурия оказалось необходимым модифицировать теорию гравитации, а не искать «темное» тело.

8. Темная энергия

Третий типа вещества, известного в космологии, – это *темная энергия*. Она представляет собой новый, неизвестный вид вещества. Так, если темную материю в будущем вполне вероятно можно будет исследовать в лабораторных условиях, то темную энергию пока принципиально невозможно. Вообще говоря, темная энергия веществом не является – скорее, это свойство самого пространства.

Темная энергия проявляет себя как отталкивающая сила, вызывая ускоренное расширение современной Вселенной. Подобная энергия послужила источником ускоренного расширения и ранней Вселенной, когда не существовало еще плазменного шара, а Вселенная проходила т. н. стадию инфляционного расширения, [32].

Существование темной энергии можно объяснить несколькими способами:

1. наличие новой фундаментальной физической константы – космологической постоянной Λ , вводимой в уравнения Эйнштейна;
2. существование энергии сплошной среды или поля, обладающая отрицательным давлением (квинтэссенция и фантомная энергия); в ранней Вселенной это поле инфлатона.
3. существование динамичной сплошной среды или поля, меняющей свой вид со временем.

Несмотря на то, что микроскопические свойства темной энергии пока изучать невозможно, но об ее усредненных на космологических масштабах характеристиках космологи уже могут сказать довольно много. Темная энергия распределена в пространстве чрезвычайно однородно и обладает паскалевым (изотропным) релятивистским натяжением. Последнее означает, что натяжение примерно равно плотности энергии. Главное свойство темной энергии – это определяющая ускоренное расширение Вселенной антигравитация, поскольку предельно большое релятивистское натяжение дает отрицательный вклад в полную массу.

«Обычное» вещество составляет всего несколько процентов от всей массы нашей Вселенной, [8]: темная материя составляет примерно 28.7%, а темная энергия – 69.1% всей массы. Удивительно, что та материя, к которой человек привык и изучал в течение нескольких тысячелетий, составляет ничтожную долю во Вселенной. Однако этот вывод твердо установлен.

9. Гравитационные волны

В 2015 были обнаружены *гравитационные волны* от слияния двух черных дыр в далекой галактике. Сигнал был зарегистрирован детектором американского проекта LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory).

Открытие гравитационных волн не только блестяще подтвердило предсказания общей теории относительно Эйнштейна, но стало началом новой эры гравитационно-волновой астрономии.

Гравитационная волна – это распространяющееся волновое поле поперечных переменных неоднородных ускорений. Для космологии важнейшее свойство гравитационных волн – это чрезвычайная слабость их взаимодействия с веществом, что дает им важное преимущество по сравнению с электромагнитными волнами. Для гравитационных волн диапазон свободного распространения волн существенно шире, чем для электромагнитных. Таким образом, с помощью приборов гравитационно-волновой астрономии удастся заглянуть за поверхность последнего рассеяния, еще ближе к началу Вселенной, в области энергий, недоступных не только земным ускорителям, но и оптическим телескопам.

Источниками гравитационных волн могут служить двойные звезды, сливающиеся нейтронные звезды, сливающиеся черные дыры промежуточных и сверхбольших масс. Интересный возможный источник гравитационных волн – космические струны. Наконец, еще один источник гравитационных волн – т. н. *космологический* – скрыт от нас толщей непрозрачной космологической плазмы, находящейся за поверхностью последнего рассеяния. Их источник – фазовые переходы во Вселенной, инфляционная стадия расширения ранней Вселенной. Широчайший спектр космологических гравитационных волн (от 10^{-18} ГГц до сотен МГц) несет уникальную информацию о физике взаимодействий на инфляционной стадии, при планковских энергиях. К сожалению, объявленное открытие космологических гравитационных волн (эксперимент BICEP2 – Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization, 2014 год) пока не подтвердилось, [33].

