

Борис Е. Штерн

Прорыв за край мира

При участии
Валерия Рубакова
Андрея Линде
Владимира Лукаша
Вячеслава Муханова
Алексея Старобинского



АВТОР:

Борис Штерн, докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ИЯИ РАН, главный редактор газеты «Троицкий вариант – Наука»



НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР:

Валерий Рубаков, академик РАН, главный научный сотрудник ИЯИ РАН, профессор МГУ, лауреат премии РАН им. Фридмана (1999)



СОБЕСЕДНИКИ:

Андрей Линде, профессор Стэнфордского университета, лауреат премии Мильнера по фундаментальной физике (2012)



Владимир Лукаш, докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. отделом АКЦ ФИАН им. Лебедева, лауреат премии РАН им. Фридмана (2008)



Вячеслав Муханов, профессор Университета Людвиг-Максимилиана в Мюнхене, лауреат премии Грубера по космологии (2013)



Алексей Старобинский, академик РАН, главный научный сотрудник ИТФ им. Ландау РАН, лауреат премии Грубера по космологии (2013)



Борис Е. Штерн

Прорыв
за край мира
О космологии землян
и европейцев

Москва Троицк

2014

УДК 524.8

ББК 22.632

Ш90

Штерн Б. Е.

Ш90 Прорыв за край мира. О космологии землян и европиан / Борис Е. Штерн. —

М.: Троицкий вариант, 2014. — 304 с.

ISBN: 978-5-89513-345-3

Последние несколько лет стали эпохой триумфа теории космологической инфляции, объясняющей происхождение Вселенной. Эта теория зародилась в начале 1980-х годов на уровне идей, моделей и сценариев, давших ряд четких проверяемых предсказаний. Сейчас благодаря прецизионным измерениям реликтового излучения, цифровым обзорам неба и другим наблюдениям эти предсказания подтверждаются одно за другим. В книге отражено развитие главных идей космологии на протяжении последних ста лет, при этом главное внимание уделено теории космологической инфляции. Книга содержит интервью с учеными, внесшими решающий вклад в становление этой теории. Дополнительная научно-фантастическая сюжетная линия иллюстрирует основную на более простом материале: развитие космологии разумных существ подледного океана спутника Юпитера Европы. Книга рассчитана на широкий круг читателей, хотя уровень сложности материала сильно отличается от главы к главе. Автор исходил из принципа: «Любой читатель — от школьника до профессионального физика — сможет найти в книге то, что ему понятно и интересно».

УДК 524.8

ББК 22.632

ISBN: 978-5-89513-345-3

© Б. Штерн, 2014

Содержание

Предисловие	7
Часть I. Предыстория	11
1. Комфортная, но неправильная картина мира	13
2. Старая космология жителей подледного океана Европы	20
3. Первая космологическая революция.	27
4. Первая космологическая революция на Европе.	32
5. Вселенная — физический объект?!	38
6. Рыцарь Вечности.	44
7. Свет Большого взрыва	48
8. Почему Большой взрыв не гипотеза.	51
Часть II. На подступах.	53
9. Простые вопросы.	55
10. Опыты европейцев с поршнями и цилиндрами	57
11. Бездна, в которой мы обитаем.	62
12. Уравнения Эйнштейна	69
13. Отталкивающая гравитация	79
14. Великое объединение наук.	86
15. Лестница масштабов и планковский потолок	88
16. Фазовые переходы	95
17. Проблески новой космологии жителей подледного океана Европы.	103
18. У истоков космологической инфляции (интервью с Владимиром Лукашом).	111
Часть III. Прорыв.	123
19. Откуда взялась Вселенная	125
20. Всё даже еще проще	133
21. ... И еще проще	137
22. Почва под ногами	139
23. Инфляция здесь и сейчас.	141
24. Рябь Вселенной	147
25. Темная материя, спасительная и неуловимая	152
26. Сверхскопления галактик как результат квантовых эффектов	157

27. Логарифмическая история Вселенной.	160
28. Судьба сгустка X	165
29. Реконструкция из-под льда.	169
30. Зашифрованная карта	176
31. Если бы Сахаров увидел это!	183
32. Что зашифровано на карте	188
33. Вклад реликтового излучения в фундаментальную физику	194
34. Почему это так хорошо получается	196
35. Последний штрих.	202
36. Р. С. к главам 31–35.	206
37. Р. Р. С. к главам 31–36: Гравитационные волны обнаружены?	208
38. Что мы в результате знаем и чего не знаем о нашей Вселенной	211
39. Сто пятьдесят миллиардов оксов	215
40. За 10^{-35} с до Большого взрыва (интервью с Алексеем Старобинским)	221
41. Четыре железобетонных следствия и еще одно (интервью с Вячеславом Мухановым)	233
Часть IV. Большой фейерверк	239
42. Антропный принцип.	241
43. Вечная инфляция.	244
44. В роли внешнего сверхъестественного наблюдателя	248
45. В роли внутреннего наблюдателя.	253
46. Дежурный по границе	255
47. Где Бог играет в кости?	260
48. Где кончается рациональность и начинается капитуляция?	266
49. Как за полчаса изменился мир (интервью с Андреем Линде)	270
50. Интервью с адвокатом дьявола	283
51. Вся картина, ее свет и тени.	289
52. Внешнее пространство. Вместо эпилога	294
Благодарности.	299
Указатель имен	300

Предисловие

Утверждение, что основной инстинкт человека — половой, есть гнусная клевета. Скажите это альпинисту, глядящему ранним утром на освещенную солнцем вершину! Или представьте, что бы высказал в ответ на это утверждение полярник начала XX века перед стартом экспедиции. Да что полярник! Представьте его собаку в упряжке, с нетерпением отрывисто гавкающих и пытающихся рывками сорвать привязанные нарты, чтобы скорей рвануть вперед в снежные просторы...

Любознательность, жажда исследования и стремление быть первым складываются у человека (конечно не у любого, но зато и не только у человека) в мощный инстинкт, который условно можно назвать инстинктом первопроходца. Этот инстинкт помог человеку в кратчайшие сроки расселиться по всей Земле и стать тем, кто он есть.

Остается завидовать белой завистью первопроходцам прошлых веков. Теперь поверхность Земли исчерпана. Поверхность других небесных тел еще слишком далека. И всё же пространство для реализации этого инстинкта остается — прежде всего в науке.

В этой книге мы попытаемся осветить сравнительно недавний прорыв за пределы реальности, данной нам в ощущениях. За последние тридцать с лишним лет люди добрались-таки до края, за которым пока еще нечетко, словно сквозь дымку или слой льда, увидели грандиозные очертания того, что может оказаться новым уровнем мироздания. Не исключено, что часть представшей картины — мираж. Но даже в этом случае мираж захватывающе интересен и несет какой-то важный смысл. Мы имеем в виду современную космологию и передовые рубежи физики микромира — два, казалось бы, противоположных направления, которые уже давно сошлись воедино в истоках Вселенной.

Человек, вопреки расхожему мнению о собственном могуществе, очень слаб перед лицом природы. Современный ученый даже слабей, чем первопроходец времен великих географических открытий: при-

рода ставит на дальних рубежах совершенно непреодолимые барьеры. Вперед выходит теория, которую всё труднее проверить, — прямой эксперимент становится всё дороже, пока наконец не становится принципиально невозможным. Но это не значит, что впереди глухая стена. Просто меняется метод — на первый план выходит что-то вроде искусства экстраполяции: построение внутренне стройных непротиворечивых теорий, которые правильным образом издалека проецируются на нашу действительность.

Эксперимент при этом не отбрасывается, но меняет смысл. Вместо прямой проверки новых теорий он расширяет и детализирует базу для экстраполяции картины доступного мира в недоступную даль.

Прорыв к новому горизонту произошёл в два этапа. Первый — теоретический, он протекал в 1980-е годы. Люди многое поняли и много чего предсказали. Второй этап экспериментальный: предсказания стали подтверждаться прецизионными наблюдениями. Он длится последние пятнадцать лет, в течение которых космология получила право называться точной наукой в самом прямом смысле этого слова. Прорыв ещё не завершён — пока писалась эта книга, история продолжала разворачиваться прямо на глазах, появлялись новые важные данные, и автору приходилось добавлять постскрипты и примечания. Они, с одной стороны, делают книгу чуть более «растрепанной», зато приносят ощущение живого действия.

В событиях, излагаемых в книге активно участвуют сотни, а то и тысячи человек (смотря как определять степень участия). Но лишь нескольким из них (или немногим десяткам — как считать) удалось найти ключевые решения, ставшие мостами или проливами, куда устремились и остальные. Наверно, этим людям можно позавидовать не меньше, чем капитанам парусников, чьи имена остались на географических картах.

Цель этой книги — осветить не столько упомянутую выше открывшуюся картину, сколько путь к ней, вплоть до живописных подробностей, отразить её дух. Счастливое обстоятельство заключается в том, что её герои живы, более того, многие из этих героев говорят по-русски и являются давними знакомыми автора и научного редактора. Поэтому значительную часть книги составляют интервью или диалоги с основными участниками.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, хотя иногда речь в ней заходит о довольно сложных вещах. Среди прочего, есть и формулы, графики и большие степени десятки. Считайте, что автор восстает против известной сентенции: «Каждая формула вдвое снижает количество потенциальных читателей». Это суждение опирается на представление о читателе как об умственно ленивом существе — жертве масс-медиа и условного Голливуда. Такая аудитория существует, но она всё равно не по зубам любому автору, пишущему о науке, как бы он перед ней не заискивал. Будем уважать читателя и рассматривать знакомство с формулами на школьном уровне как неперенный атрибут культурного человека. Представьте, что бы стало с художественной литературой, если бы каждый писатель руководствовался принципом: каждая метафора, оперирующая античными или библейскими сюжетами (с которыми средний читатель не знаком), уменьшает количество потенциальных читателей на 10%!

Все формулы, которые для восприятия требуют высшего образования (дифференциальные уравнения), собраны в две главы, идущие подряд. Они называются «Уравнения Эйнштейна» и «Отталкивающая гравитация». Пропустив эти главы, читатель ничем особо не рискует, кроме того, что некоторые важные утверждения придется принимать на веру. Основные формулы сводятся к умножению, делению и возведению в степень.

Излагаемая история действительно сложна, но не формулами, а понятиями. Приступая к книге, автор решил не обманывать себя: написать о данном предмете так, чтобы все всё поняли, невозможно, тем более, что и сам он понимает не всё. Поставленная задача стоит иначе: для любого читателя в книге должно найтись нечто понятное и интересное для него. Зацепившись за это нечто, он сможет потихоньку отгрызать менее податливые места, так, что в какой-то момент картина проявится как целое.

Книга эта вообще разнородна — содержит разные сюжетные линии. Рассказ о зарождении и триумфе теории космологической инфляции перемежается историей развития космологии и мировоззрения жителей глубин инопланетного океана, покрытого толстым слоем льда. Для определенности взят спутник Юпитера Европа. Эта сю-

жетная линия отчасти иллюстрирует основную на более простом материале и зацепляется за нее в ключевых моментах.

У любой книги должен быть жанр и целевая аудитория. Обычно они очевидны, но не всегда. Литературный жанр определить не так просто, тут намешано разное — научпоп, научная фантастика, мемуары, публицистика. Есть даже элементы учебника. Если все-таки нужно как-то определить общий жанр книги, то пусть это будет ода. Конечно, оды нынче непопулярны и само слово дискредитировано. Да и предмет воспевания — наука и ее люди — сейчас не в фаворе. И всё же кто-то должен двигаться напрямик сквозь извивы времен. Ода, значит ода!

Что касается целевой аудитории — с ней, как подсказывает опыт автора, никогда не угадаешь. Она всегда меньше, чем предполагаешь, и не совсем та. Скорее можно говорить о некоем «эталонном читателе», которого автор держал в голове, к которому как бы обращался. Здесь ответ прост — я обращался к самому себе, каким был почти полвека назад. Кстати тогда, читая некоторые книги, я чувствовал себя эталонным читателем, ощущая, что автор пишет именно для меня. Возможно, авторы этих книг тоже обращались к самим себе, какими они были в юности. В таком подходе есть рациональное зерно — обращаясь на склоне лет к себе юному в тексте, написанном для современников, укрепляешь связь прошлого с будущим.



ЧАСТЬ I ПРЕДЫСТОРИЯ

В этой части описывается переворот во взглядах людей на устройство Вселенной, который начался примерно в 1916 году и закончился в середине 1960-х.

1. Комфортная, но неправильная картина мира

Опуская всяческие киты, слонов и хрустальные сферы, начнем исторический очерк с картины мира, которая уже может обсуждаться в рамках науки. Это вечная, бесконечная, в среднем неизменная Вселенная. Такая концепция постепенно сложилась в XVI–XIX веках и служила основной космологической парадигмой вплоть до 1920-х годов. Впрочем, наверняка эту концепцию, как и большинство философских откровений эпохи Просвещения, уже сформулировал кто-то из древних греков. Современный человек как будто впитывает идею вечной бесконечной Вселенной с молоком матери и очень удивляется, когда узнает про Большой взрыв.

Вечная бесконечная Вселенная комфортна для человеческого разума. Человеку хочется думать, что звезды будут светить всегда, что у мира нет ни конца, ни начала, что перед жизнью и разумом нет никаких пределов, даже в отдаленном будущем.

Такая Вселенная понятна и логична. А как же еще? Как представить себе начало и конец? А что раньше начала? А что дальше конца? Вопрос, откуда взялась Вселенная, в этой парадигме тоже не актуален — это всё остальное откуда-то взялось во Вселенной, которая есть простоместилище всего сущего.

Однако уже в XIX веке в грандиозной картине мироздания появились первые трещины. Причем эти трещины имели вид простых вопросов. Во-первых, почему ночью небо темное? Именно такой вопрос был однажды задан школьником команде «знатоков» в телепередаче «Что? Где? Когда?». «Знатоки», уповая на то, что вопрос задан школьником (даже не старшеклассником), дали простой ответ: «Потому, что ночью мы находимся в тени Земли, и атмосфера над нами не может рассеивать солнечные лучи». Школьник был не столь прост. Оказывается, если Вселенная бесконечна, вечна и изотропна, прямой луч в любом направлении упрется в звезду (как любой горизонтальный взгляд в лесу упрется в лист или ствол дерева) — значит, небо

должно сиять столь же ярко, как поверхность звезды. Поглощение не спасает — любой поглотитель нагреется и засияет с той же яркостью. Этот факт носит название «фотометрический парадокс Ольберса». Он говорит о том, что Вселенная либо не вечна, либо не бесконечна.

Интересно попробовать парадокс Ольберса «на зуб» — насколько должна быть велика Вселенная, чтобы он сработал. Здесь следует предупредить читателя, что если он не любит оперировать большими числами, то может пропустить два следующих абзаца.

Стволы деревьев в лесу перекроют перспективу на нескольких сотнях метров. А на каком расстоянии звезды перекроют небо? Это нетрудно прикинуть, зная среднюю плотность Вселенной. Нам нужно обычное вещество, сейчас известно, что его плотность во Вселенной около 10^{-30} г/см³ (в XIX веке этой величины не знали и при попытке оценить скорее всего получили бы значение на несколько порядков выше), и примерно десятая часть вещества находится в звездах. Значит, средняя плотность вещества, заключенного в звездах, 10^{-31} г/см³. Будем считать, что все звезды подобны Солнцу, — это даст не слишком большую ошибку, расстояние будет завышено, может быть, в пару раз. Масса Солнца — $2 \cdot 10^{33}$ г. Значит, средняя плотность звезд во Вселенной $n \approx 0,5 \cdot 10^{-64}$ см⁻³. Надеемся, читателя не смущает такая величина, как число звезд в кубическом сантиметре — ее смысл можно выразить иначе: одна звезда в кубе с ребром $2 \cdot 10^{21}$ см (2 тыс. световых лет). Теперь надо взять площадь диска Солнца $\sigma = \pi R^2 \approx 10^{22}$ м² (радиус Солнца — 696 тыс. км) и определить среднюю длину луча до попадания в звезду: $S = 1/n\sigma \approx 2 \cdot 10^{41}$ см.

Это чудовищное расстояние, на 13 порядков больше, чем размер видимой части современной Вселенной. На столько видимая часть Вселенной больше Солнечной системы, и на столько последняя больше собаки. Соответственно, время существования такой Вселенной тоже должно быть на 13 порядков больше, чем возраст нашей, — иначе свет далеких звезд не успеет дойти до наблюдателя.

Единицы измерения, используемые в книге

Физики — очень упрямые люди: внедрить в их среду систему единиц СИ не удалось и, видимо, уже не удастся, поэтому и мы будем пользоваться сантиметрами, граммами, эргами. Энергию частиц физики измеряют в электронвольтах (эВ) ($1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг), мегаэлектронвольтах (МэВ),

1. Комфортная, но неправильная картина мира

гигаэлектронвольтах (ГэВ) и т.п. Причем в этих же единицах измеряется и масса частиц. Как так? Да просто используется знаменитая формула $E = mc^2$, и скорость света полагается равной единице. Вообще, эквивалентность массы и энергии в книге используется весьма активно в надежде, что читатель к этому привык либо быстро привыкнет. Кстати, температура тоже часто измеряется в эВ или ГэВ. А может быть, и в эргах. Достаточно вспомнить, что температура пропорциональна энергии, приходящаяся на степень свободы частицы в веществе, а в чем эту энергию измерять — дело вкуса. Для измерения больших расстояний используются световые годы (10^{18} см) или парсеки ($3 \cdot 10^{18}$ см). Большие массы обычно измеряются в массах Солнца ($2 \cdot 10^{33}$ г).

Итак, парадокс Ольберса в полноценном варианте подразумевает гигантские размеры и времена, но запрещает бесконечность. Бесконечную неподвижную неизменную Вселенную со звездами лучше и не пытаться представить. Наблюдатель, телепортировавшийся в нее, мгновенно бы сгорел.



1.1. Глубокий снимок космического телескопа «Хаббл». Расстояние до галактик, видимых на снимке, — от 1 до 12 млрд световых лет. Снимок взят из архива NASA с сайта hubblesite.org

А если бы Вселенная возникла 13,8 млрд лет назад, как это и есть на самом деле, но не расширялась бы? Ее горизонт имел бы примерно такие же размеры — 13,8 млрд световых лет. Посмотрите на «глубокий» снимок космического телескопа «Хаббл» (то есть снимок участка неба, где нет близких объектов, сделанный с большой экспозицией). Несколько процентов площади снимка занимают далекие галактики. Если бы не было расширения, их поверхностная яркость превышала бы яркость Млечного Пути (молодые галактики ярче). Поэтому всё небо слегка бы светило — слабее, чем Млечный Путь, но достаточно, чтобы это можно было почувствовать в темную ночь. На самом деле из-за расширения Вселенной далекие галактики становятся во много раз тусклее, и чтобы увидеть почти равномерное свечение неба, нужна хорошая техника.

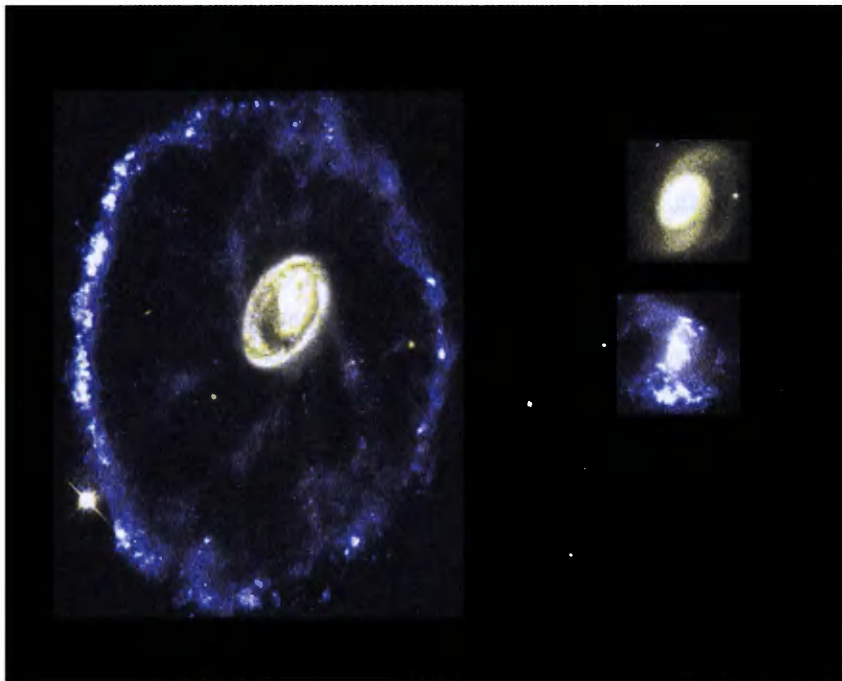
Второе умозаключение, портящее картину, называется «тепловая смерть Вселенной». Принципом, обрекающим Вселенную, оказывается второе начало термодинамики — всё должно со временем прийти в состояние тепловой бани, где всё имеет одну температуру, все источники энергии исчерпаны и никакая жизнь не возможна. Так и вечная Вселенная в ее современном живом состоянии, хоть в ту, хоть в другую сторону по стреле времени, получается, невозможна. Кстати, современная физика способна дать вполне реалистичную картину предстоящей тепловой смерти — она будет постепенной и не мучительной.

Вселенная уже заметно состарилась. Сейчас за единицу времени рождается в 20 раз меньше звезд, чем 10 млрд лет назад. Солнце погаснет через 5 млрд лет — тогда новые звезды типа Солнца будут рождаться заметно реже, чем сейчас. Но через 100 млрд лет еще будут светить ныне существующие красные карлики, близ которых возможна жизнь.

Постепенно, строительный материал для новых звезд будет становиться всё более дефицитным, их рождение почти остановится. Но если где-то через триллион лет столкнутся две галактики (а это и тогда будет изредка происходить в гравитационно связанных скоплениях), то остатки газа и пыли в этих галактиках сожмутся ударной волной от столкновения и это выльется в сотни миллионов или

миллиарды новых звезд всех типов с планетными системами. Где-то снова возникнет жизнь ничем не хуже нашей, и разумные существа ничем не хуже нас.

И у них тоже будет звездное небо над головой! Единственно, чего у них не будет, так это множества других галактик, видимых в телескопы. Будут видны только погасшие или чуть тлеющие галактики местного скопления, которые не разлетелись на безнадежные расстояния из-за того, что оказались гравитационно связанными в первые миллиарды лет. Космический телескоп «Хаббл» там окажется не столь полезным. А всё великолепие молодой Вселенной будет полностью закрыто для наблюдения любыми инструментами из-за ускоренного расширения пространства.



1.2. Пример возврата бурной молодости галактик в результате столкновения. Маленькая галактика (справа, вероятно, та, что голубая), сотни миллионов лет назад пролетела через большую галактику слева и вызвала в ней круговую ударную волну в диске, сжимающую газ с пылью, дающую толчок образованию миллиардов звезд. Яркие звезды быстро прогорят, отчего светящееся кольцо тонкое, но за ним остаются менее яркие звезды типа Солнца. Подобные эпизоды возрождения будут изредка происходить и тогда, когда галактики полностью погаснут. Снимок космического телескопа «Хаббл» (NASA) с hubblesite.org

Итак, мы знаем, что «умирание» Вселенной будет очень долгим, что ее температура будет только падать, знаем, что в обозримое время не случится тотального апокалипсиса типа коллапса Вселенной. Есть экзотические варианты теории, где Вселенную когда-нибудь не скоро ждет внезапный конец («большой разрыв» или коллапс), но в простых незатейливых вариантах теория предсказывает для Вселенной очень долгое будущее. Однако мы сильно забежали вперед — из XIX века в конец XX. Вернемся назад.

Третья проблема вечной неизменной Вселенной — гравитационная неустойчивость. Любой объем вещества стремится сжаться под действием гравитации. Если в среде давление мало, то малейшие неоднородности плотности начинают расти — чем дальше, тем быстрее. Сжатие останавливается, когда давление или разброс скоростей объектов сжимающейся системы уравнивает гравитацию. Всё, что мы видим вокруг себя, уже прошло стадию гравитационной неустойчивости и пришло к равновесию: Солнце уравновешено давлением газа, Солнечная система — движением планет, галактика — движением звезд, скопление галактик — движением галактик. А дальше — проблема! В XIX веке ничего не знали про скопления галактик и крупномасштабную структуру Вселенной. Но теоретически было понятно, что от проблемы не уйти, — чем больший объем берем, тем дольше развивается неустойчивость, но тем большее давление или разброс скоростей требуется, чтобы остановить сжатие. В конце концов, приходим к какому-нибудь парадоксу, типа того, что для стабилизации сжимающейся системы требуются скорости, превышающие скорость света (это в рамках ньютоновской механики, а на современном языке это означало бы формирование черной дыры).

Несмотря на перечисленные проблемы, многие ученые и тем более философы долго верили в старую парадигму. Про парадоксы все знали, но думали, что как-нибудь рассосется — наука развивается и найдет лазейки из тупика.

2. Старая космология жителей подледного океана Европы

Мы находимся в довольно благоприятном положении для обозрения Вселенной. Атмосфера Земли прозрачна, космос тоже (что не само собой разумеется — в Галактике довольно много облаков пыли). Тем не менее, пытаясь понять, как устроена Вселенная, откуда она взялась и что это такое, мы уперлись в некие пределы, о которых пойдет речь ниже. Интересно попытаться представить картину мира тех, кто находится в худших условиях, у кого пределы находятся перед самым носом.

В Солнечной системе есть несколько интересных мест, о которых с надеждой говорят как о возможном прибежище внеземной жизни. Одно из них — спутник Юпитера Европа, точнее, ее подледный океан. Аналогичные океаны, вероятно, есть у спутников Сатурна — Титана и Энцелада.

Европа — второй после Ио по удаленности галилеев спутник Юпитера. Радиус орбиты — 671 км (почти вдвое больше, чем у Луны), По размеру Европа почти равна Луне. Покрыта водяным льдом. Местами лёд загрязнен буроватыми минералами, местами он голубой. Есть много доводов в пользу



2.1. Серп Европы, снятый
«Вояджером-2» (NASA)

того, что под слоем льда находится слой жидкой воды порядка сотни километров глубиной.

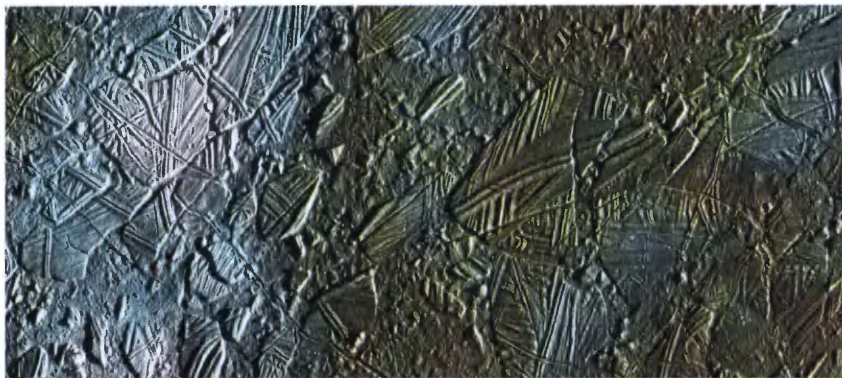
По поводу толщины льда продолжаются споры — он может быть как километры толщиной (тонкая модель), так и десятки километров (толстая модель). В пользу тонкой модели говорят районы, где поверхность раздроблена на огромные льдины (см. фото), повернутые и даже наклоненные, вмерзшие в новый лёд. В пользу толстой модели говорит структура немногочисленных ударных кратеров.

Существование жизни подо льдом Европы не противоречит законам термодинамики.

В недрах спутника выделяется достаточно тепла из-за приливного трения, которое возникает в мощном поле тяготения Юпитера благодаря небольшой вытянутости орбиты. Соседний спутник, Ио, весь покрыт лавовыми озерами и извергающимися вулканами, прямо на наших глазах (точнее, на снимках «Галилео») выбрасывающими фонтаны на пару сотен километров. Европа в полтора раза дальше от Юпитера, но всё равно на ней должен быть подводный вулканизм, и, вероятно, что-то вроде земных «черных курильщиков», где на глубине нескольких километров кипит жизнь — есть точка зрения, что она там и зародилась.

Представим, что жизнь подо льдом Европы развилась до уровня разумных существ (вообразим их отдаленно похожими на наших головоногих моллюсков), создавших цивилизацию.

Эти воображаемые существа подледного океана (европиане) нам потребуются как некто, кто видит гораздо меньше (правильней будет сказать, почти ничего), но всё равно способен успешно познавать мир за пределами досягаемости. Пытаясь представить их методы и прозрения, мы лучше поймем свое положение и сможем по достоинству оценить достижения человеческой цивилизации, которая находится на гораздо более высоком уровне развития науки. Нужно сразу оговориться, что всё, что ниже сказано по поводу физиологии, технологии и образа жизни европиан, не претендует на полное согласие с положениями науки и относится скорее к области научной фантастики. Однако сюжеты, касающиеся их открытий и представлений, вполне поучительны. Будем считать всё это мысленными экспериментами, показывающими, на что способны разумные существа по части познания мира, даже находясь в самых невыгодных для этого условиях.



2.2. Район, где поверхность Европы была раздроблена на плавающие айсберги и затем снова замерзла. Ширина поля снимка — около 50 км. Фотография сделана аппаратом «Галилео» (NASA)

Сделаем несколько уточняющих предположений. Пусть европиане обладают чувствительным зрением (внешнего света нет, но есть биолюминесценция), хорошим слухом и развитой способностью к акустической локации, а также электрическими органами защиты. Благодаря последнему обстоятельству они оказались на ты с электричеством и легко освоили электролиз и силовую электротехнику, пусть более неуклюжую, чем наша, из-за суровой борьбы с утечками, неизбежной для всех, живущих в проводящей среде. Зато они легко освоили водородную энергетику с топливными элементами — хранить водород и кислород в отдельных емкостях под большим давлением не так сложно. При многих недостатках своего положения у европиан есть и преимущества, например, свобода передвижения в трех измерениях, отсутствие климатических катаклизмов.

Какова их «стартовая» космология, аналогичная нашей картине мира XVII–XIX веков?

Античная картина мира европиан сводилась к двум полупространствам — вода и твердь внизу. Но с развитием цивилизации стали появляться сомнения. Главную загадку составляло небесное эхо. Когда начинал извергаться вулкан, раздавались громовые удары, и от каждого через некоторое время откуда-то сверху приходило раскатистое эхо. Естественно, древнее объяснение этого явления было непосредственным и самоочевидным: это боги мрака небес вторят богам недр, извергаю-

щим гнев. Однако некоторые дотошные индивиды начали задавать вопросы:

— Почему боги недр всегда выступают первыми? Предания гласили, что однажды гром пришел с неба без всякого грома недр, но лишь однажды и лишь в преданиях.

— Почему ответ неба всегда одинаково повторяет последовательность раскатов снизу? Именно так бывает при обычном эхе. Загвоздка в том, что небесное эхо не дает объемной картины неба, подобно тому, как эхо от холма дает объемную картину части холма. Потому и думали, что это не обычное эхо, а диалог богов. На самом деле отсутствие объемной картины от небесного эха — в его растянутости во времени. Мозг европиан, как и наш, не приспособлен к автоматической обработке медленного сигнала — если замедлить развертку изображения в старом телевизоре в десятки раз, мы перестанем видеть картинку. Мало-помалу дотошные европиане заключали, что там в небе есть что-то вполне материальное, отражающее звук вулканов. Но что именно и насколько высоко? Видимо, очень высоко, поскольку задержка эха сверху была намного дольше, чем от соседних гор. Почти столь же далеко, как граница изведенного Мира.

Это нечто в небе манило смельчаков, которые, запасшись в дорогу пищей, поднимались на невероятную высоту, но их всех охватывал тяжелый давящий ужас, вынуждавший вернуться. Этот ужас на самом деле был полезной находкой эволюции, страхующей от смерти из-за набора излишней плавучести при понижении давления — вернуться назад с чрезмерных высот могло не хватить сил, особенно если попадешь в восходящий конвекционный поток.

Естественно, европиане не отступились. Во-первых, они нашли растительное снадобье, снимающее страх больших высот. После приема зелья побаливала голова и подташнивало, но зато открывалась дорога в немыслимую высоту! Во-вторых, умельцы изобрели адекватное средство передвижения в вертикальном направлении без затрат сил. Оболочка, сшитая из кожи круглобрюхов, пропитанной жиром кухляков, наполнялась жидкостью, поднимающейся от ямы с гниющими пищевыми отходами. Получалась вполне приличная подъемная сила. К оболочке цеплялась корзина с экипажем, припасами и балластом, служившим средством возвращения домой.

Несколько первых попыток оказалось неудачными. Два раза протекла оболочка, потеряв подъемную силу, три раза «высокоплавателей» скрутило от передозировки высотного зелья так, что они смогли лишь обрезать стропы и вцепиться в корзину, дожидаясь, пока она чудовищно медленно не опустится на дно, где можно отлежаться в зарослях и придти в себя.

Трое друзей, потерпев две неудачи и набравшись опыта, собрались на решительный штурм. Точнее, в экипаже было четверо, четвертым был смысленный шустрый улзень по кличке Дзынь, настолько преданный своему хозяину, что даже пытаться оставить его было немислимо.

Через четыре смены, после того, как с возгласом «Понеслись!» был обрублен швартовый канат, они оказались на такой высоте, где еще никто никогда не был.

Снадобье избавляло от животного ужаса перед высотой, но не спасло трех первопроходцев от отчаяния, подступавшего по мере жуткого долгого подъема в полной пустоте, мраке и безмолвии. Путешественники своим трезвым разумом понимали, что там нет никаких ужасных небожителей, которыми с древних пор пугали проповедники. Но когда тянется время, которому, кажется, нет конца, и на твое звонкое щелканье нет ни малейшего ответа, словно всё пространство забито ватой, разум перестает быть трезвым, и вся жуткая орава сказочных монстров оживает и корчит рожи в съезжившемся сознании.

Дзыню было куда легче — он прекрасно переносил высоту без всякого зелья и его никто не пичкал с детства рассказами о небесных чудовищах. А раз хозяин рядом, значит, всё в порядке, несмотря на странное безмолвие пространства. Он прильнул к хозяину, который, забившись в угол корзины, завернувшись в покрывало, рефлекторно продолжал издавать локационные щелчки и посвисты. В таком же состоянии находились два других члена экипажа. Вдруг Дзынь встrepенулcя, вытянул голову и начал попискивать и щелкать.

Следом очнулся хозяин и растолкал остальных. — Смотрите, Дзынь точно что-то учуял или услышал. — А ну-ка, свистни изо всех сил — у тебя это лучше получается! — Есть! Точно! Там твердое небо! Тихо... Оно, кажется, чуть волнистое!

Ко всем мгновенно вернулось ясное сознание, хотя голова у каждого гудела и казалась распухшей.

Твердое небо оказалось состоящим из неведомого прозрачного материала, поддававшегося зубилу. Отколотые куски стремились вверх, как камни стремятся вниз, поэтому по пути домой их пришлось держать в сетке из-под съеденных моллюсков.

Однако доставить прозрачные куски домой так и не удалось: они стали уменьшаться, округляясь, и на полпути вообще исчезли к большому огорчению путешественников. И кто им теперь поверит?!

Едва восстановившись физически и морально, они повторили экспедицию. На сей раз они откололи куски побольше и по наитию завернули их

во много слоев кожи. Драгоценные образцы неба были представлены руководству придворной академии наук, где и растаяли на глазах у изумленных ученых мужей.

— Д-а-а... — сказал президент академии.

— Не знаю, что и сказать... — сказал первый вице-президент.

— Надо как-то отреагировать, — сказал второй вице-президент.

— Э-э-э... — задумался президент. — А ты знаешь, как надо отреагировать, чтобы там это не вызвало гнева?

— Не знаю, — ответил второй вице-президент, — а также не знаю, не вызовет ли это недовольство здесь, даже если не вызвало гнева там.

— Давайте никак не реагировать, — подвел итог президент, — да и незачем: свидетельство-то исчезло.

— Но ведь они еще привезут! — возразил первый вице-президент.

— Вот пусть тогда и выпутываются сами, а там посмотрим на результат и поймем, как реагировать, — завершил дискуссию президент.

После этого, конечно, лёд привезли еще и еще. Как реагировать, не знали ни «там» ни «здесь». Но природное любопытство европиан брало свое: стихийные экспериментаторы выяснили, что куски неба превращаются в воду, правда в такую, в которой чего-то не хватает, безвкусную. И стало удивительным, как это сразу не поняли, что лёд — твердое состояние воды, подобно тому, как бывает жидкий свинец и твердый свинец. Из этих опытов постепенно вырастала настоящая наука и настоящие ученые, а тем временем (а может быть и в связи с этим) начиналась первая промышленная революция со своими электрическими машинами, винтоходами, электролизным алюминием, медью а потом и сталью.

Изменилась и картина мира. Теперь это был бесконечный плоский слой воды между полупространствами скального грунта и льда. Скальная среда — вечный источник тепла и плодородия, ледяная — холода. Вполне логичная картина, даже с точки зрения термодинамики: поток энергии избавляет мир от термодинамического равновесия, которое есть тепловая смерть. Кусок льда, отломленный от ледяного полупространства, тяготеет назад ко льду, а кусок скального полупространства, камень, тяготеет к своей среде. Вскоре этот факт оформился в своеобразную версию закона Архимеда: на каждое тело действует сила, направленная вниз, пропорциональная массе этого тела, и сила, направленная вверх, пропорциональная массе воды, занимающей объем тела. Таким образом, вселенная в космологии европиан, соответствующей космологии землян XVII–XIX веков, была бесконечной однородной и изотропной в двух измерениях и не изотропной неоднородной в третьем.

2. СТАРАЯ КОСМОЛОГИЯ ЖИТЕЛЕЙ ПОДЛЕДНОГО ОКЕАНА ЕВРОПЫ

Картина мира устоялась, но в ней всё более явно проступала логическая дыра. На камень действует сила, направленная вниз. На кусок льда – сила, направленная вверх. А на камень, принадлежащий дну (недрам), или на кусок льда, принадлежащий твердому небу, – что, не действует? Тогда где и как прекращается действие? Странная сила получается! А если сила универсальна, почему она не разорвет Мир? Приходилось прибегать ко всяким метафизическим уловкам вроде тезиса, что природа не терпит пустоты.

Догадаться о том, что их мир сферичен, европианам оказалось намного сложнее, чем обнаружить ледяной панцирь. Кривизна поверхности не видна (и не слышна). Нет внешних ориентиров, таких как солнце и звезды. Нет компаса (магнитное поле Юпитера на Европе намного слабее земного, свое европианское отсутствует). Но знание элементарных законов физики дает ключ даже жителям глубин, чтобы определить топологию и форму своего мира. Однако, для этого потребуется технология, немного выходящая за рамки той, что имели земляне в XVII–XIX веках. Об этом рассказано ниже, а сначала вспомним про нашу собственную первую космологическую революцию.

3. Первая космологическая революция

Парадигма вечной Вселенной дожила до 1920-х годов и пала жертвой не столько собственных противоречий, сколько новых фактов и теорий. Для начала уточним, что именно в картине мира XIX века потерпело крушение.

Вопреки тезисам современных философских поветрий, родственных постмодернизму, достижения науки прошлых веков никто не отвергал — они просто приобрели новый, более ограниченный смысл в более широком контексте. Астрономия XVII–XIX веков дала примерную картину ближней Вселенной, которая в целом выдержала испытание временем, хотя и была существенно дополнена и пересмотрена в ряде деталей.

Крушение потерпела не научная теория, а, скорее, философская доктрина, вышедшая за круг научно установленных фактов. Она казалась естественной, очевидной, простой и была желанной для разума. Природа в очередной раз преподала нам урок: не всё, что кажется очевидным и привлекательным с философской точки зрения, является истиной. Реальность оказалась сложнее, драматичнее и даже трагичнее: Вселенная родилась, эволюционирует и перестанет существовать в ее нынешнем виде. Как и всё, что в ней содержится. Всё течет, всё изменяется, всё проходит. Вселенные — тоже.

Сокрушающим фактом стал закон разбегания галактик, открытый Эдвином Хабблом, теоретической основой революции — общая теория относительности Эйнштейна и решения уравнений Эйнштейна для Вселенной как целого, найденные Александром Фридманом и позже Жоржем Леметром. Главные события революции произошли в 1920-х годах.



Хроника примерно такова

1915–1917 годы: Эйнштейн формулирует общую теорию относительности, из которой следует нестационарность Вселенной как целого. Эйнштейн этого не хотел и попытался подправить теорию, введя произвольно дополнительный лямбда-член (или космологическую постоянную, как чаще

3. ПЕРВАЯ КОСМОЛОГИЧЕСКАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

называют ее сейчас), который мог бы стабилизировать Вселенную (хотя и не обеспечивал устойчивости).



1922 год: Александр Фридман показывает, что Вселенная с лямбда-членом неустойчива, и публикует решения уравнений Эйнштейна, описывающие нестационарную Вселенную. Поначалу его работа не нашла поддержки в научном сообществе, в частности, поддержки Эйнштейна.

1923–1925 годы: Эдвин Хаббл видит в спиральных туманностях цефеиды — переменные звезды с известной зависимостью периода от светимости. Из видимой яркости цефеид следует гигантское расстояние до них. Такое расстояние, что спирали не могут быть ни чем иным, кроме как галактиками, подобными нашей собственной. Так утвердилось внегалактическая астрономия, начало

которой было положено чуть ранее Слайфером, разглядевшим в спиральных туманностях звезды.



1927 год: Жорж Леметр продолжает дело Фридмана, независимо воспроизведя его решения и активно пропагандируя теорию нестационарной Вселенной. Вводит понятие Большого взрыва (сам термин появился много позже; Леметр использовал понятие «первичный атом»). Леметра воодушевляли первые данные Хаббла и Слайфера, говорящие, что спектры большинства галактик смещены в красную сторону. Это

трудно интерпретировать иначе, как эффект Доплера: большинство галактик удаляется от нас. Леметр теоретически предсказывает закон красного смещения: скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию до нее. Более того, он берет данные Слайфера по красному смещению галактик и результаты Хаббла по оценке расстояний до галактик и подтверждает свою догадку: числа свидетельствуют о расширении Вселенной с темпом 625 км/с на мегапарсек. Но данные были еще не убедительны, и автором закона в историю вошел Хаббл.



1929 год: Хаббл, основываясь на большом количестве измерений, публикует свой закон пропорциональной зависимости красного смещения от расстояния, ошибившись в 7 раз в определении коэффициента этой зависимости. Эйнштейн признает нестационарность Вселенной и Большой взрыв, а также называет лямбда-член своей ошибкой. Лямбда-член, однако, остался висеть, подобно ружью, на стене и впоследствии, как в хорошей пьесе, выстрелил, да еще как!

На этом первую космологическую революцию можно было считать свершившейся, хотя факт ее свершения осознали совсем немногие. Сам Хаббл в то время не был уверен, что его закон доказывает расширение Вселенной. К тому же ошибка в определении постоянной Хаббла ставила под сомнение всю складывающуюся картину: возраст Вселенной, определяемый как момент начала разлета галактик, получался слишком маленьким — где-то 2 млрд лет.

Ошибка Хаббла складывалась из нескольких составляющих. Во-первых, неправильная калибровка «стандартной свечи» в качестве которой использовались цефеиды — звезды с периодическими колебаниями блеска, у которых абсолютная яркость жестко зависит от периода. Эта яркость была занижена, и расстояние до ближайших галактик с различными цефеидами, соответственно, занижено. Расстояние до более далеких галактик определялось с помощью их ярчайших звезд — это была вторая, более яркая «стандартная свеча». Здесь Хаббл тоже ошибся — он во многих случаях за ярчайшие звезды принял компактные очаги звездообразования, которые ярче любой звезды. Эти и другие неточности сработали в одну сторону, дав огромную

ошибку — недооценку расстояний до галактик. Более-менее правильная величина постоянной Хаббла была определена лишь в 1950-е годы, но еще долго оценки разных групп различались почти в два раза.

Концепция Большого взрыва решает перечисленные в первой главе парадоксы одним легким движением. Парадокс Ольберса объясняется красным смещени-



3.1. Эдвин Хаббл (1889–1953). Фото «Википедии»

ем в расширяющейся Вселенной. Когда объект удаляется, его яркость снижается по двум причинам: энергия квантов падает из-за эффекта Доплера и уменьшается темп их прихода к наблюдателю. Кроме того, у Вселенной появляется горизонт, из-за которого не приходит ничего. Проблема тепловой смерти снимается простым соображением о том, что она еще только впереди. Проблема гравитационной неустойчивости отпадает вообще: в расширяющейся Вселенной неоднородности растут медленней и заведомо не успевают привести к каким-либо парадоксам.

Несмотря на блестящее решение космологических противоречий, новая парадигма утверждалась долго и довольно мучительно. Прошли еще десятилетия, когда образованные родители говорили своим вопрошающим детям (в числе которых был и автор данной книги), что Вселенная не имеет ни начала, ни конца, ни пределов. Еще долгое время вполне заслуженные ученые пытались дать альтернативные объяснения закона красного смещения. В частности, предполагали некий механизм «старения фотонов» — они, дескать, теряют энергию по пути, что имитирует эффект Доплера. Однако механизм подобной потери энергии науке неизвестен. Даже в 1950-х годах многие хорошие ученые и слышать не хотели о Большом взрыве. Многие считали, что разбегание галактик — локальный эффект.

Интересно, что концепция Большого взрыва была благожелательно встречена церковниками самых разных конфессий. Действительно, чем не акт творения?!

Зато марксистско-ленинская философская школа держалась до конца, признав Большой взрыв лишь где-то к концу 1950-х годов.

