

К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ В.Л. ГИНЗБУРГА

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Квантовая Вселенная

В.Ф. Муханов

В марте 2013 года научная коллаборация "Планк" после тщательной обработки результатов измерений наконец опубликовала наиболее точную фотографию ранней Вселенной, когда ей было всего несколько сотен тысяч лет. Эта фотография настолько подробно выявила детали галактических зародышей, что оказалось возможным проверить нетривиальные теоретические предсказания, сделанные более 30 лет назад. Поразительно то, что все теоретические предсказания подтвердились с огромной степенью точности. Поэтому без преувеличения можно сказать, что к настоящему времени экспериментально доказано, что квантовая физика, которая обычно считается актуальной в атомных и меньших масштабах, сыграла также решающую роль в образовании структуры всей Вселенной, в том числе галактик, звёзд и планет.

Ключевые слова: космология, ранняя Вселенная, первозданное фоновое излучение, квантовые флуктуации, структура Вселенной

PACS numbers: 04.60. – m, 98.70.Vc, 98.80. – k

DOI: 10.3367/UFNr.2016.07.037857

Содержание

1. Введение. Хаббловское расширение и реликтовое излучение (1117).
2. Проблема образования галактик (1118).
3. Квантовые флуктуации (1120).
4. Космология как точная наука (1121).
5. Заключение (1124).

Список литературы (1124).

1. Введение. Хаббловское расширение и реликтовое излучение

Естественно, учёные и философы всегда интересовались происхождением нашей Вселенной. Однако на протяжении тысячелетий все теории о Вселенной оставались в статусе ничем не обоснованных теологических и философских спекуляций. Космология начала приобретать черты естественной науки менее чем 100 лет назад. А именно, только в 1923 г. Эдвин Хаббл после завершения строительства 100-дюймового телескопа в обсерватории Маунт Вилсон (Mount Wilson Observatory), вблизи Лос-Анджелеса, смог разрешить отдельные звёзды в туманности Андромеды и доказать, что она находится за пределами нашей Галактики. Это открытие ознаменовало начало внегалактической астрономии. Сегодня достоверно установлено, что в наблюдаемой части нашей

Вселенной находится около 100 млрд галактик. Таким образом, скопления, состоящие в основном из нескольких сотен миллиардов звёзд, образуют галактики размером около 100 тыс. световых лет, которые в свою очередь находятся на расстоянии в несколько миллионов световых лет друг от друга. Анализируя спектры удалённых галактик, Хаббл открыл, что они немного сдвинуты в красную сторону, и интерпретировал это красное смещение как доплеровский сдвиг, обусловленный разбеганием галактик. Более того, он обнаружил, что спектры более удалённых галактик имеют большее красное смещение и, следовательно, удаляются от нас с большей скоростью v , пропорциональной расстоянию r до соответствующей галактики,

$$v = Hr,$$

где коэффициент пропорциональности H называется хаббловской постоянной. С открытием Хаббла стало ясно, что наша Вселенная не является статической и вечной, а расширяется и, следовательно, она была образована в какой-то момент в прошлом. Для оценки возраста Вселенной можно на минуту забыть о гравитации, замедляющей скорость расширения, и просто поделить расстояние между галактиками на их относительную скорость:

$$t \approx \frac{r}{v} = \frac{1}{H}.$$

Первоначальное измерение H , сделанное Хабблом, страдало от систематических ошибок, и поэтому оценка возраста Вселенной оказалось существенно заниженной. В настоящее время этот возраст определён довольно точно — около 13 млрд лет.

В.Ф. Муханов. Ludwig-Maximilians-Universität München, Professor-Huber-Platz 2, 80539 München, Deutschland
E-mail: Viatcheslav.Mukhanov@physik.uni-muenchen.de

Статья поступила 13 июня 2016 г.

Открытие Хаббла стало началом научной космологии. Нельзя сказать, что это открытие было полной неожиданностью. В 1922 г. Александр Фридман обнаружил, что в общем случае уравнения Эйнштейна предсказывают, что Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. Более того, предположив, что полная масса Вселенной в 100 млрд раз больше массы нашей Галактики, Фридман оценил, что возраст Вселенной должен составлять около 10 млрд лет [1]. Таким образом, открытие Хаббла можно считать блестящим подтверждением теоретического предсказания Фридмана.

Открытие расширения Вселенной оставалось в течение многих лет единственным экспериментально подтвержденным фактом в космологии. Только по прошествии более чем 30 лет был установлен другой факт. В 1964 г. Арно Пензиас и Роберт Вильсон обнаружили неустранимый шум в радиоантенне. Так как интенсивность радиоизлучения не зависела от направления на небе, было естественно предположить, что это излучение имеет реликтовое происхождение, оно существовало во Вселенной практически с момента её рождения и поэтому должно иметь тепловой планковский спектр. Измеряя интенсивность излучения на длинах волн около нескольких сантиметров, Пензиас и Вильсон определили, что температура излучения должна находиться в интервале между 2,5 и 4,5 К. Реликтовое излучение однородно, и оно пронизывает всё пространство, в то время как барионная материя сосредоточена в основном в галактиках. Число квантов реликтового излучения намного превышает число барионов, а именно, на каждый барион приходится около 1 млрд фотонов.

Открытие реликтового излучения положило начало теории горячей Вселенной. Когда Вселенная расширяется, температура излучения уменьшается обратно пропорционально её размеру. Поэтому, когда Вселенная была в 1000 раз меньше и её возраст составлял всего лишь около 300 тыс. лет, температура реликтового излучения составляла около 3000 К. Этого достаточно, чтобы ионизировать практически весь водород, составляющий около 75 % всей барионной материи. При более высоких температурах излучение рассеивалось на свободных электронах и Вселенная оказывалась непрозрачной для реликтового излучения. Лишь после того как температура опустилась ниже 3000 К, большинство электронов было захвачено протонами и при этом образовывался нейтральный водород, в дальнейшем Вселенная стала прозрачной для подавляющего большинства квантов реликтового излучения. То время, в течение которого водород стал нейтральным, называется эпохой рекомбинации. Рекомбинация, естественно, не являлась мгновенной — её продолжительность составляла около 100 тыс. лет.