Заключение

Несмотря на кажущуюся всеохватность как во временных, так и пространственных рамках, космология стремится к покорению новых горизонтов, опираясь на совершенствующиеся технологии и все новые и новые теоретические модели. Особый интерес представляет поиск Единой теории, долгожданного объединения квантовой теории и теории гравитации, поиск возможных наблюдательных проявлений многомерных моделей, наблюдательная проверка теории суперструн. Гравитационно-волновая астрономия открывает возможности для проникновения на масштабы планковских энергий, для выявления причин ускоренного расширения Вселенной и обоснования инфляционной парадигмы. Возможно, удастся обнаружить косвенные наблюдательные проявления теории Мультимира, согласно которой наша Вселенная – всего лишь одна из очень многих среди бесконечно рождающихся и гибнущих, вложенных друг в друга миров.

Список литературы

1. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. Изд-во Московского университета, 1988, 199 с.
2. Сажин М.В. Современная космология в популярном изложении. УРСС, 2002, 242 с.
3. Сажин М.В., Сажина О.С. Современное состояние и проблемы космологии // Метафизика: Изд-во РУДН. 2016. Т. 19. № 1. С. 10–30.
4. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. УРСС, 2016, 616 с.
5. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. УРСС, 2020, 568 с.

6. Вайнберг С. Космология. УРСС, 2018, 608 с.
7. The Large Hadron Collider: <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
8. Ade P.A.R. et al [Planck Collaboration]. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. // *Astron. Astrophys.* 2016. Vol. 594. P. A13.
9. Gamov G. Expanding Universe and the Origin of Elements // *Phys. Rev.* 1946. Vol. 70. Pp. 572–573.
10. Penzias A.A. and Wilson R.W. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. // *Astrophys. J.* 1965. Vol. 142. P. 419.
11. Strukov I.A. et al. The Relikt-1 experiment - New results // *MNRAS* 1992. Vol. 258. № 2. Pp. 37–40.
12. Smoot G.F. et al. Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First-Year Maps // *Astroph. J. Lett.* 1992. Vol. 396. P. L1.
13. Zeldovich Ia.B., Einasto J., Shandarin S.F. Giant voids in the Universe. // *Nature*, 1982. Vol. 300. Iss. 5891. Pp. 407–413.
14. Kirshner R.P., Oemler A.Jr., Schechter P.L., Sheckman S.A. A million cubic megaparsec void in Bootes? // *Astrophys. J.* 1981. Vol. 248. Pp. L57–L60.
15. Perlmutter S. Measurements of Ω and Λ from 42 high redshift supernovae // *Astrophys. J.* 1999. Vol. 517. Pp. 565–586.
16. Riess A.G. et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *Astron. J.* 1998. Vol. 116. Pp. 1009–1038.
17. Schramm D.N., Turner M.S. Big-bang nucleosynthesis enters the precision era // *Rev. Mod. Phys.* 1998. Vol. 70. P. 303.
18. Капаччиоли М., Сажина О.С., Сажин М.В. De rerum natura сегодня: об открытии темной материи // *Природа*. 2016. № 11. С. 3–12.
19. Oort J.H. Note on the Determination of K_z and on the Mass Density Near the Sun // *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*. 1932. Vol. VI. № 238.
20. MACHO Collab., C. Alcock et al. // *Astrophys. J.* 2000. Vol. 542. P. 257.
21. EROS-2 Collab., P. Tisserand et al. // *Astron. & Astrophys.* 2007. Vol. 469. P. 387.
22. OGLE Collab., L. Wyrzykowski et al. // *MNRAS* 2011. Vol. 416. P. 2949.
23. Сажин М.В., Сажина О.С. Темная энергия и космология // *Земля и вселенная*. 2012. № 5. С. 32–47.
24. Abbott B.P. and et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // *Phys. Rev. Lett.* 2016. Vol. 116. P. 061102.
25. Crill B.P., BOOMERANG Collaboration. A Measurement of the Angular Power Spectrum of the Cosmic Microwave Background with BOOMERANG // *American Astronomical Society, 195th AAS Meeting*, id.55.04; *Bulletin of the American Astronomical Society*. 1999. Vol. 31. P. 1457.
26. Benoît A. et al. The cosmic microwave background anisotropy power spectrum measured by Archeops // *Astron. Astrophys.* 2003. Vol. 399 Pp. L19–L24.
27. Bennett C.L. et al. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results // *The Astrophys. J. Suppl.* 2013. Vol. 208, Iss. 2. P. 54
28. Liddle A.R. and Lyth D.H. *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*. Cambridge.: Cambridge University Press, 2000, 414 p.
29. Milgrom M. Does Dark Matter Really Exist? // *Scientific American* 2002. № 52. Pp. 42–50.
30. Mordehai Milgrom. MOND theory // *Can.J.Phys.* 2015. Vol. 93(2). Pp. 107–118.
31. Motohashi H., Starobinsky A.A., Yokoyama J. f(R) Gravity and its Cosmological Implications // *International Journal of Modern Physics D*. 2011. Vol. 20. Iss. 08. Pp. 1347–1355.
32. Frieman J., Turner M. and Huterer D. Dark Energy and the Accelerating Universe // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2008. Vol. 46. Pp. 385–432.
33. Сажин М.В., Сажина О.С. Возможное открытие космологических гравитационных волн // *Советский физик*. 2014. № 4 (107). С. 5–9.