Перелом в общественном сознании наступил, пожалуй, только в 1960-е годы, когда теория Большого взрыва, подтвержденная новыми данными, пошла в широкие народные массы через популярную литературу и СМИ. Где-то году в 1966-м или 1967-м преподавательница математики рассказывала нам, десятиклассникам, про геометрию Римана и сказала, что, похоже, именно этот вариант реализуется во Вселенной в соответствии с теорией Большого взрыва. Правда, таких учителей было немного. Так или иначе, в 1960-х, более чем через 30 лет после возникновения, новая парадигма утвердилась окончательно.

Из настоящих ученых, заставших открытия 1960-х годов, до конца не признал Большой взрыв только известный английский астрофизик Фред Хойл. Его вариант стационарной Вселенной был по-своему красив и романтичен, справлялся и с парадоксом Ольберса, и с проблемой тепловой смерти, но имел свои проблемы, которые множились по мере поступления новых астрофизических данных. Эта история настолько живописна и по-своему драматична, что мы посвятим ей небольшую главу книги.

Пожалуй, самая яркая роль в первой космологической революции XX века выпала на долю Хаббла (отчасти вместе со Слайфером) — расширить «ойкумену» в тысячу раз, первым увидеть колоссальную Вселенную, да к тому же расширяющуюся! Интересно, был ли в жизни Хаббла момент просветленного потрясения от внезапно открывшегося или понятого? Вполне возможно, что яркий момент истины остался погребен под гигантским количеством рутинной работы, необходимой, чтобы эту истину добыть.

Кажется, Хаббл так и не понял значение своего закона. Он не раз подчеркивал свою позицию: закон красного смещения — эмпирический факт, а его интерпретация — задача для теоретиков. Сам он больше склонялся к версии, что красное смещение — результат неизвестного науке явления уменьшения частоты электромагнитных волн при их распространении на огромные расстояния. Ему бы прожить еще дюжину лет до открытия реликтового излучения! Тогда бы Хабблу уже некуда было деться и пришлось бы осознать, насколько грандиозен его вклад в наше новое мировоззрение.

4. Первая космологическая революция на Европе

В первой половине XX века наша Вселенная оказалась расширяющейся, эволюционирующей, имеющей дату рождения и горизонт, дальше которого мы заглянуть не можем принципиально. У европейцев мировоззренческая революция, соответствующая данному уровню развития, выглядела несколько иначе. Вспомним их старую космологию: Вселенная есть слой воды между двумя полупространствами — ледяным и скальным. Убедиться в том, что это не так, им было несравненно сложнее, чем людям догадаться о шарообразности Земли.

Издавна эти существа подледного океана, живя во мраке, испытывали проблемы с дальней навигацией: отсутствовали ориентиры. Европейцы довольно далеко, гораздо дальше, чем глазами, «видят» с помощью звуковой локации и, находясь в движении, даже воспринимают красоту ландшафта по переливам отраженного звука. Но у них нет ни солнца, ни звезд, ни компаса. Поэтому географические открытия сильно задержались — к эпохе, когда их технология достигла уровня земной начала XX века, они лишь фрагментарно исследовали дальние области.

Отсутствие внешних ориентиров европейцы пытались восполнить акустическими маяками, сеть которых охватывала густонаселенные районы. А в дальних экспедициях маяки ставились друг за другом так, чтобы образовывать прямые цепочки: новый маяк ставился в створ двух предыдущих. Это было не просто: для точного определения створа приходилось делать маяки, звучащие на строго фиксированной частоте, и использовать трюки с интерференцией звука да еще учитывать поправку на течение. Стремясь расширить «ойкумену», европейцы предприняли несколько сверхдальних экспедиций на больших винтоходах, напоминающих земные подводные лодки, только гораздо легче: не надо удерживать внешнее давление. Большинство вернулось назад по своей цепочке маяков, поворачивая, когда кончались запасы топлива или маяки. Были открыты великолепные леса гигантских растений, колышущихся в потоках, восходящих от еще теплых полей лавы, племена диких собратьев, новые горные хребты и плодородные

вулканические кальдеры. Но пришлось вернуться, так и не утолив в полной мере своего инстинкта первопроходцев, которым европиане наделены в не меньшей степени, чем мы. Всегда остается досада: так и не узнал, что лежит за тем хребтом...

Наконец, были снаряжены две экспедиции, «Кальмар» и «Медуза» на судах, по самую рубку заправленных водородом с кислородом, с запасами маяков по несколько тысяч штук, с неограниченным ресурсом пищи, оснащенные мощными прожекторами и сонарами. Отправились в двух перпендикулярных направлениях, но вскоре вышли за пределы акустической связи и остались предоставленными самим себе. Но осталась еще экстренная связь — типа азбуки Морзе из серии мощных гидравлических ударов, слышимых на огромных расстояниях. И однажды, когда уже об экспедициях стали слегка подзабывать, в Центр пришло экстренное сообщение от «Медузы»: «Слышим маяки „Кальмара“, идем прямо». В Центре были озадачены и обеспокоены: экспедиция заблудилась — двигаясь по прямой, она никак не могла напасть на след «Кальмара», ушедшего в перпендикулярном направлении.

Экстренных сообщений больше не было. В Центре царило похоронное настроение, но однажды раздались обычные акустические позывные «Кальмара», а потом и «Медузы». Причем раздались совсем не оттуда, откуда их ждали, а, скорее, с обратной стороны. Ликование при встрече смешалось с недоумением: обе команды настаивали на том, что всё время двигались прямо. «Кальмар» уже было планировал поворачивать назад, как услышал почти прямо по ходу Центральный маяк. В какой-то момент команду охватил суеверный ужас — получалось, что они обнаружили в невероятной дали какой-то фантом родного маяка! Но когда они навели тарелку и услышали по связи знакомые голоса, когда распознали знакомые места, поняли, что просто бездарно сбились с пути и описали круг. Команда «Медузы» уже раньше подозревала, что у них что-то не так с ориентацией, и поэтому была поражена меньше.

Причина такого курьеза казалась очевидной — створ маяков представлялся неточно, из-за чего обе экспедиции описали замкнутую кривую. Удивительно было лишь то, что они проплыли примерно одинаковое расстояние. Это наводило на мысль, что природа ошибки, заставлявшей экспедиции отклоняться в сторону, была общей. Ошибку надо было во что бы то ни стало понять. Для выяснения была организована специальная комиссия, которая, успешно освоив выделенные деньги, испустила отчет такого объема и такого качества изложения, что никто в нем и не пытался разобраться. Забыли и успокоились.

Однако один инженер придумал способ навеки решить проблему с блужданием экспедиций. Уже был известен закон сохранения вращательного момента, и автор изобретения решил создать навигационный гироскоп. Это было непростой задачей: до создания приборов в вакуумных камерах технология европиан еще не дошла, приходилось иметь дело с вязкостью и возможным влиянием движения воды.

Решение было таковым: гантель из двух массивных полированных металлических сфер, заполненных водородом для придания им нулевой плавучести. В ручке гантели — электромотор, раскручивающий сферы в противоположных направлениях. Каждая сфера — в кожухе, опять же заполненном водородом, который, в условиях океана Европы не являясь ни жидкостью, ни газом, имеет меньшую вязкость, чем вода. Единственное соединение с внешним миром — гибкий электрический кабель, подведенный к середине ручки и заодно играющий роль «поводка». Вся конструкция с неизбежностью была массивной и громоздкой, чтобы момент инерции был как можно больше, а относительное влияние вязкости и тока воды — меньше.

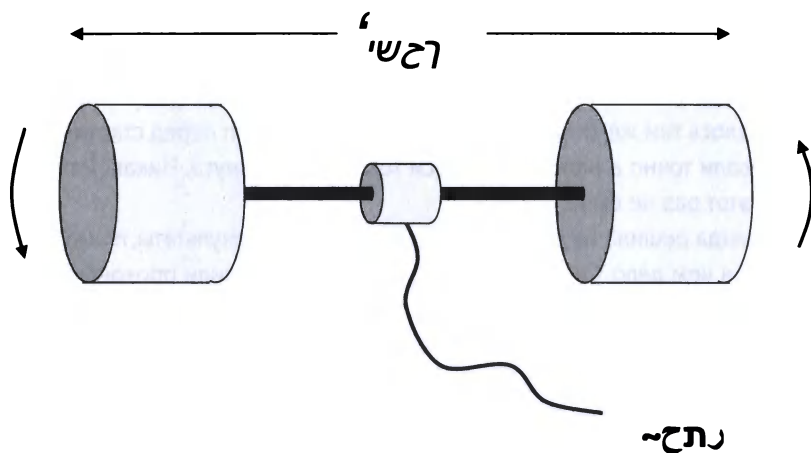


Рис. 4.1. Рисунок гироскопа, представленный инженером в Ассоциацию судовладельцев

Сделать такой механизм было непросто, тем более, что требовалось довольно много денег. Проект согласилась финансировать ассоциация судовладельцев, которые стонали от поборов Управления навигации, взимаемых за пользование акустическими маяками. Маяков не хватало, покрытие многократно отставало от потребностей торгового флота, а плата была несоразмерной. Одним словом — естественная монополия.

Выслушав доклад инженера, председатель ассоциации заявил:

— Я не очень верю, что эта штука будет работать. Но если вдруг уважаемый заявитель исполнит обещанное, мы так надраим затылок живодерам из Управления навигации, что это оправдывает любой риск.

Работа по созданию гироскопа шла тяжело и медленно. Но, как говорят на Европе, два глаза боятся, а восемь рук делают — благодаря энтузиазму и самоотверженности создателей аппарат был смонтирован и запущен. Однако уже на стадии отладки появилась одна странность: гироскоп медленно поворачивался — всегда в одну и ту же сторону.

Чего только не предполагали! Первая гипотеза — не сбалансирована плавучесть двух сфер, что вызывает прецессию. Проверили — всё сбалансировано. Второе предположение — конвекция воды в помещении. Измерили ток воды — не подтвердилось. И так далее. Вплоть до действия неизвестных науке сил. В конце концов решили предоставить работающий гироскоп самому себе и посмотреть, что он будет делать.

И гироскоп медленно и уверенно поворачивался. За семь с небольшим смен он описал круг, вернулся в исходное состояние и пошел на новый. Точнее, это был не круг, а конус: гантель, в начале эксперимента расположенная горизонтально, описывала конус полураствором 40 градусов. Гироскоп остановили, сориентировали иначе и запустили снова. Все повторилось, только изменился раствор описываемого конуса, а направление его оси осталось тем же. В третьем эксперименте гироскоп перед стартом сориентировали точно в направлении оси того самого конуса. Никакой прецессии на этот раз не было.

Команда решила не оглашать эти таинственные результаты, пока не разберется, в чем дело. Своих идей не было, поэтому решили проконсультироваться с известным специалистом в области теоретической механики. Он, выслушав это, пришел в изрядное возбуждение и заявил: «Кажется, я знаю, что это такое, но боюсь говорить, поскольку вы сочтете меня сумасшедшим». После бурных заверений, что такое никак не возможно, он все-таки сказал:

— У меня уже были смутные подозрения, теперь кажется все ясно: наш Мир — шар. Именно поэтому две недавние экспедиции вернулись с другой стороны. А вы только что открыли, что этот шар вращается, и определили период и ось этого вращения.

— Как, шар?!

— Какой шар?

— А как же с другой стороны шара — всё перевернуто?!

— Бредятина какая-то!

— В отчете же всё объяснили...

— Я в отличие от многих осилил тот жуткий отчет. Его явно писали, чтобы запутать читателя и скрыть, что просто бездарно растратили деньги, так ни в чем и не разобравшись. Кто-нибудь обратил внимание на то, что «Медуза» наткнулась на маяки «Кальмара» примерно в середине своего пути? Они вышли по перпендикулярным направлениям. Если они шли по кругу, должно быть так:

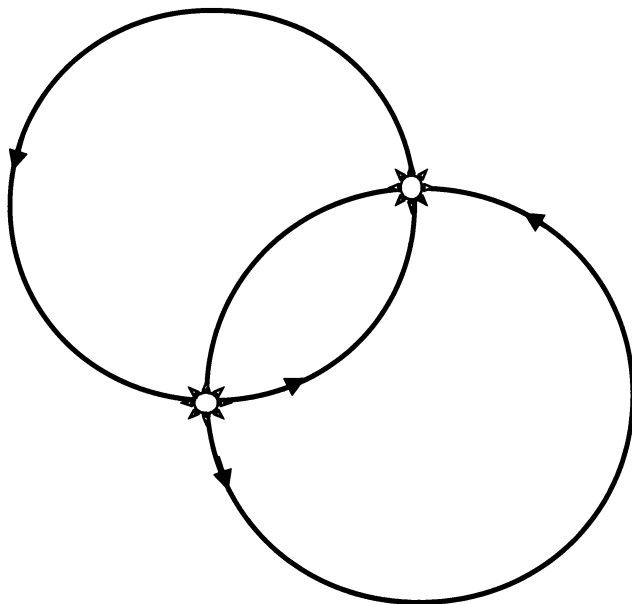


Рис 4.2. Траектории движения «Кальмара» и «Медузы» в случае, если бы они двигались по кругу из-за общей навигационной ошибки

То есть встреча должна была бы произойти либо на четверти, либо на трех четвертях пути — в зависимости от того, в какую сторону кружили. Но никак не посередине.

— А если они шли не по кругу, а по каким-то другим кривым?

— А как они тогда с такой точностью попали назад в точку выхода? Случайно? Обе? Приходится громоздить нелепые предположения. А если Мир — шар, всё становится на места: они шли прямо по окружности шара, маяки работали отлично. Пересеклись на противоположной стороне Мира. И ваш гироскоп вовсе не прецессирует — он строго держит одно направление. Вращается Мир. Неужели не ясно?

— Ты, конечно, большой ученый, но может тебе все-таки стоит отдохнуть...

— Это вам надо проспаться как следует, чтобы освежить замусоренные головы! А лучше тяните свою махину, куда указывает ось прецессии, примерно до Круглого плато — это как раз в том направлении. Там запускайте и смотрите, куда направлена эта самая ось. Она должна быть задрана круче — если последние экспедиции не сильно провалились в определении длины своего пути, то примерно на 48–49 градусов к горизонтали. И тогда с вас четыре больших баллона экстракта пупырышника трехпериодной выдержки. И чтобы каждый из вас явился на Белую площадь, стукнул головой об обелиск и прокричал: «Наш Мир — шар. И он вертится!»

Ученый получил свои четыре баллона. Однако, триумф оказался отнюдь не быстрым и не безболезненным. Не только простые европейцы, но и весьма заслуженные ученые не могли принять новую идею, от которой всё внутри переворачивалось и протестовало. Наиболее добросовестные оппоненты пытались придумать новый закон природы, заставляющий гироскопы прецессировать, а экспедиции — ходить по кругу. Менее добросовестные, среди которых были чиновники из Управления навигации, упражнялись в сарказме и казуистике. Служители культа клеймили еретиков и требовали привлечь к суду за оскорбление Высших Предначертаний.

Но гироскоп, подобно огромному тарану, на который походил даже внешне, сам пробил все стены. Им начали пользоваться сперва дальние экспедиции, а потом и торговые суда, и это оказалось куда проще и точнее, чем цепочки маяков. Карты поверхности стали быстро расширять охват и вскоре явным образом замкнулись в тотальную карту Мира, у которой не было краев и которую стало удобно рисовать на шаре. И всё стало логично и просто: гироскоп, который направляли вдоль оси прецессии, показывал одновременно направление меридиана (горизонтальной проекцией) и широту (углом наклона к горизонту). А другой гироскоп, направленный поперек оси мира, указывал долготу, вычисляемую с помощью хронометра. Почему? — На этот вопрос любой штурман ответил бы: «Как это почему? Потому что мир — вращающийся шар, и медузе ясно!»

Смена парадигмы вместе с появлением навигационных гироскопов привела почти к мгновенному (в течение жизни одного поколения) исследованию всего дна и «потолка» океана Европы. Цивилизация получила новые ресурсы, намного превосходящие имевшиеся до тех пор. В лоно Цивилизации вошли, правда, не без отчаянного сопротивления, многочисленные дикие племена. Но среди находок была и утрата — неведомая, манящая и пугающая бесконечность.

5. Вселенная — физический объект?!

Данный подзаголовок в XIX веке прозвучал бы как ужасное кошунство. Статус вместилища всего сущего предполагал, что Вселенная — это то, в чем разворачивается история, внутри нее работают законы мироздания, а вопрос «Есть ли какие-либо законы, управляющие Вселенной как таковой?» не имеет смысла. Но уже в 1920-х годах Вселенная была необратимо разжалована из высших философских категорий в объект, описываемый уравнениями. В простейшем случае однородной изотропной Вселенной это уравнение Фридмана.

Решения уравнений говорили следующее: вселенная типа нашей (пишем «вселенная» с маленькой буквы, имея в виду вселенную вообще, любую) может либо расширяться из бесконечно плотного состояния, либо сжиматься в бесконечно плотное состояние. Наша Вселенная расширяется. Она может быть либо «замкнутой» — конечной, либо «открытой» — бесконечной, либо — в промежуточном случае — «плоской». «Замкнутую» вселенную в принципе можно обогнуть, вернувшись с противоположной стороны, если снять ограничение на скорость передвижения. «Открытую» и «плоскую» — нельзя. Определить, в какой Вселенной мы находимся, просто — надо измерить сумму углов очень большого треугольника (миллиарды световых лет): если она больше 180° — Вселенная «замкнута» и описывается геометрией Римана, если меньше 180° — «открытая» и описывается геометрией Лобачевского, если равна — «плоская» и описывается геометрией Евклида. Если Вселенная заполнена обычной материей (с неотрицательным давлением), то в первом случае расширение когда-нибудь сменится сжатием, во втором — вселенная будет расширяться вечно. В третьем — будет тормозиться до нулевой скорости расширения в бесконечном будущем. Первый случай (вероятно, достаточно близкий к «плоскому») с точки зрения физики кажется более естественным. То, какой из этих сценариев реализован, определяется средней плотностью энергии во вселенной (или массы, поскольку для обычной материи $E = mc^2$). Если она в точности совпа-

дает с критической плотностью, которая в настоящее время близка к 10^{-29} г/см³, то реализован «плоский» вариант. Если плотность выше — вселенная «замкнута», если ниже — «открыта». По современным данным сумма вкладов всех типов материи (включая так называемую темную энергию) в пределах ошибок совпадает с критической.

Как представить замкнутую конечную вселенную? С самым простым способом автор познакомился на первом курсе Физтеха на лекции Сергея Петровича Капицы. Тот брал воздушный шарик, на котором нарисованы завитки-галактики, подсоединял его к трубке компрессора и открывал вентиль. Шар медленно надувался, а Сергей Петрович, разводя руками, показывал, как галактики разбегаются — чем дальше друг от друга, тем быстрее, как и наблюдал Хаббл. Потом шарик громко лопался, и лектор обводил аудиторию победным взглядом.

Победный взгляд оправдан: демонстрация снимает глупые вопросы: «Где произошел Большой взрыв?», «Откуда разбегаются галактики?» и «Где у Вселенной край?». Многие воспринимают Большой взрыв по аналогии с обычным взрывом: разлет вещества из некоего эпицентра в пустоту. Смотрите на надуваемый шарик, на его поверхность! Там нет и не было центра разлета. Вообразите, что шарик стал раздуваться от микроскопических размеров — сначала быстро, потом медленней. Большой взрыв и есть начало расширения «шарика» — «замкнутой» Вселенной. Надо лишь добавить, что в этой демонстрации есть третье измерение, откуда мы можем рассматривать шарик. Пример будет точнее, если допустить, что все движения возможны только вдоль поверхности шарика, а третьего, перпендикулярного измерения (в случае реальной Вселенной — четвертого пространственного) нет вообще.

Коль скоро мы признали, что Вселенная — физический объект, имеет смысл, не откладывая, перечислить основные геометрические и физические характеристики этого объекта.

Определить размер «шарика», в «поверхности» которого мы живем, мы не можем — он слишком велик и весь не доступен наблюдениям (см. ниже про горизонт). Впрочем, были попытки найти объекты, видимые с противоположных направлений, в предположении,

что лучи от них обогнули замкнутую Вселенную с противоположных сторон, как взрывная волна от падения Тунгусского метеорита обогнула земной шар. В таком случае можно было бы примерно оценить размер, но сейчас мы точно знаем, что подобное невозможно — Вселенная слишком велика. Зато мы в принципе можем измерить пространственную кривизну Вселенной. Например, зная настоящий размер очень далекого объекта и расстояние до него, можно оценить кривизну пространства по углу, под которым мы видим этот объект. Другой способ измерения кривизны — определить среднюю плотность всех видов энергии во Вселенной и постоянную Хаббла (эти величины связаны через уравнения Фридмана). Сейчас мы знаем, что кривизна в пределах ошибки неотличима от нуля.

Вместо размера Вселенной для описания ее расширения можно использовать масштабный фактор. Он описывает, как меняется расстояние между точками вместе с расширением Вселенной, например расстояние между двумя галактиками, не связанными гравитацией. Нельзя сказать: «Масштабный фактор при красном смещении $z = 1$ был 100 мегапарсек», — это бессмыслица (величина z определяется через соотношение $\lambda_1 = \lambda (1 + z)$, где λ — длина волны испущенного, λ_1 — принятого фотона). Зато можно сказать: «Масштабный фактор с эпохи $z = 1$ к настоящему времени увеличился в два раза», «Две данные галактики разлетелись со 100 мегапарсек на 200» и т.п. Этот термин относится только к относительному увеличению расстояний. Объем, который, подобно увеличению масштабного фактора, расширяется вместе со Вселенной, называется сопутствующим объемом. Число частиц в единице объема уменьшается. А число частиц в сопутствующем объеме, как правило, сохраняется.

Для описания темпа расширения Вселенной используется постоянная Хаббла, обозначаемая H . Астрофизики ее выражают в привычных себе единицах — свежайшее значение постоянной Хаббла $H = 68 \pm 0,9$ км/с на мегапарсек. Смысл тот, что галактики, отстоящие от нас на один мегапарсек, удаляются в среднем со скоростью 68 км/с. Однако внимательный читатель может заметить, что мегапарсек можно выразить в километрах ($3 \cdot 10^{19}$ км), и тогда расстояние вообще выпадает из определения величины, остаются обратные секунды, а именно $2,3 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$, что равно единице, поделенной на

14 млрд лет. В знаменателе не случайно оказалась величина, близкая к возрасту Вселенной: если бы темп расширения был постоянным, то стартовать оно должно было бы 14 млрд лет назад. Но в классическом варианте Фридмана Вселенная расширяется с замедлением, значит, ее возраст заметно меньше 14 млрд лет, что приходит в противоречие с возрастом самых старых звезд. Это противоречие нашло разрешение лишь в конце 1990-х годов. Но не будем на сей раз забегать вперед.

Еще одна важнейшая геометрическая вещь во Вселенной — горизонт. Если Вселенная возникла 13,8 млрд лет назад, то ее первые лучи не могли распространиться дальше, чем на 13,8 млрд световых лет. В принципе, это расстояние можно принять за размер горизонта — это проще всего, и большой ошибки не будет. Но то, что мы видим, например, на карте реликтового излучения, испущенного 13,8 млрд лет назад, сейчас из-за расширения Вселенной ушло от нас более чем в два раза дальше (какое-то время точки, где сейчас находимся мы и где был испущен первый видимый луч, удалялись друг от друга со сверхсветовой скоростью). Поэтому размер области, о которой мы можем что-то знать, — это 45 млрд световых лет. Если мы видим, например, пятно пониженной яркости на карте реликтового излучения, то можем сказать, что в данном направлении на расстоянии примерно 45 млрд световых лет от нас находится войд — область, где нет скоплений галактик. То есть мы имеем информацию о том, что находится за 45 млрд световых лет от нас, точнее, информацию о том, что было там давным-давно. А то, что сейчас, можем грубо прикинуть. Это и есть общепринятое определение горизонта. О том, что еще дальше, мы ничего не знаем в принципе.

Если Вселенная — физический объект, то какова ее температура? Температура нашей среды обитания никакого отношения к температуре Вселенной не имеет — мы живем вблизи источника энергии и вдали от теплового равновесия. Что покажет градусник, если поместить его в межгалактическом пространстве, подальше от всех галактик и их скоплений?

В принципе, показания термометра в межгалактической пустоте никак не связаны с энергией редких частиц газа, находящихся

там, — их слишком мало. Показания определяются балансом поглощения и излучения электромагнитных волн телом термометра. Если падающие на термометр электромагнитные волны — лишь свет звезд и излучение пыли в далеких галактиках, то термометр покажет около градуса Кельвина или чуть меньше. Но это будет не та температура! В нынешней Вселенной глобального теплового равновесия нет. А в ранней — было!

Первые 380 тыс. лет во Вселенной вещество и излучение находились в состоянии термодинамического равновесия при общей температуре. Отклонения от равновесия на некоторых этапах были, но скорее как исключение. Вселенная расширялась, и ее температура падала с расширением по адиабатическому закону (грубо говоря, тепло совершает работу по расширению Вселенной). Затем, когда плазма превратилась в нейтральный газ, Вселенная вышла из термодинамического равновесия: была потеряна связь между излучением и веществом. Часть вещества стала сгущаться и разогреваться. Но излучение, которое с тех пор живет само по себе, продолжая остывать по тому же самому адиабатическому закону, осталось тепловым по всем своим характеристикам. У этого излучения, называемого реликтовым, есть определенная температура и логично именно ее приписать нынешней Вселенной. Оказывается, именно она определяет показания термометра в межгалактическом пространстве. В 1965 году это излучение зарегистрировали и вскоре его температуру измерили с хорошей точностью. Она оказалась равной 2,7 градуса Кельвина. Именно эту температуру покажет термометр в межгалактическом пространстве. Кстати, разница между градусом (равновесие со светом звезд) и 2,7 градуса очень велика — плотность энергии излучения пропорциональна четвертой степени температуры. Плотность энергии реликтового излучения в сотню раз выше, чем у света звезд вдали от галактик.

В физической Вселенной менялось также состояние вещества. Одно из самых важных изменений состояния — рекомбинация водорода, произошедшая в возрасте 380 тыс. лет. Вещество из состояния полностью ионизованной плазмы перешло в газ нейтральных атомов — именно поэтому тогда тепловое излучение потеряло связь с веществом.

Вселенная также характеризуется уравнением состояния. Оно определяется как связь между плотностью энергии, ϵ (куда входит и энергия покоя вещества), и давлением. До конца 1990-х годов думали, что давление близко к нулю; такое уравнение состояния называется «пылевым». Оказалось, что сейчас давление материи во Вселенной отрицательно — об этом пойдет речь ниже. Отрицательным давление было не всегда. Первые 80 тыс. лет в энергетическом балансе Вселенной доминировала радиация, и давление было положительным и очень высоким. На возраст 80 тыс. лет пришлось равенство энергий излучения и вещества, а еще раньше имел место предельный случай ультрарелятивистского уравнения состояния: $p = 1/3 \epsilon$.

Выше речь шла о Вселенной, подчиняющейся решению Фридмана, но с давних пор существует еще решение де Ситтера для однородной пустой вселенной с лямбда-членом. Это вечно расширяющаяся вселенная, причем расширяющаяся экспоненциально: за каждую единицу времени расстояние между любыми двумя точками увеличивается в (не «на» а «в») постоянное число раз:

В своем чистом виде решение описывает некий парадоксальный стационарный мир. Тем не менее, вспомним о его существовании! Решение де Ситтера, оказывается, имеет близкое отношение к действительности.

Если Вселенная — физический объект, не значит ли это, что таких объектов много? Конечно, значит! И из множественности вселенных вытекает возможное решение ряда каверзных вопросов, касающихся нашей собственной, единственной доступной для наблюдений. Но об этом тоже ниже.

6. Рыцарь Вечности

В науке достаточно яркий след оставили не только правильные теории и концепции, но и некоторые красивые заблуждения. Автор одного из таковых — английский астрофизик Фред Хойл.

Он вошел в историю в четырех ипостасях: как один из пионеров теории нуклеосинтеза в звездах, как автор научно-фантастических романов, как поборник теории панспермии и как упрямый безуспешный борец с концепцией Большого взрыва (между прочим, термин Big Bang, вольно переведенный на русский как «Большой взрыв», придумал именно он).

В теории нуклеосинтеза Хойл пробил тупик, казавшийся глухим, ответив на вопрос, как в звездах образуются элементы тяжелее гелия. Оказывается, мостиком от гелия к более тяжелым элементам служит тройная гелиевая реакция — сливаются три ядра гелия, образуя ядро углерода. Вероятность реакции получается достаточно высокой лишь потому, что у углерода существует ядерный резонанс с «правильной» энергией — именно Хойл в конце 1940-х предсказал существование этого резонанса, потом этот факт был экспериментально подтвержден. Позже он с Марга-



6.1. Фред Хойл (1915–2001).

Фото с сайта

www.english.cam.ac.uk

рет Бербидж, Джеффри Бербиджем и Уильямом Фаулером опубликовал фундаментальную статью по звездному нуклеосинтезу, ставшую знаменитой.

Теория, вошедшая в историю как «стационарная модель», была впервые предложена им в 1948 году совместно с Томасом Голдом и Германом Бонди.

Хойл признавал, что Вселенная расширяется, галактики разбегаются и красное смещение — реальный эффект Доплера, а не мифическое «старение фотонов». Но! Пусть в каждом кубическом километре пространства в среднем раз в год рождается один протон и один электрон. Этого достаточно, чтобы компенсировать разбегание галактик и поддерживать среднюю плотность Вселенной на одном уровне. И так могло быть всегда — никаких «больших взрывов».

Откуда возьмутся этот протон с электроном? Да хоть из ничего! Ведь в космологии Большого взрыва целая Вселенная возникла из ничего. По мнению Хойла, Большой взрыв антинаучен и относится скорее к сфере теологии, чем физики.

Далее новое вещество потихоньку сгущается в новые галактики (на самом деле с этим могут быть большие проблемы), старые освобождают место для новых, и Вселенная самовоспроизводится, оставаясь вечно молодой. Это очень оптимистичная теория. С парадоксом Ольберса всё в порядке — далекие звезды не светят из-за красного смещения. Тепловая смерть тоже отменяется: рождающаяся материя имеет низкую энтропию — она сгустится в звезды и станет новым топливом. Энтропия сопутствующего объема в расширяющейся Вселенной растет, но энтропия фиксированного объема остается постоянной.

В такой вечнозеленой Вселенной приобретает смысл старая идея панспермии. Жизнь возникла не на Земле — она гораздо древнее, а может быть вечна. Она переносится в космосе в виде спор примитивной жизни, например с пылью или замороженная в глыбы льда, выброшенного с поверхности планет ударами метеоритов. Споры засевают новые планеты, жизнь на них размножается и эволюционирует к высшим формам, и так будет всегда! Не правда ли, замечательно?!

А если Вселенная родилась в результате Большого взрыва? Тогда в идее панспермии нет особого смысла. Действительно, жизнь на Земле появилась 4 млрд лет назад, а еще на 6–7 млрд лет рань-

ше для нее во Вселенной не было никаких условий. Какая разница, зародилась жизнь на Земле или чуть раньше на другой планете и с огромными трудностями перепрыгнула на Землю? Статус панспермии уже не тот — вместо неограниченного времени на зарождение и распространение жизни отводится всего лишь раза в два больший срок, чем она существует на Земле.

У теории Хойла есть еще один плюс — она отчасти имеет под собой физическую основу, которая окрепла со временем. Такой тип расширения Вселенной, как требуется в этой теории, происходит на самом деле прямо сейчас. Это ускоренное экспоненциальное расширение, когда расстояние между парой далеких галактик увеличивается в два раза примерно каждые 10 млрд лет. В 1963–1966 годах Хойл в соавторстве с Джайантом Нарликаром развил теорию, согласно которой Вселенная заполнена неким полем, которое он назвал «полем творения» (C-field), с отрицательными давлением и плотностью энергии, которое вызывает экспоненциальное расширение Вселенной и рождает новые частицы.

Здесь осведомленный читатель может воскликнуть: «Да это же один в один инфляция, придуманная на 15 лет позже!» Почти что так, за исключением знака плотности энергии поля. Идея, в общем, оказалась близкой к истине. Фактически Хойл первым предложил прототип механизма под названием «космологическая инфляция», занимающий центральное место в этой книге. Увы, идея была приложена к неправильному сценарию и имела неверные положения, например, теперь ясно, что поле с отрицательной энергией будет нестабильно. Сейчас мы много чего еще знаем: подобное поле существует (только плотность его энергии положительна, а не отрицательна), и оно действительно вызывает ускоренное расширение Вселенной. Однако, рождать протоны с электронами это поле по современным представлениям не может. В широких массах оно известно под именем «темная энергия». Фред Хойл дожил до открытия ускоренного расширения Вселенной (это произошло в конце 1990-х) и наверняка порадовался.

Как жаль, что эта жизнеутверждающая теория оказалось неверной!

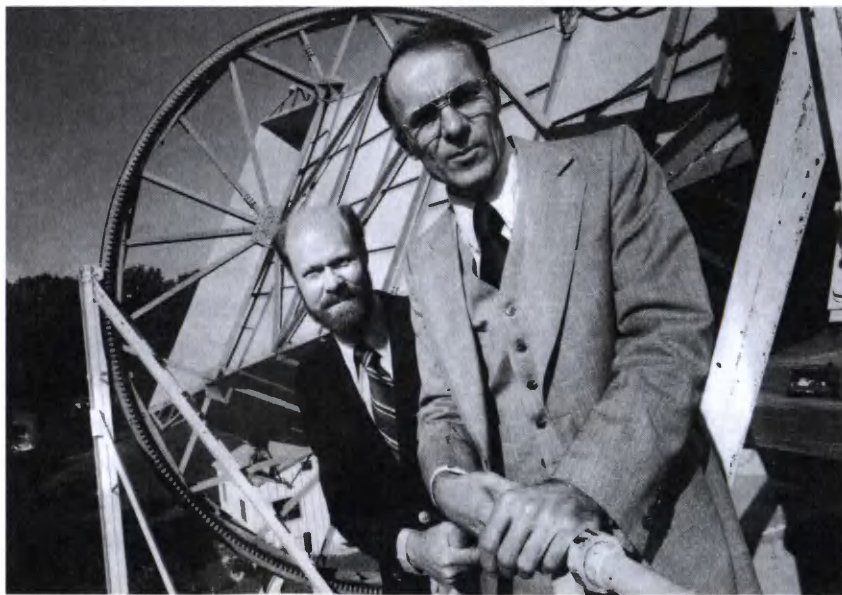
Сильнейший удар по ней был нанесен открытием микроволнового реликтового излучения, оставшегося со времен, когда Вселенная вся

была заполнена горячей плазмой. Хойл не сдался, он предположил, что это излучение — свет далеких звезд, переработанный галактической пылью. Хойлу указали на то, что Вселенная явно меняется со временем: квазары почти исчезли за последние несколько миллиардов лет, изменились типы галактик... Но он продолжал выкручиваться, искал лазейки. В частности, предположил, что творение вещества идет не равномерно, а модулировано синусоидой. Так и не сдался! Испортил себе репутацию, возможно, именно по этой причине не получил Нобелевскую премию, которая была присуждена его соавтору Уильяму Фаулеру за теорию нуклеосинтеза в звездах, но не сдался. Умер в звании рыцаря (посвящен в 1972 году), в возрасте 86 лет, в новом тысячелетии (2001 год), когда основные события, описываемые в этой книге, уже произошли.

Вероятно, драма Хойла заключается в том, что философ и поэт в его душе оказались сильнее профессионала-физика. И все-таки стоит отдать ему должное не только за правильные работы, но и за красивые и в каком-то смысле пророческие заблуждения. Без подобных заблуждений история науки была бы скучнее.

7. Свет Большого взрыва

Америку открыл Колумб, хотя викинги еще за сотни лет до открытия торговали с индейцами. Аналог эпохи великих географических открытий в астрофизике — 1960-е годы. Открытия шли одно за другим с интервалом в год: квазары, пульсары, реликтовое микроволновое излучение, гамма-всплески и ряд других, относительная важность которых зависит уже от точки зрения. Наиболее прямое отношение к нашей истории имеет реликтовое излучение. Лавры открытия принадлежат Арно Пензиасу и Роберту Вильсону, хотя архивные раскопки показывают, что микроволновое излучение уже видели раньше — прямо или косвенно. Так, в 1941 году канадский астроном Эндрю Маккеллар увидел в спектре поглощения звездного света межзвездным газом молекулярные линии, которые требуют постоянной накачки тепловым излучением с температурой 2,5 градуса Кельвина. Это отметили как загадочный факт и прошли мимо.



7.1. Арно Пензиас (справа) и Роберт Вильсон. Фото из архива Jodrell Bank Centre for Astrophysics

«Википедия» сообщает, что в 1955 году аспирант Тигран Шмаонов, работая в Пулковской обсерватории, обнаружил изотропный фон с температурой 4–5 К. Это было опубликовано в журнале «Приборы и техника эксперимента» и забыто. Наверняка кто-нибудь еще наблюдал реликтовое излучение, принял его за артефакт и пошел дальше.

И все-таки Америку открыл Колумб, а реликтовое излучение открыли Пензиас с Вильсоном. Все-таки слово «открытие» подразумевает «открытие миру», а не только себе. Здесь многое зависит и от исторического контекста. Для Пензиаса и Вильсона он был самым благоприятным.

Выше, перечисляя физические характеристики Вселенной, мы упоминали ее температуру, уменьшающуюся в ходе расширения. Соответствующая теория изначально горячей Вселенной была предложена Георгием Гамовым в конце 1940-х. Кстати, насколько Вселенная горяча? Этот вопрос Гамов пытался решить вместе с Ральфом Альфером и Робертом Германом: настолько горяча, чтобы в первые минуты ее суще-



ствования «правильно» прошли ядерные реакции протонов и нейтронов, синтезировав наблюдаемое количество гелия. Более научная формулировка вопроса «насколько горяча» звучит следующим образом: «Какова удельная энтропия Вселенной?» — иными словами, сколько фотонов приходится на один протон. Ядерные реакции в ранней Вселенной шли при температуре в десятки и сотни килоэлектронвольт. Из

7.2. Георгий Гамов.
Фото с сайта www.aip.org

наблюдаемого количества гелия можно определить концентрацию протонов с нейтронами (барионов) в тот момент — от плотности будет зависеть, сколько из них успеют слиться в ядра гелия. А поскольку плотность фотонов однозначно определяется температурой, то из требуемой плотности барионов получается соотношение примерно 10^9 фотонов на один барион. Это отношение в ходе расширения Вселенной не меняется. Значит, и сейчас на каждый барион приходится около 10^9 фотонов. И тогда современная температура Вселенной, точнее, температура излучения, оставшегося от бывшего теплового равновесия, должна быть 3–5 градусов Кельвина, что соответствует микроволновому диапазону. Впоследствии стало ясно, что эта оценка содержит ошибку и совпала с правильным значением случайно: только из концентрации гелия точно определить температуру сложно (зависимость довольно слабая), для этого нужна концентрация дейтерия, а тогда она не была известна.

Долгое время результат Гамова с Альфером и Германом оставался в статусе сугубо теоретической модели. Кажется, никому не приходило в голову, что это проверяемо и, тем более, уже косвенно подтверждено. Ситуация изменилась только в 1960-е. Так, в 1964 году Андрей Дорошечкин и Игорь Новиков обнародовали оценки, показывающие, что реликтовое излучение вполне может быть зарегистрировано с помощью уже существующей техники. В том же 1964 году Роберт Дикке с сотрудниками приступает к созданию изобретенного им специально для обнаружения реликтового излучения радиометра. В то же время Пензиас и Вильсон с похожим радиометром начинают астрофизические наблюдения. Обнаруживают тепловой шум, одинаковый по всем направлениям. Долго пытаются устранить этот шум, принимая его за технический артефакт. Наконец, Дикке с коллегами объясняют Пензиасу и Вильсону, что они обнаружили. Таким образом, открытие сделано случайно, но уже в то время, когда его ждали.

До сих пор реликтовое излучение остается главным источником информации в космологии. Карта реликтового излучения отражает карту неоднородностей плотности нашей Вселенной возраста 380 тыс. лет — фактически это ее детская фотография. Именно тогда плазма превратилась в нейтральный газ (момент рекомбинации) и фотоны пустились в свободное путешествие, постепенно смещаясь в красную, потом в инфракрасную, потом в микроволновую область

из-за расширения Вселенной. После рекомбинации наступили темные века (dark ages), когда не существовало никаких ярких объектов, которые можно было бы обнаружить современной техникой. И только где-то через 700 млн лет из тьмы выплывают первые галактики и квазары, обнаруженные недавно в инфракрасном диапазоне. Еще до них зажглись первые звезды, не связанные с галактиками. Но этого мы пока не видим. Самый первый известный на сегодняшний день сигнал, возвестивший об окончании темных веков, — гамма-всплеск с красным смещением $z = 8,2$, испущенный сколлапсировавшей звездой через 630 млн после рождения Вселенной.

8. Почему Большой взрыв не гипотеза

До сих пор на каких-нибудь форумах в Интернете можно прочесть: «Большой взрыв — спорная гипотеза». Слава богу, сомнения в шарообразности Земли (пока еще?) не высказываются. Между тем у Большого взрыва и шарообразности Земли одинаковый статус: и то и другое — твердо установленные факты. В данном случае под Большим взрывом имеется в виду расширение Вселенной из состояния с огромной плотностью и температурой (каких именно — отдельный вопрос) в соответствии с решением Фридмана (с возможными модификациями).

Красное смещение, свидетельствующее о разбегании галактик, — лишь первый аргумент. По мере совершенствования техники наблюдений всплывали всё новые свидетельства. Телескоп часто сравнивают с машиной времени — мы наблюдаем в хороший телескоп молодую Вселенную и видим, что она существенно отличается от нынешней. Галактики выглядят по-другому. Когда-то они с виду имели неправильную форму, были меньше, но ярче — рождение звезд шло раз в двадцать интенсивнее, чем сейчас. Квазары в ранней Вселенной было тоже во много раз больше, и они были ярче нынешних. То есть мы воочию видим, как Вселенная менялась.

На самом краю досягаемости мы видим, как изменилось состояние межгалактического водорода. Сейчас он ионизован, но есть нейтральные облака. Далекие квазары играют роль маяков, просвечивая пространство. В их спектре нейтральные облака видны как линии поглощения, соответствующие самой сильной линии водорода Лайман-альфа. Причем облака находятся на разном красном смещении, и каждое вырезает свою щель в спектре. Чем дальше в красную область спектра, тем гуще идут линии (явление получило название Лайман-альфа лес). Наконец, они сливаются в одно «корыто» — никакие кванты в этом диапазоне не доходят до нас, поскольку поглощающие облака сливаются в сплошную среду, в которой нейтральных атомов хватает, чтоб поглотить всё излучение маяка выше линии

Лайман-альфа. Квазар-маяк, с помощью которого увидели это явление, называемое эффектом Ганна — Петерсона, находится на красном смещении 6,28.

Почему где-то за красным смещением 6 (что соответствует возрасту Вселенной 900 млн лет) заполняющий космос газ частично нейтрален (целиком нейтральным он становится при $z \sim 10$, см. главу 32), а потом — ионизован? Эволюция молодой Вселенной дает ясный ответ: это сделали первые звезды и квазары, которые чуть раньше зажглись во Вселенной, — их ультрафиолетовое излучение ионизовало водород.

Так мы прослеживаем историю Вселенной до возраста 700 млн лет и видим, как она менялась в полном соответствии с теорией Большого взрыва. Дальше мы перепрыгиваем через темные века на отметку 380 тыс. лет, когда Вселенная имела температуру три тысячи градусов и плотность в миллиард раз больше, чем сейчас. Это эпоха рекомбинации, о которой рассказано выше. Здесь опять всё точно соответствует теории: реликтовое излучение, его температура, его спектр.

На этом мы пока остановимся. Карта реликтового излучения поведет нас дальше, гораздо ближе к истокам. Но это уже будет не предыстория, а история, которой посвящена книга.

Практика, конечно, не единственный критерий истины, но, пожалуй, самый убойный.

Человек, исследующий далекую Вселенную с помощью данных, добытых самыми разнообразными инструментами, пользуется теорией расширяющейся Вселенной, где Большой взрыв накрепко «зашит», примерно так же, как мореплаватели пользовались секстантом и хронометром. И если внезапно спросить исследователя: «А ты уверен, что Большой взрыв был на самом деле?» — он посмотрит и ответит примерно так же, как капитан времен Джеймса Кука, если бы его спросили: «А ты уверен, что Земля — шар?»



ЧАСТЬ II НА ПОДСТУПАХ

В этой части описывается драматическая ситуация в космологии, которая сложилась к концу 1970-х годов: научное сообщество давно было убеждено в том, что Вселенная произошла в результате Большого взрыва, но отсутствовало решение ряда фундаментальных вопросов и парадоксов. Да и сам «приводной механизм» Большого взрыва оставался непонятым — это давало простор для рассуждений о божественном творении Вселенной в модернистском варианте. Но в ту же декаду стали появляться первые догадки о естественном механизме, послужившем решением самых трудных вопросов космологии.