Теория рекомбинации водорода была разработана Яковом Зельдовичем, Владимиром Куртом и Рашидом Сюняевым [2] в 1968 г. Главная особенность этой теории состоит в том, что существенным для рекомбинации оказался маловероятный двухквантовый $2s-1s$ -переход в водороде. В настоящее время теория рекомбинации блестяще подтверждена данными по флуктуациям температуры реликтового излучения, и поляризационные кривые, полученные в эксперименте "Планк", позволяют измерить скорость двухквантового распада $2s$ -состояния водорода с точностью до 5 %, что существенно превышает точность лабораторных измерений, и таким

образом демонстрируют возможности современной прецизионной космологии (precision cosmology).

После того как Вселенная стала прозрачной для излучения, большинство фотонов не рассеивалось, и, следовательно, они дают нам возможность получить прямую фотографию ранней Вселенной, в возрасте всего лишь нескольких сотен тысяч лет. Эта фотография, впервые полученная Пензиасом и Вильсоном, показывала, что, хотя сегодня мы видим галактики, звёзды и другие структуры, в прошлом никаких структур и даже их зародышей не видно вообще. Если бы вещество, включая реликтовое излучение, было распределено немного неоднородно, то Пензиас и Вильсон должны были бы увидеть вариации температуры реликтового излучения в различных направлениях на небе. Отсутствие таких вариаций можно было объяснить только тем, что либо теория горячей Вселенной неправильна, либо недостаточна чувствительность радиодетекторов. Естественно, теоретики, работавшие в 1970-х годах в области космологии, предпочитали второе объяснение, а экспериментаторы безуспешно пытались найти вариации температуры. В частности, одной из основных задач построенного в СССР в 1970-х годах 600-метрового радиотелескопа РАТАН-600¹ являлся поиск флуктуаций температуры реликтового излучения.

Возвращаясь к истории, важно отметить следующее: факт, состоящий в том, что Вселенная могла быть очень горячей, в XX в. не явился полной неожиданностью. Из наблюдений интенсивности спектральных линий было известно, что 75 % всего барионного вещества во Вселенной составляет водород и 25 % — гелий-4, а все другие элементы присутствуют в незначительном количестве. В то время как происхождение тяжёлых элементов можно было объяснить ядерными реакциями в звёздах, объяснить происхождение гелия было трудно. Действительно, из предположения, что весь гелий был также синтезирован в звёздах, следовало, что светимость неба должна быть как минимум в 100 раз больше, чем мы видим в действительности. Поэтому в 1940-х годах Георгий Гамов [3] и его коллеги Ральф Альфер и Роберт Герман [4] пришли к заключению, что большинство гелия было произведено в ранней горячей Вселенной, когда температура была очень высока. Вся высвободившаяся при этом энергия термализовалась, и излучение охладилось в результате последующего расширения. Таким образом загадка происхождения гелия разрешалась. Хотя фактически расчёты Гамова, Альфера и Германа были не вполне правильными, они случайно даже угадали сегодняшнее правильное значение температуры реликтового излучения, которое и было установлено 15 лет спустя Пензиасом и Вильсоном. Дальнейшие расчёты Роберта Вагонера, Уильяма Фаулера и Фреда Хойла в 1967 г. полностью подтвердили, что химическое обилие гелия и других лёгких элементов на самом деле можно объяснить в теории горячей Вселенной [5].

2. Проблема образования галактик

В 1976 г. я, будучи студентом Московского физико-технического института, после преодоления многочисленных препятствий, устроенных администрацией инсти-

¹ РАТАН — аббревиатура от "Радиоастрономический телескоп Академии наук".

туда, всё же умудрился добиться перевода на кафедру Виталия Лазаревича Гинзбурга. Мне непременно хотелось заниматься космологией, несмотря на то что большинство физиков в то время, как я уже теперь отчётливо осознаю, не придавало никакого серьёзного значения исключительно теоретическим измышлениям о Вселенной. Только благодаря научной демократичности Виталия Лазаревича, который через три года стал моим научным руководителем, я получил возможность заниматься тем, что меня действительно интересовало. Как неоднократно повторял В.Л., "моя роль как руководителя заключается в том, чтобы не мешать Вам работать".

Когда я начал заниматься космологией, вся наука о происхождении Вселенной основывалась на "полутора" экспериментальных фактах. Действительно, за весьма редким исключением, практически никто не сомневался в том, что Вселенная в самом деле расширяется. Относительно происхождения реликтового излучения такой твёрдой уверенности всё же не было. Несмотря на то что подавляющее большинство космологов было почти уверено в первичном происхождении реликтового излучения, это ещё не являлось твёрдо установленным фактом, и время от времени публиковались статьи с альтернативными объяснениями происхождения этого излучения. Для того чтобы разрешить все сомнения, надо было с высокой точностью измерить спектр реликтового излучения и убедиться в том, что он действительно является планковским в широком диапазоне частот, включая виновскую часть спектра, для которой атмосфера была непрозрачной. К концу 1970-х годов результаты измерений для соответствующих частот, осуществлённых на воздушных шарах, были довольно противоречивыми.

Одной из проблем, серьёзно занимавших в конце 1970-х годов космологов (которых в то время было несколько десятков раз меньше, чем сегодня), была проблема образования галактик из каких-либо наперёд заданных начальных возмущений. Из наблюдений реликтового излучения следовало, что Вселенная не имела никакой структуры в то время, когда она была в тысячу раз меньше, чем сегодня. Естественно, возникал вопрос: каким образом тогда образовались галактики? Было ясно, что гравитационная неустойчивость должна была при этом играть ключевую роль. Действительно, в нормальных условиях гравитация является притягивающей силой. Поэтому если вещество распределено немного неоднородно, то те области, в которых его плотность выше, будут заимствовать вещество из соседних менее плотных областей, до тех пор пока те не опустеют. Таким образом, в итоге распределение вещества станет сильно неоднородным и большинство барионов окажется в галактиках. Тем не менее, для того чтобы в результате гравитационной неустойчивости образовались большие неоднородности, надо начинать с каких-то первичных возмущений. Насколько велики эти возмущения, зависит от эффективности гравитационной неустойчивости.

