

ПРОБЛЕМЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

© 2023 г. И. Д. Новиков^{1,2,3,*}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Астрокосмический центр, Москва, Россия

²Niels Bohr International Academy, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark

³Федеральное государственное бюджетное учреждение

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: novikov@asc.rssi.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

В статье дается обзор основных положений космологии и ее современного состояния.

Ключевые слова: космология, инфляция

DOI: 10.31857/S000462992308008X, **EDN:** HMTZGS

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблемой происхождения Вселенной занимается космология, которая за последние 30–40 лет претерпела колоссальную эволюцию. Еще в 1993 г. знаменитый английский физик С. Хокинг писал: “В последние 30 лет в статусе космологии произошли огромные изменения. Когда я в 1962 г. начинал мои исследования в Кембридже, космология мыслилась как псевдонаука, где самые дикие спекуляции никак не ограничивались любыми возможными наблюдениями”. Сейчас положение в корне изменилось. Проблема рождения Вселенной и другие космологические проблемы решаются на основе последних достижений физики и проверяются точнейшими астрономическими наблюдениями. Никакие измышления здесь в принципе невозможны.

2. КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Сначала напомним несколько хорошо известных космологических фактов. Уже более 100 лет известно, что мы живем в расширяющейся Вселенной. Этот факт теоретически был предсказан российским ученым А. Фридманом [1] и подтвержден наблюдениями американского астрофизика Э. Хаббла [2]. Галактики удаляются друг от друга. Вся Вселенная расширяется.

Обычно, когда говорят о расширяющейся Вселенной, проводят такую аналогию. Представим себе, что галактики — это отдельные монетки на поверхности раздувающегося шарика: если этот шарик раздувается, то все расстояния между галактиками увеличиваются. (Большинство галактик входит в скопления и группы галактик, так

что лучше говорить об удалении скоплений галактик друг от друга). Такая двумерная аналогия — поверхность шарика — это раздувающаяся система координат Лагранжа, расширяющаяся вместе с расширением всего мира. И такая система часто очень удобна, особенно для компьютерных вычислений.

Скорость удаления галактик хорошо измерена. Измерены также и расстояния до галактик. Таким образом, мы можем сказать, что нами измерен темп расширения Вселенной. Если же известен темп расширения Вселенной, мы можем сказать, когда примерно оно началось. Оказалось, что это произошло примерно 13.5 млрд. лет тому назад. Материя в самом начале расширения была очень плотной, почти однородной, за исключением очень маленьких по амплитуде флуктуаций этого однородного распределения по пространству. Эти флуктуации возникли вместе с рождающейся Вселенной.

Кратко историю Вселенной можно обрисовать следующим образом. В самом начале вещество Вселенной было очень плотным, как уже было сказано, почти однородным и очень горячим. Поэтому нашу Вселенную мы называем “горячей”. Примерно 13.5 млрд. лет назад началось ее расширение. В процессе расширения Вселенной температура падала. После первых минут расширения Вселенной, когда температура упала примерно до миллиарда градусов, произошел синтез легких химических элементов. Тяжелые химические элементы во Вселенной возникли существенно позже, в ходе ее дальнейшей эволюции — в звездах, в эпоху, близкую к нам.

Примерно через 300 тыс. лет после начала расширения температура упала до 3–4 тысяч градусов. Произошла так называемая “рекомбинация” горячей плазмы, плазма превратилась в нейтральный газ. Никаких галактик, никаких звезд тогда, конечно, не было. В ходе последующей эволюции неоднородности нарастали из-за гравитационной неустойчивости. В конце концов из них возникли галактики, звезды, и мы переходим к эпохе, близкой к нам. Так, коротко говоря, развивалась Вселенная.

От той далекой эпохи, когда Вселенная была горячей, в наше время остались существенные следы. Самым существенным из этих следов является слабое электромагнитное излучение, называемое реликтовым. Оно заполняет всю видимую часть Вселенной. Сегодня его температура составляет всего 2.7 градуса абсолютной шкалы Кельвина. Но оно остыло лишь в ходе расширения Вселенной. Раньше оно было гораздо горячее и находилось в тепловом равновесии с горячей плазмой. Причиной существования реликтового излучения является огромная температура горячей плазмы в прошлом. Все сказанное надежно установлено и подтверждено наблюдениями.