9. Простые вопросы

Парадигма вечной бесконечной Вселенной господствовала около трех веков и не выдержала нескольких простых недоуменных вопросов. Концепция Большого взрыва и расширяющейся Вселенной родилась в 1920-х годах, постепенно утвердилась, а в 1960-х была окончательно подтверждена открытием реликтового излучения. Но при этом в ней остались очевидные дыры. Как и в первом случае, эти дыры имели форму простых, почти детских вопросов, на которые не было ответа. Вот основные из этих вопросов:

1. Вселенная удивительно велика и динамически сбалансирована. Чтобы она не «схлопнулась» в первые секунды своего существования или не разлетелась так, чтобы один атом был от другого за много световых лет, скорость расширения и плотность в первые мгновения должны быть сбалансированы с невероятной точностью. Или, что то же самое, пространственная кривизна должна быть ничтожно малой по сравнению с постоянной Хаббла, деленной на скорость света. Начальные условия требуется подогнать гораздо точнее, чем при таком броске мяча на Останкинскую башню, чтобы он мягко сел на ее верхушку и остался там в равновесии. Что дало такую точность?
2. Вселенная всюду одинакова на миллиардах световых лет. Между тем, в первые мгновения Вселенной разные области, которые мы сейчас наблюдаем, «ничего не знали» друг о друге — не были причинно связаны. Иными словами, не хватало времени, чтобы со скоростью света передать сигнал от одной области наблюдаемого пространства к другой. Что так согласовало параметры Большого взрыва в причинно не связанных областях пространства?
3. У Вселенной огромная энтропия, что на бытовом языке можно выразить, как огромное число частиц (большинство из ко-

торых — реликтовые фотоны и нейтрино). В наблюдаемой части Вселенной их 10^{90} . Откуда взялось это содержимое?

4. Наконец, что же послужило начальным толчком для Большого взрыва?

Есть еще один вопрос, который поначалу казался не столь фундаментальным. Поэтому мы его оставляем вне пронумерованного списка. Этот вопрос встал ребром позже. Вселенная однородна на больших масштабах. Но чтобы смогли образоваться галактики и их скопления, должны существовать первичные неоднородности. Откуда они взялись?

И еще раньше встал вопрос, с виду философский, но на самом деле имеющий глубокую научную подоплеку. Есть ряд физических постоянных, значения которых вроде бы ниоткуда не следуют. Но если мы попытаемся представить мир, где какая-нибудь из этих констант немного изменена, жизнь в таком мире оказывается невозможной: не образуются атомные ядра, не горят звезды и т.п. Что так подогнало значения констант, чтобы мы могли существовать?

Это такие вопросы, которые греют душу религиозным философам, приветствовавшим новую космологию. Действительно, местоимение «что» в этих вопросах так и просится быть замененным на «Кто» — именно с большой буквы. Однако физики, которые не нуждаются в гипотезе Бога, воспринимают подобные вопросы как чисто профессиональный вызов. Вызов был принят, и к концу 1970-х годов ученые разных областей науки разработали достаточно крепкое снаряжение, чтобы совершить прорыв через намечающийся тупик.

Одним из ключевых достижений, предвещающих прорыв, стало лучшее понимание того, что есть вакуум.

10. Опыты европейцев с поршнями и цилиндрами

Вернемся к повествованию о жителях океана Европы. Здесь мы нарушим европейскую хронологию, вернувшись в эпоху, предшествующую изобретению гироскопа, ради того, чтобы следовать земной хронологии, которая имела иную последовательность событий.

Еще задолго до открытия шарообразности своего мира, европейцы научились пользоваться гидравликой для передачи и трансформации усилий в разнообразных механизмах. Как и у нас: цилиндры, поршни, трубки. По этой причине они хорошо понимали, что такое давление, что вода передает его одинаково по всем направлениям. А если тянуть за поршень, создается отрицательное давление, тоже одинаковое по всем направлениям, передаваемое, якобы, за счет сил сцепления воды. А нулевым давлением, по их мнению, было то, что есть в их родной среде обитания.

Жил-был мастер-гидравлик, изготавливавший и ремонтировавший трансмиссии рулевого управления винтовых судов. Однажды во внеурочное время к нему в ангар явился заказчик по поводу заклинившего поршня на его старом плоскокорпусном сыпогрузе «Стремительный».

— Извини, — сказал Мастер, — не до тебя! Тут сейчас очень важное дело... Впрочем, ты то мне и нужен, рабочие уже уплыли, а одному не справиться.

— Что за дело?

— Я хочу порвать воду.

— Чего?! Какую еще воду? Как это порвать?

— Вот у тебя заклинило приемный поршень. А если ты сильно потянешь назад передающий поршень, что будет?

— Он не пойдет.

— А если будешь тянуть мощной лебедкой?

— Порвется либо трос, либо шток поршня.

— А почему не порвется столб воды в трубке?

— ...? А как это?

— А как шток рвется? В школе учил? Частицы металла цепляются друг за друга силами электричества. А если тянуть очень сильно, сил сцепления не хватит. Частицы воды чем цепляются друг за друга и за поршень? Откуда

следует, что они цепляются намного сильнее? Наоборот, они могут скользить одна вокруг другой, а в металле сидят прочно на своих местах.

— Подожди, когда рвешь металл, в разрыв затекает вода. А что затечет в место разрыва воды?

— А почему туда что-то должно затечь? Ничего там не будет. Пустота!

— Но ведь тебя же в школе учили, что природа не терпит пустоты...

— Да? И до какой степени не терпит?! Мало ли что философы для красного словца не насочиняют. Мы, люди практичные, должны проверять. Заставим — потерпит! Вот смотри — поршень, хоть тоненький, но из самой прочной стали. Тут он расширяется, чтобы не рвался в месте сцепления с тросом. Тут он входит в цилиндр, высверленный в бронзовом бруске. Там внутри воды на два когтя, с обратной стороны запрессован. Свинцовый сальник тут, гайкой затянул — не протечет. Брус прикреплен к станине, та — к раме с лебедкой. Всё готово, двумя руками хватаешься за раму, двумя за перекладину, четырьмя за рукоятки колеса лебедки — вот так. Давай крутить оба колеса — аккуратно, не то порвем... Давай посильней... Никак пошел?!

— Точно пошел! Может протечка?

— Назад тянет! Давай ослабим... О! Втянулся назад! Давай еще! Пошел снова! То-то, жморов дрынь! Пошел! Давай назад... Снова пошел, дрынь жморов, знай наших! Еще раз!

— Почему вода, как пружина, тянет назад?

— Э-э, не как пружина... Смотри, мы прилагали большую силу — ни с места. Потом чуть-чуть посильней налегли — пошел дальше и дальше и назад тянул с той же силой. Пружина не так. Знаешь, что? Я почию твою калошу за две смены, а ты раздобудь за это время полированный брусок свинцового стекла. Надо посмотреть, что там внутри происходит.

Через три смены был готов прозрачный цилиндр: стеклянный брусок с высверленным отверстием, вода в котором была подкрашена. На сей раз рукоятки лебедки крутили двое рабочих, а мастер с заказчиком командовали и наблюдали.

— Так, еще чуть-чуть налегли... О, смотри, смотри, что с ней?!

— Сарсынъ охрясная! Такого сроду никто не видал, смотри (вода пузырилась, оставаясь на дне цилиндра), смотри: сверху пустота... Природа не терпит?! Философы дрыновы! Ну-ка назад отпустите... О, поршень вернулся, нет пустоты. Ну-ка, налегли еще...

Рабочие с энтузиазмом налегли. Поршень прошел до верха цилиндра, выскочил из сальника, раздался оглушительный хлопок. Экспериментаторы обмякли, их глаза остекленели, но вскоре к обоим вернулось сознание.

— Что это было?

- Я тебя не слышу – в ушах звенит...
- ЧТО ЭТО БЫЛО?!
- Это природа не потерпела пустоты...
- Смотри, стекло всё в трещинах!
- Ну и силища! Это не сцепление частиц... Это что-то похлеще...
- Что же это все-таки было?
- Давай подумаем.
- Это ты без меня давай думай. Мне легче свой «Стремительный» вручную песком загрузить, чем думать над этим.
- Выспаться надо. Завтра позову друга, он в гидравлике не хуже меня разбирается, да еще «Научный ежегодник» выписывает и читает время от времени. И голова у него свежая. Ты тоже приплывай, чувствую, пригодись. Скоро у тебя и передающий поршень заклинит, я тебе его потом бесплатно почию.
- Через смену Мастер, Свежая голова и Капитан (владелец «Стремительного») собрались в том же ангаре.
- У тебя пружинные весы помощнее есть? – спросил Свежая голова. – давай измерим силу с которой вытягивается поршень.
- Весы нашлись на «Стремительном», как раз для троса лебедки. Сила, с которой вытягивался поршень, оказалась чуть больше одной четверти глыбы.

Соотношение между земными и европейанскими единицами

1 коготь = 2,54 см

1 свист = 1066,8 м

1 глыба = 1638 кг (веса)

1 токсм = $9,8 \cdot 10^7$ паскалей

1 смена = 11,3 часа

1 период = 512 смен = 239 земных суток

1 поколение = 64 периода = 42 земных года

1 гироскопные сутки = 3,55 земных суток

— Так, у тебя поршень четверть когтя диаметром, значит примерно три с половиной глыбы на квадратный коготь! Ого-го! Как твой поршень выдержал?

— Ну! Спецзаказ! Думаешь, я первым пытался это сделать? У других не выдержал.

— Так... Это мне что-то напоминает... В предпоследнем ежегоднике... У них там единицы научные, токсы, сейчас пересчитаю... Ну точно! Один чудак писал, что у нас в воде огромное давление, что если распространить силу тяготения на саму воду, то на каждый квадратный коготь давит столб воды весом три глыбы. Потом в «Письмах» на него набросились сразу трое. Один написал, что при таком давлении мы бы не смогли жить, второй написал, что вода является первичной материей и на нее не может распространяться сила вторичного характера, а третий написал, что тогда надо учитывать и вес льда, который бесконечен. Но три и три с половиной?! Это наводит...

Все задумались. Вдруг Мастер взметнулся, описал два круга и вскричал:

— Капитан, твое корыто вверх плыть может?!

— А чего ж не может? Закачиваешь метаном на ноль-плав — и вперед, хоть в небеса, хоть в преисподнюю.

— Тарелочный локатор есть?

— Ну!

— На сколько добивает?

— Свистов на пятьдесят.

— Так, полпути до льда. Поплыли сейчас же. Грузим всё это барахло!

— Э-э-э, я на это не подрыжался! Тем более за починку исправного цилиндра.

— Ты же войдешь в историю!

— И чего я в ней потерял?

— Ну не ты, твой «Стремительный» войдет в историю. Будут водить экскурсии: «Корабль, на котором было совершено великое открытие».

— Так, ну ладно, давайте через пару смен, надо же еще высотное пойло раздобыть и еду.

— Какие две смены!? Тут такое! Срочно... Подгоняй свою посудину под кран-балку!

На высоте пятьдесят свистов эксперимент был повторен. Поршень пошел намного легче: давление оказалось две глыбы.

— Что и требовалось доказать, сказал Свежая голова. Тот чудак был прав: вода дает три глыбы на квадратный коготь и еще половину — лёд, никакая не бесконечность.

— Осталось подняться до льда и убедиться, что там будет полглыбы.

— Ну, это не обязательно, сказал Свежая голова. И так ясно, можно возвращаться, а то голова уже распухла и гудит...

— Ну нет! сказал Капитан, будут потом говорить, что «Стремительный» до льда не дотянул. В историю, так в историю! Поплыли! Хлебните вот этого.

Давление подо льдом действительно оказалось всего полглыбы на квадратный коготь.

— Чуть больше восьми свистов — вся толщина льда, — сказал Свежая голова.

— А что за ним? Спросил Капитан.

— Наверно то же, что было в стеклянном цилиндре, — пустота, — сказал Мастер. А нельзя ли прозвонить лёд твоей тарелкой?

— Нет, разве что если вморозить ее в лёд, да и то вряд ли. Здесь надо чем-то тяжелым вдарить по льду.

— Это давайте рудокопам оставим, у них есть, чем вдарить, сказал Свежая голова. И поплыли вниз, ради бога, не могу уже, сейчас голова взорвется.

Со всей скоростью, на которую был способен плоскокрпусный сыпозгруз, они начали спуск. «Стремительный» с командой, мучившейся головной болью, шел по спирали — действительно в историю. Они не только открыли давление воды, но и изменили космологию жителей Европы — лёд не бесконечен! Они также открыли новую фундаментальную сущность, наличие которой до этого отрицалось, — пустоту. Кстати, ей еще предстояло сыграть свою огромную роль в технологии.

Как всегда, прозрения приносят новые загадки: а что за льдом? А может быть, и недра не бесконечны? Если сверху есть край у льда, то почему не быть снизу края у недр? Тогда что с той стороны недр? И как вообще выглядит Мир? Как бесконечное полупространство недр со слоем воды, покрытой коркой льда? А дальше бесконечное полупространство пустоты? Подобных гаданий, выливавшихся в жесточайшие споры, хватило еще на несколько поколений, пока не открыли шарообразность Мира, что уже было описано выше.

Так, казалось бы, пустяковый эксперимент меняет картину мироздания и уровень цивилизации. Увы, на нынешней стадии нашего развития таких пустяковых экспериментов, видимо, уже не осталось. Ну а «Стремительный» в конце концов стал одним из центральных экспонатов в музее истории науки. В его грузовом отсеке была установлена копия (оригинал не сохранился) той самой установки, и любой желающий мог приложиться к колесу лебедки...

11. Бездна, в которой мы обитаем

Мы не зря предварили статью про вакуум рассказом о том, как европейцы обнаружили, что их тихая, уютная среда находится под колоссальным давлением.

В классической физике, как и в сознании подавляющего большинства людей, вакуум — это пустота. В квантовой теории поля вакуум — арена действия чудовищных сил, которые оказываются чудесным образом скомпенсированы. Есть способ почувствовать эти силы. Если взять две отполированные пластины металла и свести их на расстояние нескольких микрон, они начнут притягиваться настолько, что это можно реально измерить. Если бы удалось изготовить столь идеальные пластины и фиксаторы, чтобы придвинуть их на 10 нанометров — пластины бы притягивались с силой, эквивалентной давлению атмосферы.

Это так называемый эффект Казимира. Его можно понять только в рамках квантовой теории поля, в которой содержится такое понятие, как нулевые колебания (или нулевые флуктуации) полей в вакууме. Вакуумное среднее значение электромагнитного поля равно нулю. Но средний квадрат знакопеременного поля нулю не равен — такой парадокс. Нулевые колебания прямо не наблюдаются, из них нельзя извлечь энергию: они гасят друг друга благодаря интерференции. Но в них заключена энергия, причем огромная. Если частоты нулевых колебаний не ограничены сверху, то плотность энергии ваку-



11.1. Хендрик Казимир
(1909 – 2000).
Лейденский университет,
Нидерланды
(фото из «Википедии»)

ума оказывается бесконечной. Все-таки предел частот должен существовать, об этом пойдет речь ниже. Но в любом случае плотность энергии нулевых колебаний огромна — на много порядков больше, чем плотность энергии, например, в нейтронной звезде. Эту энергию нельзя «черпать», но можно ощутить.

Металлические пластины в опыте Казимира чуть-чуть влияют на нулевые колебания. Эффект сказывается лишь на самом краю их спектра: пластины обрезают вакуумные колебания электромагнитного поля с длиной волны больше, чем расстояние между ними. В результате плотность энергии нулевых колебаний между пластинами уменьшается — тем сильнее, чем меньше зазор, и пластины притягиваются.

Есть еще один тонкий эффект: нулевые колебания влияют на атомы. Согласно релятивистской квантовой механике, разные возбужденные состояния атома водорода, обозначаемые как ${}^2S_{1/2}$ и ${}^2P_{1/2}$, должны иметь в точности одинаковую энергию (это следует из решения уравнения Дирака в кулоновском потенциале). Оказывается, их энергии чуть-чуть различаются. Причина та же, что и в эффекте Казимира: эти состояния имеют разную геометрию волновой функции электрона и по-разному взаимодействуют с нулевыми колебаниями электромагнитного поля. Эффект расщепления уровней (он называется лэмбовским сдвигом) рассчитан и измерен с фантастической точностью, так что то, как устроены нулевые колебания электромагнитного поля, мы знаем очень хорошо.

Так удастся «зацепить» лишь самую поверхность бездны, которая почему-то не влияет явным образом на наш мир, хотя точно существует. Может быть, она не влияет по той же причине, по какой огромное давление не ощущается жителями океанских глубин? С одной стороны так. Однородная плотность энергии не создает никаких сил, действующих на вещество. Все явления нашего мира чувствительны только к перепаду плотности энергии. С другой стороны совсем не так. Однородная ненулевая плотность энергии влияет на Вселенную как целое через гравитацию. По поведению современной Вселенной мы можем определенно сказать, что плотность энергии вакуума очень мала (хотя и отлична от нуля). И в этом заключается одна из серьезнейших проблем современной физики.

Мы говорили только о нулевых колебаниях электромагнитного поля. Но есть и другие поля — они тоже дают свой вклад. Мы привыкли к тому, что поля связаны с частицами с целым спином — бозонами. Но есть еще и фермионы — частицы с полуцелым спином. Фермионы отличаются от бозонов взаимоотношениями друг с другом: два фермиона не могут находиться в одном квантовом состоянии. Именно поэтому электроны в атомах распределены по разным оболочкам. Еще Дирак предположил, что вакуум является «морем» фермионов с отрицательной энергией, где все возможные состояния заполнены — поэтому нормальные поля и частицы с положительной энергией этого моря не чувствуют. Но море Дирака имеет отрицательную плотность энергии! Именно на этом пути ищут решение проблемы энергии вакуума: положительная плотность энергии нулевых колебаний бозонных полей компенсируется отрицательной плотностью энергии моря Дирака. Но поля есть совершенно разные, и частицы разные, и между ними нет никакой явной симметрии. А точность компенсации должна быть огромной. Значит, должна существовать очень фундаментальная симметрия, зануляющая энергию вакуума. Но подобная симметрия неизвестна! Нулевая энергия вакуума была и остается болевой точкой современной физики. К этому вопросу мы еще вернемся.

Итак, пустота — очень сложная сущность. Может ли она играть роль среды, влияющей на физические законы, подобно тому, как огромное внешнее давление имитирует неразрывность воды, находящейся в цилиндре под поршнем? Влиять не через тонкие эффекты, подобные упомянутым выше, а весомо, грубо, зримо — меняя физику, как стекло меняет скорость света, а вода — вес предметов? В 1960-х годах ученые, занимающиеся физикой элементарных частиц, пришли к мнению, что, скорее всего, так и есть.

В принципе, идея не нова: еще в XIX веке была популярна теория эфира — среды, заполняющей всё пространство. Считалось, что свет — колебания эфира, подобно тому, как звук — колебания воздуха. Идея эфира с треском провалилась: она предполагала существование выделенной системы отсчета, что было опровергнуто прямыми экспериментами. На смену эфиру пришла специальная теория относительности, и важнейшим требованием к вакууму стала лоренц-

инвариантность, т.е., например, невозможность обнаружить свое движение, ставя любые эксперименты в кабине космического корабля.

Выше было заявлено, что среднее значение электромагнитного поля в вакууме равно нулю. А если бы оно было не нулевым, а постоянным и однородным, может быть, мы бы не заметили этого и приняли его влияние за закон природы? Заметили бы. Более того, мы живем в почти однородном магнитном поле напряженностью полгаусса и замечаем это по стрелке компаса. Поведение стрелки не слишком элегантный закон — иногда оно неустойчиво, а где-то аномально. Если мы будем двигаться с большой скоростью поперек направления стрелки компаса (например, на орбитальной станции), мы обнаружим, что в кабине появилось электрическое поле, перпендикулярное стрелке компаса и направлению движения станции. Зато двигаясь вдоль силовых линий поля наблюдатель не обнаружит ничего нового. Значит, наш «вакуум», в который мы директивным путем включили магнитное поле Земли, не изотропен и не лоренц-инвариантен. И никакая конструкция из электромагнитного поля не подойдет на роль вакуума, который нам нужен.

Проблема в том, что электромагнитное поле слишком сложное — четыре независимых компоненты, которые не утаишь в мешке, они всегда выдают свое наличие по легко измеряемым величинам. Но в принципе может существовать и более простое поле — скалярное, имеющее только одну компоненту, которое, будучи однородным и постоянным, не нарушает ни изотропии, ни лоренц-инвариантности. До недавнего времени не было обнаружено ни одного примера фундаментального скалярного поля, но теоретики уже давно говорили о возможном существовании подобных полей. Среди этих теоретиков был Питер Хиггс. Не он один, конечно: независимо и даже чуть раньше идею опубликовали Франсуа Энглер и Роберт Браут, но именно имя Хиггса оказалось увековеченным.

Почему бы скалярному полю не заполнять наше пространство, влияя на законы природы? Мы такого поля не видим, не можем его «пощупать», но не можем и исключить.

А зачем понадобилось изобретать такое поле, играющее роль среды в которой мы живем? Зачем умножать сущности? Дело в том, что подобное поле как раз может убрать лишние сущности!

В основании нашего материального мира лежит несколько семейств элементарных частиц: фотоны с W -бозонами, лептоны (электрон с двумя более тяжелыми партнерами и три нейтрино), кварки, глюоны. У фотона и глюонов нулевая масса, у нейтрино — очень маленькая, у остальных — разные, разброс в двести тысяч раз. Все подчиняются разным взаимодействиям: электромагнитным, сильным, слабым. Короче, зоопарк!

Поле, заполняющее вакуум, которое получило ныне всем известное имя Хиггса, объясняет, почему получился такой зоопарк. Изначально, как сказал бы физик-теоретик, «в исходном лагранжиане» (а мы скажем высокопарно: «в фундаменте мироздания»), фотон и W -бозоны вели себя сходным образом, а электромагнитные и слабые взаимодействия были в точности симметричны. У всех частиц исходно массы равны нулю. Более того, в таком мире действовала очень красивая связь между полями и носителями заряда, с которым связаны эти поля, — такая связь называется калибровочной инвариантностью. Только такой мир был бы вряд ли пригоден для жизни.

Появление зоопарка частиц и взаимодействий — факт истории нашей Вселенной: в первые доли секунды существования этого мира вакуум заполнился ненулевым полем Хиггса; почему — будет объяснено ниже. Мы его напрямую не ощущаем — оно везде одинаково. Но исходно одинаковые частицы по-разному взаимодействуют с этим полем, в результате приобретают разные массы. Когда у одного переносчика взаимодействия (фотона) масса остается нулевой, а у другого (W - и Z -бозоны) делается весьма большой, единое прежде электрослабое взаимодействие расщепляется на два совсем непохожих: электромагнитное и слабое.

Подозревают, что и сильное взаимодействие изначально было едино с электрослабым. Соответствующую гипотезу называют **теорией великого объединения**. В ней кварки и лептоны исходно (опять же «в фундаменте мироздания») оказываются родственниками, способными превращаться друг в друга. У сильных и электрослабых взаимодействий — общая константа. Переносчики сильного взаимодействия — глюоны — попадают в одну широкую группу симметрии с фотонами и переносчиками слабого взаимодействия — W - и Z -бозонами. Но всё нарушилось, поскольку в ва-

кууме появились ненулевые скалярные поля. Группа симметрии расщепилась на отдельные подгруппы. Кварки перестали превращаться в лептоны и наоборот, отчего протон оказался почти стабильным. Почти — потому что запрет на переходы «кварк — электрон» связан с тем, что масса частицы-переносчика такого взаимодействия, Х-бозона, стала огромной. Но запрет не абсолютный, поскольку эта масса всё же конечна. Квадрат этой огромной массы стоит в знаменателе вероятности распада протона, из-за чего время жизни протона оказывается больше 10^{33} лет (экспериментальный предел). Мир стал сложнее и богаче.

Итак, мир изначально проще, чем мы наблюдаем, но «кривой» вакуум сделал его сложным и пригодным для жизни. Это на научном языке называется «спонтанным нарушением симметрии» и относится не только к вакууму. Возникновение доменов в остывающем ферромагнетике (участки самопроизвольной намагниченности; на их основе делали первые компасы, см. «Моби Дик» Мелвилла, глава СХХIV) — тоже спонтанное нарушение симметрии. Или образова-



11.2. Результат спонтанного нарушения симметрии при конденсации пара.
Фото Валентины Сафроновой

ние узора на окне в морозный день. Пар в комнате однороден, изотропен и «безвиден», но когда он кристаллизуется на стекле, образуется сложный красивый узор. Причем заранее нельзя сказать, каким этот узор получится — он случаен и в то же время подчиняется неким простым законам. То же самое происходит при образовании снежинок — они красивы и симметричны, но также случайны. А образовались они из того же пара.

12. Уравнения Эйнштейна

А сейчас пару слов о теории, которая определила развитие космологии. Теория, с одной стороны, удивительно красива, с другой — сложна в техническом плане. Если читателя пугают формулы и тем более дифференциальные уравнения, то данную главу и, возможно, следующую надо обязательно пропустить. Автор обещает, что в дальнейших главах такого не повторится.

Уравнения Эйнштейна заслуживают того, чтобы предъявить их читателю, конечно, не призывая разобраться. Просто окинуть взглядом. Итак, вот традиционная запись:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 16\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

На первый взгляд это кажется совсем не страшным. Ужас наступает, когда начинаешь разбираться с объектами, из которых состоит уравнение. Все двухиндексные члены — $g_{\mu\nu}$, $R_{\mu\nu}$, $T_{\mu\nu}$ — это объекты, называемые тензорами второго ранга. Выглядят как матрицы 4×4 — четыре строки, четыре столбца, — но отличаются от обычной матрицы-таблицы тем, что определенным образом преобразуются при изменении системы координат. Кстати, обычный вектор — тоже тензор, только первого ранга. И даже скаляр — тензор, только нулевого ранга. Но когда говорят просто «тензор», чаще всего подразумевается второй ранг.

Тензор $g_{\mu\nu}$ называется метрический тензор — это неизвестное в уравнениях. Каждая его компонента является функцией координат и времени. Он определяет не что иное, как свойства пространства-времени в данной точке. Равенство должно выполняться для каждой компоненты матрицы. То есть на самом деле это 16 уравнений:

$$R_{00} - \frac{1}{2} R g_{00} = 16\pi \frac{G}{c^4} T_{00}$$

$$R_{01} - \frac{1}{2} R g_{01} = 16\pi \frac{G}{c^4} T_{01}$$

и так далее. Правда, 6 уравнений можно выкинуть из-за симметричности входящих в него тензоров: $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$. Уравнения — дифференциальные, в частных производных, второго порядка, нелинейные.

$T_{\mu\nu}$ — тензор энергии-импульса, составлен из плотности энергии, плотности импульса и тензора напряжений. В уравнениях играет роль внешнего источника.

Идем дальше. $R_{\mu\nu}$ — так называемый тензор Риччи, расписывать его уже не стоит, чтобы излишне не запугивать читателя. R — скалярная кривизна, получаемая из тензора Риччи сверткой с тензором $g_{\mu\nu}$. В построении этих объектов участвует аж тензор четвертого ранга — тензор кривизны с четырьмя индексами $R_{\alpha\beta\gamma\delta}$, составленный из вторых производных компонент метрического тензора. Не приведи бог пытаться расписывать всё это по компонентам! К счастью, такой необходимости на практике не встречается.

Вдаваться в более подробные разъяснения в данной книге не имеет смысла, однако стоит обсудить, откуда такой «ужас» (с точки зрения непрофессионала) или красота (с точки зрения профессионала, знакомого с альтернативными теориями) взялись.

В ньютоновской теории тяготения гравитационное поле описывается очень простым уравнением Пуассона:

$$\Delta\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 4\pi G\rho$$

здесь Φ — гравитационный потенциал, а ρ — плотность материи. Оно в точности совпадает с уравнением для электростатического потенциала, только вместо $G\rho$ надо подставить плотность электрического заряда. Уравнение Пуассона в отличие от уравнений Эйнштейна линейно, то есть можно суммировать решения, наведенные отдельными массами. Таким образом, зачастую можно не решать уравнения, а просто просуммировать гравитационный или электрический потенциал от разных тел или зарядов, пропорциональный $1/r$: $\Phi = G (m_1/r_1 + m_2/r_2 + \dots)$. Но ни уравнение ньютоновской гравитации, ни уравнение электростатики не могут оставаться верными, как только мы допускаем возможность движения тел и зарядов и вооружаемся специальной теорией относительности. Уравнение Пуассона предполагает бесконечную скорость распространения сигнала (сдвинули тело — и гравитационный потенциал вдали от него мгновенно изменился). Но специальная теория относительности запрещает мгновенное распространение сигнала, значит,

уравнение Пуассона придется отбросить и описывать действительность более сложными уравнениями, куда обязательно должна входить скорость света.

Чтобы примирить электростатику с теорией относительности, приходится объединить электрическое поле с магнитным — описать их единой системой уравнений. Это будут знаменитые уравнения Максвелла. Максвелл ничего не знал про теорию относительности, но в его уравнениях с ней всё в порядке. Когда мы двигаем заряд, появляется магнитное поле и электромагнитные волны, распространяющиеся со скоростью света. Электрическое поле от удаленного заряда изменится не раньше, чем дойдут волны. И при переходе от одной системы отсчета к другой всё меняется логично. Всё в порядке.

Уравнения Максвелла в своей исторической форме довольно сложно запоминаются. Но если перейти от электрического и магнитного полей к четырехмерному векторному потенциалу A_μ (A_0 — обычный электрический потенциал, A_1, A_2, A_3 — трехмерный вектор, из производных которого получается магнитное поле), мы получаем нечто, удивительно похожее на уравнение Пуассона:

$$\square A_\mu = -\frac{4\pi}{c} j_\mu,$$

где знаком $\square$ обозначена конструкция $\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2 - 1/c^2 \partial^2/\partial t^2$, называемая оператором Д'Аламбера, j_μ — четырехвектор плотности тока: $j_0 = \rho$ — плотность заряда, j_1, j_2, j_3 — плотность тока. Что изменилось? Уравнений стало четыре — по одному для каждого значения μ . Слева к сумме вторых производных по пространственным координатам добавилась еще производная по времени, но с противоположным знаком и квадратом скорости света в знаменателе. Итак, имеем четыре уравнения для четырехкомпонентного поля, в каждом уравнении слева сумма вторых производных по четырем координатам. Почему всего тут по четыре? Потому, что специальная теория относительности делает наш мир существенно четырехмерным, только время надо брать с коэффициентом $1/c$ и знаком минус. Все физические вектора по сути четырехмерны, например, четвертой компонентой для импульса частицы является энергия. Получается, если записывать уравнения Максвелла в естественном для нашего мира четырехмерном представлении, они становятся удивительно простыми.

Чем линейная теория отличается от нелинейной

«Линейная теория» — жаргон, так же как и «нелинейная теория», но в науке этот термин используется часто. Первая описывается линейными дифференциальными уравнениями, вторая, естественно, нелинейными. Различие между ними огромно как с точки зрения техники решения, так и с точки зрения мира описываемых явлений.

Линейное дифференциальное уравнение состоит из производных неизвестной функции и самой неизвестной функции в первой степени. Первая степень позволяет складывать решения и умножать их на произвольную константу — то, что получится, всё равно будет решением. Мир линейных уравнений оказывается простым: можно суммировать поля от разных источников, можно разлагать сложные конфигурации на простые (типа плоских волн) и рассматривать эволюцию каждой из них по отдельности. Волны, описываемые линейными уравнениями, спокойно проходят друг через друга, складываясь в интерференционную картину, и расходятся, ничуть не изменившись. Линейный мир прост, но неинтересен — в нем не получишь сложных стабильных структур.

Достаточно ввести в уравнение квадрат неизвестной функции или ее произведение на ее же производную — и мир меняется. Сумма решений уже не является решением, волны уже не проходят спокойно друг через друга, а взаимодействуют, появляются новые сущности, такие как солитоны. Кстати, протоны и нейтроны в некоторых упрощенных моделях сильных взаимодействий появляются именно как солитоны, а описывающая их теория, квантовая хромодинамика, существенно нелинейна. Часто бывает так, что возмущения какой-либо среды описываются линейными уравнениями, пока они остаются малыми. Как только их амплитуда становится большой, проявляется нелинейность. Пример — обычные волны на поверхности воды. Рябь линейна с хорошей точностью, а большие океанские волны уже нелинейны из-за сложной аэро- и гидродинамики. Отсюда и получается знаменитый девятый вал и «волны-убийцы». Гравитационные волны тоже линейны, когда они слабые, а когда, например, сливаются две черные дыры, нелинейность переменного гравитационного поля чудовищна. Самая распространенная причина нелинейности — взаимовлияние. Например, сливаются два автомобильных потока. Если они редкие, машины продолжают двигаться с той же скоростью, потоки просто суммируются. Если потоки интенсивные, машины начинают мешать друг другу, скорость падает зачастую до нуля. Это и есть нелинейный эффект. Все варианты самоорганизации

в живой и неживой природе — тоже результат нелинейности. Можно сказать, что эволюция — очень длинная цепь нелинейных эффектов.



12.1. И. Айвазовский.
Нелинейная волна

Но в этой главе речь идет в основном не об электромагнитном поле, а о гравитации. Нельзя ли сделать с гравитацией то же самое? Добавим к гравитационному потенциалу еще три компонента (появится еще гравимагнитное поле, которое мы не чувствуем из-за слабости земной гравитации), и пусть они подчиняются точно такому же уравнению, только справа поставим плотность энергии и поток импульса, помноженные на гравитационную постоянную. Со специальной теорией относительности будет всё в порядке. Получится то, что можно было бы назвать «векторной гравитацией». Вышла бы очень простая теория. Уравнения, как и уравнения Максвелла, были бы линейными, гравитационное поле от разных источников было бы суммой полей каждого. Автору не хватает фантазии представить себе, как вела бы себя в таком мире мощная гравитация, но можно точно сказать, что ничего похожего на черные дыры в таком мире не существовало бы.

Впрочем, ничто не ново под луной, в том числе и любое наивное предположение. Именно такую векторную гравитацию предложил Пуанкаре в 1905 году. Оказалось, теория внутренне противоречива и не может описывать наш мир. В такой теории либо одноименные заряды отталкиваются, либо энергия волн отрицательна.

Для гравитации требовалось нечто более сложное: не векторное, а тензорное поле. Почему тензорное, поясним ниже, а сейчас прикинем, во что должно превратиться уравнение с оператором Д'Аламбера, если его обобщить на случай тензорного поля. Математически тензор — матрица (для нашего мира его естественная размерность 4×4), определенным образом преобразующаяся при изменении системы координат. Обозначим поле-тензор $f_{\mu\nu}$. По аналогии мы вправе ожидать, что уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$F_{\mu\nu} = 4\pi G T_{\mu\nu},$$

где тензор $F_{\mu\nu}$ состоит из длинной суммы всевозможных вторых производных $\partial^2 f_{\beta\gamma} / \partial x_\alpha \partial x_\mu$. Имеем 16 уравнений для 16 переменных, которыми являются элементы тензора $f_{\mu\nu}$. Расписывать их не будем — они простые, но громоздкие — это всего лишь обобщение уравнения с оператором Д'Аламбера с векторного поля на тензорное. Конкретный вид $F_{\mu\nu}$ выводится из тех соображений, чтобы в пределе малого

поля он воспроизводит ньютоновскую гравитацию. Это тоже линейная теория, в уравнении фигурируют только вторые производные от $f_{\mu\nu}$ в первой степени. У такой теории тоже всё в порядке со специальной теорией относительности. В такой теории решения также суммируются — поле тяготения двух слившихся нейтронных звезд будет равно сумме полей тяготения каждой из них. Гравитационные волны в такой теории есть, однако никаких черных дыр нет. Но теория гравитации, описываемая таким уравнением, еще не может называться общей теорией относительности. Такой теории не существует. Не хватает одного важнейшего шага.

Этот шаг сделал Эйнштейн, основываясь на универсальности тяготения. Еще в XIX веке с высокой точностью была доказана эквивалентность инертной и гравитационной масс. Но если все тела подчиняются гравитации одинаковым образом, то ее влияние можно представить искривлением четырехмерного пространства. Траектории всех тел, предоставленных самим себе, в искривленном пространстве являются геодезическими линиями, т.е. прямыми в том смысле, в котором земной меридиан или траектория рейса Москва — Сан-Франциско через Арктику являются прямыми. Если тело вращается по орбите — оно описывает кратчайшую траекторию в кривом пространстве-времени.

Если гравитация искривляет пространство, то как должно выглядеть гравитационное поле? Что, если его выразить через параметры, описывающие свойства пространства? Тогда это будет метрический тензор, традиционно обозначаемый $g_{\mu\nu}$. В нашем плоском пространстве Минковского $g_{\mu\nu}$ — диагональная матрица, по диагонали 1, -1, -1, -1 (скорость света положили равной единице). В кривом пространстве появляются недиагональные элементы, диагональ меняется тоже.

А как изменится уравнение для гравитационного поля, коль скоро оно и есть метрический тензор? Существуют выделенные системы отсчета — инерциальные. К такой системе относится космический корабль с выключенными двигателями — в его кабине царит невесомость. При этом нет никакой разницы, движется ли он прямолинейно в отсутствии поля тяготения, движется ли по орбите, падает ли в черную дыру, — важно, что в кабине невесомость. В такой системе уравнение локально будет иметь именно такой вид, как напи-

сано выше, — с линейным тензором $F_{\mu\nu}$, но тензор будет иметь уже другой смысл. Он называется тензором Эйнштейна и обозначается $G_{\mu\nu}$. Еще раз: эти тензоры совпадают по виду только в локально-инерциальной системе отсчета.

Как построить четырехмерную координатную сетку из таких систем, которые где-то движутся по орбите вокруг тяготеющего центра, где-то падают в черную дыру? Работать в такой кривой системе координат невозможно, даже если теория в ней проста. А как перейти к какой-нибудь глобальной системе координат? С помощью той же метрики! И тогда в уравнение кроме вторых производных $g_{\mu\nu}$ войдут множителями их первые производные и сами матрицы $g_{\mu\nu}$, да еще обратные к ним матрицы $g^{\mu\nu}$. Их пришлось ввести дополнительно, чтобы перейти из локально-инерциальной в глобальную систему координат. Но они же являются переменными в уравнении. И уравнения получаются нелинейными, причем сильно нелинейными — их нельзя выразить степенями элементов метрического тензора. И теория оказывается существенно нелинейной: две слившиеся нейтронные звезды дадут поле, заметно отличающееся от суммы полей каждой. На самом деле физическое слияние двух нейтронных звезд приведет к их коллапсу в черную дыру. Но если пренебречь физическими процессами и просуммировать несколько нейтронных звезд «теоретически», то они станут черной дырой автоматически — окажутся под горизонтом Шварцшильда, что означает неминуемый коллапс в сингулярность. Этот коллапс никакие силы не в состоянии предотвратить, так же, как никакие силы не могут помочь преодолеть скорость света. Тут коллапс в бесконечно плотное состояние (на самом деле — в планковское состояние, см. главу 15) становится делом не столько физики, сколько геометрии: все мировые линии ведут в центр.

Такова плата за геометричность теории гравитации, или, другими словами, за ее универсальность и всеобщность. Выражения стали сложными, хотя теория минимальна — все ее модификации могут быть только сложнее. Зато в теории появились чудеса, такие как черные дыры или нестационарная вселенная.

Эйнштейн, конечно, пришел к этим уравнениям совсем другим путем, и на этом пути немалую роль сыграл Гильберт, мы просто

постарались набросать естественную логическую цепочку, ведущую к общей теории относительности через более простые конструкции.



12.2. Явление, непосредственно связанное с одним из решений общей теории относительности, найденных аналитически (решение Керра для вращающейся черной дыры): джет ядра галактики M87. Это релятивистская струя замагниченной плазмы, индуцируемая непосредственно вращающейся черной дырой, погруженной во внешнее магнитное поле. Именно эта черная дыра, возможно, будет первой, которую удастся «разглядеть» с помощью микроволновых космических интерферометров. На данном снимке для этого не хватает пяти порядков по разрешению. Снимок космического телескопа «Хаббл» (NASA)

Разумеется, уравнения Эйнштейна решать сложно. В общем случае они поддаются только численному перемалыванию на суперкомпьютерах. Аналитические решения, не сводящиеся к малым поправкам для ньютоновского тяготения, можно пересчитать по пальцам. Из решений, наверняка имеющих отношение к реальности, это черные дыры Шварцшильда (не вращающиеся), вращающиеся черные дыры Керра, гравитационные волны, однородная изотропная вселенная Фридмана и де Ситтера. Есть аналитические решения, представляющие, скорее, академический интерес — заряженные черные дыры, однородная анизотропная вселенная и еще несколько. Есть много решений, описывающих кротовые норы с разными уравне-

ниями состояния вещества. Имеют ли они отношение к реальности, пока не известно.

Нас интересуют уравнения для однородной изотропной вселенной, каковой является наша. Это самый простой случай. Из-за однородности и изотропии в уравнениях выпадают все производные $g_{\mu\nu}$ по координатам, остаются только производные по времени. Тензор энергии импульса становится диагональным, по диагонали стоят ε , $-p$, $-p$, $-p$, где ε — плотность энергии, p — давление. Метрический тензор при этом выражается всего через два параметра — масштабный фактор $a(t)$ и кривизну трехмерного пространства $k/R(t)$. При этом k определяет знак кривизны ($k = 1$ для замкнутой вселенной, $k = -1$ для открытой и $k = 0$ для плоской), а $R(t)$ — радиус кривизны вселенной. Первое уравнение Эйнштейна (с индексами 0, 0) принимает вид:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} G\varepsilon - \frac{k}{R(t)^2},$$

где $\dot{a}$ — производная масштабного фактора по времени, а $R(t)$ пропорционален масштабному фактору: $R(t) = R_0 \cdot a(t)$. Это и есть уравнение Фридмана, описывающее однородную изотропную вселенную. Оно получено только из первого (0, 0) уравнения Эйнштейна, но остальные уравнения либо нулевые, либо ему тождественны. Напомним, в простейшей модели Вселенной знак трехмерной кривизны определяет ее судьбу: если $k > 0$, то за расширением последует сжатие («закрытая» Вселенная); если $k < 0$ («открытая» Вселенная), то расширение будет вечным; если $k = 0$ («плоская» Вселенная), то скорость расширения со временем будет стремиться к нулю. Сейчас мы знаем, что величина R настолько велика, что влияние члена k/R^2 на динамику Вселенной незаметно на довольно хорошем уровне точности. Раньше ее влияние было еще меньше, поэтому для дальнейшего анализа последний член в уравнении Фридмана можно отбросить.

Уравнение стало совсем простым, остается найти зависимость плотности энергии от масштабного фактора. Для этого надо знать уравнение состояния, дающее связь между плотностью энергии и давлением и зависящее от того, чем заполнена Вселенная. Самое простое и весьма правдоподобное предположение — давление равно нулю. Это так, если основная часть материи во Вселенной сосредото-

чена в звездах и холодном газе. Сейчас мы знаем, что гораздо большая часть массы Вселенной заключается в темной материи. Но мы также знаем, что темная материя состоит из сравнительно медленно движущихся частиц, которые не создают давления. В случае нулевого давления плотность энергии (она же просто плотность, помноженная на c^2) $\varepsilon \sim a^{-3}$, поскольку масса вещества в сопутствующем объеме $V \sim a^3$ остается постоянной. В этом случае уравнение Фридмана принимает совсем простой вид:

$$\dot{a} = \text{const} \cdot a^{-1/2}$$

Как решаются подобные простейшие дифференциальные уравнения, объяснено во врезке. В данном случае его решение:

$$a(t) = \text{const} \cdot t^{2/3}$$

В конце 1990-х оказалось, что предположение о нулевом давлении в современной Вселенной неверно, и закон расширения другой. Об этом чуть ниже.

Есть еще один жизненно важный вариант уравнения состояния Вселенной — ультрарелятивистский:

$$p = 1/3 \varepsilon,$$

возникающий, когда основная масса частиц движется со скоростью света или близкой к ней. Такое уравнение состояния у Вселенной было в первые 80 тыс. лет ее существования. При расширении Вселенной плотность энергии релятивистского содержимого падает как $1/a^4$ (число частиц в единице объема падает как $1/a^3$, и энергия каждой частицы падает как $1/a$, что проще всего представить как растяжение волны фотона вместе с пространством: $\lambda \sim a$). Уравнение Фридмана приобретает вид:

$$(\dot{a}/a)^2 = \text{const}/a^4,$$

или

$$\dot{a} = \text{const}/a$$

Решение в данном случае

$$a(t) = \text{const} \cdot t^{1/2}$$

Получается, что ранняя Вселенная, в которой давление материи огромно, расширяется по более медленному закону ($t^{1/2}$), чем нынешняя ($t^{2/3}$). Это, казалось бы, противоречит здравому смыслу. Но так диктуют уравнения. Запомним этот странный факт — дальше будет еще интересней.

13. Отталкивающая гравитация

В этой главе автор допускает некоторое занудство, приводя подробную серию выкладок, чтобы дотошный читатель мог проследить, как и откуда берутся парадоксальные явления, связанные с появлением Вселенной на свет. Здесь уже нет уравнений в частных производных, только обыкновенные простейшие дифференциальные уравнения, метод решения которых изложен на врезке.

Выше мы допустили, что пространство может быть заполнено неким скалярным полем, которое мы напрямую не ощущаем. Сейчас мы знаем по крайней мере один пример фундаментального скалярного поля — поле Хиггса. Квант этого поля (бозон Хиггса) недавно открыт на Большом адронном коллайдере. Еще одним примером скалярного поля может оказаться темная энергия, доминирующая в плотности энергии современной Вселенной, хотя в этом случае возможны разные интерпретации.

Абстрагируясь от конкретных примеров, предположим, что Вселенная заполнена однородным и постоянным во времени скалярным полем. Допустим, это поле имеет ненулевую плотность энергии, которую обозначим, как ϵ . Как это поле будет влиять на Вселенную?

Чтобы правильно вставить скалярное поле в уравнение Фридмана, осталось выяснить его уравнение состояния: как давление скалярного поля зависит от его энергии. Представим себе чудесный ящик (чудесный, поскольку в реальном мире такое воспроизвести невозможно), заполненный скалярным полем, вне которого поле равно нулю. Пусть у ящика есть выдвижная стенка с ручкой, которую можно вытягивать, увеличивая объем ящика. Потянем за стенку, отодвинув ее наружу на расстояние l . Объем ящика с полем увеличился на sl , где s — площадь стенки ящика. Значит, энергия поля в ящике увеличилась на ϵsl . Она увеличилась за счет того, что мы совершили работу Fl , где F — сила, с которой мы тянули, — она равна $-ps$ (минус появляется из-за того, что сила направлена против давления). Итак, приравнивая работу приращению энергии, имеем $\epsilon sl = -psl$,

значит, уравнение состояния (т.е. связь между плотностью энергии и давлением) для однородного и постоянного во времени скалярного поля: $p = -\varepsilon$.