В начале XX в. Джеймс Джинс установил, что в статической, нерасширяющейся, Вселенной неоднородности возрастают экспоненциально [6]. Однако, как было показано Евгением Лифшицем в 1946 г., в расширяющейся Вселенной возрастание неоднородностей происходит существенно медленнее [7]. Правильная интерпретация результатов расчётов Лифшица означает, что на

масштабах, превышающих размер причинно-связанной области, неоднородности полностью "заморожены", и только после того как возмущения входят под космологический горизонт и становятся причинно-связанными, их амплитуда начинает возрастать степенным образом в прямой пропорции размеру Вселенной. Отсюда следует, что в галактических масштабах все начальные неоднородности были заморожены в течение первых 100 тыс. лет и только затем могли возрасти, как максимум, в 10 тыс. раз.

Таким образом, для объяснения структуры Вселенной необходимо предположить, что плотность вещества в момент рекомбинации не была равномерно распределённой — имелись отклонения от её среднего значения примерно на 0,01 %. Эти небольшие вариации плотности вещества должны сопровождаться вариациями температуры излучения. Следовательно, возникал естественный вопрос: почему же мы не видим вариаций температуры (около 0,01 %) на фотографии, полученной Пензиасом и Вильсоном? Если излучение действительно имеет реликтовое происхождение, то тогда флуктуации температуры непременно должны быть видны на фотографии!

Первые теоретические оценки ожидаемых флуктуаций температуры, сделанные Рашидом Сюняевым, Яковом Зельдовичем [8], Джимом Пиблсом и Джером Ю [9] в 1970 г., не были настолько определёнными, чтобы с уверенностью вступить в противоречие с результатами экспериментов, и отсутствие флуктуаций температуры вполне можно было объяснить недостаточной чувствительностью детекторов. В то же время было абсолютно ясно, что если теория горячей Вселенной верна, то в конце концов после повышения чувствительности детекторов мы сможем неизбежно их обнаружить.

Неудовлетворительное состояние наблюдательной космологии в 1970-х – 1980-х годах также объясняет, почему в то время существовало так много различных теорий образования галактик. В частности, в отношении характера возмущений можно было предположить, что в какой-то начальный момент как барионы, так и излучение были немного неоднородно распределены в пространстве, но при этом число фотонов, приходящихся на каждый барион, являлось постоянным в пространстве. Такие возмущения называются адиабатическими.

Теория адиабатических возмущений развивалась главным образом в Советском Союзе. Поскольку в те времена о существовании тёмной энергии и небарионной тёмной материи не было известно, эта теория не вполне согласовывалась с астрофизическими наблюдениями. Поэтому за рубежом, в частности в США, предпочитали теорию энтропийных возмущений, которая, как считалось, гораздо лучше объясняет наблюдательные данные. В теории энтропийных возмущений предполагается, что первоначально только барионы были распределены неоднородно на однородном фоне реликтового излучения. В конце концов даже вихревая теория образования галактик, несовместимая с фридмановской моделью ранней Вселенной, всё ещё считалась конкурентоспособной.

Также ничего не было известно о статистических свойствах первичных возмущений. Можно было предположить, что либо начальные неоднородности описываются случайным гауссовым процессом, либо в них закодирована дополнительная информация и они являются сильно негауссовыми. Например, очень популярные в 1980-х годах теории космических струн и текстур пред-

сказывали очень большую негауссовость первичных возмущений.

3. Квантовые флуктуации

Неудивительно, что после первоначальных попыток добавить к перечисленному выше списку теорий образования галактик ещё одну я окончательно разочаровался и предпочёл более академическую тему, в те времена ничего общего с наблюдениями не имевшую. А именно, вместе с моим соавтором Геннадием Чибисовым мы решили выяснить природу происхождения начальных неоднородностей, которые впоследствии могли бы привести к рождению галактик. Принимая априори, что по каким-то неизвестным нам причинам Вселенная была создана в максимально однородном состоянии, мы задались вопросом: а не могли ли неизбежные квантовые флуктуации в распределении вещества быть ответственными за образование структуры Вселенной?

В середине 1979 г., когда мы начали работу на эту тему, практически не было посвящённых данной теме публикаций. Впоследствии, когда наша работа уже была завершена, мы обнаружили статью Андрея Сахарова [10], в которой он ещё в 1965 г. сделал попытку квантования космологических возмущений в рамках холодной Вселенной. Поскольку в этом случае усилить квантовые флуктуации невозможно, статья Сахарова [10] прошла незамеченной.

Первая задача, с которой мы столкнулись, заключалась в том, чтобы проквантовать возмущения в гидродинамической среде с учётом гравитации. Квантование линейризованных гравитационных волн было хорошо известно, но никто до этого не пытался серьёзно квантовать гравитационное поле, индуцированное неоднородностями квантовой материи. Соотношение неопределённостей Гейзенберга неизбежно приводит к минимальным неоднородностям, и нам хотелось выяснить, при каких условиях, если это вообще возможно, такие неоднородности могут оказаться достаточными для образования галактик. На первый взгляд идея казалась слегка сумасшедшей, так как квантовые эффекты обычно существенны лишь в масштабах атомов или меньших. Однако не следует забывать, что сразу после образования Вселенной вся материя нашей Галактики была сосредоточена в области с размером, меньшим размера атома. Именно поэтому квантовая механика могла оказаться очень существенной в тех масштабах, которые сегодня стали огромными вследствие расширения Вселенной. В случае, если бы мы оказались правы, это расширение послужило бы недостающим звеном, связывающим атомные и галактические масштабы, микро- и макрофизику.

Весной 1980 г. формальная квантовая теория космологических возмущений была в основном завершена. На основе этой теории мы доказали, что в расширяющейся Вселенной, где гравитация всегда является притягивающей силой и замедляет расширение, усилить квантовые возмущения до необходимой амплитуды невозможно. Нам также удалось показать, что квантовые флуктуации можно было бы усилить только при предположении, что в самом начале Вселенная прошла через стадию ускоренного квази-де-ситтеровского расширения, во время которой гравитация эффективно действовала как отталкивающая сила (антигравитация) [11]. Используя модель

такой стадии, предложенную Алексеем Старобинским [12] в 1980 г. с целью решения проблемы начальной сингулярности, мы нашли, что квантовые флуктуации разрушают де-ситтеровскую стадию в течение конечного времени и, следовательно, проблема сингулярности не решается таким образом. С другой стороны, было показано, что в случае, когда эта стадия была достаточно продолжительной, начальные квантовые неоднородности усиливаются до необходимых значений, и был рассчитан спектр возмущений.