Теперь мы подходим к трем важнейшим проблемам происхождения Вселенной.

1. Как родилась горячая Вселенная?
2. Что послужило причиной начала расширения?
3. Что было до рождения горячей Вселенной?

Все эти вопросы связаны между собой. Мы начнем со второго вопроса. Неправильно представлять, что причиной расширения стала высокая температура плазмы и, следовательно, высочайшее давление. Дело в том, что давление служит причиной возникновения гидродинамической силы, которая способна придать начальную скорость расширению материи, только если есть перепад давления. Так происходит, например, при взрыве бомбы в разреженной атмосфере. Чрезвычайно плотный горячий газ имеет очень большое давление, которое соседствует с практически ничтожным давлением в атмосфере. Значительный перепад давления и вызывает появление силы. В таком случае может возникнуть гидродинамическая причина для появления начальных скоростей и разлета.

Во Вселенной ничего подобного, конечно, не случилось. Никакого пространства вне Вселенной не было, никаких перепадов давления не было, материя была распределена практически однородно. Следовательно, большая температура не может быть причиной появления начальных скоростей разлета во Вселенной.

Но из-за чего же началось расширение Вселенной? Первые догадки о возможных причинах были высказаны в середине 1960-х гг. у нас в стра-

не Эрастом Глинером [3, 4]. Согласно предположению Э. Глинера в начале расширения материя находилась в так называемом вакуумном состоянии. Вакуумное состояние материи характеризуется тем, что материя в этом состоянии имеет огромное, но весьма своеобразное давление. По абсолютной величине оно равно плотности энергии (т.е. плотности материи, умноженной на квадрат скорости света), но со знаком минус. Иными словами, это огромное отрицательное давление. Но что такое отрицательное давление? Это просто натяжение; оно присутствует, например, в растянутой резине.

Это огромное отрицательное давление, конечно, тоже было распределено во Вселенной равномерно. Никакой гидродинамической силы это давление вызвать не могло, потому что оно везде было одинаково, так же, как и положительное давление горячего вещества, о котором я упоминал раньше и которое также не могло вызвать никакой гидродинамической силы.

Но такое вакуумное состояние материи порождает гравитационное отталкивание, подобно тому, как между одноименно заряженными электрическими зарядами создается электростатическое отталкивание. Гравитационное отталкивание возникает вместо гравитационного притяжения, которое существует в нормальных условиях.

По идее Э. Глинера, это гравитационное отталкивание и послужило причиной первотолчка, который привел к появлению гигантских начальных скоростей расширения материи. Тогда Глинеру никто не поверил, да его, по существу, и не поняли. Но впоследствии развитие представлений о том, что причиной чрезвычайного мощного первотолчка послужило гравитационное отталкивание, оказалось чрезвычайно плодотворным. Постепенно эти идеи начали развиваться и у нас в стране, и за рубежом.

После первотолчка Вселенная начала расширяться с постоянным ускорением, все быстрее и быстрее, так как эта сила продолжала действовать. Мы называем это чрезвычайно быстрое или, как еще говорят, экспоненциально быстрое расширение инфляцией. Именно инфляция и была до возникновения горячей Вселенной.

Кратко мы можем представить себе картину следующим образом. Сначала размер Вселенной, в которой мы живем, был ничтожно мал, всего 10^{-33} см, что на 20 порядков меньше размеров атомного ядра. Соответственно, плотность была гигантская — 10^{93} граммов на кубический сантиметр. Несмотря на такую гигантскую плотность из-за малости объема полная масса существовавшей тогда материи была всего 10^{-5} – 10^{-6} г. И эта Вселенная расширялась с огромной скоростью.

Расширение характеризуется так называемым “параметром Хаббла” H , который зависит от

плотности материи ρ как $H = \sqrt{G\rho}$ (G — это ньютоновская гравитационная постоянная). Тогда этот параметр был равен 10^{43} с^{-1} , т.е. расширение было чрезвычайно быстрым. Объем Вселенной становился все больше и больше, а плотность фактически не менялась, она падала чрезвычайно медленно. Из-за этого масса материи во Вселенной возрастала.