Это особое уравнение состояния: единственное с ненулевой плотностью энергии, которое лоренц-инвариантно, т.е. не выдаст наблюдателю, с какой скоростью он движется. Наблюдатель в любой системе отсчета будет «видеть» то же самое: плотность энергии ε , давление $p = -\varepsilon$. Сравним с пространством, заполненным пылью: в системе отсчета, где пыль покоится, наблюдатель видит плотность энергии ρc^2 , давление 0. Для наблюдателя, движущегося с лоренц-фактором Γ относительно пыли, плотность энергии равна $\Gamma^2 \rho c^2$, кроме того, с его точки зрения в тензоре энергии-импульса появляются недиагональные элементы (компоненты импульса частиц пыли).

Благодаря лоренц-инвариантности такое уравнение состояния называют «вакуумным», подразумевая под вакуумом среду, которая не содержит частиц или переменных полей, не имеет температуры, лоренц-инвариантна, но не обязательно имеет нулевую плотность энергии.

Отрицательное давление само по себе не должно сильно удивлять. Из бытовых явлений самую близкую по смыслу демонстрацию дает поверхностное натяжение. Закрыв глаза на то, что это двумерный случай, имеем аналогию: мыльный пузырь. Поверхностное натяжение на пузыре не зависит от размеров последнего, при надувании пузыря любой элемент его поверхности не меняется, только поверхность становится более плоской. Вспомним теперь демонстрацию расширяющейся Вселенной в виде надуваемого шарика и заменим резиновый шарик на мыльный пузырь — на поверхности ничего нарисовать нельзя, зато состояние элемента «пространства» при надувании не меняется. Натяжение остается прежним.

Вернемся к вселенной, заполненной скалярным полем. Мыльный пузырь за счет поверхностного натяжения стремится сжаться — если из пузыря внезапно исчезнет воздух — он сожмется. А вселенная?

Оказывается, отрицательное давление (натяжение) заставляет вселенную расширяться с ускорением.

Чтобы показать это, снова обратимся к уравнению Фридмана. Выше мы выписали его для двух вариантов уравнения состояния —

пылевидного ($p = 0$) и ультрарелятивистского ($p = 1/3 \epsilon$). Сделаем это для общего случая пропорциональной зависимости $p = \omega \epsilon$. Как меняется плотность энергии с изменением масштабного фактора? Во-первых, она меняется с изменением объема как

$$d\epsilon = -\frac{dV}{V} \cdot \epsilon = -\frac{da^3}{a^3} \cdot \epsilon = -3 \frac{da}{a} \cdot \epsilon$$

Во-вторых, плотность энергии меняется из-за того, что давление совершает работу:

$$d\epsilon = -p \cdot \frac{dV}{V} = -3p \cdot \frac{da}{a}$$

в сумме:

$$\frac{d\epsilon}{da} = -3 \frac{p + \epsilon}{a} = -3\epsilon \cdot \frac{1 + \omega}{a}$$

Решение этого уравнения:

$$\epsilon = \epsilon_0 a^{-3(1+\omega)},$$

где ϵ_0 — константа размерности плотности энергии, конкретное значение которой зависит от выбора времени отсчета; положим $a = 1$.

Подставим его в уравнение Фридмана:

$$\dot{a}/a = \sqrt{8\pi/3G\epsilon_0} \cdot a^{-3/2(1+\omega)}$$

или

$$da/dt = H_0 \cdot a^{1-3/2(1+\omega)}$$

Константа $H_0 = \sqrt{8\pi/3G\epsilon_0}$ имеет размерность, обратную времени, — это не что иное, как постоянная Хаббла в момент, когда мы зафиксировали $a = 1$. Чтобы не мучиться с размерным временем в разных степенях, обезразмерим его, положив далее $t = t_r H_0$, где t_r — время, выражаемое, например, в секундах, а постоянная времени $1/H_0$ зависит от того, на каком промежутке истории Вселенной мы работаем, — это может быть 10^{-37} с, если речь идет о самой ранней Вселенной, или 10 млрд лет для современной.

Решение уравнение Фридмана с таким безразмерным временем (см. врезку):

$$a = t^{2/3 \cdot 1/(1+\omega)}$$

Если $\omega = -1$, т.е. $p = -\varepsilon$, как в вакууме, то показатель степенной зависимости от времени становится бесконечным — в этом случае масштабный фактор растет экспоненциально (см. ниже). Если $\omega = -1/3$, то рост идет по линейному закону с постоянной скоростью: $a = t$. Если $\omega > -1/3$, то показатель степени меньше единицы и расширение идет с замедлением. А если $-1 < \omega < -1/3$, то расширение пространства ускоряется со временем.

Ускоренное расширение при $p < -1/3 \varepsilon$ можно интерпретировать как действие силы гравитации, которая стала расталкивающей. Этот факт сам по себе поразителен — гравитация издревле отождествлялась с тяготением. Правда, этим свойством отталкивания нельзя воспользоваться, как антигравитацией в фантастических романах. Поле с отрицательным давлением должно занимать огромное пространство, больше размеров горизонта, иначе на краях оно будет очень быстро падать и «выгорать», стремясь сжаться. К тому же поле должно быть весьма однородным внутри этого пространства, поскольку любые его перепады (градиент) дают вклад в притяжение. Чтобы расталкивание сработало, расширение должно быстро вынести все «края» пространства, занимаемого полем, за горизонт. Таким образом, расталкивающий эффект гравитации не может сделать ничего, кроме как создать огромную вселенную или раздуть уже существующую.

Теперь вспомним лямбда-член, введенный Эйнштейном в попытке стабилизировать нестационарную Вселенную. Он традиционно обозначается греческой «лямбда», откуда и получил свое название (альтернатива — космологическая постоянная), и фигурирует в уравнениях следующим образом:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} - 8\pi \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{16\pi}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Он тоже имел расталкивающий эффект и был по определению константой во всем пространстве. Уравнение Фридмана с лямбда-членом в отсутствие материи и в пренебрежении кривизной пространства выглядит так:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 - \frac{8\pi}{3} \cdot G\Lambda = 0,$$

где a — масштабный фактор, $\dot{a}$ — его производная по времени. Уравнение Фридмана без лямбда-члена, но со скалярным полем, вошедшим в уравнение через тензор энергии-импульса:

$$(\dot{a}/a)^2 = 8\pi G/3 \varepsilon$$

Да ведь это абсолютно то же самое, если ε постоянно во времени и пространстве и если положить $\Lambda = \varepsilon$! Так лямбда-член, забракованный Эйнштейном, вернулся в историю благодаря развитию теории поля, на сей раз в правую часть уравнения, через тензор энергии-импульса.

Каким будет решение уравнения Фридмана, приведенного выше? Конечно, экспонента: $a = e^t$, где t , напомним, — безразмерное время, выражаемое через обычное время, как $t = t/H$; H — постоянная Хаббла, которая в данном случае не меняется со временем: $H = \sqrt{8\omega G/3\varepsilon}$.

Это решение носит имя де Ситтера, а умозрительная соответствующая ему вселенная называется «миром де Ситтера». Это несколько странный мир. Несмотря на экспоненциальный рост масштаба, в нем ничего не меняется. В нем нет глобальной выделенной системы отсчета (а в нашей Вселенной она есть — та, что связана с усредненным движением галактик и реликтовым излучением). Там непонятно, как определить причинно связанную область — горизонт. Более того, для мира де Ситтера можно преобразовать координаты так, что он будет вообще стационарным.

Странности этого мира снимаются малейшим отклонением от вакуумного состояния.

Если там есть хоть немного обычной материи, если скалярное поле и его плотность хоть чуть-чуть меняются во времени или пространстве, сразу экспоненциальное расширение становится реальным, хотя закон расширения будет чуть-чуть отличаться от экспоненты (см. врезку и рис. 13.1). Сразу исчезает стационарность, появляется выделенная глобальная система отсчета и многое другое.

Переход от чисто вакуумного состояния $p = -\varepsilon$ к близкому, например $p = -0,99\varepsilon$, описан на врезке и проиллюстрирован на рис. 13.1. Переход достаточно плавен, но есть и серьезное отличие — где-то прошлом степенная зависимость упирается в ноль, а в будущем сильно отклоняется вниз. Кстати, теоретики рассматривают возможность $p < -\varepsilon$. При этом нарушается так называемое

мый принцип изотропной энергодоминантности, который кажется естественным, но напрямую ниоткуда не следует. Субстанция с таким уравнением состояния называется «фантомной материей», или «фантомной энергией» (второй вариант названия употребляется чаще). Подобный экзотический случай также проиллюстрирован на рис. 13.1: кривая в будущем отклоняется вверх от экспоненты и за конечное время уходит в бесконечность. Это так называемый «Большой разрыв» — страшилка, которую очень любят журналисты (Вселенную вплоть до атомов и нуклонов разорвет на элементарные частицы).

Фактически, сейчас мы наполовину раскрыли карты. Ускоренное расширение Вселенной — тот стержень, вокруг которого будет разворачиваться сюжет в следующей части. Но эта книга не детектив, и стержня мало — нужны еще конкретные сценарии с деталями, в которых может скрываться дьявол.

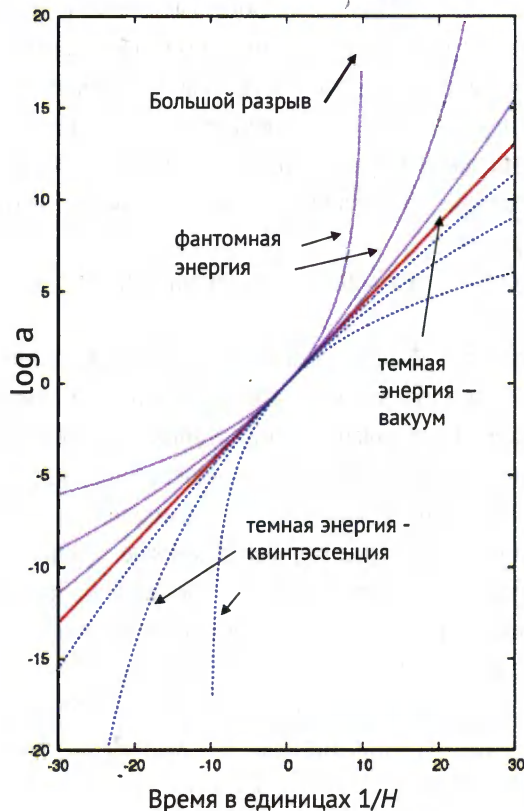


Рис. 13.1. Ход расширения пространства в зависимости от уравнения состояния содержимого вселенной. По горизонтали — время, выраженное в единицах $1/H_0$, где H_0 — постоянная Хаббла в момент $t = 0$. По вертикали — десятичный логарифм масштабного фактора. Центральная красная линия — вакуумное уравнение состояния $p = -\epsilon$, ему соответствует точная экспонента. Снизу от нее идут кривые для $p = -0,9\epsilon, -0,97\epsilon, -0,99\epsilon$ (в порядке приближения к экспоненте). Сверху, соответственно, идут кривые для $p = -1,1\epsilon, -1,03\epsilon, -1,01\epsilon$, что соответствует фантомной энергии

Как решаются самые простые дифуры

Поскольку автор намерен помочь читателям (хотя бы тем, которые помнят что-нибудь о производных) всерьез разобраться, откуда берется ускоренное расширение Вселенной и как работает механизм космологической инфляции, на данной врезке подробно объяснено, откуда берутся приведенные в тексте решения уравнения Фридмана. Первое, что нужно знать, как выглядит производная степной функции $y = x^\beta$ (β — любое фиксированное число). Вот так: $dy/dx = \beta x^{\beta-1}$. Уравнение Фридмана для нулевой кривизны с учетом уравнения состояния и при использовании безразмерного времени (выраженного через постоянную Хаббла) выглядит так:

$$da/dt = a^\alpha,$$

где a — масштабный фактор, α зависит от уравнения состояния вселенной.

Решение ищется в виде

$$a = c(t+t_0)^\beta,$$

где c и t_0 — константы. Подставляем в уравнение Фридмана:

$$\beta c(t+t_0)^{\beta-1} = c^\alpha (t+t_0)^{\alpha\beta}$$

Понятно, что степени у переменной справа и слева должны быть равны:

$$\beta - 1 = \alpha\beta,$$

откуда

$$\beta = 1/(1-\alpha)$$

и

$$c = (1/\beta)^\beta$$

На константу t_0 пока не обращаем внимания. Обратит внимание надо на случай $a = 1$, когда b обращается в бесконечность. В этом случае исходное уравнение превращается в

$$da/dt = a.$$

Это не только самое простое, но и самое знаменитое дифференциальное уравнение, описывающее размножение нейтронов при ядерном взрыве или бактерий в благоприятной среде. Его решение

$$a = e^t$$

основано на свойстве экспоненты оставаться самой собой при дифференцировании. Однако, предметом разбирательства остается переход между экспоненциальным и степенным решением. Он из соображений здравого смысла должен быть плавным, а из формул этого не видно. Здесь надо вспомнить про константу t_0 . Добавим ее так, чтобы решение при $t = 0$ совпадало с экспоненциальным. Надо получить $a = 1$ при $t = 0$ и для этого взять $t_0 = \beta$:

$$a = (1/\beta)^\beta (t + \beta)^\beta = (1 + t/\beta)^\beta$$

А теперь надо вспомнить определение числа e и убедиться, глянув в учебник или «Википедию», что последнее выражение при b стремящемся к бесконечности (что происходит, когда a стремится к 1 из-за того, что уравнение состояния вселенной стремится к вакуумному), стремится к e^t . Решения для значений a близких к 1 (или больших значений b) показаны в логарифмическом масштабе на рис. 13.1.

14. Великое объединение наук

Космология возникла как наука о самом гигантском: космос, галактики, миллиарды световых лет, миллиарды лет времени. Но уже более полувека назад она бы не смогла сдвинуться с места без ядерной физики: почему образовалось столько-то гелия и столько-то дейтерия; горячей родилась Вселенная или холодной; если горячей, то какова ее нынешняя температура? Все эти вопросы решались с таблицами данных по ядерной физике.

В первые мгновения своего существования Вселенная была настолько плотной и горячей, что состояла из частиц, которые сейчас в свободном виде в природе не существуют, — мы знаем об этих частицах только благодаря современной физике микромира, опирающейся на данные, добытые с помощью ускорителей частиц. И, наоборот, то, что мы наблюдаем в мощнейшие телескопы — оптические и микроволновые, — косвенным образом дает важнейшую информацию для физики микромира. Никакой теоретик по физике частиц не может безнаказанно ввести в теорию новую сущность: сразу надо проверять, не дает ли она каких-либо неприемлемых последствий в космологии, например, повлияв на уравнение состояния Вселенной в какой-то момент.

Таким образом, физика микромира и космология практически объединились. Впрочем, еще раньше так же объединились физика и астрономия в науку под названием «астрофизика». Это в корне противоречит расхожему мнению о том, что усложняющаяся наука требует всё более узких профессионалов, которые в пределе знают «всё ни о чем». Получается наоборот: наука требует людей со всё более широким кругозором. Разные ветви науки заимствуют друг у друга методы, а то и самих исследователей. Без подобной миграции наука захирела бы уже давно, и недаром во всевозможных научных грантах и программах всё чаще мелькает слово «мультидисциплинарность». К сожалению, оно часто используется не в самых благовидных целях, например, чтобы провести слабую диссертацию через непрофильный совет. Но так или иначе,

главные прорывы в науке сейчас, как и раньше, делаются обычно людьми с широким кругозором.

Выше мы уже столкнулись с тем, что в космологии оказались за-
требованы ядерная физика и теория поля. По мере приближения
к самому началу Вселенной требуется знание, связанное со всё бо-
лее высокими энергиями частиц — температура растет до немысли-
мых величин. В какой-то момент (порядка долей наносекунды) энер-
гии существующих ускорителей уже не хватает для воспроизведения
взаимодействий частиц, которые тогда происходили. Для продвиже-
ния еще глубже не хватит энергии ускорителя, который принципи-
ально может быть создан в условиях Земли. Звучали и продолжают
звучать высказывания, что мир по этой причине непознаваем до кон-
ца. А продвижение всё происходит.

В следующих главах речь пойдет о процессах, воспроизведение
которых выходит за пределы возможностей экспериментальной фи-
зики высоких энергий на много порядков величины. Одна из теорий,
которая позволяет приблизиться совсем близко к Началу, где-нибудь
на 10^{-35} с, называется теорией великого объединения. Речь здесь идет
об объединении физических взаимодействий, а не наук. О ней бо-
лее подробно расскажем ниже, а сейчас пару слов о еще более да-
леком пределе — совершенно недостижимом экспериментально, но
явно просматривающимся теоретически.

15. Лестница масштабов и планковский потолок

«Б

ыть может, эти электроны — миры, где пять материков...» — Валерий Брюсов написал это в 1920 году, когда уже закладывались основы квантовой механики, говорящей, что этого быть не может в принципе. Мир на разных масштабах не самоподобен — тут дело не только в квантовой механике: муха размером со слона не сможет не только летать, но и ползать — лапы не выдержат. Но квантовая механика меняет мир радикально: исчезает траектория частицы, исчезает однозначная причинно-следственная связь, исчезает полная детерминированность будущего настоящим. Ричард Фейнман высказался в том духе, что квантовую механику не понимает никто, но есть люди, которые хорошо умеют ей пользоваться и описывать с ее помощью явления природы.

Квантовая механика достаточно проста с математической точки зрения, пока она остается в рамках описания нерелятивистских частиц во внешнем потенциале. Но и в этих рамках она тяжела для интерпретации, порождая всякие курьезы типа кота Шрёдингера (суперпозиция живого и мертвого котов), многомировой интерпретации и сильного антропного принципа (чтобы вселенная реализовалась, в ней должен возникнуть наблюдатель).

Квантовая теория поля даже в рамках теории возмущений по зубам только профессионалам, хорошо владеющим нужным математическим аппаратом, за рамками метода возмущений уже непотребно сложна и не имеет точного конструктивного математического описания. Приходится вводить дискретное пространство-время (решетку), чтобы хоть написать конструктивные выражения.

И всё же в квантовой механике есть один очень простой принцип, позволяющий сразу оценивать масштаб квантовых явлений. Это принцип неопределенности Гейзенберга. Напомним:

$$\Delta p \Delta x \sim \hbar/2$$
$$\Delta E \Delta t \sim \hbar/2,$$

где Δp — неопределенность в импульсе частицы, Δx — неопределенность в положении частицы, вторая строчка — аналогично для неопределенностей в энергии и времени, $\hbar$ — постоянная Планка. Это столь же фундаментальная постоянная, как и скорость света. К ним надо добавить еще гравитационную постоянную G . Если и есть что-то общее у разных вселенных, то, скорее всего, именно эта тройка констант. Конечно, общими не могут являться их конкретные численные значения — они есть результат нашего произвольного выбора единиц. Наоборот, эти константы задают естественную систему единиц, правда, не очень удобную для нас (см. ниже в этой главе). Общность скорее может заключаться в том, что процессы в разных вселенных имеют в этих естественных единицах одинаковое описание.

Из соотношения неопределенностей легко оценить, например, размер атома водорода R_H не прибегая к решению квантомеханических уравнений: энергия связи электрона в атоме порядка $E = e^2/R_H$, где e — заряд электрона. Кинетическая энергия связанного электрона должна быть порядка половины энергии связи — во всяком случае, такой принцип соблюдается в классической механике. От более глубокого падения электрона на протон страшает как раз принцип неопределенности: $\Delta p \Delta x \sim \sqrt{Em_e}$, $R_H \sim \hbar/2$. Из этих условий находим, что $R_H = \hbar^2/4 e^2/m_e = 0,13 \cdot 10^{-8}$ см, что в четыре раза отличается от размера боровского радиуса (который, конечно, тоже весьма условно характеризует размер атома). Такую точность можно считать вполне удовлетворительной.

Обратите внимание, что масса электрона стоит в знаменателе. Это значит, что если вместо электрона в атоме будет более тяжелая частица, то его размер будет меньше. Так и есть, мюонный атом водорода в 100 раз меньше нормального атома водорода. Но мюон живет всего 10^{-6} с. А если бы он был стабилен? Тогда могли бы существовать молекулы в 100 раз меньшего размера, а также в миллион раз более плотные жидкости и твердые вещества.

Таким образом, квантовая механика диктует: системы меньшего размера можно строить только из более тяжелых частиц, и связаны они должны быть сильнее. Так что ни о каких мирах на масштабах атома речи идти не может. У нас нет более тяжелых стабильных

частиц! Стабильная составная система наименьшего размера, существующая в нынешней Вселенной, — протон.

А каковы будут размеры квантовой гравитационно связанной системы двух частиц? Иными словами, каков размер атома, связанного только силами гравитации? Составляющие его частицы должны быть нейтральными, поскольку кулоновское притяжение или отталкивание сильнее гравитации. Увы, у нас нет нейтральных стабильных элементарных частиц, которые имели бы массу (кроме разве что нейтрино). Поэтому возьмем неэлементарные частицы, например два атома водорода. Имеем: энергия связи $E = Gm_p^2/R$, соотношение неопределенности: $\sqrt{2Em_p} \cdot R = \hbar$. Результат $R \sim \hbar^2/Gm_p^3 \sim 10^{24}$ см. Это порядка миллиона световых лет — полпути до Туманности Андромеды. Понятно, что энергия связи такого атома мала до полной потери смысла. Однако обратите внимание, что расстояние обратно пропорционально кубу массы частицы. Если взять недавно открытый бозон Хиггса, или W-бозоны, которые принадлежат к тому же уровню иерархии физических масштабов, размер гравитационного атома будет около светового года. Тоже бессмысленно, тем более, что упомянутые частицы живут ничтожные доли секунды. Существенно более тяжелых частиц мы пока не знаем, но есть серьезные основания предполагать, что за огромным интервалом в 14 порядков величины по энергии взаимодействий и по массе частиц начинается новая физика, новый уровень иерархии — так называемое великое объединение. Там должны существовать частицы, которые в 10^{16} – 10^{17} раз тяжелей протона. Сейчас таких частиц нет — распались, но они существовали в первые мгновения после рождения Вселенной. Размер гравитационного атома из частиц, которые в 10^{16} раз тяжелей протона, — 10^{-24} см — на много порядков меньше всего, что доступно зондированию на самых мощных ускорителях. Теперь прикинем энергию связи такого атома: $E = GM^2/R = 7$ эрг — вполне макроскопическая величина. Чтобы разбить такой атом, не хватит энергии Большого адронного коллайдера. Но в условиях ранней Вселенной, когда ее температура была огромной и существовали частицы уровня великого объединения, это был очень рыхлый атом.

А может ли гравитационный атом быть настолько сильно связанным, чтобы энергия связи оказалась сравнима с массой составляю-

щих его частиц? Может, если частицы в 10^{19} раз тяжелее протона. Эта масса по порядку величины равна 10^{-5} г и называется массой Планка. Размер этого атома будет 10^{-33} см, данная величина называется планковской длиной.

Интересно, каков будет радиус черной дыры массой те же 10^{-5} г ($R_g = GM/c^2$)? Оказывается, как раз эти самые 10^{-33} см! То есть гравитационный атом двух точечных частиц массой 10^{-5} г оказывается черной дырой. В этом заключается смысл планковского масштаба: сходятся квантовая механика (атом) и сильная гравитация.

Между прочим, черная дыра массы, например, 10^{-4} г мгновенно испарится, излучив частицы сверхвысокой энергии (механизм Хокинга). Но, возможно, она испарится не полностью — останется черная дыра планковской массы. Впрочем, это трудно сказать наверняка — возможен распад и на частицы меньшей массы. А черная дыра массы меньше планковской невозможна в силу принципа неопределенности: ее невозможно локализовать внутри своего гравитационного радиуса. Точно так же и элементарная (точечная) частица с массой больше планковской окажется под своим гравитационным радиусом — т.е. черной дырой, не обладающей никакими характеристиками, кроме массы, момента вращения и электрического заряда. Но, как сказано выше, она очень быстро испарится до черной дыры 10^{-5} г или до частиц меньшей массы.

Планковские величины (массу, длину, время) можно получить просто из соображений размерности: взять основные мировые константы — скорость света (размерность см/с), постоянную Планка (размерность эрг·с) и гравитационную постоянную (эрг·см/г²) — и комбинировать их так, чтобы получить нужную размерность.

Итак, планковскую массу мы уже получили $m_{pl} = \sqrt{\hbar c/G} \sim 2 \cdot 10^{-5}$ г. Планковскую длину тоже: $l_{pl} = \hbar/M_{pl}c \sim 10^{-33}$ см. Ну и планковское время: $t_{pl} = l_{pl}/c \sim 10^{-43}$ с. Эти величины можно взять за основу естественных фундаментальных единиц измерения — их диктует физика. Причем физический смысл этих величин тоже фундаментален. Масса Планка — максимальная масса, которую может иметь точечная элементарная частица. Планковская длина — минимальное расстояние, на котором можно в принципе что-то «увидеть». При попытке «рассмотреть» что-то меньшее требуется такой импульс частицы-зонда,

что пространство при взаимодействии частицы с объектом искривилось бы настолько, что само понятие длины потеряло бы смысл. Аналогично планковское время — минимальный промежуток, на котором может произойти какое-либо событие (например, испускание последней частицы испаряющейся черной дырой).

Выше речь шла о нулевых колебаниях вакуума. Их энергия бесконечна, если нет ограничения сверху на частоту. Планковский масштаб, похоже, как раз дает это ограничение: обратное планковское время для частоты (не может существовать больших частот), или планковская длина для длины волны, что то же самое. Бесконечность исчезает, но проблема остается: плотность энергии вакуума без каких-либо механизмов компенсации оказывается на уровне планковской плотности. Последняя получается как масса Планка, деленная на куб планковской длины, 10^{94} г/см³, что кажется абсурдно большой величиной: масса наблюдаемой части Вселенной «всего» 10^{57} г. Реально плотность энергии вакуума (примем за нее плотность темной энергии) на 123 порядка ниже. Таковы требования к точности какой-то неизвестной нам симметрии, которая должна спасти науку от этого парадокса.

Впрочем, есть и иная точка зрения: столь малая плотность энергии вакуума «выпала» нашей Вселенной случайно как одной из немногих в бесконечном множестве. Если эта плотность для зародыша вселенной выпадает в результате какого-то случайного процесса более-менее равномерно по линейной шкале, то вероятность такой удачи (иначе ничего хорошего из вселенной не получится) порядка 10^{-123} . Маловато, но всё зависит от числа возможных реализаций вакуума. Если их, скажем, 10^{500} (а это часто называемое число), то подели его на 10^{123} — всё равно останется 10^{377} разных реализаций с достаточно малой плотностью энергии вакуума. Более подробная дискуссия по данному поводу развернута в главе 45.

Кроме того, что планковский масштаб фундаментален и предельен, он, увы, темен для нас. Дело в том, что общая теория относительности (а с ней и любая другая теория) перестает работать на планковском масштабе. Теория гравитации Эйнштейна — сугубо классическая теория. Электродинамика Максвелла — тоже классическая теория, но на ее основе удалось построить квантовую электродинамику.

Квантовой теории гравитации построить не удалось. Трудности, возникающие из-за сильной нелинейности теории и неустранимой расходимости интегралов, оказываются непреодолимыми. Хотелось бы добавить «пока», но тема занятий под названием «квантовая гравитация» существует многие десятилетия, а ясной теории с таким названием так и не просматривается. Если будет найден адекватный язык, на котором квантовая гравитация будет конструктивно сформулирована, это станет великим достижением. Сейчас квантовую гравитацию пытаются сформулировать на языке теории струн — в этом направлении есть свои достижения, а также свои проблемы.



15.1. Сальвадор Дали.
Время на планковском
масштабе (изображение
из «Википедии»)

Мы перечислили планковские единицы, включающие планковскую плотность. При такой плотности понятия расстояния и времени теряют смысл — это свойства классического пространства-времени. А в этом случае пространство-время становится сугубо квантовым, все «часы» и «линейки» перестают работать. Что это такое и что там происходит, можно только фантазировать. Кажется Джон Уиллер предложил на этот счет красивую метафору «пространственно-временная пена», имея в виду, что там должны появляться и исчезать любые мыслимые и немыслимые топологические пространственно-временные образования.

Вопрос о планковской плотности отнюдь не эквивалентен вопросу о числе ангелов на острие иглы — от него нельзя отмахнуться, как от нереализуемой абстракции. Она еще как реализуема!

Возьмем образование простой черной дыры при коллапсе звезды. На языке классической теории гравитации центральная часть звезды необратимо сжимается, уходит под горизонт Шварцшильда, теряя с нами причинную связь. Но и внутри горизонта с точки зрения сопутствующего наблюдателя вещество продолжает необратимо сжиматься — в сингулярность, в точку, где плотность бесконечна.

Это по классической теории, а по квантовой коллапсирующая материя должна упереться именно в пространственно-временную пену с планковской плотностью. Там решение Шварцшильда перестает работать, и никакого другого решения не существует — нет теоретического аппарата. Остается рассуждать (*to speculate*) и фантазировать. Зато фантазии оказываются захватывающими: из этой пены может брать начало множество новых вселенных. Причем, как будет рассказано ниже, есть качественные соображения, указывающие на то, что подобные фантазии отнюдь не беспочвенны. И наша Вселенная тоже истекает оттуда, из «пены».

А теперь позвольте автору после длинного напряженного экскурса к пределу физического мира слегка повеселиться. Если бы я был теологом, я бы сделал карьеру на теории, что Бог в распределенном виде обитает на планковских масштабах, в этой пространственно-временной пене. Он там принимает коллапсирующие вселенные и звезды, испускает новые вселенные с разными свойствами — с будущими наблюдателями и без оных — и надежно прячется от физиков-теоретиков за непрошибаемыми проблемами теории квантовой гравитации. Ниже обсуждается то, что он там, может быть, делает еще одну очень важную вещь — играет в кости (Эйнштейн заявлял по поводу вероятностной интерпретации квантовой механики: «Бог не играет в кости!»). Действительно, физики с каким-нибудь надежным математическим аппаратом туда еще не скоро доберутся, чтобы показать, как это всё работает без Бога. Поэтому подобной карьере в обозримом будущем ничего не грозит. Правда, боюсь, что я уже опоздал с такой идеей...

16. Фазовые переходы

Явления фазовых переходов хорошо известно всем из повседневной жизни: испарение и замерзание воды, плавление олова. Из менее повседневных явлений — возникновение сверхпроводимости, появление ферромагнетизма при остывании металла.

Вселенная тоже испытывала фазовые переходы в своей ранней истории. Явления, о которых рассказывается в этой главе, лежат немного в стороне от главного сюжета книги. Но без рассказа о них космология для читателя сильно потеряет в своей выразительности.

Вселенная сразу после Большого взрыва очень быстро остывала и расширялась. Был ли этот процесс гладким? Конечно, нет. Какие-то частицы исчезали, аннигилируя со своими античастицами. В какие-то моменты нарушалось и потом восстанавливалось термодинамическое равновесие. В какой-то момент образовался маленький избыток барионов над антибарионами (напомним, барион — частица, состоящая из трех кварков, стабильными барионами являются протон и нейтрон в ядре). Благодаря этому не все барионы проаннигилировали с антибарионами, и через миллиарды лет во Вселенной стало можно жить. И, самое главное, менялся вакуум — с ним происходили фазовые переходы, вполне похожие на фазовые переходы в веществе.

Картина этих фазовых переходов, правда, не столь проста и не во всех случаях надежно установлена. Попытаемся пройти по ранней истории Вселенной в направлении к самому ее началу.

Последний фазовый переход — это рекомбинация — от плазмы к нейтральному газу. Это обычный фазовый переход вещества, он (в отличие от более ранних переходов) не связан с перестройкой вакуума. Напомним, что произошел он через 380 тыс. лет после рождения Вселенной.

Предыдущий фазовый переход случился в первые доли секунды при температуре Вселенной около 200 МэВ. Именно тогда возникли протоны и нейтроны, из которых ныне состоит наш мир. До этого существовали лишь свободные кварки и глюоны, составлявшие вме-

сте с электронами, мюонами, фотонами и нейтрино газ релятивистских частиц. По мере остывания кваркам оказалось выгодно объединиться в тройки. Так устроены сильные взаимодействия: их источником является так называемый «цветовой» заряд. Термин «цвет» введен потому, что этот заряд «трехзначен»: удобно назвать состояния заряда «красный», «зеленый» и «синий» — тогда их комбинация будет «белой» — нейтральной. Именно поэтому кварки объединились по три, чтобы дать нейтральные по цвету капельки, известные нам как протоны и нейтроны, — так стало энергетически выгодно с падением температуры. На языке физики частиц это явление называется «конфайнмент» (пленение, удержание).

Точнее, фазовый переход от газа кварков к нуклонам был не фазовым переходом, а кроссовером. Разница хорошо видна на обычной фазовой диаграмме воды. Четкая линия, разделяющая воду и пар, заканчивается в критической точке. Пересечение этой линии есть классический фазовый переход. Но путь от воды к пару может обходить критическую точку сверху, как показано на рисунке, тогда никаких резких скачков не происходит и всё меняется плавно.

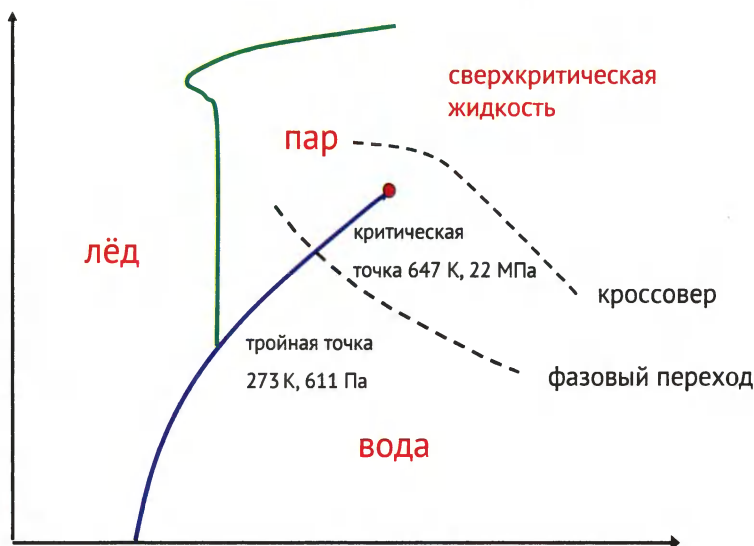


Рис. 16.1. Фазовая диаграмма воды

В случае с фазовым переходом к конфайнменту привыкли рисовать фазовую диаграмму, поменяв оси и используя плотность кварков вместо давления:

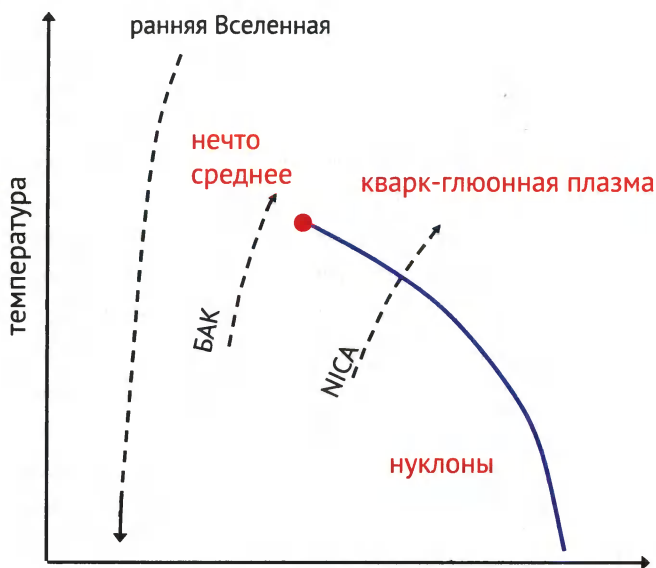


Рис. 16.2. На этой диаграмме трек в ранней Вселенной проходит намного левей критической точки. Данный фазовый переход пытаются смоделировать в лаборатории — на ускорителях тяжелых ионов (как ни удивительно, с хорошими шансами на успех).

При столкновениях тяжелых ионов на Большом адронном коллайдере (он может ускорять не только протоны но и тяжелые ионы) или RHIC в Брукхейвене получается трек ближе к критической точке, но всё же за ней. А вот на строящихся коллайдерах тяжелых ионов NICA (в Дубне) и FAIR (в Дармштадте), как утверждается, они попадут прямо в фазовый переход.

Изменился ли вакуум при фазовом переходе к конфайнменту? На этот вопрос принято отвечать положительно: к «мору» ненаблюдаемых частиц, составляющих вакуум, добавились составные частицы — кварк-антикварковые пары, примером которых являются π -мезоны.

Теперь перейдем к предыдущему фазовому переходу где-то при 100 ГэВ. Это более фундаментальный фазовый переход, поскольку вакуум претерпел более радикальное изменение — он заполнился ненулевым фундаментальным полем — тем самым полем Хиггса.

Мысль о том, что с теорией электрослабых взаимодействий должен быть связан фазовый переход в ранней Вселенной, возникла вскоре после появления теории электрослабого объединения Вайнберга — Салама. Первым об этом написал Давид Киржниц в 1972 году. Он обратил внимание, что теория электрослабых взаимодействий очень напоминает теорию сверхпроводимости Гинзбурга — Ландау. Там фотон подобно W -бозону приобретает массу, что наблюдается как эффект Мейснера: магнитное поле выталкивается из сверхпроводника. И там есть критическая температура, выше которой сверхпроводимость исчезает. Значит, и в теории электрослабых взаимодействий должна быть критическая температура, а в ранней Вселенной до определенного момента температура была выше критической. И когда-то (по мере остывания Вселенной) произошел фазовый переход.

Это была лишь общая идея, а вскоре вышла более основательная работа Давида Киржница и Андрея Линде, где этот фазовый переход уже исследуется детально с количественными оценками. Тогда же появились и работы других авторов. Кстати, это, судя по всему, тоже был кроссовер, а не фазовый переход — это важно с точки зрения барионной асимметрии (см. врезку): при кроссовере нет выхода из термодинамического равновесия, необходимого для появления



избытка барионов над антибарионами. Следовательно, причину барионной асимметрии Вселенной надо искать где-то еще. Так или иначе фаза сменилась, поле Хиггса стало ненулевым, электромагнитные взаимодействия стали отличаться от слабых.

16.13. Давид Абрамович Киржниц (1926–1998), сотрудник Теоретического отдела ФИАН, член-корр. РАН

Спонтанное нарушение симметрии много чего объяснило и сократило число существующих. Но объяснило далеко не всё. В теории осталась куча свободных параметров и необъясненных фактов. Например, нарушение СР-симметрии (см. врезку) или индивидуальные константы взаимодействия частиц с полем Хиггса — откуда они взялись? Тоже некое спонтанное нарушение? Где, в каком месте? Здесь сюжет выходит за рамки компетенции автора, поэтому приходится прибегать к помощи научного редактора, переадресовывая вопрос ему.

Валерий Рубаков: Да, это действительно вопрос! Очень может быть, что свободные параметры нынешней стандартной модели — тоже результат нарушения симметрии где-то при более высоких температурах — раньше по времени. И с СР-нарушением вопрос (см. врезку «Что такое СР-инвариантность...» — Б. Ш.) — тоже где-то выше должно было произойти. При этом остается проблема с барионной асимметрией, которая требует нарушения СР.

Б. Ш.: Почему это проблема? Требуемая асимметрия между барионами и антибарионами — всего одна миллиардная, если считать, что на один кварк приходится миллиард фотонов, а до аннигиляции кварк-антикварковых пар их было примерно поровну (см. врезку «Проблема барионной асимметрии»). И мы видим нарушение СР в слабых взаимодействиях — как раз того же порядка величины.

В. Р.: Нет, если аккуратно считать, получается, что того нарушения СР, которое видно, например, в распаде К-мезонов, не хватает для объяснения барионной асимметрии Вселенной. Требуется большее нарушение, и непонятно, откуда его взять.

Б. Ш.: Для меня это новость. Я честно полагал, что тут концы с концами примерно сходятся. Еще вопрос: до фазового перехода плотность энергии поля Хиггса была существенно выше нуля, хотя среднее вакуумное значение поля было нулевым. Как получилось, что потом она упала точно в ноль, да еще при ненулевом значении поля?

В. Р.: Это тоже загадка, причем очень старая и очень фундаментальная. Еще Паули ломал голову: почему вакуум не тяготеет?

Ведь из-за квантовых флуктуаций среднеквадратичные значения полей в вакууме отличны от нуля и их плотность энергии должна быть огромной — положительной или отрицательной.

- Б. Ш.:** Давай пока оставим этот вопрос. Разговор об этом будет логичней ближе к концу книги. Дальше, как понимаю, великое объединение, а до него — огромный прыжок в масштабе от 100 ГэВ до 10^{16} ГэВ — на 14 порядков. Причем абсолютно недоступные 10^{16} ГэВ вырисовываются в результате экстраполяции того, что мы видим при «нормальных» энергиях, достижимых на ускорителях. Откуда эта жуткая «энергетическая пустыня», как ее называют? Неужели из того, что мы видим на наших масштабах, нет ничего, что бы указывало на перспективу какой-то новой физики посреди этой пустыни?
- В. Р.:** Четких указаний, пожалуй, нет. Есть некоторые наводящие соображения. Например, откуда берется ничтожно малая разница масс осциллирующих нейтрино? Так вот, есть механизм генерации этой малой разницы с помощью частиц с массой порядка 10^{12} ГэВ! Типа того, как слабость слабых взаимодействий связана с большой массой W-бозона — малая разница масс нейтрино связана с огромной массой ответственной частицы, которая стоит в знаменателе.
- Б. Ш.:** Гипотетический зоопарк суперсимметричных частиц (всяких фотино, глюино и скварков) тоже может заполнить эту «пустыню»?
- В. Р.:** Почему бы и нет? Впрочем, есть люди, которые считают, что в «пустыне» ничего нет. Более того, Михаил Шапошников, например, считает, что выше масштаба электрослабого объединения вообще ничего нет, никакой новой физики вплоть до планковского масштаба. И великого объединения нет.
- Б. Ш.:** Ну, давай предположим, что все-таки великое объединение есть, тем более, что оно нам дальше потребуется для конкретизации понятий. Значит, где-то при температуре 10^{16} ГэВ и времени от Начала 10^{-36} с был еще один фазовый переход, ну или кроссовер, бог с ним. При этом изменилась физика: сильные взаимодействия стали резко отличаться от электрослабых. Мой главный вопрос вот в чем. «Электрослабый»

фазовый переход имел predetermined конечное состояние — бозон Хиггса один. А при великом объединении тоже всё было predetermined или физика в конечном состоянии могла оказаться разной, как направление намагниченности домена ферромагнетика?

- В. Р.:** Там требуется несколько скалярных полей и, возможно, есть вырождение по их комбинации. Поэтому вполне возможно, что там действительно какие-то симметрии нарушаются недетерминированным образом, и некоторые константы и массы оказываются случайными.
- Б. Ш.:** А не могло ли произойти еще что-то интересное выше, т.е. раньше великого объединения?
- В. Р.:** Там уже до планковского масштаба осталось всего три порядка. Так что вряд ли.

Что такое CP-инвариантность и ее нарушение

(ТрВ № 79, 4 мая 2011 года, В. Рубаков, Б. Штерн,

<http://trv-science.ru/2011/07/19/masshtabnaya-linejka-vselennoj/>)

Допустим, физики двух удаленных миров во Вселенной связались друг с другом по некому мгновенному каналу связи (в рамках этого мысленного эксперимента махнем рукой на специальную теорию относительности) и научились понимать друг друга. Одни спрашивают: что такое левая резьба в вашей документации? Тут нельзя обойтись изображением, переданным по каналу связи, поскольку всё равно встанет вопрос, как разворачивать картинку: слева направо, но как объяснить, что такое левое и правое? Оказывается, физикам объяснить можно:

Возьмите обмотку с током и такой-то радиоактивный изотоп. Ядра в магнитном поле, создаваемым обмоткой, будут поляризованы. Смотрите, в какую сторону полетит больше электронов от бета-распада ядер. Направьте отвертку в этом направлении и вращайте ее в ту сторону, куда текут электроны в вашей обмотке. При этом отвертка будет заворачивать болт с левой резьбой.

Такое объяснение возможно потому, что в мире на уровне законов физики нарушена симметрия между правым и левым. Это нарушение невелико, поэтому для объяснения пришлось привлекать довольно тонкие эффекты. Такая симметрия называется P-инвариантностью. На таком же уровне нарушена симметрия между миром и антимиром, которая называется зарядовой, или C-инвариантностью. В антимире позитроны полетят в противоположном направлении, и отвертка антифизиков в таком случае будет закручивать правый болт. Поэтому, если физики двух миров не уверены, что они не в антимирах по отношению друг к другу, то вышеизложенная инструкция не работает.

Такая асимметрия между миром и антимиром достаточно тривиальна и компенсируется заменой правого на левое. Понятно, что если отличие только в этом, то никакого перекаса между барионами и антибарионами в ранней Вселенной не получить. Если мир и антимир одинаковы при замене правого

на левое, то это называется СР-инвариантностью. Было время, когда считалось, что СР-инвариантность выполняется точно. Но в первой половине 1960-х было экспериментально обнаружено нарушение СР-симметрии. А это уже более существенное различие между миром и антимиром, хотя и выраженное очень слабо.