Таким образом, к концу 1980 г. мы практически завершили теорию квантового происхождения структуры во Вселенной и работа с окончательным спектром возмущений была опубликована в мае 1981 г. в *Лисьмах в ЖЭТФ* [13]. В течение года после публикации нашей работы Стивен Хокинг, используя другие методы, независимо пришёл к тем же выводам [14].

Приблизительно в то же самое время Алан Гут заметил, что стадия ускоренного расширения (которую он назвал космической инфляцией) могла бы помочь объяснить, почему Вселенная является однородной и изотропной в больших масштабах, а также решить проблемы причинности и отсутствия магнитных монополей (в те времена большинство физиков, занимавшихся элементарными частицами, верило в теории Большого объединения, где монополи неизбежны) [15]. Аналогичная идея была высказана в 1977 г. Робертом Браутом, Франсуа Энглертом и Эдгаром Гунцигом [16], но осталась незамеченной широкой физической общественностью². Гут пытался обосновать существование стадии ускоренного расширения наличием конденсата скалярного поля, но не смог представить конкретной модели, в которой можно было бы плавно перейти от стадии ускоренного расширения к стадии замедленного фридмановского расширения. В моделях со скалярным полем эта проблема была решена в 1982–1983 гг. Андреем Линде [20, 21].

Впоследствии я смог показать, что предсказания теории квантовых космологических возмущений фактически не зависят от модели реализации квази-де-ситтеровского расширения и являются теми же самыми, что и в нашей первоначальной модели. Только амплитуда первичных гравитационных волн, предсказанных Старобинским [22] ещё в 1979 г., может существенно варьироваться от модели к модели.

Таким образом, полученные нами в 1981 г. предсказания оказались универсальными. А именно, мы обнаружили, что если начальные неоднородности возникли из начальных квантовых флуктуаций, то они должны быть: а) адиабатическими, б) гауссовыми, и в) амплитуда гравитационного потенциала должна логарифмически возрастать с увеличением масштаба. Кроме того, если не делать специальных предположений о продолжительности стадии, на которой усиливались квантовые флуктуации, то неизбежно следует, что сегодня геометрия Вселенной на больших масштабах должна быть евклидовой.

Как отмечалось выше, адиабатичность означает, что, хотя плотность барионов и тёмной материи может слегка варьироваться в пространстве, число фотонов, приходящихся на один барион (или на одну частицу

² Впервые на возможность прохождения ранней Вселенной через де-ситтеровскую стадию было указано в работах Э.Б. Глинера [17–19].

холодной тёмной материи), изначально должно быть строго постоянным во всём пространстве.

Метрику плоской (евклидовой) Вселенной Фридмана с малыми возмущениями можно представить в виде

$$ds^2 = a^2(\eta)[(1 + 2\Phi)d\eta^2 - (1 - 2\Phi)\delta_{ik}dx^i dx^k],$$

где $a(\eta)$ — масштабный фактор, характеризующий расширение Вселенной, Φ — пространственно зависимый гравитационный потенциал, обусловленный неоднородностями. Поскольку начальные возмущения возникали в результате усиления гауссовых квантовых флуктуаций внешним классическим полем (гравитационным полем ускоренно расширяющейся Вселенной), результирующий гравитационный потенциал должен описываться гауссовым случайным полем Φ_{gauss} с точностью до поправок второго порядка, возникающих из-за нелинейности уравнений Эйнштейна, т.е.

$$\Phi = \Phi_{\text{gauss}} + f_{\text{NL}}\Phi^2,$$

где параметр f_{NL} должен быть порядка единицы, т.е. $f_{\text{NL}} = O(1)$. Гравитационный потенциал в галактических масштабах составляет $O(1) \times 10^{-5}$, вклад негауссовой примеси не должен превышать 10^{-9} .

Наконец, самое тонкое и поразительное предсказание теории касается спектра возмущений. Как мы обнаружили, сразу после окончания стадии ускоренного расширения амплитуда гравитационного потенциала должна логарифмически возрастать с увеличением масштаба λ :

$$\Phi(\lambda) \propto \ln \frac{\lambda}{\lambda_\gamma}.$$

Физической причиной неизбежности логарифмического возрастания амплитуды является необходимость плавного перехода от стадии ускоренного расширения к обычной фридмановской стадии. В том диапазоне масштабов, который мы сегодня можем наблюдать, логарифмическую зависимость можно аппроксимировать степенной:

$$\Phi^2 \propto \lambda^{1-n_s},$$

где спектральный индекс n_s в галактических масштабах должен выражаться как

$$n_s = 1 - \frac{d \ln \Phi^2}{d \ln \lambda} = 1 - \frac{2}{\ln(\lambda_{\text{gal}}/\lambda_\gamma)} \approx 0,96.$$

В случае плоского спектра, когда амплитуда не зависит от масштаба, спектральный индекс равнялся бы единице. Однако теория предсказывала неизбежные отклонения n_s от единицы, составляющие порядка 4%. Эти четыре процента определяются отношением галактических масштабов λ_{gal} к характерной длине волны реликтового излучения λ_γ и таким образом непосредственно выявляют связь микро- и макрофизики.

Для того чтобы получить необходимую амплитуду неоднородностей $\Phi \approx 10^{-5}$, мы должны предположить, что квантовые возмущения усиливались в то время, когда плотность вещества во Вселенной была всего лишь в 10^{12} раз меньше планковской, а возраст Вселенной составлял всего лишь 10^{-36} с. Естественно, микрофизика при столь высоких энергиях неизвестна. Однако после перехода на стадию замедленного фридманов-

ского расширения образовавшиеся галактические зародыши были заморожены в течение приблизительно 100 тыс. лет в силу принципа причинности. Поэтому неизвестная физика высоких энергий была для них совершенно неважна. С другой стороны, по истечении 100 тыс. лет, когда зародыши начали развиваться, энергии становятся настолько низкими, что ситуация оказывается под полным контролем.