References

1. Dolgov A.D., Zeldovich Ya.B., Sazhin M.V. *Cosmology of the Early Universe*. Publisher Moscow State University, 1988, 199 p. (in Russian)
2. Sazhin M.V. *Popular Modern Cosmology*. URSS Publ. Publ., 2002, 242 p. (in Russian)
3. Sazhin M.V., Sazhina O.S. Current state and problems of cosmology *Metaphysics: Publisher RUDN University*, 2016, vol. 19. no. 1. pp. 10–30. (in Russian)
4. Gorbunov D.S., Rubakov V.A. *Early Universe Theory Introduction: Big Bang Theory*. URSS Publ. Publ., 2016, 616 p. (in Russian)
5. Gorbunov D.S., Rubakov V.A. *Early Universe Theory Introduction: Cosmological Perturbations. Inflation Theory*. URSS Publ., 2020, 568 p. (in Russian)
6. Weinberg S. *Cosmology*. URSS Publ., 2018, 608 p. (in Russian)
7. The Large Hadron Collider: <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider>.
8. Ade P.A.R., et al. [Planck Collaboration]. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astron. Astrophys.* 2016, vol. 594, p. A13.
9. Gamov G. Expanding Universe and the Origin of Elements. *Phys. Rev.* 1946, vol. 70, pp. 572–573.
10. Penzias A.A., Wilson R.W. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *Astrophys. J.* 1965, vol. 142, p. 419.
11. Strukov I.A., et al. The Relikt-1 experiment – New results *MNRAS*. 1992, vol. 258, no. 2, pp. 37P–40P.
12. Smoot G.F. et al. Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer First-Year Maps *Astroph. J. Lett.* 1992, vol. 396, p. L1.
13. Zeldovich Ia.B., Einasto J., Shandarin S.F. Giant voids in the Universe. *Nature*, 1982, vol. 300, Iss. 5891, pp. 407–413.
14. Kirshner R.P., Oemler A.Jr., Schechter P.L., Shectman S.A. A million cubic megaparsec void in Bootes? *Astrophys. J.* 1981, vol. 248, pp. L57–L60.
15. Perlmutter S. Measurements of Ω and Λ from 42 high redshift supernovae. *Astrophys. J.* 1999, vol. 517, pp. 565–586.
16. Riess A.G. et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *Astron. J.* 1998, vol. 116, pp. 1009–1038.
17. Schramm D.N. and Turner M.S. Big-bang nucleosynthesis enters the precision era. *Rev. Mod. Phys.* 1998, vol. 70, p. 303.
18. Capaccioli M., Sazhina O.S., Sazhin M.V. De rerum natura today: about discovery of the Dark Matter. *Nature*. 2016, no. 11. pp. 3–12. (in Russian)
19. Oort J.H. Note on the Determination of K_z and on the Mass Density Near the Sun *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 1932, vol. VI, no. 238.
20. MACHO Collab., Alcock C. et al. *Astrophys. J.* 2000, vol. 542, p. 257.
21. EROS-2 Collab., Tisserand P. et al., *Astron. & Astrophys.* 2007, vol. 469, p. 387.
22. OGLE Collab., Wyrzykowski L. et al., *MNRAS*. 2011, vol. 416, p. 2949.
23. Sazhin M.V., Sazhina O.S. Dark Energy and Cosmology. *Earth and the universe*. 2012, no. 5. pp. 32–47. (in Russian)
24. Abbott B.P. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Phys. Rev. Lett.* 2016, vol. 116, p. 061102.
25. Crill B.P., BOOMERANG Collaboration. A Measurement of the Angular Power Spectrum of the Cosmic Microwave Background with BOOMERANG. *American Astronomical Society, 195th AAS Meeting, id.55.04; Bulletin of the American Astronomical Society*. 1999, vol. 31, p. 1457.
26. Benoît A. et al The cosmic microwave background anisotropy power spectrum measured by Archeops. *Astron. Astrophys.* 2003, vol. 399, pp. L19–L24.
27. Bennett C.L. et al. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results. *The Astrophys. J. Suppl.* 2013, vol. 208, Iss. 2, 54 p.
28. Liddle A.R. and Lyth D.H. *Cosmological Inflation and Large-Scale Structure*. Cambridge.: Cambridge University Press, 2000, 414 p.