В свете нарушения СР-инвариантности физики разных миров уже могут понять, одинаковы или противоположны их миры в зарядовом отношении. Соответствующая инструкция может выглядеть следующим образом: Возьмите нейтральные долгоживущие К-мезоны. Они могут распасться на три частицы, одна из которых — либо электрон, либо позитрон (а две другие — заряженный Λ -мезон и антинейтрино или нейтрино). Мы, земляне, называем позитроном такую частицу, которая чаще рождается в этих распадах. Если ваши атомы содержат позитроны, то вы сделаны из антивещества. Встреча с вами нам противопоказана!

Проблема барионной асимметрии Вселенной

Среди космологических фактов есть два, касающихся барионов (протонов с нейтронами) и требующих объяснения.

1. Во Вселенной есть барионы и практически нет антибарионов.
2. Число фотонов во Вселенной примерно в миллиард раз больше числа кварков, составляющих протоны и нейтроны. При огромных температурах в ранней Вселенной происходило интенсивное рождение и уничтожение кварк-антикварковых пар, и количество кварков и антикварков было примерно равным количеству фотонов. Кварки рождались и уничтожались в парах с антикварками, поэтому на каждый миллиард кварк-антикварковых пар приходился один «лишний» кварк. При остывании Вселенной кварки проаннигилировали с антикварками, а лишний кварк себе пары не нашел и дожил до наших дней. Вопрос: как получилось, что во Вселенной появилось такое неравенство между кварками и антикварками — очень маленькое, но крайне важное для нашего с вами существования?

Эту проблему впервые поставил А.Д. Сахаров в работе 1967 года. Там же он сформулировал необходимые условия для того, чтобы такой перекося смог образоваться:

1. Барионное число, то есть разность между числом кварков и антикварков должно нарушаться (как следствие, протон должен распадаться, хотя и за огромное время), кварки не всегда рождаются в паре с антикварками. Экспериментально такое нарушение не зарегистрировано, но нет никаких глубоких причин, почему его не может быть. В случае электрического заряда закон его сохранения связан с безмассовостью фотона.
 2. Должна нарушаться СР-инвариантность (см. врезку выше).
 3. При образовании перекося Вселенная должна временно выйти из состояния термодинамического равновесия.
- Общепринятого конкретного сценария образования барионной асимметрии до сих пор нет, хотя разработан ряд возможных моделей.
-

17. Проблески новой космологии жителей подледного океана Европы

После открытия конечной толщины льда и шарообразности Мира космология европиан стала более самосогласованной. Всё очевидным образом решилось с силой тяготения: она универсальна, направлена к центру Мира, действует и на воду, и на лёд, держит Мир единым — скрепляет его от разлета в окружающую пустоту. А также создает огромное давление среды и выталкивающую силу, действующую в воде. Благодаря экспериментам в вакуумных камерах, их теория тяготения была доведена до состояния, тождественного нашей ньютоновской теории гравитации.

Вместе с тем стало ясно, что картина мира катастрофически неполна. Что там, в пустоте за ледяным панцирем? Если нет ничего, и Мир является единственной сущностью, то почему он вращается? Ведь вращение говорит о какой-то вторичности, о том, что Мир не есть центр всего сущего. Так что же там?

Внешнее пространство стало тяжелейшей мировоззренческой проблемой, наплодившей множество фантазий. От бесконечной пустоты, окружающей единственный в ней Мир, до вложенных друг в друга вращающихся сфер. От множества однотипных миров, свободно летающих в пространстве, до исполинского иерархического хоровода хороводов разнообразных тел.

В то же время встал и другой вопрос: что поддерживает тепло недр? Ведь оно передается в холодный лёд и дальше как-то уходит в неведомое пространство. Если Мир вечен или существует очень долго, то его энергия должна была исчерпаться. Что пополняет запасы тепла?

Между тем былые достижения цивилизации принесли урожай — изобилие пищи и бытовых благ. Поэтому общество не особенно терзалось загадкой внешней пустоты и источника энергии, предпочитая брать от жизни как можно больше, пока дают. Массовое образование в подобные эпохи везде, что на Земле, что на Европе, деградирует одинаковым образом. В результате появляются поколения, в которых почти нет квалифицированных работников. Но европиан пока что выручала спасительная инерция цивилизации. Банкет всё еще продолжался.

Однако и во время сонного изобилия тихой сапой развивался научный инструментарий — электроника, фотометры, прецизионная локация. И ученые потихоньку продолжали заниматься своим делом. Вдруг по кабелю пошли сообщения, что они что-то обнаружили там, снаружи. Но из странных новостей никто ничего не мог понять.

Бреан Друм работал ведущим научно-популярной передачи кабельного вещания, отличался от своих коллег настоящим научным прошлым и слыл по этой причине занудой-умником. Тем не менее он имел свою преданную аудиторию и на кабеле его терпели. Он отправился к своему однокашнику, Хруам Мзеню, руководителю проекта под названием «Небесное дыхание», с просьбой выступить в передаче. И услышал в ответ:

— Я!? По вашему кабелю? Эх, если бы ты не был другом, сейчас бы летел отсюда впереди собственной трели! Я уже выступал у вас. Я рассказывал про Большой Аттрактор, как он деформирует своим тяготением ледяную оболочку. При монтаже выкинули часть моих слов, вставили слова диктора, и получилось, что я говорю про Ужасного Каттракена, изготовившегося взломать ледяную оболочку, чтобы высосать всю воду Мира. Я потом потратил десять смен, чтобы связаться со всеми коллегами и друзьями, дабы уверить их, что я в своем уме и не говорил всего этого бреда. А ты хочешь, чтобы я еще у вас выступал!

— Ну это была четвертая студия, известное дело. Меня бы спросил, прежде чем туда идти. Мне-то ты доверяешь?

— Тебе-то я доверяю, а ты доверяешь тем, кто будет монтировать твою передачу? Ты уверен, что они не вставят туда очередного каттракена ради обрамления рекламы каких-нибудь надглазных мерцалок?

— Меня обычно не трогают — аудитория специфическая, всякой дребедени не покупает, реклама неэффективна. Просто задвинули передачу в угол.

— Всё равно не пойду. Как вспомню, так скручивает...

— Хорошо, давай я сам постараюсь грамотно всё объяснить аудитории, но для этого я должен расспросить тебя. Могу не ссылаться.

— Давай. Только, действительно, лучше не ссылайся...

— Я краем уха слышал, что нашли какой-то внешний источник света. Это правда?

— Правда. Именно Внешний Источник с большой буквы. Он очень-очень слабый. Точнее, он весьма сильный, но сигнал от него слабый, поскольку толща льда неба поглощает почти всё. К небу привернули несколько фотометрических станций, которые раз в смену сбрасывают данные через тарелочные пищалки. Внизу эти данные записываются на ленту. Чувствительность у них порядка на два выше, чем у наших глаз, плюс способность накапли-

вать сигнал за большое время. Долго никакого сигнала со станций не видели и уже подумывали прекратить затею. Да и сейчас, если взять данные с любой из станций — там ничего не видно.

Так вот, новость заключается в том, что в результате совместной обработки данных со всех станций сигнал найден. Точнее, на гармоническом разложении темпов счета виден пик на периоде, близком к гироскопным суткам. Вероятность случайного возникновения такого пика — одна миллиардная. Кстати, сигнал удалось найти только благодаря недавно появившимся компьютерам — гармонический анализ такого объема данных — задача, которую в уме решить невозможно даже целой бригаде тренированных вычислителей.

— Это уже можно рассказывать по кабелю?

— Можно, это всё прозвучало на конференции и будет опубликовано со дня на день.

— Погоди, я регулярно сталкиваюсь с тем, что народ до сих пор не верит, что Мир вращается. Говорят: ну что нам ваши гироскопы, пусть себе вращаются, никто же не видел, как вращается мир.

— Это, кстати, один из результатов вашего кабеля, я не имею в виду твою передачу. Наше поколение таким тупым еще не было. Дело в том, что почти любого можно сделать дураком благодаря привычке верить широковетельному слову. Некоторые сопротивляются, перестают верить, рвут кабель, но это меньшинство. На самом деле у тебя сейчас важная роль: поддерживать и образовывать это меньшинство. Вот ты для кого-то из них авторитет. Так и говори больше и доходчивей! Глядишь, сменится пара поколений — дураков меньше не станет, но невежество станет постыдным, и большинство начнет смеяться над теми, кто не верит, что Мир вращается. Однако продолжу. Я сказал, что Внешний Источник дает гармонику, близкую по периоду, почти равную гироскопным суткам. Всё дело в этом «почти»! На самом деле за 1220 гироскопных суток Внешний Источник отстает на один оборот.

— Ого-го! Это что же: он вращается вокруг нас, делая оборот за 1220 суток? Это должно быть очень далеко.

— Хуже того, он действительно, похоже, очень далеко, но это не он вокруг нас вращается, а мы вокруг него, причем вместе с Большим Аттрактором.

— Да-а-а... Кстати, что нового известно про Большой Аттрактор? Вроде понятно, что это другой мир, притягивающий наш... Видимо, он больше нашего, и наш Мир всегда повернут к нему одной стороной. Но все-таки: насколько он больше и как далеко находится?

— Это не так просто. Он может быть не очень большим и близким или очень большим и далеким — расстояние неизвестно. Сегодня это можно

определить лишь одним способом. Кстати, ты знаешь, как обнаружили сам факт существования Большого Аттрактора?

— По «дыханию неба» вроде. Недаром ваш проект так назвали...

— Ну да. Акустики своей локацией выяснили, что небо вблизи экватора в первом квадранте в начале каждых суток чуть приподнимается и то же самое происходит в третьем квадранте. Давай покажу.

Предположим, моя голова направлена по оси Мира. А свои руки я вытягиваю в плоскости экватора. — Хруам Мзень вытянул конечности (у автора не поворачивается язык назвать это руками), став похожим на восьмилучевую звезду. — Пусть я — Мир, а вон та стойка с приборами будет Аттрактором. Я двигаюсь вокруг него, оставаясь повернутым к нему одной стороной. — Ученый непостижимым образом, чуть заметно шевеля конечностями, стал двигаться вокруг стойки, разворачиваясь так, чтобы все время быть к ней лицом. — Аттрактор вытягивает меня по направлению к себе своей гравитацией. — Хруам Мзень сильнее вытянул конечности направленные к стойке и от нее и чуть поджал боковые. — Но моя орбита не круговая. Вот здесь, со стороны красного щита, я приближаюсь к Аттрактору и вытягиваюсь сильнее... А с противоположной стороны удаляюсь и становлюсь более круглым. — Ученый в движении осуществлял соответствующие трансформации, делая всё это непрерывно и плавно. — А если у меня на лице сидит наблюдатель и измеряет расстояние до крайнего когтя на передней руке, он увидит периодическое изменение этого расстояния...

— Зачем ты мне этот цирковое представление устраиваешь? Мне бы и пары слов хватило, чтобы понять. Но как тебе удается это шоу? Прямо настоящий балет! Я бы точно не смог.

— Показываю, чтобы похвастаться. Я ведь преподаю студентам, в том числе младшим курсам. Им не то, что пары слов, а и целой лекции не хватит, чтобы понять. Такой студент нынче пошел. Вроде слушают, а глаза сонные и мутные — не понимают ни-че-го! А устроишь такое представление — что-то щелкает у них в голове — просыпаются, глаза оживают, начинают понимать. А как только студент начинает хоть что-то соображать, хватаешь его за это «что-то» и вытягиваешь из состояния сонного оупения. У нас на сотню студентов получается всего два-три по-настоящему толковых выпускника, зато почти половина становится способна что-то самостоятельно выяснять и делать собственные суждения. По нынешним временам и это — благо.

— И что будут делать эти двое-трое, когда они никому не нужны?

— Будут хранителями. Будут копать потихоньку в чем-то интересном, как это делаем мы. Зато когда наконец припрет по-настоящему, не надо будет восстанавливать науку совсем с нуля.

— Ваши «копания», видимо, аукнутся совсем не потихоньку. Уже пошли слухи, которые вызывают не только интерес, но и настороженность, вплоть до явной нервозности в высшем духовенстве... Кстати, насколько вытянута наша орбита?

— Как ни странно, пока не знаем. Проблема в чем? Надо измерить, насколько Мир вытянут в сторону Аттрактора. А мы не можем взглянуть на Мир со стороны. И не можем промерить его изнутри с достаточной точностью. Скорее всего, вытянутость орбиты не больше пяти процентов.

— Я слышал, что, вроде, дыхание как раз и дает тот загадочный источник энергии недр, благодаря которому мы существуем.

— Конечно, это похоже и есть ответ. Недра, как и небо, тоже растягиваются и сжимаются, хоть и поменьше, — вот тебе трение, значит, есть и выделение тепла.

— Я тебя было спросил о массе Большого Аттрактора — давай вернемся к этому.

— Чтобы знать массу Аттрактора, надо знать расстояние до него. Единственный способ понять далеко он или близко — измерить разницу в дыхании на противоположных полюсах. Если Аттрактор близко — на том полюсе, который обращен к нему, амплитуда дыхания будет заметно больше. Этого пока не видно — точности еще не хватает. Мы даже не знаем, с какой стороны Большой Аттрактор — со стороны первого или третьего квадранта. Но из верхнего предела на разницу амплитуд вытекает нижний предел на массу Большого Аттрактора — это пять тысяч масс нашего мира.

— Слышал, что он большой, но пять тысяч?! Наш Мир, получается, всего лишь мокрый булыжник, покрытый ледяной скорлупой?!

— Да, но зато на нем можно жить. А на Большом Аттракторе вряд ли. Правда, вокруг него могут летать и другие «мокрые булыжники»...

— Подожди, а их, других, можно как-нибудь почувствовать?

— С тем оборудованием, что мы имеем сейчас, нет. Но в принципе можно. Даже есть кое-какие задумки по этому поводу, но оглашать их рано.

— Давай вернемся к Внешнему Источнику, с которого начали. Это что-то еще более грандиозное?

— Судя по тому, что Внешний Источник своим тяготением никак не сказывается на вращении нашего Мира вокруг Аттрактора, он очень, очень далеко. И при этом он очень ярок. Недавно измерили прозрачность льда. Оказывается, что если наши фотометры, хоть и на пределе, чувствуют внешний свет, то за толщей льда освещенность должна намного превосходить всё, что мы можем вообразить. Значит, у этого источника просто какое-то непости-

жимое энерговыделение. А значит, надо думать, и масса огромная. Потому я и сказал, что это мы с Аттрактором вращаемся вокруг Источника, а не наоборот. Там могут быть и другие подобные аттракторы со своими мирами.

— Ты нарисовал совершенно грандиозную картину. Она сворачивает мозги набекрень даже у меня, а что говорить о широких массах трудящихся?! Кто в нее поверит, когда она основана на каких-то незначительных, тонких эффектах? Фотометры что-то там на пределе чувствительности измерили... Еле заметное «дыхание неба»... При этом никто ничего не видит, ничего не может потрогать! Как поверить в то, что это не плод фантазии длинноголовых?

— Прежде всего мы сами, профессионалы, должны себе верить. Мы чаще сами недостаточно полагаемся на свои выводы, чем слишком полагаемся на них. Так, один известный чудака потратил кучу времени на решение задачи о движении тел в центральном поле притяжения в гипотетической пустоте. Всякие эллипсы, параболы, гиперболы... Ему говорили: и где же движутся твои тела? В сопротивляющейся воде? В ледяном небе? Где твоя пустота? Да и сам он воспринимал свои занятия скорее как искусство. А оказалось, что сам Мир со своей ледяной скорлупой движется по его закону. Если появляется ощущение, что все концы с концами начинают сходиться, что задача начинает сама тащить тебя вперед, значит, ты прав и должен твердо стоять на своем.

— Я-то тебя прекрасно понимаю. А какой-нибудь фермер, услышав всё это, придет в ярость, назовет тебя жуликом, скажет, что этого не может быть никогда...

— И это не так плохо. Если фермер придет в ярость, значит, его интересует картина мира. Значит, у него в голове что-то происходит на эту тему, что-то сложилось — своя система взглядов, смена которых, как известно, вызывает ломку. Гораздо хуже, если фермеру, если любому другому жителю будет абсолютно всё равно. Если он просто пропустит сообщение мимо ушей. Если картина мира нужна ему как девятая рука...

— Слушай, а нельзя ли пробурить этот проклятый панцирь и посмотреть, что за ним?

— Это было бы потрясающе! Но знаешь, где здесь основная западня, полная сарсынь, с позволения сказать? Температура льда. Лёд можно растопить или пробурить — в любом случае скважину заполнит вода. Но температура стенок скважины сначала еще ничего, но чем дальше, тем холодней, при приближении к поверхности лёд должен быть чудовищно холодным. Это значит, вода в скважине будет очень быстро замерзать, и чтобы поддерживать ее жидкой, потребуется почти вся энергия электростанций Мира.

— Может быть, это стоит того, чтобы напрячься, новые электростанции построить наконец?

— Это древние деспотии могли напрячься и нагромоздить исполинский конус в честь деспота. А сейчас поди объясни тем же фермерам, что нужно чем-то поступиться ради дырки в никуда! Именно так они воспримут эту идею. Эпоха не та — время великих экспедиций кончилось, настало время наслаждаться.

— Так что же — полная безнадежность? Обидно будет помереть, так и не узнав, что там снаружи! Наши предки жили, не зная, что это «снаружи» вообще существует, — им было легче.

— Безнадежность не полная. Во-первых, мы уже почувствовали, что снаружи есть две вещи, и скоро определим расстояние до одной из них. Во-вторых, время идет быстрее, чем раньше, эпоха удовлетворения не вечна — кое-кого из молодежи уже подташнивает от нее. Кому-то начинает хотеться чего-то настоящего... Разумная тварь должна принимать настоящие вызовы! Иначе какая же она разумная? Иначе она быстро превратится в тупого кальмара! Глядишь — и прорвемся когда-нибудь.

Через две смены, после трансляции передачи Бреан Друма, в которой он пересказал состоявшийся диалог, по каналу четвертой студии в новостях было сказано: «По мнению ученых, с каждым оборотом гироскопов к нам приближается Большой крактор, который уже поглотил более пяти тысяч миров, и теперь, как полагают некоторые комментаторы, наш на очереди. Кроме того, обнаружено, что существует огромный Внешний Источник, который через каждые 1220 оборотов гироскопов излучает на нас палящую вспышку. В связи с этим вице-трибун Верховного наказа заявил, что внесен законопроект о срочной остановке и запрете эксплуатации всех гироскопов».

Так европейцы расплачивались за легкодоступные блага, добытые талантом и трудом предков. Что ж, это было время, которое надо перетерпеть. Терпеть оставалось 726 гироскопных суток.

Комментарий к разговору Бреан Друма с Хруам Мзенем

«Дыхание», о котором говорят европейцы, это, конечно, приливы. Они отличаются от земных приливов тем, что Европа, как и Луна, как и остальные галилеевы спутники, всегда повернута к Юпитеру одной стороной. Приливная сила первого порядка вытягивает спутник в эллипсоид, направленный к Юпитеру, но этот эллипсоид в первом приближении статичен и его невозможно выявить изнутри подледного океана.

Однако орбита Европы слегка вытянута (эксцентриситет 0,009), и это вызывает динамические приливы: когда Европа приближается, она вытягивается чуть сильнее, когда удаляется — чуть меньше. Приливное трение греет спутник изнутри. Кроме того, из-за вытянутости орбиты Европа чуть меняет свою ориентацию относительно Юпитера — на $0,1^\circ$. Это существенно увеличивает приливное тепловыделение.

Как европейцы могут оценить массу Юпитера, не зная радиуса орбиты? Амплитуды приливов для этого недостаточно, даже если известен период обращения. Требуется следующий порядок малости — разница в амплитуде приливов с противоположных сторон. Она составляет примерно $d/R \sim 1/200$ от самой амплитуды (d — диаметр Европы, R — радиус орбиты). Из диалога следует, что ими измерен только верхний предел на разницу амплитуд.

18. У истоков космологической инфляции (интервью с Владимиром Лукашом)

Выше мы перечислили простые вопросы, адресованные теории Большого взрыва, которые стояли во весь рост в 1960–1970-х годах. Теперь, попробуем совершить экскурсию в те времена, чтобы представить атмосферу в сообществе космологов. Попробуем разглядеть с высоты нашего времени первые шаги в направлении, которое позже привело к прорыву в космологии. В этом экскурсе нам поможет Владимир Лукаш, который в те времена работал в «эпицентре» советской космологии, каковым была научная школа Якова Борисовича Зельдовича.

Б. Ш.: Начнем с известных парадоксов: изотропия, однородность Вселенной, ее «плоскостность». Откуда всё взялось? Откуда такая симметрия? Как Вселенная достигла таких огромных размеров и не разлетелась — атом от атома — на парсеки? Что думали тогда по этому поводу?

Владимир Лукаш: Был целый рынок космологических моделей. Самые простые — фридмановские модели: «открытая», «плоская»

и «закрытая». Они симметричные по определению, но как столь высокосимметричная космология могла реализоваться в природе оставалось загадкой. На первых порах приходилось просто задавать руками фридмановскую вселен-



18.1. Владимир Лукаш.
Фото из личного архива

ную, т.е. постулировались такие начальные условия, которые и приводили к современному состоянию, — это так и называлось «космологический постулат».

Б. Ш.: Постулат, куда, как под ковер, заматались главные проблемы?

В. Л.: Ну, конечно, ситуация с начальными условиями никого не устраивала, шли интенсивные поиски физических механизмов изотропизации и сглаживания неоднородностей.

С изотропностью было легче. Уже в начале 1970-х годов поняли, что если Вселенная однородна, то гравитационное влияние материи приводит к ее эффективной изотропизации в ходе расширения (это наши работы с Игорем Новиковым и Андреем Дорошкевичем, а также исследования Чарлза Мизнера, Стивена Хокинга, Бэрри Коллинза, Олега Богоявленского, Сергея Новикова и др.). То есть мы показали, что если уже имелась однородность, то со временем будет почти изотропная ситуация. А вот с пространственной однородностью всё обстояло гораздо сложнее — её действительно приходилось задавать руками, она оставалась за рамками Большого взрыва.

Кстати, какая-то анизотропия могла остаться. Разные модели предсказывали различные виды глобальной анизотропии — в виде квадрупольной гармоники или крупномасштабного пятна в распределении температуры реликтового излучения на небесной сфере. И наблюдатели бросились искать. Одним из пионеров этого направления был итальянский астроном Франческо Мельхиори, который посвятил большую часть своей научной жизни поиску квадрупольной анизотропии реликтового излучения. Тогда эта «охота» не увенчалась успехом — слишком мала была амплитуда. Но к поиску анизотропии уже подключились многие исследователи как в России (Юрий Парийский, Николай Кардашёв, Игорь Струков, Дмитрий Скулачёв и др.), так и в Америке и Европе (Джордж Смут, Дэвид Вилкинсон, Паоло Бернардис и др.). Я помню, как в начале 1970-х в группу Зельдовича приезжал Джордж Смут, спрашивал, как и что измерять и какие ожидаются амплитуды сигнала. Речь тогда шла об амплитудах $\sim 10^{-4}$, однако много позже анизотропия была открыта на уровне 10^{-5} в полном соответствии с предсказаниями Космологической

стандартной модели. Следует, однако, заметить, что глобальную анизотропию мира, которую искал Мельхиори, так и не нашли до сих пор и продолжают ее искать — время от времени появляются «сенсации», связанные с обнаружением выделенных осей и плоскостей мира, но окончательный вердикт можно будет вынести только с увеличением точности измерений.

- Б. Ш.:** Вернемся назад. Я еще спрашивал по поводу «плоскостности», или близости плотности к критической, что то же самое. Что думали по поводу такого точного баланса?
- В. Л.:** Прямые оценки плотности Вселенной по звездам и газу давали всего несколько процентов от критической плотности. Уже была обнаружена темная материя (по разбросу скоростей и кривым вращения галактик), но ее вклад сильно недооценивался. Самая известная оценка того времени принадлежала Джиму Пиблсу и Брэнду Тали: плотность Вселенной не более 10% от критической. То есть не хватало порядка. Это работало в пользу «открытой» модели, хотя и от «плоской» никто не отказывался.
- Б. Ш.:** Подожди, что с этого одного порядка? Эта разница на порядок, если пойти в раннюю Вселенную, выражается в какой то момент как отклонение от критической типа 10^{-50} , что странно. Если бы отклонение изначально было чуть больше, сейчас оно бы выражалось десятками порядков величины, а не процентами. Правда, тогда бы и нас не было...
- В. Л.:** Да, конечно, мы это знали. Первым, наверное, был американский астрофизик Роберт Дикке, который четко сформулировал: Ω (отношение плотности Вселенной к критической плотности) — переменная во времени величина. Она быстро деградирует либо к нулю, либо к бесконечности. За исключением одного-единственного случая: если $\Omega = 1$ в точности. Поэтому и тогда были подозрения, что плотность равна критической, т.е. Вселенная «плоская». Мы, кстати, работали с плоской моделью. Однако дискуссии о компонентах материи не утихали. Аргумент Дикке был эвристический, а измерение плотности — это реальная наука.
- Б. Ш.:** Небось, тогда пытались привлекать антропный принцип для объяснения этого парадокса?

В. Л.: В нашей группе считалось, что антропный принцип — это от бедности. Ситуация типична для случая реализованной (апостериорной) вероятности. Вселенная-то уже есть, но как она появилась, что тогда произошло? Всегда есть соблазн решить задачу одним махом: взгляните в окно, вы же видите, как сложно и разумно всё устроено, неужели не ясно, что всё это создано провидением, а дальше подставляйте — Бог, антропный принцип, избранный наблюдатель и т.д. Нет, в группе Зельдовича доверяли только эмпирике. Понимали так, что надо развивать эксперимент и методы обработки, будут новые данные, тогда и с моделью продвинемся. Именно в то время появился термин «наблюдательная космология» — «астрофизика» как исследование звезд уже была тесна.

Б. Ш.: Чтобы подтвердить «плоский» вариант, надо было искать недостающую материю. Где?

В. Л.: О компонентах материи и темпах космологического расширения шли горячие дискуссии. Согласно уравнениям Фридмана, скорость расширения регулируется средней плотностью материи и ее давлением. Если давление мало (а тогда казалось очевидным, что оно близко к нулю), то фридмановская Вселенная должна расширяться с замедлением.

Это можно было проверить по диаграмме Хаббла — зависимости красного смещения объектов стандартной светимости от их видимой яркости. В середине 1970-х Джеймс Ганн и Беатрис Тинсли опубликовали свою версию диаграммы Хаббла. Они



ее строили по центральным галактикам больших скоплений — тогда считалось, что яркость у таких галактик более-менее одинакова. Так вот, их данные лучше всего описывались отрицательным параметром

18.2. Яков Борисович
Зельдович (1914–1987),
Astronet.ru

замедления, т.е. ускорением, ускоряющимся космологическим расширением (сейчас-то мы знаем, что именно так оно и есть). Но тогда народ был еще не готов всерьез воспринять ускоренное расширение, всё свалили на ошибки измерений и про этот результат потихоньку забыли.

Б. Ш.: Потрясающе! Уже который раз оказывается, что важнейшие факты в космологии видели задолго до официального открытия, но не придали значения или не поверили. Космологическая инфляция как новая парадигма появилась в 1981 году. Часто идеи перед тем, как восторжествовать, витают в воздухе. Мой вопрос: витала ли в воздухе идея космологической инфляции в 1970-х годах?

В. Л.: Бесспорно, витала, однако тогда ее так не называли и многие следствия ускоренного расширения или раздувания (инфляции) не связывали еще в единую парадигму. Как это часто бывает у людей, новую идею не сразу заметили, осознали и приняли. Первый раз с настойчивой мыслью о том, что космологический лямбда-член, вызывающий экспоненциальное расширение, может появиться из физики вакуума, точнее, из тензора энергии-импульса в правой части уравнений Эйнштейна, выступил Эраст Глинер — еще в конце 1960-х. Он пришел в группу Зельдовича и рассказал о своей догадке. В те времена одним из популярных космологических сценариев была осциллирующая вселенная: сжатие — отскок — расширение. Проблема была в том, что при сжатии вселенная неизбежно должна была достичь сингулярности — состояния с бесконечной плотностью.

Глинер придумал, как можно избежать сингулярности при отскоке с помощью вакуума с ненулевой плотностью энергии и с уравнением состояния $p = -\varepsilon$ (напомним: ε — плотность энергии, p — давление, которое оказывается отрицательным). Тогда при сжатии, когда образуется такой вакуум, включается расталкивание, и вселенная идет по решению де Ситтера: торможение коллапса, поворот при конечной плотности, экспоненциальное расширение.

Я.Б. Зельдович, выслушав это, пришел в ярость, сказал, что всё это ерунда, и выгнал докладчика, разве что с лестницы не спу-

стил. Глинер хотел опубликовать работу в УФН, и Гинзбург дал добро. Тогда Зельдович выдвинул ультиматум: если статья публикуется, он выходит из состава редакции. Печатать академики из редакции УФН не решились, и Глинер опубликовал работу в «Докладах Академии наук» по рекомендации Андрея Сахарова. Всё это смешно вспоминать, если бы не было так грустно. Потом, много лет спустя, когда у нас обсуждалась работа Алана Гута по космологической инфляции, я спросил Зельдовича: почему он в свое время выгнал Глинера? Ведь у Гута по сути то же самое: вакуум с $p = -\varepsilon$, экспоненциальное расширение. Зельдович ответил, что этого не может быть при коллапсе — там должно быть, наоборот, очень жесткое уравнение состояния с положительным давлением, никак не вакуумное.

Б. Ш.: Действительно, идея приложена к неправильному сценарию, но получилось, что с водой ребенка выплеснули.

В. Л.: Да и у Гута всё неправильно в его первом сценарии. Тем не менее, очевидно, что Зельдович был неправ. Но идея-то инфляции верная — она блестяще ответила на вопросы, как решить проблему горизонта, почему Вселенная большая, откуда так много частиц и др. Кстати, Глинер жив и здоров. Ветеран Великой Отечественной, между прочим. Где-то в Штатах живет.

Б. Ш.: С Глинером еще работала Ирина Дымникова...

В. Л.: Да, Глинер работал в Ленинградском Физтехе. Там же была группа «релятивистов», занимавшихся задачами, связанными с общей теорией относительности. Ее лидером был Лев Гуревич, в этой же группе работала и Дымникова, которая заинтересовалась задачей.



Они вместе опубликовали статью («Несингулярная фридмановская космология») в «Письмах в ЖЭТФ». В середине 1970-х Дымникова докладывала эту работу у нас на семинаре

18.3. Эраст Глинер, Astronet.ru

и сказала две важные вещи. Во-первых, данный процесс экспоненциального расширения (термина «инфляция» тогда еще не существовало) позволяет быстро создать огромный объем из микроскопического начального состояния. Это может объяснить огромный размер Вселенной. Во-вторых, это может объяснить, откуда во Вселенной такое огромное количество частиц. Вакуум с ненулевой энергией неустойчив и когда-то распался, при этом диссипируя в излучение и частицы. На стадии экспоненциального расширения плотность энергии вакуума остается неизменной, и при его распаде в единицу объема рождается определенное количество частиц. А объем-то уже экспоненциально возрос. Значит, и полное число частиц в этом выросшем объеме экспоненциально велико.

Б. Ш.: Это уже довольно мощный проблеск. Похоже, что он не был достаточно внятно зафиксирован в научной литературе. И как вы восприняли этот доклад?

В. Л.: И доклад, и вышедшая позже статья были восприняты довольно спокойно. Никаких скандалов или бурных восторгов, задали несколько вопросов, поздравили с грандиозными выводами и пожелали успехов. Я думаю, всё дело в том, что вакуум с ненулевой плотностью воспринимался тогда как экзотика. Да и сейчас это выглядит экзотично.

Ты всё спрашиваешь про догадки по поводу инфляции. Но есть еще одна важная вещь, завершающая картину: квантовые флуктуации. В принципе, квантовые флуктуации в ранней Вселенной могут давать реальные гравитационные волны и неоднородности плотности. Сначала думали, что это может реализовываться лишь в анизотропной Вселенной. Однако Леонид Гришук показал, что гравитационные волны рождаются из квантовых флуктуаций и в обычной космологии Фридмана, где никакой анизотропии нет. Зельдович поначалу отрицал такую возможность, но, почитав наброски Гришука, согласился и предложил писать совместную статью. Но статья была уже написана, и Гришук опубликовал ее сам.

Я в те времена сделал работу в том же направлении, но не для гравитационных волн, а для скалярных возмущений, благодаря

которым во Вселенной в конце концов сформировалась структура (включая галактики и их скопления) и то, что наблюдается как флуктуации реликтового излучения. Основной результат очень прост: если есть любая нестационарность, любое изменение метрики пространства со временем, то квантовые гравитационные флуктуации усиливаются и выливаются в реальные флуктуации метрики и, в конечном счете, плотности энергии. Я сделал это для общего случая нестационарной фридмановской вселенной. Сейчас это совершенно очевидно, но тогда было нетривиальным. Все понимали важность открытого тогда квантово-гравитационного эффекта рождения затравочных неоднородностей для образования галактик — ведь он был реально проверяем (каталоги распределений галактик уже начинали создаваться).

Б. Ш.: Еще ведь работа Алексея Старобинского была чуть раньше, чем знаменитая статья Алана Гута. Короче, как обычно, до первооткрывателя почти всё уже было сделано.

В. Л.: Важно то, что Гут ясно и недвусмысленно назвал все вещи своими именами. Вот дом, вот стена, вот крыша... Именно благодаря ему в космологии образовалась новая парадигма.

Б. Ш.: Давай назад, к работе Старобинского.

В. Л.: Да, интересно проследить, как возникал ручеек инфляционных моделей в период от работы Дымниковой и Глинера до знакомой всем статьи Гута (а дальше уже потекла река). Я хорошо помню, как в конце 1970-х в нашу группу приехал Виктор Гурович из города Фрунзе (ныне Бишкек, Киргизия) со своими новыми моделями, где было и экспоненциальное расширение, и отскоки



18.4. Леонид Гришук (1941–2012), ГАИШ МГУ (1967–1994), Кардиффский университет (Великобритания, с 1995 года), Astronet.ru

от сингулярности, но опирались эти сценарии не на «вакуум Глинера», а на неэйнштейновскую гравитацию с добавлением к гравитационному действию квадратичных по тензору Риччи членов (напомним, что гравитационное действие Гильберта — Эйнштейна пропорционально скаляру Риччи R). Тогда многие приезжали к Зельдовичу как к «коронованному авторитету» в области космологии — в его силах было либо зарубить статью, либо дать добро на публикацию. Статья Гуровича была опубликована в ЖЭТФ и получила дальнейшее развитие в совместных работах со Старобинским, но члены типа R^2 там закладывались руками и не имели физического обоснования. Однако идея попала на благодатную почву — Алексею удалось показать, что квадратичные поправки к действию возникают в однопетлевом приближении к квантовой гравитации. Каждое материальное поле входит со своим коэффициентом, но геометрическая структура поправок универсальна — это билинейные формы, составленные из тензоров кривизны Риччи и Римана. Тогда и появилась так называемая модель Старобинского, основанная на гипотезе о добавлении к действию Гильберта дополнительного члена, пропорционального квадрату скаляра Риччи R^2 (коэффициент, конечно, пришлось задавать феноменологически — количество и состав полей никто не знал). Эта космологическая модель модифицированной гравитации была физически мотивирована, она давала инфляционную ветвь раздувания при больших энергиях и подавляла тензорную моду возмущений в соответствии с наблюдательными требованиями.

- Б. Ш.:** Можно сказать, что это была первая достаточно проработанная модель инфляции?
- В. Л.:** Бесспорно, это была одна из первых моделей (не забывайте про вакуум Глинера!), но насколько она реальна покажет время. Во-первых, непонятно, почему только R^2 , ведь есть еще и другие поправки. Очевидно, что R^2 — это простейший (минимальный) вариант теории, просчитываемый до конца. Включение же и учет дополнительных членов приводит к новым параметрам, которые никто не в состоянии оценить и настроить.

В дальнейшем появилось множество других моделей инфляции, они посыпались как из рога изобилия. Я вспоминаю семинар Роки Колба в ЦЕРНе в начале 1990-х годов: он перечислил около 30 «работающих» моделей инфляции, совместимых с космологическими наблюдениями. Этот рынок пока не убывает, и подвижек пока не видно: прямых физических экспериментов в области очень высоких энергий нет и не будет. Вся надежда здесь на косвенные эксперименты и новые идеи.

Кстати, на примере инфляции интересно проследить, как изменилось физическое наполнение самого слова «гравитация» на протяжении XX века. Сам Эйнштейн не назвал ОТО теорией гравитации, хотя в статьях и устной речи это слово использовалось в основном как синоним «притяжения» или «тяготения». В своих книгах термин «гравитация» использовал Владимир Фок, а одна из первых книг Зельдовича и Новикова так и называлась «Теория тяготения и эволюция звезд». После открытия феномена инфляции выяснилось, что гравитация проявляется не только как притяжение, но и как отталкивание — всё дело в свойствах материи и релятивистском давлении, которое тоже гравитирует и может изменить знак гравитационной силы (как, например, в однородном случае, когда $\epsilon + 3p < 0$). В конце концов стал очевидным тот факт, что притяжение и отталкивание — это два равноценных крыла релятивистской гравитации, описываемой ОТО или другими теориями.

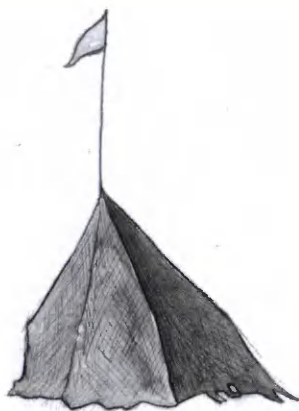
P.S. Интервью у Владимира Лукаша было взято еще до публикации финальных результатов экспериментов WMAP по измерению реликтового излучения и первых результатов более чувствительного эксперимента «Планк». Эти результаты уже закрыли целый ряд моделей инфляции, а какие-то поставили под сомнение. Видимо, утверждение, что рынок моделей инфляции не убывает, уже устарело. Из новых данных также видно, что модель Старобинского (вместе с группой других моделей, см. интервью с Андреем Линде) оказывается предпочтительней других: она лучше вписывается в совокупность данных.

Р. Р. S. Однако в связи с заявленным результатом ВІСЕР2 (глава 37) над моделью Старобинского нависла некая угроза. Насколько она серьезна, узнаем в ближайшее время.

Еще одно важное замечание. Всё, изложенное про проблески будущей парадигмы, подвержено аберрации места. Так история выглядит из России — она основана на личных впечатлениях, воспоминаниях и контактах участников. На самом деле идея носилась в воздухе по всему миру, и догадки по поводу механизма космологической инфляции высказывались в той или иной форме людьми из разных стран еще до статей Старобинского и Гута. В частности, в 1980 году японский физик Сато Кацухико опубликовал статью, где предложен механизм экспоненциального расширения, весьма похожий на излагаемый ниже сценарий Алана Гута. Однако из статьи не видно, что автор понимал фундаментальную роль этого механизма. Другое имя, которое иногда звучит в связи с ранними версиями теории, — Демосфенес Казанас. Однако, пионером все-таки был Эраст Глинер, хотя его идеи были выдвинуты в той форме, в какой они работать не могли.



18.5. Исторический снимок 1974 года, сделанный непосредственно после защиты Владимира Лукаша (второй слева). Крайний справа — Сергей Новиков (ныне академик РАН), второй справа — Игорь Новиков (ныне член-корр. РАН) Крайний слева — однокурсник Лукаша Александр Марковский



ЧАСТЬ III ПРОРЫВ

В этой части мы описываем теорию космологической инфляции, или раздувающейся вселенной, которая ответила на фундаментальные вопросы, разрешила парадоксы, касающиеся Большого взрыва, и находит всё новые подтверждения.

19. Откуда взялась Вселенная

Выше описаны детали картины, которая впоследствии получила название «космологическая инфляция». Эти детали оставалось только собрать воедино для того, чтобы выявилось нечто очень важное, произошедшее в самом начале. Напомним, Большой взрыв давно стал такой же очевидностью, как шарообразность Земли. Однако теория Большого взрыва имела одну очень смутную сторону: начальные условия. Они привели к удивительной однородности в причинно не связанных областях, к гигантским размерам, «плоской» геометрии и обеспечили громадное содержимое. Начальные условия выступили тем ковром, под который приходилось заматывать основные проблемы космологии. Причем казалось, что вопрос о начальных условиях будет в терминах науки решен не скоро, что это, скорее, вопрос для философов или, прости господи, теологов.

Оказалось, что этот проклятый вопрос решается той же силой природы, что придала Земле шарообразную форму, — гравитацией. Только не в ее тяготеющей ипостаси, а в отталкивающей.

Это был, конечно, прорыв. Возьмем на себя смелость назвать его второй космологической революцией, которая произошла в начале 1980-х годов в несколько стадий, которые мы осветим, придерживаясь хронологической последовательности.

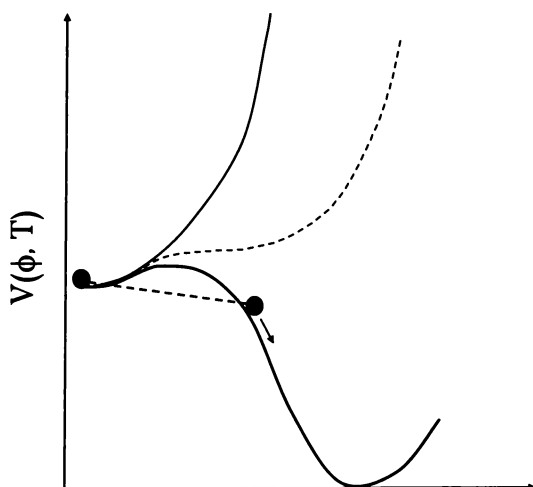
Исторически первый достаточно проработанный вариант механизма инфляции предложил Алексей Старобинский в 1980 году. В основе механизма лежала модификация уравнений Эйнштейна — такая, что сказывается только



19.1. Алексей Старобинский
(фото из «Википедии»)

при огромной кривизне пространства-времени. Модификация заключалась в добавлении члена, пропорционального квадрату кривизны пространства-времени. Основания для такой модификации были почерпнуты из квантовой теории поля. Это напоминает эффект Казимира, в котором металлические пластины «деформируют» нулевые колебания электромагнитного поля в вакууме. В модели Старобинского нулевые колебания вакуумных полей «деформируются» большой кривизной четырехмерного пространства-времени. При этом энергия вакуума не уменьшается, как в эффекте Казимира, а увеличивается, причем очень сильно. Это в точности соответствует возникновению скалярного поля, которое дает гравитационное расталкивание пространства. Тот же эффект, с другой стороны, эквивалентен действию лямбда-члена Эйнштейна, только в данном случае он не постоянен, а становится ничтожным, когда ускоренное расширение Вселенной прекратилось.

Ретроспективный анализ показал, что модель Старобинского эквивалентна более поздней и наиболее реалистичной модели инфляции с сильным полем (сценарий медленного скатывания). К сожалению, в момент появления эта работа не вызвала должного резонанса. Называют разные причины, в частности, вспоминают о самоизоляции советской науки тех времен. Однако статья была опубликована в хорошем международном журнале и впоследствии неплохо цитировалась. Более того, в свете новых данных по реликтовому излучению



модель Старобинского, дополненная работой В. Муханова и Г. Чибисова (см. ниже) вышла в число фаворитов. Сейчас, когда опубликованы окончательные данные космического микроволнового телескопа WMAP

Рис. 19.2. Потенциал поля инфлатона в сценарии Алана Гута. Разные кривые соответствуют разным температурам

19.3. Алан Гут (фото из «Википедии»)

и когда они проанализированы вместе со всей совокупностью разнообразных данных, добытых разными инструментами, видно, что эта модель лучше многих других вписывается в общую картину.

Наконец работа Старобинского завоевала заслуженную популярность. Осознавали ли сам Алексей всё значение своей работы? Действительно, в статье не говорится, что этот механизм позволяет решить главные проблемы космологии. Впрочем, лучше мы об этом спросим его самого ближе к концу книги.



Заявления, что инфляция решает основные парадоксы, совершенно явно и с изрядной настойчивостью начал делать Алан Гут, опубликовавший в том же году, но позже статью с другим механизмом космологической инфляции. Именно эта статья привела к появлению новой парадигмы. Возможно, даже не столько статья, сколько интенсивная пропагандистская кампания, которую вел Гут, выступая на десятках конференций и семинаров по всему миру, убеждая и вдалбливая.

Научные работники зачастую опасаются докладывать свои результаты, пока они не опубликованы, дескать, украдут. Как правило, это не слишком опытные ученые. Конечно, бывает, что и крадут, но редко — намного чаще не замечают или игнорируют. Особенно когда работа открывает направление, перпендикулярное мейнстриму, или находится вне сферы внимания основных действующих лиц данной области науки. В этом случае упорное продвижение новых результатов в круг внимания научной общественности — такая же неотъемлемая часть работы, как и написание статьи. Алан Гут хорошо справился с этой частью работы.

Вот сценарий Алана Гута. Существует скалярное поле с потенциалом, где есть метастабильное и основное состояния. Это, например, может быть аналог поля Хиггса, но с гораздо более высокой плотностью энергии. Такое поле может отвечать за нарушение симметрии, связанной с великим объединением. Мы этого поля не «щупали» и никогда не сможем этого сделать напрямую. Скалярное поле можно обнаружить, возбудив его — родив частицу поля, что и произошло недавно с полем Хиггса. В данном же случае частица поля имеет такую массу, что о перспективах ее рождения на ускорителях можно забыть. Однако есть достаточно сильные аргументы в пользу того, что такое поле должно существовать. Например, теория Великого объединения, в которой энергетический масштаб этого поля, т.е. характерный потенциал V_1 , неплохо экстраполируется из физики доступных нам масштабов: видно, что он лишь на два-три порядка ниже планковской энергии.