Таким образом, из простого предположения о том, что структура Вселенной возникла из начальных квантовых флуктуаций, следуют четыре весьма нетривиальных предсказания: 1) наличие евклидовой геометрии, 2) адиабатичность возмущений, 3) $f_{\text{NL}} = O(1)$, 4) величина $n_s \approx 0,96$. Очевидно, что при существовании убедительных данных теорию со столь большим предсказательным потенциалом, казалось бы, нетрудно или подтвердить, или опровергнуть. Однако состояние наблюдательной космологии вплоть до начала 1990-х годов было довольно плачевным, и поэтому теория квантовых возмущений не была сразу же отвергнута, хотя она и находилась в противоречии почти со всеми имевшимися астрофизическими данными. В частности, вплоть до 1998 г. астрономические наблюдения убедительно указывали на то, что во Вселенной недостаёт тёмной материи, чтобы сделать Вселенную евклидовой. Как казалось, адиабатические, гауссовы, возмущения не могут объяснить происхождения галактик. Поэтому большинство астрофизиков отдавало предпочтение либо энтропийным возмущениям, либо топологическим дефектам. Более того, низкая точность измерений не позволяла даже мечтать о доказательстве гауссовости начальных возмущений, не говоря уже об обнаружении 4%-ного отклонения спектра от плоского. Последнее относилось к области фантастики всего лишь 15 лет назад. Вплоть до начала 1990-х годов никто не смог обнаружить никаких флуктуаций реликтового излучения и убедиться в планковской природе его спектра. Ясно, что в таких условиях можно было легко усомниться даже в самой теории горячей расширяющейся Вселенной. Более того, в 1987 г. японско-американская группа объявила, что в эксперименте на ракете они обнаружили существенные отклонения спектра от планковского. Если бы они оказались правы, то это было бы концом теории горячего Большого взрыва.

4. Космология как точная наука

Неудивительно, что в сложившейся ситуации все с нетерпением ожидали первых результатов космического эксперимента COBE (Cosmic Background Explorer), которые были опубликованы в 1992 г. Согласно Нобелевскому комитету по физике эти результаты явились "отправной точкой для космологии как точной науки".

Научная аппаратура спутника COBE состояла из трёх инструментов, два из которых предназначались для изучения реликтового излучения, а именно высокочувствительный радиометр для измерения анизотропии температуры (Differential Microwave Radiometer — DMR) (научный руководитель Джордж Смут) и спектрофотометр для измерения спектра реликтового фона (Far-InfraRed Absolute Spectrophotometer — FIRAS) (научный руководитель Джон Мазер).

Результаты измерений оказались сенсационными. Было установлено, что спектр реликтового излучения

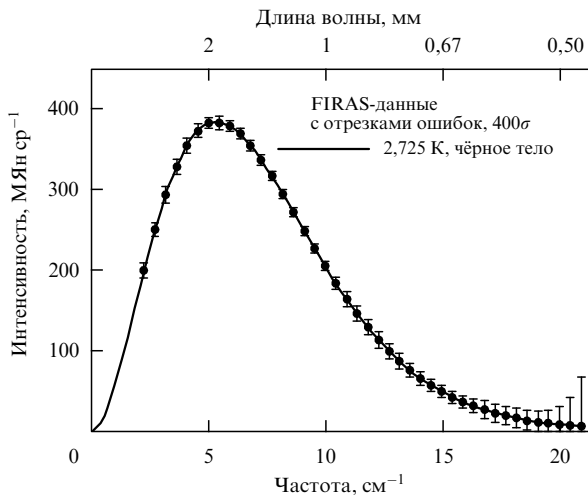


Рис. 1. Спектр реликтового излучения, измеренный COBE.

является планковским с огромной степенью точности и его температура составляет 2,725 К (рис. 1). Таким образом, первичная природа этого излучения была установлена, вне всяких сомнений.

С помощью DMR сделано ещё более сенсационное открытие. Впервые были обнаружены небольшие вариации температуры реликтового излучения в разных направлениях на небе, которые составляли около 0,0001 К (рис. 2). Таким образом, мы наконец смогли увидеть зародыши галактик во Вселенной, когда ей было всего лишь несколько сотен тысяч лет. Имея эту фотографию ранней Вселенной, можно было надеяться восстановить и портрет ещё более молодой Вселенной, когда её возраст исчислялся ничтожно малыми долями секунды. Действительно, как отмечалось выше, в тех масштабах, которые впоследствии растянулись в галактические и большие, согласно эйнштейновской теории гравитации, после стадии ускоренного расширения неоднородности не развивались вплоть до того момента, в который Вселенная "постарела" до 100 тыс. лет. В этом заключается вся мощь гравитации, которой абсолютно безразличны все другие взаимодействия в тех масштабах, где она доминирует. Зародыши галактик "просыпаются" и начинают развиваться только тогда, когда Вселенной уже около 100 тыс. лет. А для этого времени мы уже с уверенностью знаем всю физику, определяющую дальнейшую эволюцию неоднородностей.

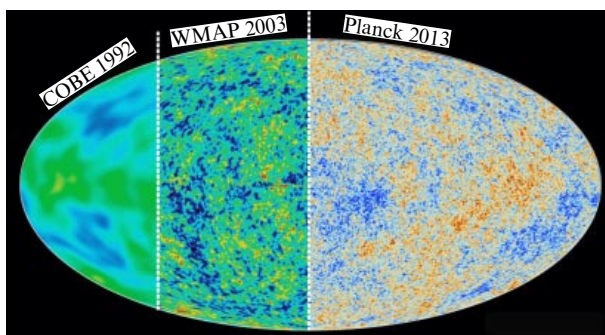


Рис. 2. COBE, WMAP и Planck последовательно выявили всё более детальную структуру ранней Вселенной.