Как же быть в таком случае с законом сохранения массы-энергии? Дело в том, что с новой массой рождалось и новое тяготение этой массы, а энергия гравитации, энергия тяготения отрицательны. Поэтому положительная энергия материи компенсировалась рождающейся отрицательной энергией гравитации, и в сумме закон сохранения энергии соблюдался.

Вакуумная материя неустойчива. Инфлантон (как называют вакуумную материю) через ничтожное время (10^{-36} с) распался квантовым образом и превратился в горячую плазму — обычную материю. Это и был квантовый процесс рождения нашей Вселенной. За эти 10^{-36} сек, мгновение, которое мы не можем не только представить, но даже назвать правильно, Вселенная невероятно раздулась — в 10^{10} . Это единица с миллиардом нулей. И вся Вселенная стала гораздо больше, чем та ее часть, которую мы можем сейчас наблюдать и исследовать.

Таким образом, можно сказать, что мы знаем, что было перед началом горячей Вселенной: был процесс инфляции, который за ничтожный промежуток времени определил очень многое из того, что существует сегодня во Вселенной.

Эти выводы очень сложной современной физико-математической теории. Но, может быть, все это просто домыслы? Существуют ли какие-то проверки, подтверждения выводов этой теории? Да, существуют!

Во Вселенной имеются явные следы той очень ранней эпохи. Наиболее информативно слабое электромагнитное излучение, о котором мы уже говорили, — реликтовое излучение, или, как его часто называют в англоязычной литературе, космическое микроволновое фоновое излучение. Это излучение содержит сведения о первых моментах расширения Вселенной. И мы, расшифровывая эту информацию, можем проверить выводы теории, о которых я говорил. Дело в том, что это излучение приходит на Землю с разных сторон немножко с разной интенсивностью. Вариации интенсивности крайне малы — примерно одна сотысячная доля от среднего значения (2.7 К). Их крайне трудно уловить. Первые попытки измерения этих малых флуктуаций в зависимости от направлений на небе делались сразу после обнаружения самого реликтового излучения, кото-

рое было открыто в 1965 г. [5] (в 1978 г. за это открытие была присуждена Нобелевская премия).

Попытки обнаружения вариаций реликтового излучения предпринимались и у нас в стране: соответствующие измерения проводились со спутника “Реликт”. Но уверенно открытие этих флуктуаций было совершено при помощи американского спутника COBE, запущенного в 1989 г. Сообщение о результатах первых измерений было сделано в 1992 г. [6], и этот год считается датой обнаружения этих маленьких флуктуаций. Их открытие было чрезвычайно важным и также было удостоено Нобелевской премии. Но угловое разрешение первых наблюдений было очень плохим, всего около 7° . Поэтому информация, которую получали из этих наблюдений, была не слишком богатой.

В последующие годы неоднократно проводились другие наблюдения как с помощью радиотелескопов на поверхности Земли, так и с помощью радиотелескопов, которые поднимались на воздушных шарах в верхние слои земной атмосферы. В июне 2001 г. был запущен американский спутник WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), который существенно обогатил наши познания о слабых флуктуациях реликтового излучения. Угловое разрешение радиотелескопов WMAP составляло 0.2° . Чувствительность приборов была также значительно выше, чем в эксперименте COBE. Наконец, весной 2009 г. запущен европейский спутник “Planck” с радиотелескопом, имеющим еще лучшее угловое разрешение и лучшую чувствительность, чем спутник WMAP.

Теория предсказывает определенную зависимость между размерами более холодных и более горячих пятен на карте интенсивности излучения. Хотя вариации очень малы, они все-таки должны зависеть от размера этих пятен.

Как видно из рис. 2, зависимость очень своеобразна. Принципиальный механизм, приводящий к такой зависимости, был открыт российским физиком А.Д. Сахаровым, поэтому такую осциллирующую зависимость называют “Сахаровскими осцилляциями”. В положении максимумов и минимумов на этой кривой, в их ширине, форме и высоте как раз и заключена та информация, которую можно расшифровать и сделать выводы о процессе рождения Вселенной, о том, что происходило сразу после этого рождения, а также о параметрах сегодняшней Вселенной.