Сценарий Гута начинается с очень плотного и очень горячего зародыша Вселенной. Откуда этот зародыш взялся — отдельный вопрос, многократно обсуждавшийся. Например, микровселенная может появиться как результат редкой (но не безнадежно редкой) квантовой флуктуации. Важно, чтобы зародыш расширялся (по закону Фридмана) и чтобы все поля были в термодинамическом равновесии. Характерное время первой стадии сценария — 10^{-37} или 10^{-36} с, за это время зародыш расширился и остыл до 10^{16} ГэВ. Это важный момент, поскольку при такой температуре плотность энергии поля ϕ становится сравнимой с плотностью энергии частиц, а у эффективного потенциала поля появляется новый минимум, как показано на рис. 19.1. Это момент фазового перехода.

Но переход поля в новый минимум задерживается — происходит переохладение, подобное тому, что может происходить при замерзании воды. Поле ϕ «успокаивается», оставаясь в локальном минимуме ϕ_1 — именно в том, где величина поля равно нулю, а потенциал V_1 огромен. Это метастабильное состояние также известно как «ложный вакуум». Согласно остроумной формулировке Андрея Линде, «тяжелое ничто» (heavy nothing). По мере остывания плотность энергии статического поля всё больше начинает перевешивать тепловую плотность энергии. А давление у постоянного и однородного скалярного поля, напомним,

ним, отрицательное. И в какой то момент суммарное давление в зародыше вселенной меняет знак — становится отрицательным. Вселенная переохлаждается — скалярное поле застревает в локальном минимуме, в метастабильном состоянии. По мере охлаждения давление идет всё дальше в минус и наконец пересекает критическую черту $-1/3 \varepsilon$.

Как только это происходит, знак самотяготения вселенной меняется. До этого гравитация стремилась замедлить скорость расширения пузырька, теперь она начинает его раздувать. Размер вселенной начинает расти, кривизна уменьшается. А скалярное поле никуда не девается — оно по-прежнему занимает весь объем, лишь становится однородней. Получается тот же самый закон роста, что у размножения нейтронов при ядерном взрыве или бактерий в идеальных условиях, — экспоненциальное расширение. Каждый равный промежуток времени типа 10^{-37} с размер вселенной удваивается, а кривизна уменьшается в два раза. И это продолжается довольно долго — пока поле ϕ остается в минимуме ϕ_1 , могут пройти многие десятки или сотни времен удвоения размеров Вселенной. За это время из микроскопического зародыша вселенная становится гигантской, ее пространство совершенно «плоским» — евклидовым.

При этом скорость удаления любых двух точек друг от друга быстро становится выше скорости света. Это ничему не противоречит — точки попадают в причинно не связанные области пространства, никакая информация от одной точки к другой не может быть передана в принципе. Ограничение на относительную скорость движения тел в специальной теории относительности — локальный принцип. Он глобален в стационарной вселенной, но не в расширяющейся. Возможно, причинная связь теряется не навсегда — когда-нибудь при более медленном расширении вселенной она восстановится, но на стадии экспоненциального раздувания любой объем быстро «рассыпается» на гигантское количество ничего не знающих друг о друге областей. Однако важно то, что эти причинно не связанные области имеют общее происхождение — они помнят общие условия, с которых стартовали.

Наконец, скажем через 10^{-35} с, метастабильное поле «вскипает», выделяя свою энергию в частицы. Как это происходит? В сценарии Гута поле в отдельных местах туннелирует через потенциальный ба-

рьер в основное состояние φ_0 . При этом образуются растущие пузырьки новой фазы — истинного вакуума. Пузырьки сталкиваются, ложный вакуум «выгорает», передавая свою энергию частицам. Вселенная снова разогревается, давление меняет знак — становится положительным. Экспоненциальное расширение заканчивается.

Дальше всё снова происходит по сценарию Фридмана, только вселенная уже имеет гигантские размеры и почти нулевую кривизну. Она продолжает расширяться с замедлением и еще вырастет на много порядков, испытав в самом начале ряд других метаморфоз. При этом ей гарантировано практически вечное, а может быть и просто вечное существование.

Таков сценарий возникновения нашей Вселенной с помощью механизма космологической инфляции, который первым получил широкую известность. В этом сценарии, однако, есть один неправильный эпизод. О нем скажем ниже. Очень часто достижения, менявшие представления о мире, содержали в себе неправильные элементы: Колумб думал, что открыл периферию Индии, Коперник считал орбиты планет круговыми, Хаббл ошибся в определении своей постоянной более чем в пять раз. Гут предложил сценарий рождения Вселенной, который в данном конкретном виде работать не мог, но ухватывал суть. Поэтому прежде, чем перейти к последующим более правильным сценариям, мы перечислим важнейшие вещи, зафиксированные и четко изложенные Гутом в основополагающей статье.

Вернемся к фундаментальным вопросам, перечисленным в начале части II.

1. Почему Вселенная так велика и сбалансирована (близка к «плоской») с невероятной точностью? Потому, что инфляция раздула ее на десятки порядков, сделав кривизну Вселенной ничтожной. Напомним, согласно уравнениям Фридмана динамику расширения Вселенной определяет отношение кривизны трехмерного пространства к постоянной Хаббла (мы можем сравнивать величины разных размерностей, выразив их в планковских единицах или, в данном случае, помножив кривизну на скорость света). Это отношение Ω_k могло быть порядка единицы до начала инфляции. В процессе инфляции кривизна уменьшилась на много порядков, а по-

стоянная Хаббла не изменилась. Вселенная стала «плоской» с огромной точностью — это и есть та «точность броска», которая обеспечила огромное время расширения с замедлением до ничтожной скорости в отдаленном будущем. Если Вселенная раздулась, например на 100 порядков, то после инфляции $\Omega_k \sim 10^{-100}$. Можно говорить в терминах средней плотности Вселенной — ее отличие от критической как раз и определяется параметром Ω_k , т.е. инфляция автоматически обеспечивает точнейший баланс между скоростью расширения и плотностью — настолько точный, что он будет сохраняться неопределенно долгое время.

2. **Почему Вселенная столь однородна, хотя ее наблюдаемые области не были причинно связаны в первые мгновения? Что так согласовало параметры Большого взрыва в причинно не связанных областях?** Все наблюдаемые части Вселенной составляли одну причинно связанную область до начала инфляции. Эта связь была потеряна, но общее прошлое, а вместе с ним и общее скалярное поле остались. Поле, практически не меняясь, раздулось вместе с пространством и к окончанию инфляции было повсюду одинаковым. «Выгорание» однородного поля дало однородные условия в областях, потерявших причинную связь.
3. **Почему во Вселенной так много частиц (порядка 10^{90} только в ее видимой части)? Другими словами, откуда у Вселенной такая большая энтропия? Частицы образовались в результате распада скалярного поля, которого стало очень много — при расширении вселенной заполняющее ее поле, в отличие от газа частиц, не меняет своей плотности и остается тождественным себе самому. То есть суммарная энергия поля на инфляционной стадии росла экспоненциально. Вся эта энергия перешла в частицы. При дальнейшем расширении Вселенной число частиц в сопутствующем объеме оставалось примерно одинаковым. Причем никакого нарушения закона сохранения энергии не было: в каждый момент отрицательная гравитационная энергия связи вселенной равна по абсолютной величине энергии скалярного**

поля (а потом и энергии частиц). Так что всё содержимое огромной Вселенной получено как бы «бесплатно».

Этим вселенная как целое отличается от любого объекта внутри нее: в ней глобально не действует принцип сохранения материи — всё, что есть во вселенной, образовалось практически из ничего, вопреки классикам естествознания, начиная с древних греков утверждавшим невозможность подобного. Необъятное содержимое Вселенной перед нами. А то, что оно получено ценой абстрактной отрицательной энергии связи, не портит впечатления от грандиозного процесса творения всего из ничего.

5. **Что дало начальный толчок расширению Вселенной?** Сценарий космологической инфляции как раз и представляет собой описание этого начального толчка.

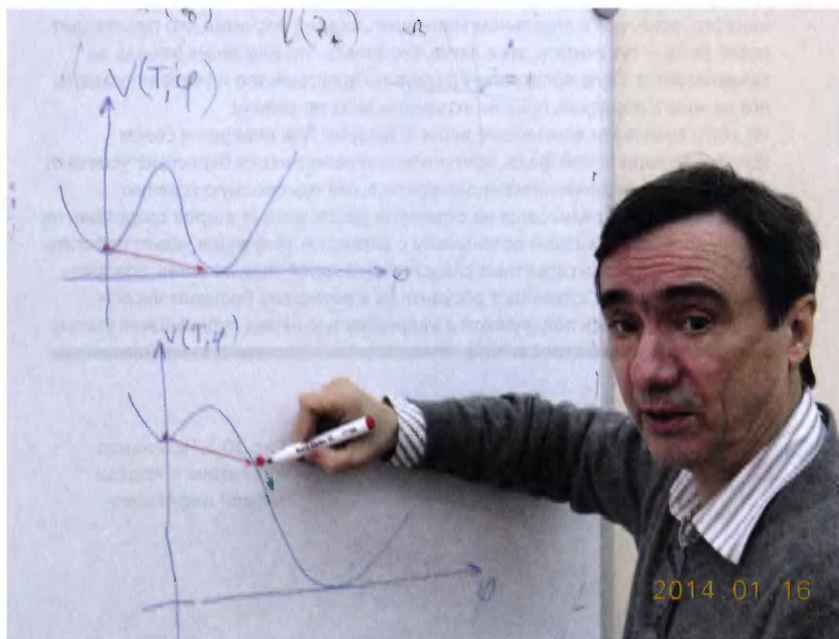
Пока оставляем в стороне четвертый вопрос: почему физика Вселенной оказалась как будто специально подогнанной под существование человека? На этот вопрос будет дан ответ ниже, когда речь пойдет о следующих стадиях развития теории.

Теперь о неправильности этого замечательного сценария. Она заключается в его конечной стадии — в выходе из режима инфляции. Гут предположил, что поле переходит в новое состояние с нулевой энергией путем туннельного перехода в разных точках — образуются пузырьки новой фазы, которые потом растут и объединяются. Оказывается, не объединяются! На самом деле пузырьки удаляются друг от друга продолжающейся инфляцией гораздо быстрее, чем они растут, — расстояние между ними увеличивается экспоненциально, и никакого темпа рождения новых пузырьков не хватит, чтобы победить эту экспоненту.

Если вернуться к исходным предположениям, то неправильной оказалась форма потенциала, точнее, барьер между двумя минимумами. Но, как выяснилось, никакой барьер и не нужен — без него всё работает лучше и проще.

20. Всё даже еще проще

Где-то году в 1982-м в столовой ФИАН произошел разговор, который хорошо запомнился Игорю Ткачёву. Рассказ об этом разговоре заслуживает того, чтобы передать его полностью.



20.1. Игорь Ткачёв иллюстрирует варианты туннельного перехода инфлатона — как это предполагалось в работе Гута (вверху) и как это должно происходить на самом деле (внизу). Снимок Б. Штерна

Игорь Ткачёв о давнем разговоре с Андреем Линде

В то время, когда работа Гута по инфляции была у всех на слуху, Андрей рассказал про некоторые свои соображения по этому поводу. Это было в фиановской столовой. Как сейчас помню, ели борщ.

В сценарии Гута инфляция заканчивается, когда поле туннелирует через потенциальный барьер. Он считал, что туннелирование происходит сразу из локального минимума в основной, как на верхнем рисунке. Для оценки вероятности он использовал так называемое тонкостенное приближение. В его сценарии образовывалось много пузырей новой фазы, которые сталкивались и объединялись в горячую однородную вселенную.

Андрей сказал, что это большой вопрос, куда туннелирует поле. А если потенциал устроен так, что второго минимума нет и кривая уходит вообще

вниз? Что тогда — туннельный переход произойдет в минус бесконечность? Да нет, конечно! То, куда оно перейдет, надо считать, и тонкостенное приближение здесь не годится. Потенциал после туннельного перехода не может стать выше из-за закона сохранения энергии. Ниже может, но не сильно ниже — вероятность этого очень мала: под барьером наберется большой отрицательный интеграл действия, который идет в экспоненту, когда считаешь вероятность.

Андрей честно посчитал, куда с наибольшей вероятностью попадает поле после туннельного перехода, причем считать пришлось на компьютере — это не так просто. Оказалось, поле туннелирует немного ниже минимума на склон, как на нижнем рисунке. И здесь, на склоне, его значение велико — не намного ниже, чем в локальном минимуме. Андрей посчитал, что происходит после этого — тут считать даже легче. Оказалось, что инфляция отнюдь не заканчивается. Поле продолжает раздувать пространство и успевает раздуть его на много порядков, пока не «сползет» вниз по склону.

Из этого следовали важнейшие вещи: сценарий Гута неверен в своем конце — пузыри новой фазы, протуннелировавшие через барьер, не успевают объединиться, перемешаться и разогреться, дав однородную горячую вселенную, — они разнесутся на огромные расстояния. И второе следствие: не нужно изобретать хитрые потенциалы с барьером. Инфляция может работать и без них. Это очень серьезные следствия, и Андрей, еще не очень доверяя своим результатам, стремился обсудить их с возможно большим числом коллег, заручившись поддержкой и уверенностью перед публикацией статьи.

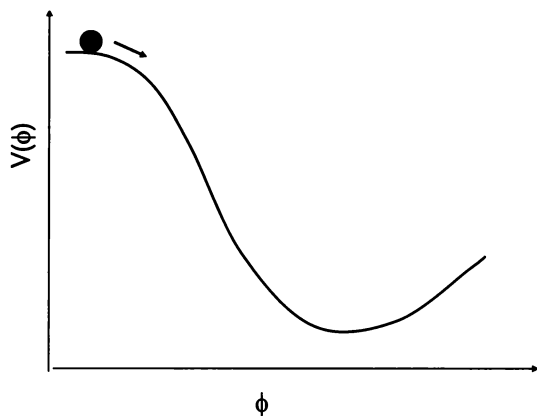


Рис. 20.2. Потенциал инфлатона в модели «новой инфляции»

Итак, потенциальный барьер был призван задержать скалярное поле в локальном минимуме, чтобы оно успело раздуть вселенную прежде, чем «упадет» в основное состояние. Но, оказывается, поле и без барьера может «застрять» вблизи своего первоначального значения. Для этого нужно, чтобы расширение было быстрым, а потен-

циал поля положим. На языке хорошо знакомых явлений быстрое расширение играет роль вязкого трения, а наклон потенциала $V(\varphi)$ аналогичен наклону поверхности, по которой катится шарик. Есть разные возможности сконструировать скалярное поле. Вариант, предложенный взамен сценария Гута Андреем Линде и на три месяца позже Андреасом Альбрехтом и Полом Стейнхардтом, — потенциал с плоской вершиной при нулевом поле и минимумом в стороне, как изображено на рис. 20.2.

Вход в стадию инфляции, как и в сценарии Гута, — термодинамический: горячая протовселенная расширяется и адиабатически охлаждается. Если в начале поле находится в термодинамическом равновесии при высокой температуре, оно должно «сесть» в нуль. Это довольно общее свойство систем — находиться при высокой температуре в наиболее симметричном состоянии (на самом деле изображенный потенциал похож на донышко бутылки в комплексных координатах, и нуль оказывается центром симметрии). При расширении зародыша вселенной опять происходит переохлаждение, и инфляция стартует точно так же, как изложено выше. И точно так же вселенная успевает раздуться на десятки порядков величины, пока поле, преодолевая вязкое трение, катится вниз с «полой горки».

Разница в том, что в этом сценарии поле, не встречая никаких барьеров, в конце концов целиком сваливается в минимум. Потенциальная энергия поля превращается сначала в энергию его колебаний, а потом в конечном счете передается рождаемым частицам. Наступает новое термодинамическое равновесие, дальше всё идет по хорошо знакомому закону Фридмана, хотя впереди остается еще много нетривиальных событий.

Этот вариант выхода из инфляции пережил придирчивую проверку многими авторами — он действительно работает при достаточно общих предположениях.

Как в исходном сценарии Гута, так и в новом сценарии (он так и называется: «новая инфляция») остается один этап, который для своего объяснения требует слегка напрячься: как протовселенная добралась до старта инфляции? Она должна была достаточно расшириться и остыть, чтобы скалярное поле с отрицательным давле-

нием перевесило энергию частиц и переменных полей. Дистанция от планковского состояния до начала раздувания относительно невелика, и проблема ее преодоления решается несравненно проще, чем создание огромной Вселенной без механизма инфляции. И всё же зазор в три порядка по температуре и интервал в миллион планковских времен требуется преодолеть (он именно таков, если механизм приводится в действие полем масштаба великого объединения). Вероятно, для описания этого скачка можно было бы использовать что-то вроде квантомеханического описания подбарьерного туннелирования (распад ядер и т.п.). Можно было бы... если бы существовала наука под названием «квантовая гравитация». Увы, до применения квантовой механики к подобным задачам еще далеко. Но, по крайней мере, концепция туннельного перехода дает подходящую метафору (см. рис. 20.3), позволяющую легко смириться с проблемой доинфляционной стадии.



20.3. Микеланджело. Сотворение мира. Фрагмент

21. ...И еще проще

Следующий важный шаг сделал Андрей Линде уже без других претендентов на приоритет. На самом деле всё может быть еще проще — инфляция может произойти без всяких хитростей типа специального потенциала с плоским максимумом в нуле и без термодинамического равновесия с переохлаждением. Возьмем произвольное поле с естественным чашеобразным потенциалом.

Предположим, что вблизи планковского состояния образовался фрагмент пространства-времени, заполненного скалярным полем. «Вблизи» означает удаление от планковских условий, достаточное для того, чтобы фрагмент мог рассматриваться в рамках классической теории. Пусть поле будет достаточно однородным, а вклад горячей материи незначительным. Тогда давление в нем может оказаться отрицательным, удовлетворяющим условию инфляции: $p < -1/3 \epsilon$.

Примет ли эта инфляция «вселенский» масштаб (т.е. раздует пространство на много порядков) или тут же прекратится? Это зависит от того, насколько пологий склон потенциала и насколько быстро пошло раздувание. Напомним: скорость раздувания (постоянная Хаббла) играет роль вязкого трения. Для большой скорости раздувания требуется большое отрицательное давление, значит, и большая плотность энергии, она же — потенциал поля ($V(\varphi)$ на картинке и ϵ в формуле совпадают, если поле однородно и постоянно). А для пологости склона ось X должна быть длинной, т.е. величина φ должна быть большой. Величина поля имеет размерность массы, и необходимое значение ока-



21.1. Андрей Линде, 1989 год.
Фото из архива А. Линде

зывается больше планковской массы. Ничего страшного, величина поля — достаточно абстрактная величина, главное, чтобы значение потенциала было ниже планковского масштаба — тогда есть классическое пространство-время, с которым можно работать. Еще важно, чтобы поле было достаточно однородным в некоторой области пространства, в несколько раз превышающей размеры горизонта.

Так вот, если «чаша» потенциала достаточно широка и если природа пробует любые стартовые условия, то она обязательно попробует и те, что перечислены выше. И тут уже возврата нет — готова гигантская вселенная. И не только... Но об этом «не только» — ниже

Из-за того, что для запуска механизма достаточно подходящей комбинации из разнообразного множества случайных начальных условий, Андрей Линде назвал этот сценарий хаотической инфляцией. Только надо помнить, что термин «хаотический» относится лишь к старту. В дальнейшем всё происходит как и в предыдущем варианте — вполне регулярно и с предсказуемым исходом.

Большое преимущество этого сценария в том, что не требуется ни термодинамического равновесия, ни фазового перехода, предшествующих инфляции. В сценариях Гута и «новой инфляции» цепочка событий выглядела следующим образом: горячая вселенная — переохлаждение — инфляция — горячая вселенная. В случае с хаотической инфляцией первые две стадии, каковые, безусловно, являются обузой, отпадают. Не надо больше объяснять, как установилось доинфляционное термодинамическое равновесие (далеко не очевидно, что это возможно), не нужен весьма специфический вид потенциала и т.п.

Пожалуй, хаотическая инфляция и есть общепринятая ныне концепция зарождения Вселенной, точнее, ее часть.

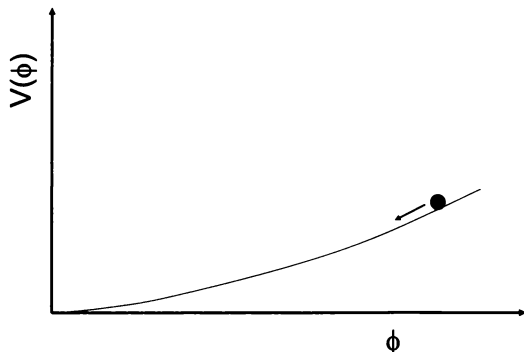


Рис. 21.2. Схема потенциала в концепции хаотической инфляции: поле находится на склоне потенциала, но скатывается настолько медленно, что пространство успевает раздуться на десятки порядков

22. Почва под ногами

В этот момент, прежде чем продолжать рассказ, стоит остановиться и задаться вопросом: а не потеряна ли у нас почва под ногами? Мы заглянули в такие дикие масштабы природы, которые невозможно ни представить, ни воспроизвести, — откуда у нас может быть уверенность, что наши методы познания работают и там? Не является ли всё вышеизложенное лишь буйной фантазией теоретиков, которую невозможно хоть как-то сопоставить с опытом?

Про сопоставление с опытом речь пойдет ниже, а сейчас попробуем понять статус теории на уровне общих соображений.

Во-первых, в науке уже есть немало примеров, когда теория, экстраполированная из земных лабораторий на недостижимые масштабы, получала фактическое подтверждение. Пример из области космологии — первичный нуклеосинтез. Модель горячей Вселенной описывает, как в первые секунды и минуты от Большого взрыва менялась температура и плотность. Зная из земных экспериментов, как протекают ядерные реакции, можно оценить, сколько каких элементов синтезировалось из протонов и нейтронов в ранней Вселенной. Это вычислили. Потом определили состав межгалактических облаков газа по линиям поглощения в спектрах далеких квазаров. Всё совпало. Это довольно старый результат, есть гораздо более эффектные примеры того, как теоретики предсказывали явления на совершенно запредельных масштабах, а потом это блестяще подтверждалось наблюдениями. Об одном таком случае (сахаровские осцилляции) рассказано в главе 31.

Во-вторых, теория, на основе которой построен изложенный выше сценарий, очень жесткая и никаких безудержных фантазий не допускает. Посмотрим, как выглядит космологическая инфляция с точки зрения критерия фальсифицируемости Поппера. Согласно Попперу, только та теория может претендовать на звание научной, которая может быть опровергнута. Напомним, что первый получивший широкую известность вариант инфляции Гута был тут же опровергнут из-за теоретической несостоятельности.

А как насчет экспериментальной фальсифицируемости? Предположим, что какую-то часть темной материи составляют черные дыры планковской массы или какие-то другие экзотические вещи, скажем, космические струны и т.п., которые могли образоваться только ДО инфляции. Во время инфляции и тем более после нее они образоваться не могут, поскольку требуют для своего рождения очень больших возмущений метрики, близких к планковским по своей амплитуде. А плотность энергии при инфляции недостаточна для возникновения таких возмущений. Если подобные объекты будут обнаружены, то теорию инфляции можно считать отвергнутой. По данной теории вся «околопланковская» экзотика разнесена на гигантские расстояния, так что плотность доинфляционных образований на десятки порядков меньше плотности обычного вещества. Если это не так, инфляции быть не могло.

Теория инфляции могла бы быть поставлена под сомнение, если бы оказалось, что средняя плотность всех видов энергии во Вселенной существенно отличается от критической. В теории инфляции такое могло получиться только случайно с весьма малой вероятностью. Это к вопросу об эмпирической фальсифицируемости теории космологической инфляции. Ниже, в интервью с Вячеславом Мухановым, перечислены другие жесткие критерии, невыполнение которых означало бы, что теория инфляции должна быть отвергнута. Она пока все их успешно проходит.

Еще один аргумент в пользу теории, на сей раз «эстетический»: концепция инфляции проста, красива и эффективна. Эффективна в том плане, что, исходя из очень простых предположений, объясняет сразу несколько фундаментальных парадоксов происхождения Вселенной.

Такая теория обязана работать! Правда, никогда нельзя окончательно отрицать, что могут появиться и другие теории, которые будут работать еще лучше. Об этом мы поговорим в конце книги.

Как же насчет верифицируемости? Что касается эмпирических подтверждений, так они пока косвенные, но их несколько и вместе они весьма убедительны. Подтверждения заключаются в том, что все предсказания теории инфляции, которые удалось проверить, выполняются. Мы вернемся к ним ниже, а сейчас только один факт: космологическая инфляция (правда, намного более медленная) идет прямо сейчас, и это факт, твердо установленный с помощью наблюдений.

23. Инфляция здесь и сейчас

Где-то с 1980-х годов стало возникать подозрение, что с расширением Вселенной по классическому закону Фридмана что-то не так. В интервью с Владимиром Лукашем, уже было упомянуто, что в 1970-х Ганн и Тинсли опубликовали данные, говорящие в пользу расширения Вселенной с ускорением. Тогда это казалось нонсенсом и не могло быть принято всерьез. Однако в 1990-х, когда теория космологической инфляции уже получила широкое признание, некоторые космологи начали поговаривать об ускоренном расширении современной Вселенной как о реальной возможности. Одна из причин состояла в том, что измерения постоянной Хаббла всё уверенней давали высокие значения, означавшие слишком маленький возраст Вселенной, если бы она расширялась с замедлением. Постепенно ускоренное расширение Вселенной превращалось из экзотической гипотезы в рабочий сценарий, и стали появляться работы с аргументами в его пользу.

Наконец, в 1998 году вышли статьи двух групп с одинаковым выводом: данные по далеким сверхновым свидетельствуют об ускоренном расширении Вселенной. Первая статья (Адам Рисс и др.) опубликована Группой поиска сверхновых с большим z (High z Supernova Search Team). Вторая (Сол Перлмуттер и др.) — группой Проекта космологии сверхновых (Supernova Cosmology Project). Обе группы охотились за очень далекими сверхновыми типа Ia.

Почему именно этот тип? Потому, что такие сверхновые — лучшая «стандартная свеча» огромной яркости, видимая с космологических расстояний. По своей природе это белый карлик, постепенно набиравший массу за счет перетекания вещества с соседней звезды. Белый карлик очень прост и предсказуем: он сопротивляется дальнейшему сжатию огромной силой тяготения за счет давления вырожденного ферми-газа электронов в своих недрах (это эффект из области квантовой механики — электроны не дают звезде сколлапсировать по той же причине, по которой электроны атома не падают на ядро). Однако у массы белого карлика есть четкий предел имени

Чандрасекара, выше которого давление электронного ферми-газа не способно удержать тяготение. Как только белый карлик набирает вес до этого предела, он взрывается. Взрыв при этом грандиозен и, главное, стандартен как по яркости, так и по кривой блеска — взрываются одинаковые по массе и по устройству объекты. Небольшая разница может быть связана с химическим составом (важно число электронов на единицу массы, разное для водорода и, например, железа), но эта зависимость калибруется по форме кривых блеска. Далекие сверхновые важны потому, что их яркость чувствительна к разным вариантам кинематики Вселенной, только если звезда взорвалась на огромном (космологическом) расстоянии.

Сверхновые типа Ia

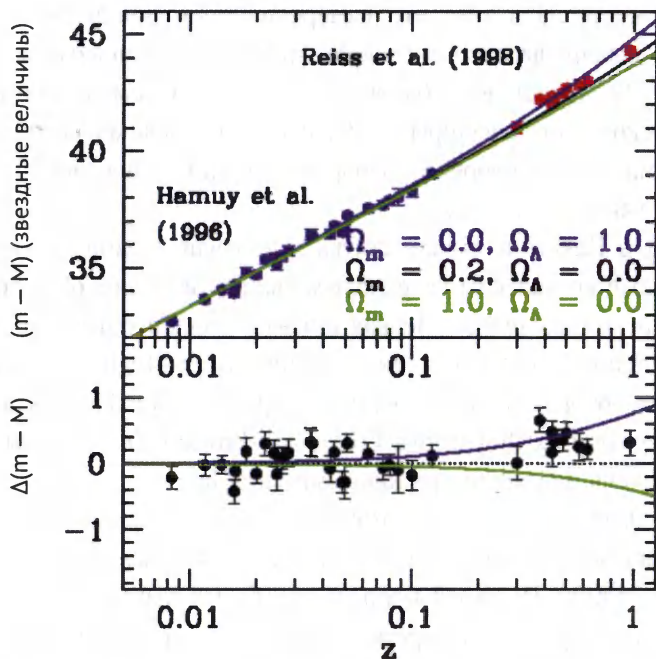


Рис. 23.1. Диаграмма Хаббла для сверхновых Ia из статьи A. Reiss et al., По горизонтальной оси — красное смещение. По вертикальной оси — звездная величина сверхновой за вычетом ее абсолютной звездной величины. На общедоступном языке это означает $2,5 \log (L_{10}/L)$, где L_{10} — светимость данного объекта, как он наблюдался бы с 10 парсек, L — светимость, наблюдаемая с Земли. Чем выше точка, тем ниже наблюдаемая светимость. Линии соответствуют разным космологическим параметрам (см. в тексте). На нижней панели — та же диаграмма, отнормированная на теоретическую зависимость для $\Omega_m = 0,2; \Omega_\Lambda = 0$

На рисунке — диаграмма Хаббла для далеких и близких сверхновых, опубликованная в статье Группы поиска далеких сверхновых. Сверху — диаграмма Хаббла как она есть, снизу — отнормированная на «нулевую гипотезу». В качестве последней авторы приняли плотность материи (обычной и темной) 0,2 от критической ($\Omega_m = 0,2$), как показывали в то время данные наблюдений, и предположение, что больше во Вселенной ничего нет.

Мы видим, что разные модели Вселенной согласуются с данными по-разному. Эффект вроде бы небольшой. Точки для далеких сверхновых отклоняются вверх от нулевой гипотезы в среднем всего лишь на величину стандартной ошибки. Но поскольку точек много, и все отклоняются вверх, факт отклонения оказывается статистически значимым. Отклонение вверх в данных координатах означает меньшую яркость (примерно на 20–30%). Значит, сверхновые дальше, чем предсказывает «нулевая модель». Значит, расширение происходило дольше и немного по другому закону. Чтобы свести концы с концами, требуется расширение с ускорением. Чтобы расширение шло с ускорением, у Вселенной должно быть уравнение состояния с отрицательным давлением, как это изложено в главе 13: $p < -1/3 \varepsilon$. Значит, содержимое Вселенной не ограничивается обычной и темной материей, значит, в ней также есть совсем другая субстанция. Ее называли «темной энергией». Вклад в темной энергии состав Вселенной обозначается как Ω_Λ — по ассоциации с лямбда-членом Эйнштейна.

Очень скоро вышла статья Перлмуттера с соавторами, где число далеких сверхновых на диаграмме Хаббла было уже около 30, и они свидетельствовали об ускоренном расширении Вселенной уверенней. Но часть космологической общественности медлила с признанием этого факта. Например, списывали наблюдаемое отклонение на эволюционный эффект, дескать, раньше химический состав белых карликов был другим. Но сомнения оставались недолго.

В том же 1998 году (и еще несколько раз позднее) в Антарктиде проводился эксперимент BOOMERanG (Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics). Аэростат с микроволновым телескопом запускали на волю циркулярных ветров «Полярной воронки», и за две недели он подобно бумерангу (в чем был второй смысл аббревиатуры) описывал круг на высоте около 40 км. Наблю-

далась лишь небольшая часть неба, зато с хорошим угловым разрешением. Результат оказался поразительным. На угловом спектре неоднородностей реликтового излучения проявился четкий пик под названием «акустический». О том, что это такое, подробно рассказано в главах 30 и 31. Вскоре открытие было подтверждено экспериментом MAXIMA с еще меньшим охватом неба, но с еще большим угловым разрешением.



23.2 BOOMERanG перед запуском. На заднем плане — вулкан Эребус («Википедия»)

Положение акустического пика четко свидетельствовало: наша Вселенная трехмерно-плоская, или, иными словами, евклидова. Это значит, что сумма плотностей энергии всех субстанций во Вселенной точно равна критической. В то же время измерения масс скоплений галактик по разбросу скоростей уверенно давали значения средней плотности Вселенной заметно меньше критической — не более 30%. Этот предел включал всю материю, подверженную гравитационной неустойчивости, — обычную и темную. И если мы видим, что плотность энергии обычной материи вместе с темной не выше 0,3 критической, значит, по меньшей мере еще недостающие 0,7 содержатся в совсем другой субстанции, давление которой должно быть отрица-

тельным, иначе вообще концы с концами не сходятся. Потом последовали новые подтверждения из изучения крупномасштабной структуры Вселенной а также из данных новых космических микроволновых телескопов. Сейчас ускоренное расширение Вселенной — столь же твердо установленный факт, как и то, что Земля имеет форму эллипсоида.

Что из себя может представлять темная энергия, составляющая около 70% содержимого Вселенной? Первый возможный ответ: это вакуум с ненулевой плотностью энергии. Почему она могла оказаться ненулевой? Во-первых, потому, что, как уже обсуждалось выше, вообще непонятно, почему энергия вакуума близка к нулю — она может быть любой из-за огромных нулевых колебаний полей, дающих вклад разного знака. Во-вторых, пространство может быть заполнено неким скалярным полем, находящимся в стационарном состоянии — в минимуме потенциала, который, тем не менее, отличен от нуля. Эти два варианта различаются лишь терминологически. В обоих случаях имеем уравнение состояния $p = -\varepsilon$ и определенный прогноз: Вселенная всегда будет расширяться экспоненциально, если только вдруг вакуум не окажется метастабильным и не «перепрыгнет» в более низкое состояние. Тогда случится катастрофа. В обоих случаях, перефразируя выражение Андрея Линде, мы имеем дело с «легким ничто» плотностью 10^{-29} г/см³.

Второй вариант: темная энергия — это скалярное поле, находящееся не в минимуме, а «на склоне» своего потенциала. Тогда оно постепенно меняется, находясь в режиме медленного скатывания. В этом случае давление находится где-то в интервале между $-1/3 \varepsilon$ и $-\varepsilon$. Такой вариант темной энергии называется «квинтэссенция». Это уже «легкое нечто»: у квинтэссенции есть выделенная система отсчета и определенная динамика. В принципе, параметр ω в уравнении состояния темной энергии ($p = -\omega\varepsilon$) поддается измерению — квинтэссенцию можно отличить от вакуума. Это дело обозримого будущего.

Как бы там ни было, благодаря открытию темной энергии теория инфляции получила новую опору. Пусть это уже не та инфляция, а на много порядков более медленная — принцип тот же. Между прочим, темная энергия, как и инфлатон, раздувавший Вселенную

перед Большим взрывом, тоже из области невообразимо далеких от нас масштабов, но далеких в другую сторону: низкая энергия, низкая плотность. Как поле, раздвигшее вселенную в первые мгновения ее существования, так и темная энергия связаны с новой физикой — мы ничего не знаем ни про первое, ни про второе напрямую из лабораторных экспериментов. Но если масштаб взаимодействий, ответственных за раннее раздувание, просматривается вдали как результат экстраполяции экспериментальных данных, то уровень темной энергии не связан с нашей физикой никак, по крайней мере, не видно, как он может быть связан. Таким образом, явление, наблюдаемое нами воочию, более загадочно, чем ранняя инфляция. И вместе с тем оно явно демонстрирует, что найденный «на бумаге» механизм, призванный объяснить происхождение Вселенной, прекрасно работает прямо сейчас, неважно, что с другими параметрами и другим результатом.

Кстати, насчет результата современного раздувания. Никто не может исключить, что когда-нибудь (скажем, через триллион лет), раздув нашу Вселенную на много порядков, это «слабенькое» скалярное поле тоже не «выгорит», породив совершенно новый мир из частиц ничтожной массы, образующих связанные структуры огромного размера на основе взаимодействий, неизвестных нам из-за своей слабости. Интересно, что скопления галактик никуда не денутся и в ту эпоху. Как уже предположено в главе 1, кое-где и тогда будут происходить рецидивы массового образования звезд. И разумные жители тех планетных систем никак не ощутят, что Вселенная перешла в новую фазу жизни, — слишком эфемерными для их инструментов будут эти новые структуры. Но в них будет заключаться основное содержимое будущей Вселенной. Это только предположение, но отнюдь не бессмысленное.

24. Рябь Вселенной

Пока мы описали только часть сценария возникновения Вселенной. Ту часть, которая объясняет, откуда взялись начальные условия, давшие огромную однородную Вселенную с богатым содержанием. Но есть и другой вопрос, который поначалу казался не столь фундаментальным: откуда взялись галактики, их скопления и более крупная структура Вселенной, называемая крупномасштабной. Этот вопрос встал во весь рост в 1970-х годах и тоже относился к начальным условиям при возникновении Вселенной: без неких первичных неоднородностей всё наблюдаемое великолепие не смогло бы появиться.

Как выглядит современная Вселенная? Она однородна в целом, на больших масштабах, — скажем, на расстояниях 300 мегапарсек (миллиард световых лет) однородность соблюдается с хорошей точностью. На меньших масштабах есть галактики, скопления галактик и так называемая крупномасштабная структура, похожая на трехмерную сеть с перепонками, — нечто ячеистое неправильной формы. Самый крупный масштаб этих неоднородностей — примерно 100 мегапарсек (300 млн световых лет). Крупномасштабная структура была выявлена на трехмерных картах распределения галактик в 1980-х годах.

Пространство внутри ячеек, между перепонками, называется *войдами* — там практически нет галактик. Толщина стенок — около одной десятой от их размера. Там, где стенки пересекаются, плотность еще выше, а в узлах находятся гигантские скопления галактик.

Контраст плотности в этой структуре довольно велик. В стенках плотность вещества на порядок больше, чем в войдах. В волокнах на пересечении стенок — еще на порядок выше. А в узлах, где находятся гигантские скопления галактик, плотность порядка на три выше средней. Откуда взялась эта сеть, скопления галактик, сами галактики? Оказывается, если бы Вселенная изначально была абсолютно однородной, то эта структура не смогла бы возникнуть.

Любая среда, заполняющая пространство, подвержена гравитационной неустойчивости, носящей имя Джинса. Любые сгущения стремятся сжаться под действием собственного тяготения. Сжатию может препятствовать давление среды, но если неоднородность имеет достаточно большой размер (критический размер Джинса пропорционален скорости звука в среде), то сгущение начинает сжиматься — сначала по экспоненциальному закону, затем при ряде условий может перейти в режим свободного падения. Именно неустойчивость Джинса привела к образованию звезд в галактиках.

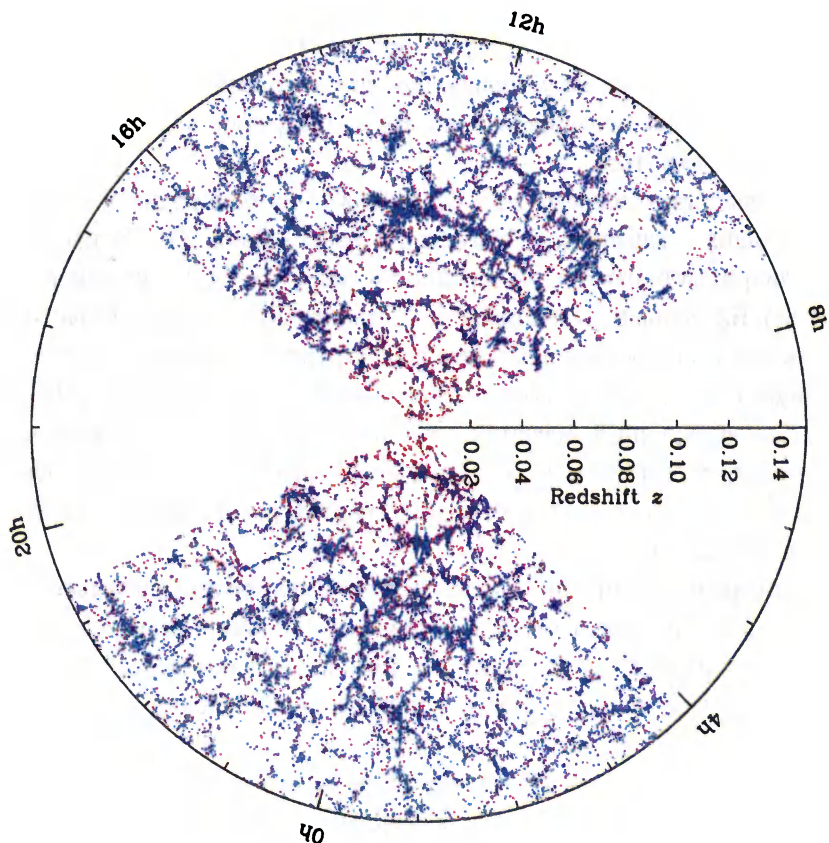


Рис. 24.1. Крупномасштабная структура Вселенной по данным Слоановского цифрового обзора неба (Sloan digital sky survey). Сюда попал «срез» неба раствором $2,5^\circ$. Темные сектора — плоскость Галактики, где наблюдения затруднены из-за пыли. Синими точками обозначены эллиптические галактики, красными — остальные. Некоторые массивные и плотные скопления галактик приобретают вид радиально направленных черточек из-за большого разброса скоростей — эти скорости добавляются к измеренному красному смещению

В случае расширяющейся Вселенной неустойчивость работает иначе. Возмущения растут медленнее: не по экспоненте, а линейно — контраст возмущений растет пропорционально масштабному фактору Вселенной. В какой-то момент, когда сгущение становится гравитационно связанным, рост становится нелинейным, причем на стадию нелинейности раньше выходят неоднородности меньшего размера — галактики и скопления галактик. А еще раньше — первые звезды, которые были гигантскими.

Ячеистая структура из стенок и войдов не успела выйти на нелинейную стадию (и уже не выйдет). Как она образовалась? Трудно допустить, что начальные возмущения плотности имели такую хитрую структуру. Ответ прост: крупномасштабная структура является сетью каустик.

Подобное явление можно наблюдать на стене, куда падает свет, отраженный от поверхности воды с легкой беспорядочной рябью. Или в виде аналогичной световой картины на мелком дне. Мы видим подвижную сетку из ярких полос. Именно сеть, а не плавные перепады яркости, подобные самой ряби. Помните, что писал Николай Гумилёв про жирафа:

*...И шкуру его украшает волшебный узор,
С которым равняться осмелится только луна,
Дробясь и качаясь на влаге широких озёр.*

Это в точности про сеть каустик в отражении от ряби, на которую действительно похожа раскраска жирафа. Математически суть «волшебного узора» и крупномасштабной структуры одна и та же, только на воде фокус происходит с углом отражения или преломления, а в случае крупномасштабной структуры — со скоростями и расстояниями — гравитационная неустойчивость в расширяющейся Вселенной работает так, что материя преимущественно накапливается на ближайшей плоскости сгущения.

Еще в 1970 году Я.Б. Зельдович аналитически показал, что положительная флуктуация плотности собирается в плоский блин (термин «блины» прижился надолго). Таким образом, структура из пересекающихся блинов была предсказана еще до своего открытия. Впо-

следствии путем моделирования с привлечением всё возрастающих вычислительных ресурсов ячеистая структура была воспроизведена во всем ее великолепии.

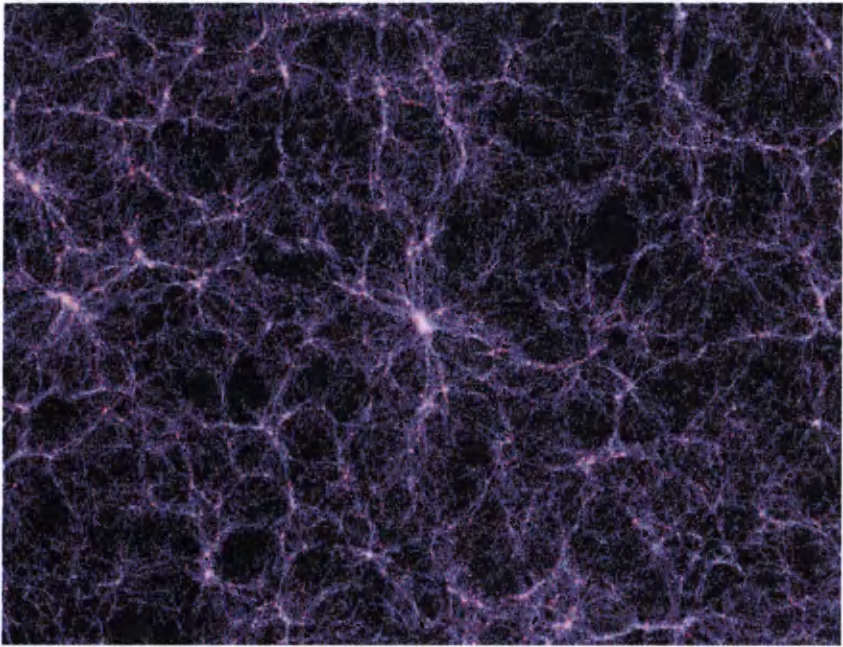


Рис. 24.2. Результат численного эксперимента «Миллениум», в котором моделировался рост первичных возмущений из-за гравитационной неустойчивости, вплоть до образования галактик и их скоплений. Каждая точка на рисунке — галактика. Яркие пятна — большие скопления галактик. Архив изображений Астрофизического института Общества Макса Планка (МПА) www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/

Но ни ячеистая структура, ни галактики, ни их скопления не смогли бы возникнуть, если бы ранняя Вселенная была совершенно однородной. Известный закон роста возмущений диктует, что для появления наблюдаемой структуры контраст неоднородностей плотности в эпоху рекомбинации должен быть чуть больше одной тысячной: Вселенная с тех пор расширилась в тысячу раз, и контраст должен был вырасти в тысячу раз, чтобы стать порядка единицы и перейти в нелинейную стадию, образовав галактики.