Таким образом, из результатов COBE однозначно следовало, что мы на самом деле живём в горячей расширяющейся Вселенной и даже можем увидеть зародыши галактик. Тем не менее полученная фотография начальных неоднородностей была ещё недостаточно детальной для того, чтобы сделать однозначный вывод о их происхождении. Разрешение DMR было не слишком высоким, что не позволяло детально изучить структуру неоднородностей. Поэтому, хотя результаты COBE не противоречили теории квантовых возмущений, они оказались совместимыми также с другими теориями, такими как, например, космические струны, текстуры, и даже с энтропийными возмущениями. Следующей задачей на повестке дня стало улучшение чувствительности и углового разрешения измерений флуктуаций реликтового излучения.

Прежде чем продолжить историю наблюдений реликтового излучения, хотелось бы кратко остановиться на результатах, полученных в области внегалактической астрономии в 1990-е годы. Здесь также был достигнут огромный прогресс благодаря введению в строй качественно новых телескопов, таких как 2,4-метровый космический телескоп Хаббла, два 10-метровых Кеэк-телескопа, построенные на Гавайях, телескоп VLT (Very Large Telescope) в Чили, состоящий из четырёх 8-метровых зеркал, и многие другие. Эти телескопы позволили существенно углубить наши знания о современном состоянии Вселенной и непосредственно в той области, которая чрезвычайно важна для космологии.

Уже в 1980-х годах было абсолютно ясно, что во Вселенной должна существовать какая-то тёмная, невидимая телескопами, материя. В противном случае было практически невозможно объяснить ни вращательные кривые галактик, ни динамику скоплений галактик.

Стоит отметить, что на необходимость такой материи для скоплений первым обратил внимание Фриц Цвикки ещё в 1930-х годах. Одной из основных загадок являлся состав этой тёмной материи. Предположение о её барионном происхождении не вполне согласовывалось с распространённостью дейтерия, поскольку если бы количество барионного вещества сильно превышало наблюдаемое, то дейтерий выгорел бы уже в ранней Вселенной. Поэтому в 1980-е годы была выдвинута гипотеза о небарионном происхождении тёмной материи, а именно предполагалось, что её могут составлять неизвестные частицы, которые до сих пор не были обнаружены на ускорителях. Однако даже в середине 1990-х годов, согласно наблюдениям, тёмной материи в галактиках и их скоплениях явно не хватало для того, чтобы сделать Вселенную евклидовой (плоской). Этот факт противоречил теоретическим предсказаниям, и если бы он был подтверждён, то теория квантовых возмущений и вся инфляционная космология были бы опровергнуты. К счастью, недостающая материя была обнаружена в виде тёмной антигравитирующей энергии, которая распределена однородно во всей Вселенной и поэтому не влияет ни на вращательные кривые галактик, ни на динамику их скоплений.

В 1998 г. две группы исследователей, возглавляемые Брайеном Шмидтом, Адамом Риссом и Солом Перлмуттером, на основе наблюдения сверхновых на больших расстояниях пришли к заключению, что в настоящее время наша Вселенная расширяется с ускорением и, следовательно, доминирующим компонентом вещества

в ней должна быть однородно распределённая антигравитирующая тёмная энергия. Таким образом, недостающее вещество было найдено.

Среди других астрономических наблюдений следует выделить Слоуновский цифровой небесный обзор (Sloan Digital Sky Survey — SDSS). В этом эксперименте с помощью 2,5-метрового телескопа в 2000-х годах были измерены красные смещения более чем 1 млн галактик. В результате космологический принцип, утверждающий, что Вселенная в больших масштабах однородна и изотропна, стал наконец неоспоримым фактом. Более того, SDSS показал, что в меньших масштабах структура Вселенной напоминает космическую паутину (Cosmic Web). В частности, галактики, сгущиваясь, образуют скопления, связанные филаментами. В свою очередь филаменты ограничены стенками, между которыми находятся пустоты (voids). Другим достижением астрономии явилось обнаружение в 2005 г. барионных акустических осцилляций в распределении материи в сегодняшней Вселенной, в полном соответствии с результатами измеренных к тому времени флуктуаций температуры реликтового излучения, характеризующих раннюю Вселенную. И наконец, недавние измерения распространённости первичного дейтерия позволили определить независимым от реликтового излучения методом плотность барионов во Вселенной с большой степенью точности.

Возвращаясь к реликтовому излучению, следует подчеркнуть, что, в отличие от астрономических наблюдений, измерения флуктуаций температуры не страдают в такой степени от неконтролируемых систематических ошибок и непосредственно относятся к ранней Вселенной, которая была гораздо проще современной. Благодаря колоссальному техническому прогрессу и созданию новых чувствительных детекторов в миллиметровой и субмиллиметровой областях, после COBE оказалось возможным проводить измерения флуктуаций температуры на воздушных шарах и даже с Земли. Конечно, эти эксперименты ограничены лишь сравнительно небольшой частью неба в направлениях, где оно наиболее прозрачно для реликтового излучения. Однако разрешение в таких экспериментах было по меньшей мере в 10 раз лучше, чем у COBE, что давало возможность изучить детальную структуру неоднородностей в меньших масштабах.

Как отмечалось выше, неоднородности в галактических масштабах начали развиваться, когда Вселенной было около 100 тыс. лет. В частности, после вхождения под космологический горизонт (размер причинной области), но ещё до рекомбинации, неоднородности представляли собой стоячие звуковые волны. В результате спектр возмущений модулировался и приобретал максимумы и минимумы.

Таким образом, в случае адиабатических возмущений зависимость разности между температурами двух антенн от углового расстояния между ними должна иметь множество максимумов (называемых акустическими пиками). Расположение и амплитуда этих пиков зависят не только от исходного спектра неоднородностей, но и от состава вещества и геометрии Вселенной. В случае плоской евклидовой Вселенной первый пик должен был бы находиться приблизительно на угловом расстоянии в 1° между антеннами.