29. Milgrom M. Does Dark Matter Really Exist? *Scientific American*. 2002, no. 52, pp. 42–50.
30. Mordehai Milgrom. MOND theory. *Can. J. Phys.* 2015, vol. 93(2), pp. 107–118.
31. Motohashi H., Starobinsky A.A., Yokoyama J. f(R) Gravity and its Cosmological Implications *International Journal of Modern Physics D*. 2011, vol. 20, Iss. 08, pp. 1347–1355.
32. Frieman J., Turner M., Huterer D. Dark Energy and the Accelerating Universe. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2008, vol. 46, pp. 385–432.
33. Sazhin M.V., Sazhina O.S. Possible discovery of cosmological gravitational waves. *Soviet physicist*. 2014, no. 4 (107). pp. 5–9. (in Russian)

Авторы

Сажина Ольга Сергеевна, д. ф.-м. н., доцент кафедры небесной механики, астрометрии и гравиметрии; ведущий научный сотрудник отдела релятивистской астрофизики Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Университетский проспект, д. 13, г. Москва, 119234, Россия.
E-mail: cosmologia@yandex.ru

Капаччиоли Массимо, почетный профессор университета Федерико II, университет Федерико II, ул. Чинтия, Неаполь, 80126, Италия.
E-mail: capaccioli@na.astro.it

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Сажина О. С., Капаччиоли М. Космология: наблюдательные основы // *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2019. № 4. С. 125–138.

Authors

Sazhina Olga Sergeevna, Doctor of Science, Associate Professor of Department of Celestial Mechanics, Astrometry and Gravimetry, leading researcher in the Relativistic Astrophysics Department, M. V. Lomonosov Moscow State University, Universitetskiy pr-t, 13, Moscow, 119234, Russia.
E-mail: cosmologia@yandex.ru

Capaccioli Massimo, Emeritus Professor of the University Federico II, University Federico II, Via Cintia, Naples, 80126, Italy.
E-mail: capaccioli@na.astro.it

Please cite this article in English as:

Sazhina O. S., Capaccioli M. Observational Basics of Cosmology. *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2019, no. 4, pp. 125–138.