Эпоха рекомбинации важна здесь потому, что у нас есть «фотография» Вселенной этого возраста (380 тыс. лет) — карта реликтового микроволнового излучения. Значит, мы должны видеть эту затравочную «рябь» на карте реликта! Причем неоднородности тем-

пературы реликтового излучения вроде должны быть того же порядка, что и контраст плотности, хотя и не точно такими же: при переводе одного контраста в другой замешан ряд нетривиальных эффектов.

В 1970–1980-х годах сложилась довольно напряженная ситуация. Уже делались измерения реликтового излучения с хорошей чувствительностью. Однако оно выглядело однородным даже тогда, когда уровень чувствительности в одну тысячную был достигнут на наземных радиотелескопах. Тогда наиболее чувствительной установкой был РАТАН-600 на Северном Кавказе (радиотелескоп Академии наук диаметром 600 м). Первый результат, доложенный руководителем научной программы радиотелескопа Юрием Парийским, вызвал недоверие. Получалось, что неоднородностей температуры реликтового излучения нет на уровне 10^{-4} . А как же тогда образовались галактики!? Кое-где раздавался ропот, что данные неверны. Но вскоре результат об отсутствии неоднородностей с контрастом 10^{-4} был подтвержден на других радиотелескопах. А предел по данным РАТАН-600 был снижен до уровня 10^{-5} и даже меньше. Это заставило изрядно поволноваться космологов — вырисовывался самый настоящий кризис. Почва уходила из-под ног: мы видим галактики и их скопления, точно знаем, как эволюционируют неоднородности, но не видим того, из чего они должны развиваться.

25. Темная материя, спасительная и неувловимая

Здесь на сцену вышла темная материя. Примерно в то же время стало ясно, что галактики существенно тяжелее, чем составляющие их звезды, газ и пыль. В галактиках есть что-то еще, поскольку они вращаются слишком быстро — требуется большая масса, чтобы своим тяготением уравновесить центробежную силу. Появился даже кандидат на роль темной материи — нейтрино. Если у нейтрино есть небольшая масса, то реликтовые нейтрино, подобные реликтовым фотонам, но уже медленные из-за своей массы, могут скапливаться в галактиках и делать их тяжелее. Как раз к месту появился и экспериментальный результат, дававший массу нейтрино около 30 эВ — даже больше, чем требовалось. Как выяснилось, результат этот был неверным, но мысль о массивном нейтрино продолжала носиться в воздухе — она, по крайней мере, смягчала кризис.

Если у нейтрино есть масса, например 10 эВ, то во времена рекомбинации газ нейтрино составлял большую часть массы Вселенной. И что важно, нейтрино были уже медленными еще задолго до рекомбинации. Гравитационная неустойчивость на большом масштабе неоднородностей начала работать для них раньше, чем для обычного вещества (нейтрино очень слабо взаимодействуют и распространяются во Вселенной свободно начиная с первых секунд после Большого взрыва). Поэтому к моменту рекомбинации они могли создать большие ямы гравитационного потенциала (в пересчете на современную Вселенную — 20 мегапарсек и больше), куда потом «стечет» обычное вещество, образовав крупномасштабную структуру. С помощью нейтрино удавалось свести концы с концами, если первичные неоднородности, запечатлевшиеся в реликтовом излучении, оставались на уровне одной десятитысячной. Но этот уровень был уже пройден — на нем не обнаружилось никакой анизотропии!

Выход мог быть лишь один: темная материя состоит из неизвестных частиц, почти не взаимодействующих с обычным веществом, скорее всего, гораздо более тяжелых, чем нейтрино, и более тяже-

лых, чем протоны. Нужно, чтобы в первые минуты Вселенной они уже были медленными. Подобная темная материя получила название «холодной». В этом случае контраста начальных неоднородностей чуть больше, чем 10^{-5} , хватает, чтобы к моменту рекомбинации темная материя успела «скомковаться» до контраста 10^{-3} , необходимого для образования галактик. Обычное вещество потом потянется за темной материей. При этом сеть каустик, о которой шла речь выше, формируется именно темной материей, и лишь потом обычная барионная материя стягивается в эту сеть и подсвечивает ее образовавшимися звездами. Так и возникает крупномасштабная структура.

25.1. Центральная часть массивного скопления галактик Abell 1689. Голубые дуги — изображения галактик, находящихся за скоплением, растянутые и усиленные из-за эффекта гравитационного линзирования. С помощью подобных дуг измеряют массу скопления и даже распределение массы по его площади. Из этих оценок видно, что для объяснения огромной массы скопления не обойтись без темной материи, количественно превосходящей обычную в несколько раз.



Получается так: первичные неоднородности (их происхождение обсуждается ниже) имели амплитуду $5 \cdot 10^{-5}$ (современная оценка) — как в темной, так и в обычной материи. До эпохи рекомбинации обычная материя осталась с тем же контрастом — в ней слишком большое радиационное давление и нет условий для развития гравитационной неустойчивости. А в холодной темной материи условия есть! Поэтому до эпохи рекомбинации она могла увеличить свой контраст почти на два порядка. Но не больше — на большее не хватает времени. Выходит, первичные неоднородности, а значит, и неоднородности обычного вещества к моменту рекомбинации и анизотропия реликтового излучения (которые близки по величине) не могут

иметь контраст меньше, чем 10^{-5} ! Это противоречило бы факту формирования галактик. Анизотропия 10^{-5} (которая традиционно обозначается как дисперсия температуры излучения $\Delta T/T$) была последним рубежом, дальше которого теория не могла отступать — за этим рубежом начиналась мистика. А из заявлений команды РАТАН-600 следовало, что этот рубеж уже пройден. Перед космологией как наукой замаячила суровая проблема. Почва уходила из-под ног: мы видим галактики и их скопления, точно знаем, как эволюционируют неоднородности, но не видим того, из чего они должны развиваться. Казалось, еще немного — и останется только развести руками: космология как наука не работает — никто ничего не понимает.

Проблема рассосалась к концу 1980-х, началу 1990-х годов. Серия экспериментов в космосе («Реликт», COBE) показала, что неоднородности реликтового излучения существуют, и их амплитуда как раз порядка 10^{-5} , чуть выше. Наука выстояла!

Что касается данных РАТАН-600, то, похоже, просто произошла некоторая путаница в определениях величин. Сейчас видно, что РАТАН-600 не мог достигнуть уровня 10^{-5} — этому препятствовали существующие фоны галактического происхождения и аппаратные шумы.

Тем не менее, напряженность, вызванная долгим ожиданием открытия анизотропии реликтового излучения (в которую внес свою лепту РАТАН-600), сыграла большое значение, приведя теоретиков в тонус, заставив их как следует продумывать модель холодной темной материи. В частности, поэтому обнаружение анизотропии реликтового излучения было встречено во всеоружии.

В существовании темной материи не сомневается почти никто из ученых: она очень нужна в космологии и астрономии, причем ставит всё на свои места. Известно, сколько ее, примерно известно, какими свойствами она должна обладать. Но в современной физике частиц темная материя остается загадкой. В стандартной модели элементарных частиц нет ничего похожего на темную материю. Дело в том, что она требует новой физики. Есть теории, имеющие статус гипотез, где такие частицы существуют. В принципе, темная материя может быть найдена, если она хоть как-то связана с обычной. Если она, пускай слабо, взаимодействует с обычными частица-

ми, то ее можно зарегистрировать в больших детекторах, расположенных глубоко под землей. В других экспериментах пытаются обнаружить поток нейтрино из центра Земли или от Солнца — частицы темной материи могут скапливаться там под действием тяготения и аннигилировать друг с другом, рождая нейтрино. Пока ничего не нашли.



25.2. Столкновение двух скоплений галактик. Наложены три изображения: оптическое (галактики), рентгеновское (розовый цвет — горячий газ) и реконструкция распределения массы (синий цвет), сделанная с помощью гравитационного линзирования. Галактики с их звездами свободно прошли друг через друга и с ними — облака темной материи, в которых заключена основная масса (два синих облака). А газ скоплений, который по массе на порядок превосходит звезды галактик, неупруго провзаимодействовал — облака газа отстали от своих скоплений

Если темная материя распадается на обычные частицы, в частности, на гамма-кванты, то последние можно обнаружить в космосе. Уже было несколько не подтвердившихся заявлений по этому поводу:

- Утверждалось, что вклад от распада темной материи видят в данных космического гамма-телескопа EGRET, но потом выяснилось, что это результат неправильного учета свойств детектора.

- Утверждалось, что космический спектрометр PAMELA регистрирует избыток позитронов, каковой объясняется распадом темной материи, но оказалось, что позитроны неплохо объясняются и обычными астрофизическими источниками.
- Утверждалось, что космический гамма-телескоп «Ферми» «увидел» особенность в спектре электронов больших энергий. Но после тщательной калибровки инструмента особенность «рассосалась».
- Наконец, в данных «Ферми» нашли пик в спектре гамма-квантов высоких энергий, летящих от центра нашей Галактики. Это приписали аннигиляции частиц темной материи. Уже вышли десятки, если не сотни работ на эту тему. Автор недавно (в январе 2013 года) собственноручно проверил этот пик по открытым данным — вместо того, чтобы стать более значимым за последний год наблюдений, пик этот тоже практически «обнулится». То есть это была статистическая флуктуация.

Таким образом, темная материя пока старательно ускользает от нас.

26. Сверхскопления галактик как результат квантовых эффектов

Итак, современная структура Вселенной, включая скопления галактик и сами галактики, выросла из небольших флуктуаций плотности, которые прекрасно отражены на карте реликтового излучения. Далее приходится задаться вопросом: откуда взялись эти затравочные неоднородности? Мы видим их в эпоху рекомбинации, мы видим, что их амплитуда была порядка 10^{-5} . До этой эпохи возмущения барионной компоненты вырасти практически не успели — они были такими с самого начала. С какого начала? Что породило эти флуктуации?

Оказывается, космологическая инфляция умеет делать и это.

Напомним, что в квантовой механике любое поле имеет нулевые (вакуумные) колебания, которые обычно не наблюдаемы. Скалярное поле, вызывающее инфляцию, — тоже. Но при разных видах воздействия вакуумные колебания могут становиться реальными флуктуациями полей — волнами, частицами — в зависимости от конкретной ситуации.

Ускоренное расширение пространства — один из видов такого воздействия. Вакуумное колебание поля имеет шанс превратиться в реальную флуктуацию, если пространство за период колебания данной частоты существенно расширится. Именно это и происходит при космологической инфляции.

Напомним, скорость расширения выражается через постоянную Хаббла H , для случая инфляции $a = a_0 \cdot e^{Ht}$, где a — расстояние между произвольной парой точек пространства (масштабный фактор, определенный с точностью до постоянного множителя). Обратная величина $1/H$ — время, за которое все расстояния в расширяющемся пространстве увеличиваются в e раз (для простоты слога ниже будем пользоваться словом «удвоение»).

Величина H пропорциональна квадратному корню из плотности энергии скалярного поля. Если «мотором» инфляции (инфлатоном) является поле, связанное с физикой великого объединения (как поле

Хиггса связано с физикой электрослабого взаимодействия), то естественное значение H , выраженное в планковских единицах, — где-нибудь 10^{-6} , а время удвоения расстояний — 10^6 планковских времен, т.е. 10^{-37} с. Это не обязательно точно так, просто остановимся на этих числах как на вероятной возможности.

При такой инфляции наиболее эффективно «реализуются» флуктуации с периодом порядка тех же 10^{-37} с, или характерного размера 10^{-27} см. Меньшие по размеру флуктуации не генерируются. Большие — генерируются, но с меньшей амплитудой, поэтому можно считать, что основные флуктуации инфлатона происходят именно на масштабе 10^{-27} см. Какова их амплитуда? Грубо говоря, ее относительная величина порядка $H \sim 10^{-6}$. Более точное значение определяется конкретной зависимостью $V(f)$.

Итак, самые сильные квантовые возмущения скалярного поля, раздувающего вселенную, рождаются с размером около 10^{-27} см. Через каждые 10^{-37} с их размер удваивается. Через 10^{-36} с увеличивает-ся в тысячу раз. А всё это время возникают новые флуктуации исходного размера. Работает своеобразный конвейер — флуктуации рождаются всё время, пока продолжается инфляция, возникают и растягиваются. А их амплитуда при этом не меняется, как не меняется и само поле. Допустим, инфляция продолжается 10^{-35} с — это вполне вероятно (равно как и 10^{-32} с, может быть и больше). За это время происходит сотня удвоений размера первых флуктуаций. Это рост на 30 порядков. Самые первые флуктуации растягиваются до размера 10 м. Цифра условная, поскольку если инфляция продлится вдвое дольше, то максимальный размер флуктуации намного превзойдет современный размер горизонта Вселенной. Итак, если инфляция идет с постоянным темпом, в результате имеем к ее завершению спектр возмущений поля с одинаковой амплитудой, простирающийся от 10^{-27} см до макроскопических величин. Такой спектр (амплитуда не зависит от длины волны) называется плоским. Или спектром Гаррисона — Зельдовича (по имени авторов, впервые предположивших, что первичные флуктуации описываются таким спектром, еще задолго до появления концепции космологической инфляции). В реальности темп инфляции меняется и спектр слегка отличается от плоского. Этот важный факт обсуждается в следующих главах.

Инфляция заканчивается «скатыванием» инфлатонного поля к нулю, причем это «скатывание» происходит с ускорением. В конце инфляции все флуктуации усиливаются в результате переходного процесса до относительных амплитуд плотности $5 \cdot 10^{-5}$ (среднеквадратичное отклонение). С таких значений впоследствии начинается их эволюция.

Картина квантового рождения первичной ряби Вселенной была впервые и довольно исчерпывающе изложена в работе Вячеслава Муханова и Геннадия Чибисова в 1981 году. При этом они опирались на сценарий Старобинского.

Итак, по завершении инфляции Вселенная перешла на обычный режим расширения по инерции — по сценарию Фридмана. Всё ее содержимое к этому моменту было «сотворено» — все частицы, правда, имевшие другой тип, чем сегодня. Ее температура была порядка 10^{16} ГэВ, если измерять ее в единицах, привычных для физиков высоких энергий, или 10^{29} градусов Кельвина. С тех пор она расширилась почти на 29 порядков. Положительные флуктуации плотности, имевшие размер в десяток микрон на конец инфляции, превратились в гигантские скопления галактик, содержащие сотни триллионов звезд. Напомним, еще раньше десятимикронная флуктуация появилась как квантовый эффект на масштабе 10^{-27} см. Таким образом, любое скопление галактик, любая галактика — прямой потомок микроскопической квантовой флуктуации, растянутой до микронных размеров за время инфляции и еще на 29 порядков — по инерции после ее окончания.

27. Логарифмическая история Вселенной

Попытка представить огромное скопление галактик, спрессованное в сферу диаметром 10 мкм, перекручивает мозг в барабанный рог. Если без предисловий рассказать про данный факт человеку, далекому от космологии, он скорее всего скажет, что это ерунда, что такого быть не может — здравый смысл протестует! При этом никаких рациональных аргументов против человек сформулировать не сможет. Чтобы урезонить здравый смысл, надо приучить его к логарифмической шкале явлений. Кстати, шкала, доступная непосредственному восприятию человека, не как уж коротка. Безо всяких устройств наш глаз способен окинуть сотню километров ландшафта, оценив расстояние, и разглядеть детали в одну десятую миллиметра. Это девять десятичных порядков. Во времени человек воспринимает даже больший диапазон — от десятой доли секунды почти до века — десять порядков. История Вселенной простирается от планковского времени (10^{-43} с) до нынешнего ($4 \cdot 10^{17}$ с) — 60,5 порядка. Нынешний размер Вселенной неизвестен — он может быть как 10^{31} , так и 10^{100} см. Но можно взять за максимальный масштаб размер современного горизонта $5 \cdot 10^{28}$ см. Тогда диапазон расстояний, начиная от планковского масштаба и кончая горизонтом, — 61 порядок. Теперь можно изобразить историю Вселенной в дважды логарифмической шкале. Для начала проследим судьбу квантовых флуктуаций — как они росли и развивались после инфляции.

Здесь важно выбрать удобную систему отсчета для времени. Мы не знаем, сколько продолжалась инфляция, — как показано в следующей части, ее продолжительность могла быть любой. По сути, у нас есть только одна точка, за которую мы можем зацепиться — окончание инфляции и переход к фридмановской стадии. Треки на рис. 27.1 начинаются от времени 10^{-37} с, характеризующего темп инфляции, — это условность, на самом деле переход от инфляции к фридмановскому расширению происходил не мгновенно. Саму инфляцию откладываем в отрицательную область, нуль будет ее окончанием. Ее удобнее изобразить в линейной шкале на отдельном рисунке (рис. 27.2).

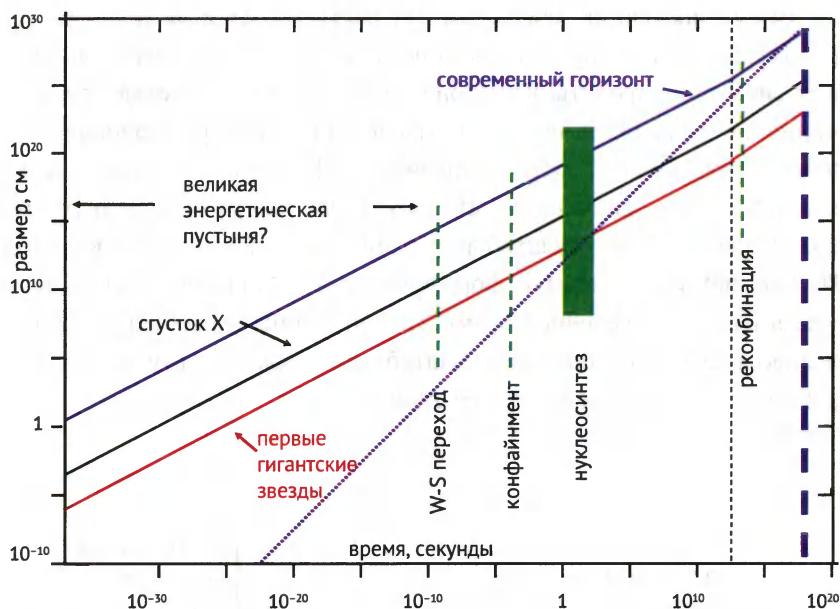


Рис. 27.1. История Вселенной после инфляции в дважды логарифмическом масштабе. Линиями показано, как менялся со временем размер области пространства, ставшего видимой частью Вселенной (горизонт), большой галактикой (сгусток X) и первыми гигантскими звездами. Вертикальные пунктиры показывают фазовые переходы материи во Вселенной. Наклонный пунктир показывает размер горизонта

Когда инфляция заканчивается, треки выходят на степенную зависимость $a \sim t^{1/2}$ (степенной закон в дважды логарифмической шкале выглядит как прямая линия с наклоном, равным показателю степени). Такой закон расширения возникает из решения уравнения Фридмана для вселенной, в которой доминируют ультрарелятивистские или безмассовые частицы. Такая ситуация продолжается до $t \sim 3 \cdot 10^{12}$ с (80 тыс. лет, незадолго до эпохи рекомбинации), после чего в балансе энергии Вселенной начинают доминировать холодные частицы (темная материя и барионы). При этом меняется уравнение состояния Вселенной — давление падает почти до нуля, и закон расширения меняется на $a \sim t^{2/3}$ (см. главу 13).

В самом конце добавляется новое экспоненциальное расширение, связанное с темной энергией, но пока оно слишком мало, чтобы его можно было увидеть в масштабе рисунка.

Прямая линия, пересекающая весь рисунок, — размер горизонта. При инфляции практически все флуктуации плотности, кро-

ме самых последних, очень быстро растягиваются за пределы горизонта и таким образом «замораживаются». Возмущение не может эволюционировать, когда оно распределено по множеству причинно не связанных областей. После инфляции расширение становится медленней роста горизонта, и флуктуации вновь входят под горизонт — сначала те, что поменьше, потом большего размера. Скорость роста масштабов увеличивается на отметке времени 80 тыс. лет и приводит к формированию наблюдаемой структуры уже в возрасте вселенной во многие миллионы и миллиарды лет — в довольно узкой полосе в масштабе рисунка. Об этом более подробно рассказано в следующей главе.

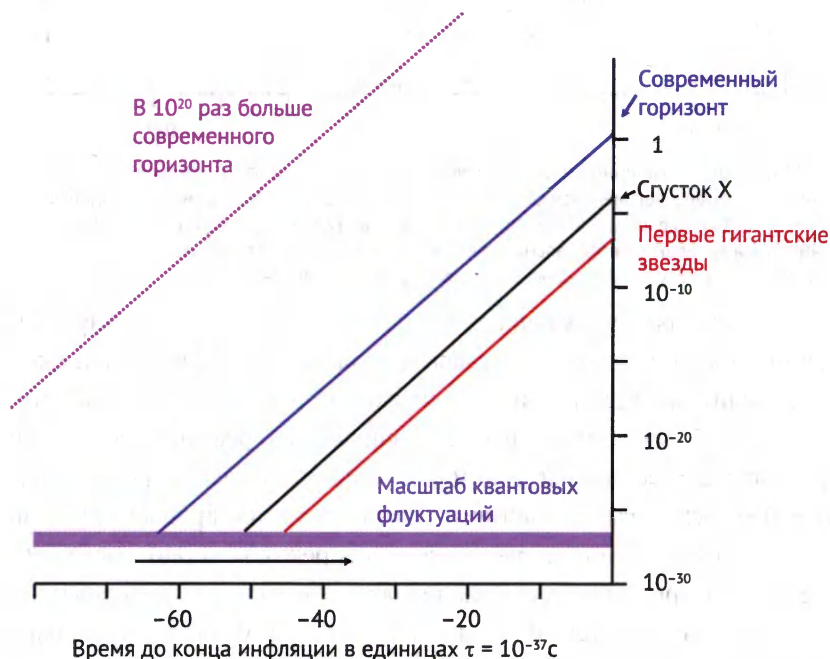


Рис. 27.2. Рост масштабов неоднородностей во время инфляции. Сиреневая полоса обозначает пространственный масштаб, на котором всё время до $\tau = 0$ рождаются квантовые флуктуации. Линии показывают, как растут неоднородности, соответствующие будущим знакомым нам объектам. Поскольку продолжительность инфляции не имеет четкого ограничения, она могла продолжаться и тысячу единиц времени — тогда треки роста первых флуктуаций придут к $\tau = 0$ на метр выше начала координат, достигнув значения порядка 10^{500}см — вполне возможно что Вселенная имеет такой или еще больший размер. Линии для простоты изображены прямыми — на самом деле при подходе к $\tau = 0$ темп инфляции снижается и линии плавно загибаются.

Наша эпоха, когда существуют планетные системы и возможна жизнь, в данном масштабе не больше ширины штрихов линии, обозначающей современную Вселенную на рис. 27.1 (справа). А между стадией инфляции и электрослабым фазовым переходом лежит самая долгая в логарифмическом плане эпоха, про которую мы мало что можем сказать. Есть подозрение, что в эту эпоху не происходило ничего интересного: по своей температуре эпоха соответствует так называемой Великой энергетической пустыне — области от сотен гигаэлектронвольт до 10^{16} ГэВ. Вероятно, где-то там сформировалась барионная асимметрия, возможно, жили разнообразные суперсимметричные партнеры нынешних частиц — фотино, скварки... Конечно, никто не даст голову на отсечение, что и посредине пустыни не происходило что-то интересное, просто это никак не просматривается из физики частиц в ее современном состоянии.

Могли ли на этом логарифмически длиннейшем отрезке истории случиться «искусства, знания, войны, троны и память сорока веков»? Для этого прежде всего нужны частицы с массой, на много порядков превосходящей температуру Вселенной. Сейчас температура $3 \cdot 10^{-4}$ эВ — масса электрона на 9 порядков больше. В принципе, такие частицы могли остаться от эпохи окончания инфляции — с массой чуть меньшей, чем масштаб великого объединения, скажем, 10^{15} ГэВ. Допустим, есть какой-то закон сохранения, заставляющий эти частицы жить долго, например 1 нс — до конца эпохи энергетической пустыни. Вполне возможно, что они могли бы образовывать что-то вроде атомов и молекул.

Однако, первая проблема заключается в том, что этих частиц оказалось бы маловато внутри горизонта Вселенной того времени. К концу эпохи энергетической пустыни таких частиц внутри горизонта оказалось бы где-то 10^{50} — на 30 порядков меньше, чем барионов внутри нынешнего горизонта. Это число примерно того же порядка, что число барионов в Земле. Явно мало, учитывая, что пространство внутри горизонта быстро расширяется.

Следующая проблема заключается в том, что эти частицы не успели бы сконденсироваться в космические тела. И, наконец, достаточно ли 1 нс для эволюции структур в их естественном масштабе времени? Вопрос о том, что такое естественный масштаб времени,

не так прост, но, вероятно, для очень грубой оценки можно использовать единицы атомного времени, определяемого с помощью принципа неопределенности как $t \sim \hbar/E$, где E — энергия связи электрона в атоме. Для внешних оболочек в атоме примем $E = 10$ эВ, тогда характерное атомное время будет 10^{-16} с. За последние 3 млрд лет (10^{17} с) прошло 10^{33} атомных времен. Этого хватило на всё.

Энергия связи электрона в атоме по меньшей мере на пять порядков меньше массы электрона. Наши гипотетические частицы эпохи конца Великой энергетической пустыни имеют массу не более 10^{15} ГэВ, и если следовать аналогии, то энергия связи в гипотетических атомах должна быть не больше 10^{10} ГэВ. Соответствующее атомное время — 10^{-34} с. В таком случае за интересующую нас эпоху в 1 нс прошло 10^{25} атомных времен, что соответствовало бы 30 годам в пересчете на наши атомы. Явно мало.

Таким образом, за длинную, богатую метаморфозами логарифмическую историю Вселенной только наш короткий интервал в полпорядка богат на сложные эволюционирующие структуры. А гораздо больший интервал в 14 порядков и впрямь остается пустынным.

28. Судьба сгустка X

Итак, инфляция приготовила затравочные возмущения плотности энергии. Они растягивались в пространстве, покрывая огромный диапазон размеров и имели примерно одинаковые амплитуды на всех масштабах. Это изложено в общих чертах в главе 24, а сейчас попробуем проследить более подробно судьбу одной положительной флуктуации плотности, которая при окончании инфляции имела размер около микрона. Назовем эту флуктуацию «сгусток X», хотя слово «сгусток» на тот момент является некоторым преувеличением — его контраст, т.е. относительное превышение плотности всего около $5 \cdot 10^{-5}$ (взяли среднеквадратичное отклонение).

При тех параметрах инфляции, которые мы приняли в главе 24, сгусток X родился размером 10^{-27} см и раздулся на 24 порядка за 70 удвоений масштаба. По времени это заняло чуть меньше 10^{-35} с, отделяющих конец инфляции от момента рождения сгустка X. Если следовать нашим допущениям, то при рождении сгусток X имел массу примерно 10 г, а по выходу из инфляции — 10^{71} г при почти микроскопическом размере, что на много порядков больше массы наблюдаемой части современной Вселенной. Избыток его массы над окружением тоже превосходил все мыслимые величины. Но этот микронный сгусток не мог сколлапсировать в черную дыру: он расширялся со скоростью, на много порядков большей скорости света, что не противоречит специальной теории относительности, поскольку сгусток X был растянут на огромное число причинно не связанных областей. По этой же причине его контраст оказался «замороженным»: одни части сгустка X ничего не знали о других частях, не чувствовали их тяготения — он как будто оказался разбит на огромное множество независимых вселенных.

Но со временем ситуация изменилась. Размер сгустка X, как и масштабный фактор Вселенной, увеличивался как корень квадратный из времени. А размер горизонта рос пропорционально времени. Когда-нибудь пропорциональная зависимость обязательно перешибет корневую. Для сгустка X это произошло в возрасте Вселенной око-

ло трех месяцев. Он оказался внутри горизонта и приобрел причинную связность: разные части сгустка почувствовали тяготение друг друга. В этот момент сгусток сильно потерял в массе (энергии), которая составляла уже 10^{49} г, или 10^{16} масс Солнца. Потеря массы связана с работой по расширению Вселенной, совершаемой давлением вещества. Энергия сгустка X (а его масса $m = E/c^2$ складывалась из энергии ультрарелятивистских частиц) пошла на уменьшение его отрицательной гравитационной энергии связи.

С этого момента контраст сгустка благодаря его самотяготению начал расти.

Мы хорошо знаем состав Вселенной той поры. Он складывался из водородно-гелиевой плазмы, фотонов, почти безмассовых нейтрино и медленно движущихся частиц темной материи. Львиная доля энергии-массы заключалась в фотонах и нейтрино. Они (как и связанная с фотонами плазма) не могли поддаваться самотяготению из-за своего огромного давления. А темная материя могла подчиняться гравитации, поскольку была не зависима от фотонов и обладала ничтожным давлением. Именно ее контраст начал расти, правда, медленно — как логарифм времени. В первые месяцы доля темной материи была ничтожной — порядка одной тысячной от плотности энергии фотонов с нейтрино. Но соотношение росло в пользу темной материи: ее количество в сопутствующем объеме не менялось, а фотоны с нейтрино остывали, и их вклад уменьшался.

Паритет наступил в возрасте 80 тыс. лет. К этому моменту логарифмический рост довел контраст сгустка до $3 \cdot 10^{-4}$. При этом изменилось уравнение состояния Вселенной, ее расширение пошло по другому закону: масштабный фактор a стал зависеть от времени t как $a \sim t^{2/3}$ (до этого, напомним, расширение шло по закону $a \sim t^{1/2}$). А рост возмущений при этом ускоряется еще радикальней: из логарифмического он превращается в линейный. К отметке 80 тыс. лет масса сгустка X составила порядка 10^{13} масс Солнца и с тех пор изменилась менее чем в два раза — в массе стала доминировать холодная темная материя, которая никуда не девается. Контраст темной материи продолжал расти, но обычное (барионное) вещество по-прежнему не участвовало в гравитационном росте возмущений по той же причине: давление излучения намного превосходило силы

самотяготения. Однако, плазма с излучением продолжали жить своей весьма интересной жизнью: они были подвержены акустическим колебаниям плотности. Эти колебания привели к важнейшему эффекту: акустическим (или сахаровским) осцилляциям, которые непосредственно наблюдаются на карте реликтового излучения. Это явление и роль, которую оно сыграло, описаны ниже в главе 28.

В возрасте 380 тыс. лет происходит рекомбинация, барионы «отклеиваются» от фотонов. Реликтовое излучение сохранило и донесло до нас карту распределения плазмы той поры, и мы видим возмущения с амплитудой порядка 10^{-5} . Но реально возмущения плотности темной материи в то время были в сто раз больше и продолжали расти. Контраст сгустка X составил $2 \cdot 10^{-3}$ и продолжал расти. После рекомбинации барионное вещество стало вести себя в больших масштабах как пыль (давление пренебрежимо) и скатываться в ямы гравитационного потенциала, образованные темной материей, догоняя последнюю по амплитуде возмущений. Сгусток X стал сгустком не только темной, но и обычной материи.

Как только амплитуда возмущений становилась порядка единицы, начинался более быстрый нелинейный рост, заканчивающийся формированием объектов. Со сгустком X это произошло в возрасте 2–3 млрд лет. Он оказался гравитационно связанным и перестал расширяться вместе со Вселенной.

Конечно, любой сгусток не оставался изолированным — распределение плотности Вселенной было наложением неоднородностей разных масштабов. Сгусток X сам был неоднородным, включал в себя более мелкие уплотнения. Поэтому он разбился на группу небольших галактик, в которых начали интенсивно рождаться звезды. Вероятно, потом эти галактики слились, и часть сгустка X объединилась в одну большую галактику. Может быть, в нашу.

С другой стороны, он входил в состав какой-то неоднородности большего размера. Из этой неоднородности позже, возможно, образовалось скопление галактик а из еще большего — стенка крупномасштабной структуры.

Из рис. 27.1 видно, что возмущения меньшего размера раньше входят под горизонт, значит, начинают расти раньше и потому раньше выходят на нелинейный рост. Первые астрофизические послед-

ствия дали возмущения, стартовавшие от размера 10^{-6} см после инфляции (красная линия). В возрасте сотни миллионов лет они вышли на нелинейную стадию и дали начало первым звездам, которые были гораздо больше современных, имея другой химический состав и другие параметры устойчивости.

Эти звезды обладали массой около 100 масс Солнца, но масса вещества (вместе с темной материей), вовлеченного в конденсацию каждой из этих звезд, была в тысячи раз больше. Неоднородности массы меньше 10^5 масс Солнца в ту эпоху не могли образовывать объектов из-за значительного давления вещества. Меньшие объекты возникли позже в галактиках. Самыми крупными объектами, которые успели образоваться, стали элементы крупномасштабной структуры, которые не являются гравитационно связанными и находятся на линейной стадии до сих пор.

Такова судьба микроскопических квантовых флуктуаций метрики пространства, возникших за 10^{-35} с до конца космологической инфляции.

29. Реконструкция из-подо льда.

Здесь надо перевести дух и вернуться к европейцам с их научными проблемами, которые нам, живущим на планете с прозрачной атмосферой, кажутся совсем простыми. Из-подо льда они простыми не кажутся.

Лишенные возможности видеть за пределами ближайших сотен метров, европейцы попробовали прощупать окружающее пространство через ледяной панцирь посредством самого панциря. Для этого был предпринят дорогой и длительный эксперимент под названием «Второе дыхание». Он продолжал прошлый эксперимент «Небесное дыхание», который выявил существование Большого Аттрактора огромной массы, вокруг которого обращается Мир.

Между этими экспериментами прошло много времени, и, можно сказать, пролегла пропасть, точнее — кризис цивилизации. Эпоха удовлетворения приказала долго жить благодаря переходу через критическую точку, предсказанную математиком Хурум Бразом.

Теория была проста до очевидности. Инфраструктура цивилизации ветшает и требует регулярного ремонта. Элементы инфраструктуры взаимосвязаны, и одна поломка влечет за собой цепную реакцию неполадок. Обычно всё идет благополучно, поскольку инфраструктура чинится и модернизируется. Это продолжается до тех пор, пока хватает специалистов, способных чинить и модернизировать. Казалось бы, эти специалисты не должны перевестись даже в эпоху удовлетворения, поскольку существуют детальные писанные правила и инструкции, пользоваться которыми можно выучить последнего идиота. Однако аварии и поломки бывают как штатные, предусмотренные инструкциями, так и нештатные, когда единственное спасение заключается в специалисте, умеющем самостоятельно принимать решения в незнакомой ситуации. Хурум Браз показал на обильном статистическом материале, что доля подобных нештатных поломок около пяти процентов.

Но главная заслуга Хурум Браза заключалась в его теореме о критическом числе специалистов, способных действовать вне рамок инструкций. Как только доля последних упадет ниже 8,2%, число неполадок начинает расти лавинообразно по экспоненте. Вскоре за конечное время (по оценке Хурум Браза, за одно поколение) наступает полный коллапс цивилиза-

ции, и темп аварий и поломок падает до нуля из-за исчезновения предмета неполадок. При этом образование в эпоху удовлетворения вело к планомерному снижению числа европиан, способных мыслить самостоятельно, что признавалось даже оппонентами Хурум Браза. Такая способность не соответствовала духу времени и признавалась идеологами эпохи излишней, а то и вредной.

И всё же математик ошибся. Он полагал, что критическая точка будет пройдена через полпоколения, тогда как на самом деле она была пройдена уже в момент публикации его статьи. К тому же время достижения коллапса оказалось вдвое короче предсказанного. Таким образом, Хурум Браз получил возможность воочию наблюдать торжество своей теории во всех деталях, таких как паническая скупка продуктов, грабежи, голод в городах, расправы над правителями. Цивилизация окончательно рухнула, когда остановились последние электростанции на гейзерных струях — разрушился крепеж турбин из-за коррозии и вибрации, протекли обмотки генераторов.

Однако потом произошло то, что ученый не предсказал, так как это уже выходило за пределы его компетенции. Цивилизация проявила удивительную живучесть. Шок заставил многих европиан очнуться — они с удивлением обнаружили, что вызубренные в школе сведения не просто словесные заклинания. Иногда они, будучи применены к окружающей действительности, помогают выживать. Бывшие винтики цивилизации, столкнувшись лицом к лицу с настоящим миром, были вынуждены учиться через кровь и пот, осмысливая знания, добытые предками. Потом этот феномен назовут «шоковой педагогикой».

Стремительность кризиса обернулась быстрым восстановлением. Так, страны разрушенные войной, быстро встают из руин, а медленно деградировавшие цивилизации веками прозябают во мраке. Бывшие инженеры и учителя осваивали выращивание донных моллюсков и питательных растений на samozaxваченных клочках поверхности. Вскоре началась стихийная самоорганизация, разделение труда и так далее — всё, что уже проходили, только в сотни раз быстрее.

Однажды собралась большая бригада крепких европиан, сделавшая то, что казалось невозможным. Они с помощью воротов, веревок, катков, ползьев со старинной тягловой песней («Ломим-ломим жморов дрынь, жморов дрынь! Гнется-гнется жморов дрынь, жморов дрынь!» — и т.п.) водрузили валявшуюся неподалеку турбину на фундамент, обрамлявший мощную гейзерную струю. И когда, закрепив ее уцелевшими шпильками, опустили затвор холостого выпуска, турбина, издав поначалу отвратительный скрежет и выплюнув облако мути, пришла в движение и стала набирать оборо-

ты. Потом восстановили обмотки генератора, пропитав их по рецепту предков смолой черного стланика, и генератор заработал. Наконец, оживили гидролизную установку, давшую первое послекризисное топливо. И первый винтоход, бывший среднемерный контейнеровоз по имени «Неукротимый», будучи отремонтирован и заправлен, отправился в триумфальный круиз по оживавшим развалинам.

На подходе к поселениям его встречали стаи бродячих улзений — сначала издавая испуганно-агрессивный треск и наливаясь багрово красным свечением. Потом, осозная, что чудовище не обращает на них внимания, любопытные улзени осторожно подплывали. Наконец, будто вспомнив, как встречали винтоходы их предки, начинали радостно носиться вокруг с отрывистым попискиванием, искрясь зелеными вспышками.

Изумленные поселенцы возникали из темноты, светясь бледно-голубым. Половина из них видела живой винтоход впервые. Выслушав парламентаров, они пытались задарить команду самыми вкусными моллюсками и провозжали корабль, резко вздергивая конечности и вспыхивая голубым светом, что означало высшую степень сердечности в пожелании счастливого пути.

«Неукротимый», уходя с эскортом возбужденно чирикающих искрящихся улзений, оставлял за собой поселения, зараженные надеждой, переходящей в уверенность: они тоже могут, у них всё получится — кончится убогое существование, будет энергия, топливо, яркий свет, медикаменты, связь, защита от мародеров — они всё это сделают сами, размяв руки и объединившись.

С круиза «Неукротимого» восстановление пошло в режиме цепной реакции. Цивилизация возрождалась в новом качестве. Ее героями были уже не звезды масс-медиа, а созидатели. Как только началось восстановление индустрии, взялись за науку. Ее тоже пришлось восстанавливать из руин, но, к счастью, кое-что сохранилось. Сохранились ученики докризисных ученых, впитывавшие знания и навыки в условиях, близких к подполью. Остались в живых и в ясном уме даже некоторые из тех ученых, которые сделали себе имя еще до кризиса. Их были единицы, они были весьма стары, но ценились на вес золота.

Одним из первых больших научных проектов и стал эксперимент «Второе дыхание». Он заключался в следующем.

К небу на разных широтах прикрепили несколько так называемых «пищалок» — акустических станций с параболическими тарелками, посылающими звуковые лучи в разных направлениях. Излучатели запитывались от генераторов со стабильной частотой, и сигнал одновременно передавался вниз по кабелю, так что приемники на дне могли запросто регистрировать сдвиг фазы акустического сигнала, определяя смещение с точностью

до одного когтя. Причем не только вертикальные смещения, но и горизонтальные. Конечно, точность в коготь была чисто теоретической, практически картину портили конвективные течения. Их пытались измерять и учитывать, в результате точность составила двадцать когтей для горизонтальных и десять когтей для вертикальных перемещений льда.

Но цель была даже не в этих когтях. Она была в поиске периодических смещений. Здесь конвекция вредила не так сильно — периодический сигнал очень хорошо вытаскивается из помех за большое время наблюдений.

Первое открытие заключалось в том, что ледяная оболочка Мира совершала суточные вращательные колебания туда-сюда относительно дна. Небольшие колебания, как раз в плоскости экватора. Здесь было всё ясно. Из-за небольшой вытянутости орбиты Мир чуть проворачивался относительно направления на Большой Аттрактор. Из-за вытянутости самого Мира, сила тяготения стремилась его чуть-чуть повернуть обратно, причем вращающий момент больше сказывался на ледяной скорлупе, чем на недрах. Так оценили эксцентриситет орбиты — 0,009.

Следующим достижением стало измерение массы Большого Аттрактора. Как уже говорилось выше, для этого надо было измерить разницу в вертикальном дыхании в противоположных точках Мира. Масса Аттрактора оказалась равной 40 тысячам масс Мира, а расстояние до него — 200 с небольшим диаметров Мира. Это были поразительные, но ожидаемые открытия.

Неожиданное открытие было закопано в гармоническом разложении движений ледяного панциря. С объявлением результатов тянули до той поры, когда поползли слухи, грозящие свести на нет всю помпезность события. Наконец, было принято решение провести церемонию оглашения не как пресс-конференцию, а как научный семинар, но с приглашенной прессой и прямой трансляцией.

Аудитория имела форму купола, с которого свисали штанги для аппаратуры журналистов и для «швартовки» ученых старшего поколения у которых уже были проблемы с вегетативной регуляцией плавучести — было несколько случаев, когда посреди доклада уснувшие патриархи науки медленно опускались на пол, служивший экраном, и просыпались, подергиваясь и вскрикивая в лучах проектора. Публика помоложе свободно висела под куполом, изредка перестраиваясь, чтобы не загораживать друг другу экран.

Семинар открыл высокопоставленный чиновник — уклониться от этого всегда очень сложно, когда пахнет чем-то важным. К счастью, его пышная речь была короткой, и он передал слово руководителю проекта. Тот без предисловий вывел на экран график, где, слегка подрагивая, шли две кривые, описывая в середине рисунка высокий узкий пик.

— Что по осям? — закричали из-под купола раньше, чем докладчик успел издать первый звук.

— Перед вами результат гармонического разложения движений ледяного неба. По горизонтали — частота в обратных гироскопных сутках, по вертикали — квадрат коэффициента гармонического разложения. Это называется гармонический спектр мощности. Черная кривая — экваториальная мода, синяя — вертикальная, то есть смещение поверхности вверх-вниз. Этот хорошо известный пик на единице отражает наше орбитальное движение вокруг Большого Аттрактора, иначе говоря, гироскопные сутки. В дальнейшем я буду опускать прилагательное «гироскопные», которое не более чем дань истории. Сутки есть сутки.

Напомню, этот пик есть то, что давно известно под названием «дыхание».

Теперь, едем в более высокие частоты (кривая и числа на оси побежали влево). Вот. Увеличим вертикальный масштаб. Смотрите, какой замечательный пичок! Период — ровно полсуток!

— И что с того? — донесся голос сверху. — Это же всего-навсего вторая гармоника суточного пика!

— Конечно, вторая гармоника, но такова ли это гармоника, какой она должна быть? Мы хорошо умеем считать дыхание и его гармоники. И вот то, что мы посчитали: пунктирные кривые. Это реконструкция того, как должна выглядеть вторая гармоника для вращения нашего Мира по слегка вытянутой орбите вокруг Аттрактора. Пунктиры заметно ниже. То есть амплитуда полусуточного пика больше, чем должна иметь вторая гармоника. Но если с амплитудой еще можно допустить, что мы ошиблись, то в соотношении экваториальной и вертикальной мод ошибиться невозможно. А здесь оно другое! Экваториальная мода выражена сильнее. Значит, в этом пике действительно кроме второй гармоники есть нечто другое. И это нечто... — докладчик поднял две конечности, что означало «сейчас произойдет самое важное!» — Это нечто прекрасно описывается двойником Мира, движущимся вокруг Аттрактора по орбите меньшего радиуса с периодом ровно в половину суток! — шум в аудитории.

— С какой стати у него период оказался ровно в два раза меньше?

— С такой стати, что есть резонанс Хруам Мзенья, и здесь для него все условия. Кстати, резонанс не обязательно должен быть один к двум. Соотношением периодов орбит может быть любая дробь — $2/3$ или $3/5$, например. Резонанс $1/2$ — самый сильный, конечно.

— Между прочим, я этот резонанс описал на пять периодов раньше Хруам Мзенья, почему меня никто не упоминает? — раздался голос со штанги.

— Ты имеешь в виду твою статью про движение двух тел в центральном поле с возмущениями? Читал. Ну, нет там ничего про резонанс. Формулы правильные и много. Но про резонанс нет ничего.

— А надо в формулах лучше разбираться — из них всё следует!

— Ты хочешь, чтобы читатель доделал за тебя работу и сделал вывод, которого ты сам не додумался? И чтобы тебе еще присудили приоритет? Хруам Мзень всё четко и ясно разложил по полочкам... — председательствующий прерывает дискуссию, предлагая закончить ее в кулуарах.

— Так, идем дальше. Значит, масса этого двойника чуть больше, чем масса нашего мира. Он движется в той же плоскости, поскольку есть сильная экваториальная мода, а меридиональной нет вообще. Теперь идем в другую сторону (кривые бегут вправо), увеличиваем вертикальный масштаб... Вот! Симпатичный пичок, период — почти ровно двое суток. Половинной гармоникой здесь быть не может! Еще один мир на большей орбите! Опять почти в резонансе с нашим. Этот будет потяжелее нашего раза в три, — шум в аудитории. — Меридиональной моды опять нет.