К первому большому триумфу теории привели изменения, осуществлённые в 1999 г. в двух наземных экспе-

риментах: Saskatoon³ и Microwave Anisotropy Telescope (MAT)/TOCO (Cerro Toco — гора в Чили), возглавляемых Лайманом Пейджем. Было обнаружено, что этот пик действительно находится на угловом расстоянии в один градус и, следовательно, Вселенная должна быть евклидовой. Таким образом, было установлено, что тёмной энергии вполне достаточно, чтобы обеспечить плоскостность Вселенной. Через несколько месяцев этот результат был полностью подтверждён в экспериментах на воздушных шарах BOOMERANG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics) и MAXIMA (Millimeter Anisotropy eXperiment IMaging Array), руководили которыми соответственно Пабло де Бернардис с Эндрю Ланге и Пол Ричардс. Кроме того, были найдены второй и третий акустические пики, что в свою очередь явилось сильным свидетельством в пользу адиабатических возмущений и надёжным доказательством существования тёмной энергии. Таким образом, в начале 2000-х годов теория квантовых возмущений "устранила" своих конкурентов, но проверка более тонких предсказаний этой теории всё ещё была впереди.

В течение последующих лет в нескольких десятках других экспериментов на Земле и на воздушных шарах результаты BOOMERANG/MAXIMA были полностью подтверждены и угловое разрешение было ещё улучшено. Однако, чтобы получить полную детальную картину ранней Вселенной, были необходимы существенно более дорогие космические эксперименты.

В 1996 г. Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (NASA) (США) утвердило космическую миссию WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), которую возглавили Чарльз Беннет и Лайман Пейдж. Чувствительность WMAP в 40 раз превышала чувствительность COBE, а угловое разрешение было в 30 раз лучше (см. рис. 2). Запущенный в июне 2001 г. WMAP в течение девяти лет проводил измерения флуктуаций температуры и поляризации реликтового излучения. Уже после опубликования первых данных в 2003 г. стало ясно, что результаты измерений хорошо согласуются с предсказаниями теории квантовых флуктуаций. Эти данные однозначно свидетельствовали в пользу евклидовой Вселенной с адиабатическими гауссовыми возмущениями. Более того, в 2006 г. с увеличением объёма собранных данных появились указания на отклонения спектра возмущений от плоского, как и предсказывалось теорией. Тем не менее оставалось ещё довольно много скептиков, ставящих под сомнение наиболее тонкие предсказания, связанные с гауссовостью и спектральным индексом возмущений. Окончательный вердикт был вынесен экспериментом Planck, который имел в 100 раз лучшую чувствительность и в пять раз лучшее угловое разрешение по сравнению с таковыми WMAP (см. рис. 2). Хотя миссия Planck была утверждена Европейским космическим агентством приблизительно в то же время, что и WMAP, по ряду причин запуск спутника Planck был отложен до мая 2009 г. Проект включал в себя два отдельных инструмента: высокочастотный — HFI (High Frequency Instrument) — и низкочастотный — LFI (Low Frequency Instrument), возглавляемых соответственно Жаном-Луи Пуже и Назарено Мондолези. Существенного улучшения результатов по сравнению с результатами WMAP уда-

³ Эксперимент назван по имени канадского города Саскатун.

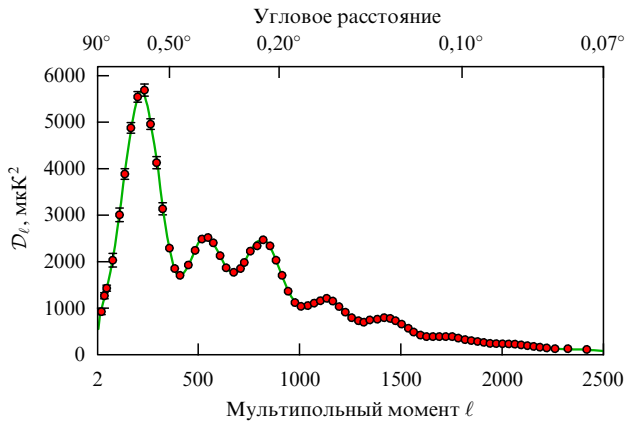


Рис. 3. Флуктуации температуры \mathcal{D}_ℓ как функции углового расстояния между антеннами. Экспериментальные результаты (кружки) находятся в очень хорошем согласии с теоретическими предсказаниями (сплошная кривая).

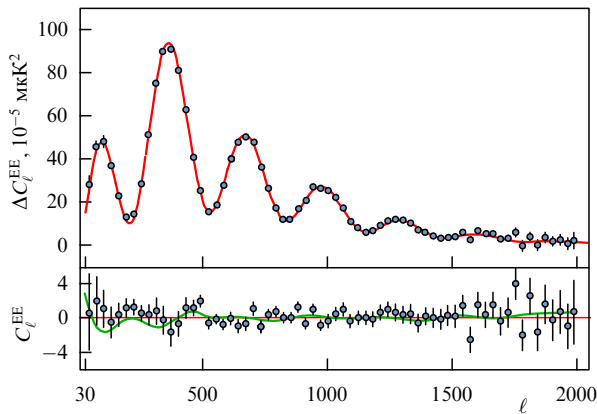


Рис. 4. Результаты Planck (кружки) для корреляционной функции поляризации C_ℓ^{EE} и ΔC_ℓ^{EE} , которые, как видно, находятся в блестящем соответствии с результатами теории (сплошные кривые).

лось достичь главным образом благодаря NFI. Первые результаты эксперимента Planck были опубликованы в конце марта 2013 г. (рис. 3, 4) (более подробно см. [23]). После обработки полученных наиболее точных карт ранней Вселенной было установлено, что теоретические предсказания более чем 30-летней давности полностью подтверждаются с очень высокой степенью точности. В частности, оказалось, что с точностью до 0,5% (1σ) Вселенная евклидова. Возмущения должны быть адиабатическими как минимум на 99%. Гауссовость начальных неоднородностей была подтверждена с максимальной возможной степенью точности ($f_{NL} = 0,8 \pm 5$). И наконец, что наиболее поразительно, отклонения спектра от плоского установлены на уровне 7σ . В частности, измеренный спектральный индекс оказался равным $0,965 \pm 0,005$ (наше с Чибисовым предсказание в 1981 г. — 0,96).