Наблюдая с помощью телескопов чуть более горячие и холодные пятна реликтового излучения, мы, по существу, видим небольшие неоднородности в распределении материи во Вселенной в далеком прошлом. Эти небольшие неоднородности возникли вследствие квантовых процессов при рождении Вселенной, а затем в ходе ее дальнейшей эволюции привели к возникнове-

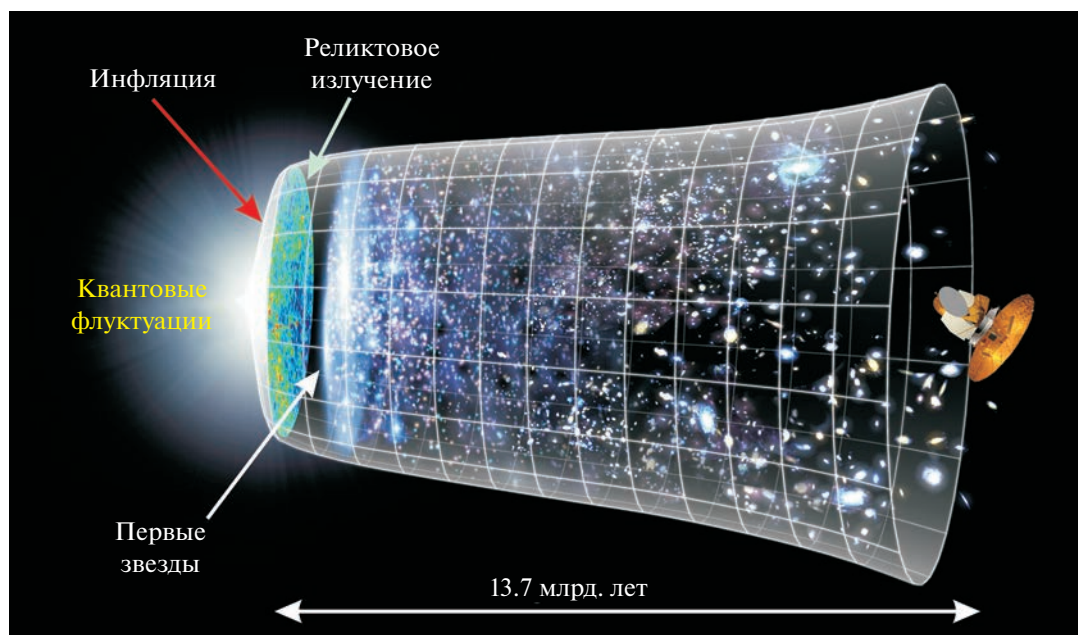


Рис. 1. Хронология развития Вселенной от Большого Взрыва до наших дней. © NASA / WMAP Science Team.