Наряду с многочисленными астрофизическими данными, такими как, например, обнаружение барионных акустических осцилляций, прямые измерения распространённости первичного дейтерия, непосредственное

определение с помощью сверхновых Хаббловской постоянной и количества тёмной энергии, измерения флуктуаций реликтового излучения позволили убедительно и надёжно восстановить картину эволюции Вселенной. Более того, наблюдательные данные, которые на протяжении нескольких десятилетий противоречили друг другу, в какой-то момент оказались в полном согласии между собой.

5. Заключение

В настоящее время твёрдо установлено, что мы живём во Вселенной, где барионы составляют только 5% от общего количества вещества. Остальное вещество состоит из двух тёмных компонентов: тёмной материи и тёмной энергии. При этом количество тёмной энергии в 2,5 раза превышает количество тёмной материи. В отличие от тёмной материи, тёмная энергия антигравитирует. Её роль сегодня не совсем понятна, но в очень далёком прошлом такая же энергия вполне могла быть ответственной за усиление квантовых флуктуаций. Вне зависимости от механизма усиления начальных квантовых неоднородностей, теория квантового происхождения структуры со всеми её нетривиальными предсказаниями сегодня весьма надёжно подтверждена, и никаких альтернатив ей более не существует. Отметим также, что, помимо теорий чёрных дыр, космология — это единственная область, в которой важна непертурбативная теория Эйнштейна. Многочисленные космологические данные подтверждают, что эта теория справедлива в огромном диапазоне масштабов — от 10^{-27} см до 10^{28} см.

Список литературы

1. Friedman A "Über die Krümmung des Raumes" *Z. Phys.* **10** 377 (1922)
2. Зельдович Я Б, Курт В Г, Сюняев Р А "Рекомбинация водорода в горячей Вселенной" *ЖЭТФ* **55** 278 (1968); Zel'dovich Ya B, Kurt V G, Syunyaev R A "Recombination of hydrogen in the hot model of the universe" *Sov. Phys. JETP* **28** 146 (1969)
3. Gamow G "Expanding universe and the origin of elements" *Phys. Rev.* **70** 572 (1946)
4. Alpher R A, Herman R C "Remarks on the evolution of the expanding universe" *Phys. Rev.* **75** 1089 (1949)
5. Wagoner R V, Fowler W A, Hoyle F "On the synthesis of elements at very high temperatures" *Astrophys. J.* **148** 3 (1967)
6. Jeans J H *Phil. Trans.* **129** 44 (1902)
7. Лифшиц Е М "О гравитационной неустойчивости изотропного мира" *ЖЭТФ* **16** 587 (1946)
8. Sunyaev R A, Zel'dovich Ya B "Small-scale fluctuations of relic radiation" *Astrophys. Space Sci.* **7** 3 (1970)
9. Peebles P J E, Yu J T "Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe" *Astrophys. J.* **162** 815 (1970)
10. Сахаров А Д *ЖЭТФ* **49** 345 (1965); Sakharov A D *Sov. Phys. JETP* **22** 241 (1966)
11. Чибисов Г В, Муханов В Ф "Формирование галактик и фононы", Препринт № 162 (М.: ФИАН АН СССР, 1980); Chibisov G V, Mukhanov V F "Galaxy formation and phonons" *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **200** 535 (1982)
12. Starobinsky A A "A new type of isotropic cosmological models without singularity" *Phys. Lett. B* **91** 99 (1980)
13. Муханов В Ф, Чибисов Г В "Квантовые флуктуации и "несингулярная" Вселенная" *Письма ЖЭТФ* **33** 549 (1981); Mukhanov V F, Chibisov G V "Quantum fluctuations and a nonsingular universe" *JETP Lett.* **33** 532 (1981)

14. Hawking S W "The development of irregularities in a single bubble inflationary universe" *Phys. Lett. B* **115** 295 (1982)
15. Guth A H "Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems" *Phys. Rev. D* **23** 347 (1981)
16. Brout R, Englert F, Gunzig E "The causal universe" *Gen. Relat. Gravitation* **10** 1 (1979)
17. Глинер Э Б *ЖЭТФ* **49** 542 (1965); Gliner E B *Sov. Phys. JETP* **22** 378 (1966)
18. Глинер Э Б, Дымникова И Г *Письма в Астрон. журн.* **1** (5) 7 (1975); Gliner É B, Dymnikova I G *Sov. Astron. Lett.* **1** 93 (1975)
19. Глинер Э Б *УФН* **172** 221 (2002); Gliner E B *Phys. Usp.* **45** 213 (2002)
20. Linde A D *Phys. Lett. B* **108** 389 (1982)
21. Linde A D "Chaotic inflation" *Phys. Lett. B* **129** 177 (1983)
22. Старобинский А А "Спектр реликтового гравитационного излучения и начальное состояние Вселенной" *Письма в ЖЭТФ* **30** 719 (1979); Starobinskii A A "Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe" *JETP Lett.* **30** 682 (1979)
23. Верходанов О В *УФН* **186** 3 (2016); Verkhodanov O V *Phys. Usp.* **59** 3 (2016)

Quantum Universe

V.F. Mukhanov

Ludwig-Maxmilians-Universität München,
Professor-Huber-Platz 2, 80539 München, Deutschland
E-mail: Viatcheslav.Mukhanov@physik.uni-muenchen.de

On March 2013, following the accurate processing of available measurement data, the Planck Scientific Collaboration published the highest-resolution photograph ever of the early Universe when it was only a few hundred thousand years old. The photograph showed galactic seeds in sufficient detail for testing some nontrivial theoretical predictions made more than thirty years ago. Most amazing was that all predictions were confirmed to be remarkably accurate. With no exaggeration, it may currently be taken as experimentally established that quantum physics, which is normally considered to be relevant on the atomic and subatomic scale, also works on the scale of the entire Universe, determining its structure with all its galaxies, stars and planets.

Keywords: cosmology, early Universe, primordial background radiation, quantum fluctuations, structure of the Universe

PACS numbers: **04.60. – m**, 98.70.Vc, **98.80. – k**

Bibliography — 23 references

Received 13 June 2016

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **186** (10) 1117–1125 (2016)
DOI: 10.3367/UFNr.2016.07.037857

Physics–Uspekhi **59** (10) (2016)
DOI: 10.3367/UFNe.2016.07.037857