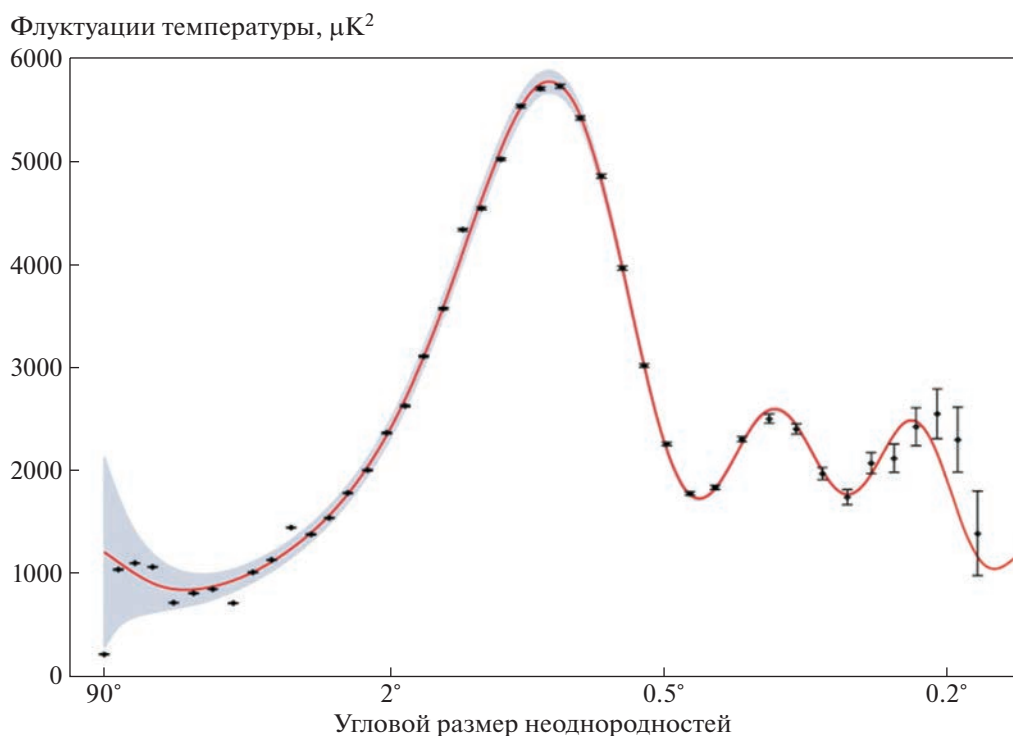


Рис. 2. Теоретическая зависимость амплитуды неоднородностей реликтового фона от их углового размера. По горизонтальной шкале отложен масштаб неоднородностей, по вертикальной — относительная интенсивность вариаций.

нию галактик и их скоплений. Поэтому наблюдения распределения галактик также дают информацию о первичных неоднородностях, а значит, и о процессах, происходивших при рождении Вселенной.

Итак, с одной стороны, у нас есть наблюдения, а с другой — теория, которая предсказывает значения для целого ряда физических параметров, которые можно измерить. Что же дало сопоставление информации, полученной из упомянутых

наблюдений, с предсказаниями теории, описывающей происхождение Вселенной? Подтверждаются или опровергаются наши представления? Конечно, в популярной статье невозможно углубиться в какие-то детали. Поэтому я упомяну о только двух таких параметрах.

Прежде всего, это так называемый параметр “Омега”. Он характеризует общую кривизну трехмерного пространства Вселенной и зависит от соотношения между плотностью материи и скоростью расширения Вселенной. Теория предсказывает, что по величине этот параметр должен равняться единице. Наблюдения показывают, что с точностью до ошибок измерений он действительно близок к единице, т.е. наблюдения подтверждают то, что предсказывает теория. Как сказано выше, это, главным образом, наблюдения анизотропии реликтового излучения, а также наблюдения крупномасштабной структуры Вселенной.

Другой параметр n описывает зависимость между размерами небольших неоднородностей, существовавших во Вселенной сразу после ее рождения, и амплитудой этих неоднородностей. Теория предсказывает, что относительная амплитуда этих неоднородностей не должна зависеть от размеров, т.е. должна быть одна и та же на всех масштабах. Если это так, то параметр n также должен быть с точностью до ошибок измерений равен единице. И это на самом деле так.

Таким образом, я думаю, что мы можем сказать с достаточной уверенностью, что основные параметры теории действительно подтверждаются прямыми астрономическими наблюдениями и что инфляционный период в самом начале существования Вселенной действительно имел место. Начался он, по-видимому, через 10^{-43} с после рождения Вселенной.

Но тогда возникает еще один естественный вопрос: что было еще раньше, что было перед началом инфляции Вселенной? К сожалению, тут и теоретические, и тем более экспериментальные выводы гораздо более проблематичны. Мы далеко не все еще знаем. Но тем не менее, предварительные заключения здесь тоже возможны.

По современным представлениям, перед инфляционным периодом был так называемый период квантового существования, или квантовый период в эволюции Вселенной. Промежутки времени, более короткие, чем 10^{-43} с, и размеры Вселенной меньше 10^{-33} см нельзя рассматривать как непрерывное пространство и непрерывное время. Пространство и время в этот период распадались на отдельные кванты, и все это находилось в состоянии, образно говоря, “кипения вакуума”, с чрезвычайно большой плотностью вакуумоподобной материи, порядка 10^{93} граммов в кубическом сантиметре. В эту эпоху “самого начала”

пространство менялось причудливейшим, квантовым образом, менялись размерность пространства, его топология.

Процессы, которые при этом происходят, удается моделировать на компьютерах. И такое моделирование показало, что из-за квантовых флуктуаций в различные моменты времени случайным образом происходит превращение кипения вакуума в отдельные пузыри раздувающихся вселенных. Каждая из них подобна нашей Вселенной. Причем разные вселенные могут иметь разные физические свойства и развиваться по-разному. В одних вселенных будут происходить процессы, подобные процессам в нашей Вселенной. В других вселенных законы физики могут отличаться от законов нашей Вселенной, и потому процессы будут совсем иные. Потом может происходить коллапс отдельных пузырей, и они снова будут переходить в квантовое кипение.

В принципе, разные вселенные могут быть связаны топологическими туннелями, так называемыми “котовыми норами”. Эти туннели представляют собою связи, оставшиеся после эпохи “кипения вакуума”. Сквозь такие туннели может протекать материя, а значит и проходить информация из других Вселенных. Если такое предположение верно, то очень важно попытаться найти в нашей Вселенной входы в такие кротовые норы. В современной наблюдательной космологии такие поисковые наблюдения планируются.

Итак, процесс бесконечного рождения разных вселенных не имеет ни границ, ни пределов. Это вечное кипение, вечное рождение новых вселенных и такое же вечное их умирание. Вот такая картина вырисовывается перед нами на основе последних достижений физики и астрофизики, достижений, касающихся процессов рождения Вселенной, и судьбы вообще всей, так сказать, Сверхвселенной.

В заключение хочу подчеркнуть следующее. В самом начале истории современной космологии, когда Эдвин Хаббл экспериментально обнаружил, что наша Вселенная расширяется, многие астрономы и физики встретили это открытие с сильным скептицизмом. Казалось, что оно неизбежно ведет к заключению о внезапном возникновении Вселенной из ничего. Такой вывод казался очень далеким от естественной науки. Знаменитый английский астроном того времени Артур Эддингтон писал: “Мне кажется, что наиболее удовлетворительной была бы теория, которая делает картину начала мира не столь неестественно оборванной”. Это было написано сразу после открытия Хаббла в самом конце 1920-х гг. прошлого столетия. Сегодня мы можем сказать, что пожелание Эддингтона в какой-то степени сбылось. Последующее развитие космологии по-

казало, что вся Вселенная вечна. Наша Вселенная рассматривается как один из пузырьков в этой целой Сверхвселенной.

Андрей Линде — один из создателей современной теории расширяющейся Вселенной, вечно рождающейся и умирающей, — написал так: “В этом сценарии Вселенная как целое бессмертна. Каждая отдельная часть Вселенной может отделиться от сингулярности (кипящего вакуума) когда-то в прошлом и закончиться в сингулярности когда-то в будущем. Однако конца эволюции всей Вселенной нет”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. Friedmann*, Zeitschrift für Physik **10**, 377 (1922).
2. *E. Hubble*, *M. L. Humason*, Astrophys. J. **74**, 43 (1931).
3. *Э. Б. Глинер*, Доклады АН СССР **192**, 771 (1970).
4. *Э. Б. Глинер*, Успехи физических наук **172**, 221 (2002).
5. *A. A. Penzias*, *R. W. Wilson*, Astrophys. J. **142**, 419 (1965).
6. *G. F. Smoot*, *C. L. Bennett*, *A. Kogut*, *E. L. Wright et al.*, Astrophys. J. Lett. **396**, L1 (1992).

PROBLEMS OF THE ORIGIN OF THE UNIVERSE

I. D. Novikov^{a,b,c}

^a*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Niels Bohr International Academy, Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark*

^c*National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia*

The paper presents an overview of the main foundations of cosmology and its current state.

Keywords: cosmology, inflation