Но и это еще не всё. Вернемся к главному пику. Вот здесь, справа от пика, что-то, похоже, тоже есть. Увеличим масштаб. Видите бугорок — он почти статистически значим. Частота на двадцать с лишним процентов меньше, чем у главного пика — тут заведомо не может быть никаких гармоник. Надо продолжить измерения, и если эта деталь подтвердится, значит, есть и четвертый мир с периодом обращения 4,7 суток.

Итак, имеем систему по меньшей мере из трех, а вероятно из четырех миров, вращающихся вокруг Большого Аттрактора в одной плоскости. Наш Мир — второй и, видимо, самый маленький. На протяжении долгой истории цивилизации считалось, что он объемлет всё сущее. Теперь мы знаем его настоящее место. Но знаем не до конца. Есть еще Внешний Источник, вокруг которого, вероятно, вращаются такие же системы. Но об этом мы можем только гадать. Только гадать — до тех пор, пока не пробуем лёд.

Более того. Теперь мы знаем ответ еще на один вопрос. Почему наш Мир теплый? Откуда берется энергия извергающихся вулканов? Вроде бы ответ уже был известен: из-за того, что орбита Мира чуть вытянута, поэтому под тяготением Аттрактора Мир дышит, отчего греется изнутри. Это так, но почему Мир долго сохраняет вытянутую орбиту? Ведь из-за трения, вызванного дыханием недр, орбита со временем должна стать точно круговой. Наш Мир очень древний, судя по тому, что значительная часть урана в кристаллах успела превратиться в свинец. Его возраст во много раз превышает то время, за которое орбита стала бы точно круговой и бы Мир замерз. Теперь мы знаем ответ, почему этого не произошло: три мира, обращающиеся в ре-

зонансе, раскачивают орбиты друг друга, не дают им стать круговыми! Есть вопросы?

— А может ли на этих мирах быть жизнь, подобная нашей?

— Для ответа на этот вопрос надо знать, насколько вытянуты их орбиты. От этого зависит, сколько в их недрах выделяется тепла. Если у всех эксцентриситет такой же, как у Мира, то на первом должны быть расплавлены недра, должно быть очень много извержений. Непонятно, может ли он быть покрыт при этом водой. Скорее всего нет. Третий и тем более четвертый миры греются слишком слабо. Там, вероятно, только лёд и скальные недра, без жидкой воды. Но это если эксцентриситеты орбит одинаковые.

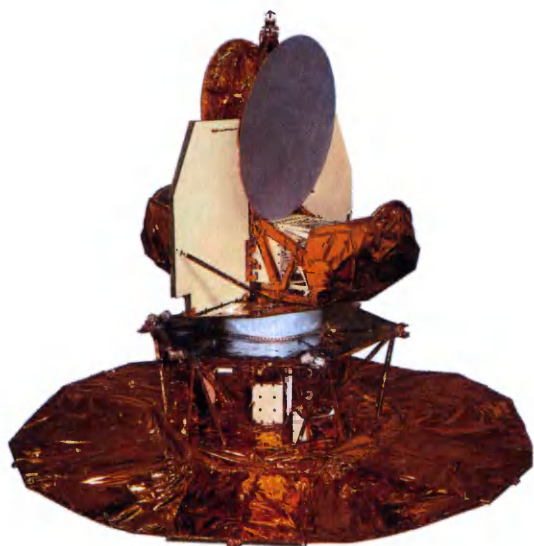
— Ты сказал: «Пока не пробуем лёд...» А это в принципе осуществимо?

— Появилась надежда. В северо-западном секторе есть мощный вулкан, который извергался десять-пятнадцать периодов назад. Как оказалось, над ним на небе протаял лёд и образовался купол. При этом главное не то, что бурить меньше, а то, что в куполе скопилась смесь метана с этаном. Они не замерзают даже при той температуре, которая должна быть у наружной поверхности льда. Значит, проблема замерзания скважины снимается. Но задача остается чудовищно сложной.

Председатель предложил поблагодарить докладчика. Раздалось синхронное гуканье, означавшее на языке европиан аплодисменты. Вдруг гуканье резко усилилось, переходя на более высокий тон, что соответствует бурной овации. Докладчик, не понимая в чем дело, обернулся: в свете проектора медленно опускался, открывая глаза и трясая головой Хруам Мзень собственной персоной. Видимо, он пристегнулся мимо штанги. Однако патриарх не растерялся и, окончательно проснувшись, выгнул две пары противоположных конечностей так, что они образовали восьмерку. Это означало выражение бесконечной признательности.

30. Зашифрованная карта

Для существ, живущих в океане Европы, окружающий мир скрыт ледяным панцирем. Однако, они смогли реконструировать ближайшую к ним часть Вселенной с помощью прецизионных измерений, воспользовавшись этим самым панцирем, его небольшими движениями. Для нас Вселенная в своем самом раннем возрасте закрыта непрозрачной плазмой. Но и для нас есть способ проникнуть дальше: воспользоваться прецизионными измерениями температуры этой самой плазмы, ее ничтожными вариациями. И метод проникновения основан на том же самом приеме — гармоническом анализе. И в том, и в другом случае природа, поставив препятствие, оставила для существ, обладающих достаточно высоким интеллектом и владеющих научной методологией, возможность узнать, что находится за ним. В нашем случае природа расщедрилась даже больше: изучая препятствие, мы способны лучше изучить то, что находится перед ним, — современную Вселенную.



Напомним, что дошедшее до нас излучение плазмы ранней Вселенной называется реликтовым. Рассказывая о нем, мы упомянули начало 1990-х годов, когда впервые были обнаружены неоднородности реликтового излучения, и остановились на конце 1990-х, когда эксперимент BOOMERanG

Рис. 30.1. Космический телескоп WMAP (NASA)

и другие позволили тщательно изучить мелкомасштабные детали его карты.

Новая эпоха в космологии наступила с запуском космического микроволнового телескопа WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Этот аппарат NASA превосходил своего предшественника COBE в 45 раз по чувствительности и в 30 раз по угловому разрешению. При этом затраты на его создание составили смешные 150 млн долларов (столько же стоит километр с небольшим олимпийской дороги Адлер — Красная Поляна). Видимо, это не весь бюджет миссии, но порядок величины понятен. Космический аппарат был выведен в 2001 году на орбиту вокруг Солнца — за Землей в полутора миллионах километров, в лагранжевой точке L2. Изначально планировалось, что WMAP будет вести наблюдения два года, но как это было со многими другими инструментами NASA, он в несколько раз превысил плановый срок жизни, проработав 9 лет.

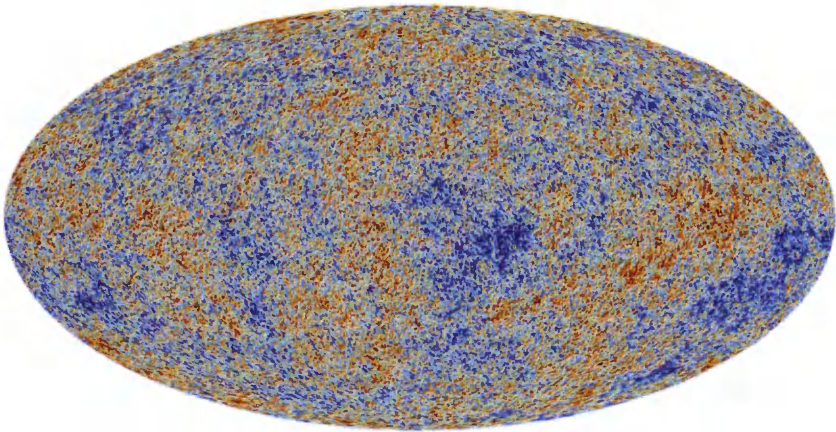


Рис. 30.2. Карта реликтового излучения, снятая WMAP за 9 лет наблюдений

На рис. 30.2 — карта неба, где цвет отражает неоднородности реликтового излучения. Исходная карта выглядит иначе: на приведенной карте сигнал очищен от галактического фона и фона отдельных внегалактических источников. На карте также вычтена средняя температура и дипольная компонента, поскольку ее происхождение тривиально: это абберация из-за движения Земли с Солнцем и Галактикой относительно системы отсчета, связанной с реликтовым излучением (она же — усредненная система покоя вещества во Вселен-

ной в данной точке). Напомним, реальный контраст пятнистости на этой карте всего лишь 10^{-5} или чуть больше, в зависимости от размера пятен.

Карта совершенно хаотична. Кажется, что из нее нельзя извлечь ничего интересного. Более того, есть очень серьезный довод за то, что на этой карте в принципе ничего не может быть «изображено» в прямом смысле слова. Этот довод называется свойством гауссовости: карта есть наложение случайных пятен разного размера, ничего не знающих друг о друге.

Впрочем, находятся и те, кто видит на этой карте аномалии или необычные особенности, подтверждающие ту или иную теорию. Например, концентрические кольца: они должны появляться в весьма специфической космологической теории Роджера Пенроуза. Или аномально холодное пятно. Или так называемую «ось зла». При этом приводятся оценки уровня достоверности, например «три девятки». На самом деле эти аномалии не более убедительны, чем профиль человеческого лица в узоре сучков и волокон доски, фигура крокодила в облаках или сфинкса на снимке марсианской поверхности. Всегда в достаточно богатом наборе данных можно обнаружить интересную особенность, подобную перечисленным выше, просто потому, что данные предоставляют обширное поле для поиска чего-либо. И значимость в три девятки не залежится, особенно, если «подкрутить» какие-нибудь пороги обрезания при статистическом анализе — тут и четыре девятки легко добываются на пустом месте. Поиск подобных «интересных эффектов» — профессиональная болезнь многих исследователей, автор и сам попадался в эту ловушку на заре своей научной деятельности. В общем, никаких аномалий, представляющих серьезный повод для разбирательства, на этой карте нет. По этому поводу команда WMAP опубликовала специальную статью.

Однако, остается поле для курьезов и шуток. Например, на карте проступают инициалы Стивена Хокинга, буквы SH. Правда, буквы кривоваты, зато достаточно велики. По поводу концентрических колец. Они были найдены на карте определенным алгоритмом поиска — искали везде, заранее не зная размера. Используя подобный метод поиска «эффектов», в богатом статистическом материале всегда можно найти впечатляющий «сигнал». Проблема в том, что довольно

сложно оценить вероятность случайного появления подобного «сигнала» в большом массиве данных. Авторы зачастую игнорируют этот ключевой и сложный этап работы, провозглашая эффект в четыре или пять стандартных отклонений, что впоследствии оборачивается подмоченной репутацией.

К первому апреля 2011 года в архиве электронных препринтов вышла статья «Нестандартные космологические реликтовые паттерны в космическом микроволновом фоне» (arXiv:1103.6262), в которой авторы издеваются над поисками «паттернов» в реликтовом излучении, проверяя карту на корреляции с символами ☺, ☹, ликом Христа на Туринской плащанице и еще парой картинок. И, конечно, они находят значимую корреляцию. Чтобы не мелочиться, они оценивают значимость корреляции в $\infty \sigma$. Этот е-принт мог бы по праву войти в сборник «Физики шутят». Кстати, там четыре автора, фамилии всех начинаются на «Z» (Zuntz, Zibin Zunkel, and Zwart) и все — реальные ученые из сильнейших научных центров! Можно предложить читателю в качестве домашнего задания оценить вероятность случайного возникновения такого авторского коллектива. После этой публикации разговоры о кольцах Пенроуза стихли.

Кстати, это не единственная первоапрельская статья данного авторского коллектива. Подбор авторов становится ясен из их предыдущей первоапрельской статьи. Годом раньше они (за исключением J. Zibin, вместо которого фигурировал T. Zlosnik) выпустили препринт «Орфографические корреляции в астрофизике» (arXiv:1003.6064v1), где исследуется зависимость числа цитирований от первой буквы фамилии автора. По ходу авторы издеваются над некоторыми методологическими приемами, использовавшимися в статьях, написанных на полном серьезе. Вообще, первоапрельские розыгрыши и прочие шутки, видимо, имеют в науке огромное значение, поскольку положительно коррелируют с научным уровнем сообщества. Автор не проверял эту корреляцию на конкретном статистическом материале, но она видна и невооруженным глазом, ее значимость никак не меньше оценки, приведенной выше, — $\infty \sigma$ (см. врезку «Что такое сигма...»).

Однако шутки в сторону! На самом деле карта неоднородностей реликтового излучения — кладезь важнейшей информации. В ней зашифрованы ключевые сведения о Вселенной — карта говорит о ней

как о целом больше, чем наблюдения далеких галактик и квазаров. По мнению автора, суммарное научное значение результатов WMAP превосходит значение открытия бозона Хиггса. Просто эти результаты оказались растянутыми во времени. Как же расшифровать карту? Для ответа полезно совершить очередной экскурс в прошлое.

Что такое сигма и статистическая значимость

Наверно каждому, кто хоть сколько-нибудь интересуется наукой, приходится время от времени слышать нечто подобное: «Модель противоречит данным на уровне два сигма», «Открытие бозона Хиггса будет официально признано, когда уровень значимости достигнет пяти сигма», «Заявки на доклады о три-сигма-эффектах не рассматриваются» и т. д.

Вездесущая сигма — всего лишь параметр, задающий ширину распределения Гаусса, традиционно обозначаемый как σ . Это жаргон. Официальный термин — стандартное отклонение, но это тот случай, когда жаргон сильно потеснил изначальный термин не только в устной речи, но и в научных статьях.

Собственно, вот так выглядит распределение Гаусса, нормированное на единицу:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}}$$

«Нормированное на единицу» означает, что при таком коэффициенте перед экспонентой площадь под кривой равна единице. Распределение Гаусса крайне важно в статистике по простой причине: сумма многих случайных величин описывается распределением Гаусса (для простоты пользуемся вульгарным языком, пусть даже рискуя навлечь на себя гнев математиков). Например, распределение числа выпадений орла при 100 бросаниях монеты близко к распределению Гаусса со средним $x_0 = 50$ и $\sigma = \sqrt{50}$. На самом деле это будет так называемое биномиальное распределение, но при числе выпадений 50 оно достаточно близко к распределению Гаусса и обычно считается таковым при обработке данных.

Сходимость суммы многих распределений к распределению Гаусса декларируется так называемой центральной предельной теоремой. Именно поэтому распределение Гаусса столь важно в статистике. Настолько важно, что его называют нормальным распределением, а параметр ширины — стандартным отклонением. Если ошибки измерений описываются нормальным распределением, то с данными работать легко — есть простые способы оценок, насколько та или иная гипотеза описывает эти данные, каковы ошибки в параметрах гипотезы, которой мы пытаемся описать данные. Если ошибки не описываются нормальным распределением, то на это часто закрывают глаза, что обычно сходит с рук, но не всегда.

Теперь важная таблица, поясняющая смысл употребления жаргона «сигма» в самых разных контекстах. Сверху — отклонение от центра распределения x_0 в единицах σ , снизу — вероятность того, что случайная величина выйдет за этот предел (в любую сторону).

σ	1	2	3	4	5
	0,32	0,045	0,0027	$0,63 \cdot 10^{-4}$	$0,57 \cdot 10^{-6}$

Если какая-то экспериментальная точка отклонилась от теоретической кривой, скажем, на 2σ , то нет оснований придавать этому особое значение. Вероятность такого отклонения $1/20$, и если точек много, то какая-нибудь с большой вероятностью вылезет за такой предел. Если точка отклонилась на 3σ , здесь уже есть предмет для разбирательства, а если за 4σ и больше — можно сделать вывод, что что-то не так. Может быть, измерение неверное, а может быть теоретическая кривая неверна. И самое интересное: нет ли здесь какого-нибудь дополнительного эффекта, например спектральной линии, если точки описывают спектр. Здесь мы подходим к понятию статистической значимости.

Если мы знаем, что в данном месте спектра, например, квазара может быть рентгеновская линия железа, и видим, что соответствующая точка «отпрыгнула» вверх на 4σ , мы вправе сказать: «Данные подтверждают существование линии излучения... на уровне статистической значимости 4σ ». Возможные эквиваленты: «...на уровне статистической значимости $0,6 \cdot 10^{-4}$ » или «...на уровне достоверности 0,9999». Если мы заранее знаем, что именно здесь может быть линия излучения железа, и, действительно, видим «отпрыгнувшую» точку, то 4σ — приличный уровень значимости, и можно смело публиковать результат.

Определение статистической значимости может быть и не связано с распределением Гаусса и числом стандартных отклонений. Допустим, мы пытаемся показать, что данные говорят о наличии какого-то эффекта. Как надо поступать в общем случае? Допустим, эффекта нет. Значит, нам надо принять некую нулевую гипотезу, как должны выглядеть данные при отсутствии эффекта. В примере со спектром это некая гладкая функция без линий. Статистическую значимость можно определить как вероятность того, что данные в результате случая отклоняются от нулевой гипотезы так, что имитируют эффект, каким мы его видим в данных. Вероятность зависит от нулевой гипотезы и гипотезы эффекта, поэтому правильно говорить о статистической значимости *такого-то эффекта* относительно *такой-то нулевой гипотезы*. В примере со спектром это просто вероятность того, что точка в том месте, где должна быть линия, случайно «отпрыгнула» вверх не меньше, чем на столько-то сигма. В общем случае любым посильным способом вычисляем вероятность случайной имитации эффекта. Неважно, как вычисляем, допустим, с помощью прямого численного моделирования методом Монте-Карло. Предположим, что эта вероятность получилась около 10^{-4} . Потом добавляем к гипотезе искомый эффект. Если при этом гипотеза (уже не нулевая) стала описывать данные хорошо, мы вправе сказать, что данные подтверждают эффект на уровне статистической значимости 10^{-4} . Чем меньше вероятность, тем выше статистическая значимость. Как это часто делают, можно перевести вероятность в термины сигма, используя таблицу, приведенную выше.

Допустим, мы обнаружили в данных указание на некий эффект значимостью 4σ . Вероятность случайности, имитирующей этот эффект, очень мала. Следует ли из этого, что надо бить в барабан и немедленно публиковать статью? Это очень сильно зависит от того, что мы искали. Если мы искали известно что, заранее зная, в каком месте, то можно. Именно таков случай обнаружения известной спектральной линии. А если мы искали чего-нибудь, где-нибудь в большом массиве данных и наткнулись на некоторое отклонение значимостью 4σ , то вполне возможно, что мы упорно искали и нашли случайный выброс на 4σ и больше ничего. Таких случаев предостаточно. Даже в *Nature* иногда публикуют подобные «открытия». Обычно они быстро

«рассасываются» и забываются. Но репутации страдают.

Проблема в том, что правильная оценка статистической значимости – не такое простое дело. Если мы нашли нечто значимостью 10^{-4} в 100 независимых попытках, то настоящая значимость 10^{-2} , а это уже очень слабый результат. В реальной работе с данными этих «независимых попыток» бывает огромное количество, и исследователь часто этого не осознает, а если осознает, то не умеет правильно оценить их число (это число в биологии и гуманитарных науках называется «поправка Бонферони», а в физике «штрафным фактором»). Четких рецептов, как оценивать эту поправку, на все случаи жизни не существует – это скорее кухня, а не наука. Владение этой кухней и есть составляющая профессионализма исследователя.

31. Если бы Сахаров увидел это!

Бывают удивительные истории, когда некий вывод, полученный кабинетным ученым на бумаге вне всякой связи с реальностью, вдруг через много лет обретает плоть и мощь, становясь одной из несущих конструкций науки. Такая история произошла с работой Андрея Дмитриевича Сахарова, сделанной в 1963 году. В этой работе исследована эволюция акустических колебаний вещества в ранней Вселенной и получен очень интересный и красивый результат. По традиции, которая у нас прослеживается в отношении выдающихся работ, исходные положения, принятые Сахаровым, были неверными. Но предсказания из этой работы сыграли большую роль в будущем.

Выше речь шла о том, как начальные неоднородности плотности начинают расти из-за гравитационной неустойчивости. Но это не



единственное, что с ними происходит. Неоднородности начинают колебаться без всякой связи с гравитацией — как звуковые волны. «Звуковыми» волны в ранней Вселенной можно назвать лишь весьма условно, уж больно нечеловеческие условия там царили, но их механика точно такая же, как и у звука в атмосфере: движущей силой становится давление среды, зависящее от ее плотности. Сейчас мы знаем, что среда состоит из темной материи и обычного вещества, которые взаимо-

31.1. А.Д. Сахаров

действуют только через гравитацию и во многих отношениях независимы друг от друга. Акустическим колебаниям подвержено только обычное вещество.

Скорость звука в ранней Вселенной, где среда состоит в основном из ультрарелятивистских частиц, очень велика: $c/\sqrt{3}$. Напомним, изначально неоднородности Вселенной «заморожены», поскольку их размер превышает размер горизонта, т.е. причинно связанной области пространства. Акустические колебания данной длины волны стартуют, когда входят под горизонт, только не световой, а звуковой горизонт, который в $\sqrt{3}$ раз меньше. Неоднородность оживает и начинает колебаться и двигаться. Важная вещь: у всех волн данной частоты на старте оказывается одинаковая фаза. Это стоячие волны, подобные волнам на гитарной струне. Их можно наблюдать, например, в порту у бетонной стены причала. Там «стоячесть» обеспечивается интерференцией набегающих и отраженных волн. В результате амплитуда волн синхронно меняется — поверхность то вспучивается высокими буграми, то разглаживается.

Почему «ожившая» неоднородность производит именно стоячую волну? В работе Сахарова это показано математически, попробуем проиллюстрировать эффект «на пальцах». Здесь важную роль играет быстрое расширение. Звуковые колебания в расширяющейся Вселенной описываются уравнением, тождественным уравнению гармонического осциллятора с вязким трением (таким же, как для скалярного поля во Вселенной, таким же, как для шарика на пружинке в вязкой жидкости). Это следует из уравнений Эйнштейна. А роль вязкого трения играет скорость расширения Вселенной — постоянная Хаббла.

Начальные условия, вообще говоря, складываются из случайной суперпозиции неоднородностей разного размера с произвольным распределением производных плотности по времени. Любую начальную конфигурацию можно разложить на не зависящую от времени часть (производная по времени равна нулю) и часть, сильно зависящую от времени. Вблизи момента $\tau = 0$ Вселенная очень быстро расширяется и «вязкое трение» очень велико. Поэтому вторая компонента (быстро меняющаяся) мгновенно затормозится и пропадет. А первая (не зависящая от времени) остается. Далее темп

расширения уменьшается, вязкость падает и волны начинают колебаться. Общее решение уравнения колебаний имеет вид $C_1 \cos(\omega t) + C_2 \sin(\omega t)$, где величины C_1 и C_2 не зависят от времени (но зависят от точки пространства), ω — частота колебаний. Однако поскольку начальная скорость равна нулю, во вселенной второго слагаемого с синусом нет, и колебания происходят по закону $\cos(\omega t)$, что соответствует стоячей волне.

Так все выжившие акустические волны оказываются стоячими, причем все волны определенной длины имеют общую фазу. Через четверть периода ($\omega t = p/2$) они проходят через нуль, а через полпериода ($\omega t = p$) вновь достигают максимума (мы слегка огрубляем ситуацию: на самом деле частота волны в процессе расширения вселенной уменьшается, и соотношения не такие простые).

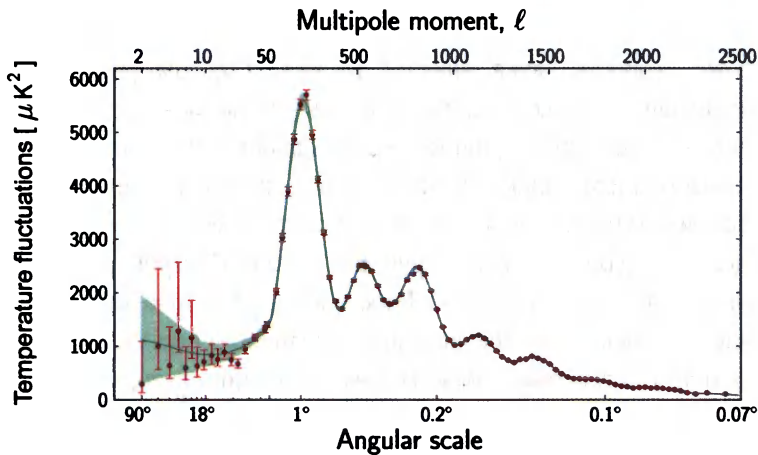


Рис. 31.2. Эффект акустических осцилляций, предсказанный Сахаровым и пересчитанный Сюняевым, Зельдовичем и др. для модели горячей Вселенной. Забегая вперед, приводим спектр мощности угловой анизотропии реликтового излучения, полученный космическим микроволновым телескопом «Планк». Пояснения — в следующей главе

Значит, в любой момент времени волны, у которых набралась фаза $\pi, 2\pi, \dots$, будут иметь максимальную амплитуду, а $1/2 \pi, 3/2 \pi, \dots$ — нулевую. Таким образом, благодаря акустическим волнам, в любой заданный момент неоднородности барионной материи на одних размерах будут выделены, на других подавлены. В расширяющейся Вселенной есть момент, когда скорость звука резко падает, потому что

падает давление, — это и есть эпоха рекомбинации. В этот момент акустические колебания застывают. Если разложить карту застывших неоднородностей в ряд Фурье, получится осциллирующая кривая, описывающая амплитуду как функцию длины волны. Эффект получил название «сахаровские осцилляции», хотя в настоящее время в научной литературе чаще используется термин «акустические осцилляции».

Сахаров работал в предположении, что Вселенная холодная. Он сделал этот выбор под влиянием Зельдовича, которому в тот момент казалось, что модель холодной Вселенной хорошо объясняет первичный нуклеосинтез. Эта гипотеза была опровергнута в тот же год, когда статья Сахарова вышла из печати. Но само явление осталось применимым и к горячей Вселенной. Причем оно оказалось реально наблюдаемым, чего не мог предвидеть Сахаров.

В принципе, в холодной Вселенной действуют похожие законы: там тоже скорость звука вначале велика, а потом резко падает. Но она падает гораздо раньше, и волны застывают, будучи гораздо меньшего размера. Причем неоднородности от самых крупных волн первого пика, дожив до наших дней, должны соответствовать небольшим звездам, о чем Сахаров написал в своей статье. На самом деле они соответствуют крупномасштабной структуре Вселенной на уровне 150 мегапарсек. Впоследствии Сахаров высказал сожаление, что неправильное исходное предположение сильно снизило ценность его работы. Тем не менее, по мнению автора, А.Д. Сахаров остается главным героем чудесной истории, связанной с акустическими осцилляциями.

То, что сахаровские осцилляции в принципе можно наблюдать, стало ясно после открытия реликтового излучения в 1965 году. Перспективу давало само реликтовое излучение: ведь его карта и есть карта ранней Вселенной, где должны быть запечатлены все неоднородности, не успевшие исказиться из-за гравитационной неустойчивости. Эффект осцилляций был проанализирован для случая горячей Вселенной Р.А. Сюняевым и Я.Б. Зельдовичем, а также независимо Джимом Пиблсом и Юй Цзе-Таем — обе работы опубликованы в 1970 году. Прошло четверть века, и сахаровские осцилляции увидели воочию. Рецепт расшифровки карты реликтового излуче-

ния прост: надо разложить ее в ряд Фурье по угловым гармоникам (мультиполям).

Если бы только Андрей Дмитриевич увидел данные, представленные на рис. 31.2, где показан спектр этого самого разложения карты!

В чем ярче всего проявляется мощь науки?

Представьте, сидит человек, пишет формулы, где фигурируют невероятные величины (10^{-43} с, 10^{94} г/см² и т.п.), заведомо недоступные никаким измерениям и экспериментам, что-то пытается вывести. Откуда убеждение, что на таких масштабах вообще работает наша логика, что к ним применимы законы, установленные человеком? С точки зрения человека несведущего, ученый в данном случае занимается полными абстракциями, фантазиями за деньги налогоплательщиков. В результате значительных усилий выводит на бумаге, что распределение по размерам неких флуктуаций плотности во Вселенной должно описываться некой осциллирующей кривой.

Через десятилетия люди запускают космический аппарат с прецизионным приемником микроволнового радиоизлучения, испущенного миллиарды лет назад. И видят из карты этого излучения ту самую осциллирующую кривую!

Сахаров не дожил до этого момента, и Зельдович не дожил. Но Рашид Сюняев и другие, исследовавшие этот эффект в более реалистичной постановке задачи, дожили. Думаю, лучшей награды за теоретическую научную работу не придумать.

32. Что зашифровано на карте

Как увидеть акустические стоячие волны, точнее, осцилляции их амплитуды? Надо подвергнуть их гармоническому анализу, иными словами, разложить на мультиполи и посмотреть, как ведут себя коэффициенты разложения. Что такое мультиполи? Самый малый — это диполь ($l = 1$). Диполь показывает разницу в более яркой и менее яркой половинах неба. При этом основной вклад в диполь дает движение Солнечной системы вместе с Галактикой относительно усредненной системы покоя Вселенной — эта скорость около 600 км/с. Там, *куда* мы движемся, реликтовое излучение кажется ярче, а там, *откуда* движемся — слабее. Отделить диполь, связанный с абберацией от нашего движения, от истинного диполя реликтового излучения невозможно, поэтому он просто выбрасывается из анализа. Следующий — квадруполь ($l = 2$), он отражает глобальную сплюснутость (или вытянутость) распределения яркости. И т. д.

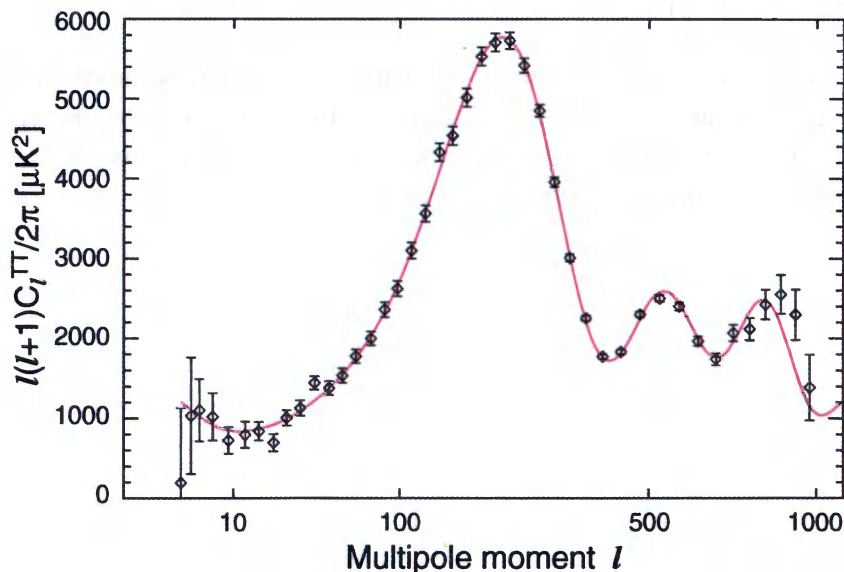


Рис. 32.1. Разложение карты реликтового излучения, снятой WMAP за 9 лет наблюдений, по угловым мультиполям (спектр мощности). Традиционно изображают величину $l(l+1) C_l$. Из статьи G. Hinshaw et al. arXiv:1212.5226

Двумерное разложение сферической карты отличается от одномерного разложения Фурье тем, что каждый мультиполь l представлен суммой $2l + 1$ членов со своими коэффициентами. Для того, чтобы увидеть, какие масштабы неоднородностей сильнее выражены, все эти коэффициенты не нужны — достаточно взять среднее от суммы их квадратов (традиционно обозначаемое как C_l). Соответствующее распределение называется спектром мощности, именно оно показано на рис. 32.1.

Высокий пик слева означает, что карта имеет самую контрастную пятнистость при размере пятна около градуса. Он соответствует акустическим волнам, пришедшим к моменту рекомбинации с фазой π . За одно колебание они успели подрасти из-за гравитационного взаимодействия с темной материей, которая за это время «скомковалась» в сто раз сильнее барионного вещества. Правее — следующие пики, соответствующие фазам 2π , 3π и т.д. Пики при увеличении номера мультиполя (уменьшении размеров неоднородностей) становятся ниже, потому что оказываются «замытыми» из-за диффузии фотонов, которые успевают частично разбежаться из сгущения вещества за период колебания стоячей волны. Это так называемый эффект Силка. Особенно хорошо этот эффект наблюдается на рис. 32.2, где тот же самый спектр мощности дан в логарифмическом масштабе и к нему добавлены данные наземных установок с меньшим охватом неба, но с лучшим угловым разрешением.

Черные точки с ошибками (те же, что и на рис. 32.1) — результат WMAP. Голубые точки — результат обзора небольшой части неба, сделанного с лучшим угловым разрешением с помощью микроволнового телескопа на Южном полюсе (SPT). Оранжевые точки — данные Космологического телескопа в Атакаме (ACT). Сплошная кривая — результат подгонки теории *только* к данным WMAP, данные при мультипольных моментах больше тысячи не использовались!

Точки с наименьшими ошибками получены на микроволновом телескопе, расположенном на Южном полюсе (тарелка диаметром 10 м) — там фон от теплового излучения атмосферы меньше, чем в не столь экстремальных местах.

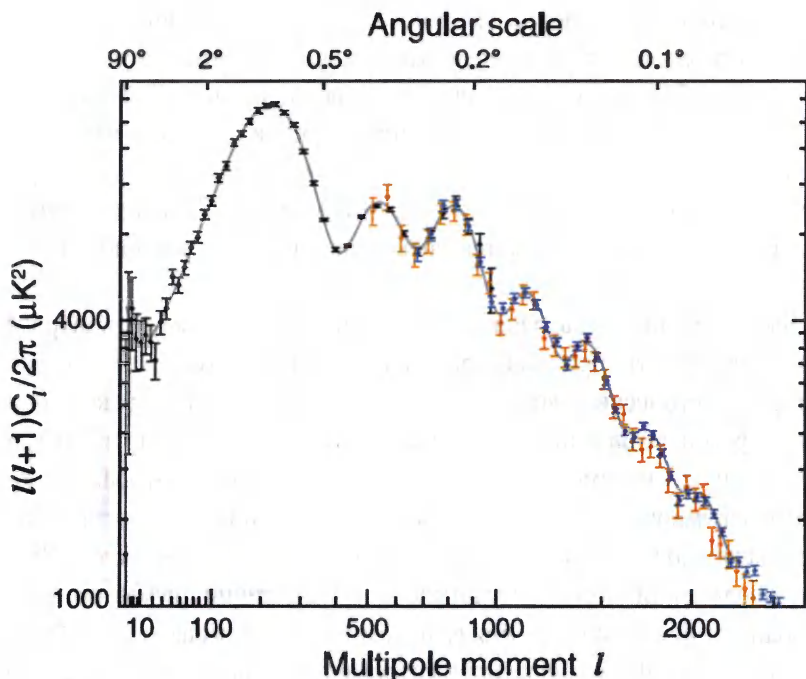


Рис. 32.2. То же самое разложение, что и на рис. 32.1, но в логарифмическом масштабе и с добавлением данных наземных микроволновых телескопов (см. текст). Из статьи G. Hinshaw et al. arXiv:1212.5226

Осциллирующая кривая на рис. 32.2 поразительно информативна. Это примерно тоже самое, как если бы мы увидели на карте ранней Вселенной масштабную линейку с делениями в мегапарсеках, да и не только линейку — целую метеостанцию с различными показаниями на циферблатах. Причем эти показания точнее, чем можно извлечь из параметров современной Вселенной. В частности, положение пиков весьма чувствительно к кривизне Вселенной Ω_k — этот параметр примерно равен относительному отклонению суммы углов треугольника от 180° , если треугольник имеет размер с видимую часть Вселенной (вспомним надуваемый шарик на лекции С.П. Капицы — кривизна его поверхности дает наглядную аналогию). Оказывается, наша Вселенная с хорошей точностью «плоская» на масштабе горизонта ($\Omega_k = -0,037 \pm 0,043$, если брать только данные WMAP и $\Omega_k = 0,001 \pm 0,012$, если привлечь также данные наземных микроволновых телескопов). Высота пиков чувствительна к относительно-

му вкладу барионов в содержимое Вселенной. Соотношение между вторым и третьим пиками зависит от вклада темной материи. И т. д.

Конечно, эффекты от всех этих и других параметров запутаны, и их извлекают не по отдельности, а все вместе посредством процедуры, называемой «подгонкой методом максимального правдоподобия». Для подгонки кроме данных нужна теоретическая модель, которая должна описать данные. В этом случае она слишком сложна, чтобы ее можно было выразить формулой. Модель включает в себя все процессы, о которых шла речь выше. Прежде всего это генерация начального спектра неоднородностей.

Мы писали о том, что относительная амплитуда начальных неоднородностей должна быть порядка $5 \cdot 10^{-5}$, а их спектр — плоским. На самом деле мы не знаем точно ни того, ни другого. Поэтому амплитуда берется за один из подгоночных параметров. Спектр неоднородностей не обязан быть в точности плоским, даже если мы уверены, что источником неоднородностей является механизм космологической инфляции. Дело в том, что в процессе инфляции величина ответственного за нее поля хоть и медленно, но меняется — это дает спектру небольшой наклон, который тоже входит в число подгоночных (свободных) параметров. Далее концентрация обычного (барионного) вещества влияет на высоту пиков и соотношение между ними. Это третий свободный параметр. Темная материя дает неоднородный гравитационный потенциал, влияющий на акустические волны. Ее концентрация — четвертый свободный параметр. Далее — кривизна Вселенной, пятый параметр. От него будет зависеть угол, под которым мы видим пятно определенного размера и, следовательно, положение всех пиков. Похожий эффект дает темная энергия, от нее зависит время распространения фотонов после рекомбинации и, соответственно, расстояние, которое они пролетели. Так что плотность темной энергии — это еще один параметр. Правда, не все эти параметры независимы: полная плотность энергии во Вселенной в сумме с вкладом кривизны, пропорциональным Ω_k , должна давать критическую плотность. *Так что пока свободных параметров пять.*

И это еще не всё. Оказывается, состояние Вселенной после рекомбинации тоже влияет на карту реликтового излучения. Свобод-

ные электроны рассеивают излучение, что слегка замыкает картину и требует учета. Электроны связываются в атомы в эпоху рекомбинации, но через сотни миллионов лет межгалактический газ снова меняет свое состояние — под действием ультрафиолетового излучения квазаров и звезд происходит вторичная ионизация. Выше рассказано про эффект Ганна — Петерсона, обнаруженный в спектре квазара с красным смещением 6,28. На самом деле то, что увидели, — это самый конец вторичной ионизации, когда атомов водорода в межгалактическом газе осталось совсем немного. Реально она произошла раньше при большем красном смещении. Когда именно, мы не видим. Поэтому это шестой свободный параметр.

Теперь осталось всё вычислить в зависимости от параметров — как развивались неоднородности темной материи в расширяющейся Вселенной, как колебались волны барионной материи и как они взаимодействовали через гравитацию с темной материей, как проходила рекомбинация вещества, как излучались фотоны реликтового излучения и как они распространялись по дороге. И многое другое. И подобрать такую шестерку параметров, которая наилучшим образом опишет данные, показанные на рис. 32.2.

Вот эти параметры с ошибками

Плотность барионов в единицах критической плотности $\Omega_b = 0,0463 \pm 0,0024$

Плотность темной материи в тех же единицах $\Omega_c = 0,233 \pm 0,023$

Плотность темной энергии в тех же единицах $\Omega_\Lambda = 0,721 \pm 0,025$

Относительная среднеквадратичная амплитуда первичных неоднородностей

$D_2 = (2,41 \pm 0,10) \cdot 10^{-9}$

Степенной индекс спектра первичных неоднородностей n_s

($n_s = 1$ соответствует плоскому спектру) $n_s = 0,972 \pm 0,013$

Красное смещение, соответствующее вторичной ионизации $z_i = 10,6 \pm 1,1$

Из этих результатов прямо следует: возраст Вселенной — $13,74 \pm 0,11$ млрд лет — точность лучше процента!

Это результаты всех 9 лет работы WMAP. Дальше начинается дополнительная игра: данные WMAP дополняются информацией, полученной другими методами, в частности, из обзоров неба обычными телескопами. Точность возрастает.

Одна из самых интересных вещей, которые при этом обнаруживаются, — отклонение спектра первичных возмущений от чисто плоского. Если привлечь всю имеющуюся информацию, то имеем ре-

зультат для степенного индекса: $n_s = 0,9608 \pm 0,0080$ (пять стандартных отклонений от единицы, которая соответствует плоскому спектру). Это уже кое-что говорит о самом процессе инфляции. Более того, это было предсказано давным-давно — еще в 1981 году Вячеславом Мухановым и Геннадием Чибисовым: первичный спектр возмущений отличается от плоского именно на такую величину. Если это не триумф науки, то что вообще можно назвать триумфом? Да и вся 9-летняя миссия WMAP, при всей скромности затрат на нее, оказалась фантастически успешной. По мнению автора, по суммарному вкладу в фундаментальную науку она превосходит открытие бозона Хиггса.

33. Вклад реликтового излучения в фундаментальную физику

Космологическая инфляция работает как исполинский конвейер. Все возмущения плотности рождаются с определенным размером: 10^{-27} см или около того. Потом каждое возмущение растягивается в e раз за каждые 10^{-37} с, за это время генерируются новые, еще не растянутые. Пока конвейер работает с постоянной скоростью, спектр флуктуаций получается почти плоским. И когда он останавливается, проработав, скажем, 10^{-34} с, имеем почти плоский спектр, простирающийся от 10^{-27} см до, например, 10^{400} см (последняя цифра очень условна). Нас интересуют те возмущения, которые при остановке составляли от долей микрона до долей миллиметра, — именно они растянулись уже после инфляции в те неоднородности, которые видит WMAP. Когда они генерировались, «колесам конвейера» предстояло сделать еще около 50–60 «оборотов», т.е. растяжений в e раз. И из измеренного значения n_s прямо следует, что «конвейер» к тому моменту уже притормаживал — движущее скалярное поле ослабевало. Скорость торможения (характеризуемая отклонением n_s от 1), зависит от характеристик этого поля. Так люди дотянулись до физики явлений, на десять с лишним порядков выходящих за пределы возможностей Большого адронного коллайдера.

И это еще не всё! Физики предполагают, что число нейтрино равно трем и нет других частиц со столь же малой массой. Но это только предположение. Объединенные данные WMAP и других инструментов показывают, что число частиц, слабо взаимодействующих с веществом и имеющих малую массу: $3,84 \pm 0,40$ — т.е. указывают на возможность существования еще одной частицы. Однако эксперимент «Планк» (см. главу 36) скорректировал этот результат в сторону трех.

В эпоху рекомбинации нейтрино имеют кинетическую энергию примерно в 0,2 эВ. Если бы у нейтрино была масса, превышающая эту энергию, то они двигались бы заметно медленнее света, и это опять бы сказалось на карте реликтового излучения. Если брать

только данные WMAP, то из них следует ограничение сверху на сумму масс нейтрино 1,3 эВ. Это уже лучше, чем ограничение на массу электронного нейтрино, полученное в лаборатории. А если привлечь все данные, то получается, что сумма масс всех нейтрино меньше 0,44 эВ. Это уже тот уровень, который очень непросто достичь в лабораторных условиях. Впрочем, это отнюдь не означает, что лабораторные эксперименты по измерению массы нейтрино надо прекращать: исследователи по своему призванию обязаны испробовать все возможные способы для определения важной фундаментальной величины.

34. Почему это так хорошо получается

Одно из важнейших свойств человека — способность поражаться происходящему в окружающем мире (в смысле впадать в крайнюю степень удивления). Например, автор, будучи в состоянии далеко не первой молодости, поражается тому, как юная гимнастка взлетает со снаряда, крутится вокруг двух осей, приземляется точно на ноги и при этом не разваливается. В детстве автор поражался тому, как стреляет ружье и ездит машина — как щепотка пороха в патроне и капля бензина в цилиндре развивают такую силу. А вот тому, как работает компьютер, я не поражался никогда, поскольку начинал работать с самыми древними машинами, программируемыми в восьмеричных кодах, где работу можно было проследить пошагово, глядя на панель с лампочками, отражающими текущую команду в двоичном виде. Последующий прогресс плавно проистекал на моих глазах.

Вероятно, и у тех, кто начинал заниматься космологией в 1980–1990-х годах, триумф теории и эксперимента, изображенный на рис. 32.2, никакого удивления не вызывает. Однако, ни автор, ни подавляющее большинство читателей к таковым не относятся, и потому согласие между теоретической кривой с подогнанными шестью параметрами и данными на рис. 32.2 можно назвать поразительным, фантастическим. Шесть параметров для сложной кривой со многими максимумами с неочевидными соотношениями высоты — это очень экономно, примерно, как убить шестью выстрелами тридцать зайцев. Причем полученные значения параметров близки к тем, что были извлечены раньше (хотя и с меньшей точностью) из данных о современной Вселенной.

Как вообще людям удастся так хорошо описать то, что происходило в интервале истории Вселенной от долей секунды до сотен миллионов лет? С одной стороны, есть понятное объяснение: все неоднородности плотности относительно малы, поэтому работает теория возмущений в первом порядке. С другой стороны, процессов много и все они не столь просты. Плюс к тем эффектам, которые пе-

речислены выше, есть, например, всякие переходные процессы: когда неоднородность входит под горизонт (от секунд до тысяч лет), когда меняется уравнение состояния Вселенной (80 тыс. лет), они усиливают контраст распределения темной материи. Дальше надо точно знать, как протекала во времени рекомбинация водорода и даже гелия — от этого зависит, насколько замыт контраст неоднородностей малых масштабов. Есть еще целый ряд эффектов, влияющих на картину, — мы опустим их, чтобы не перегружать читателя подробностями.

И это всё тщательно учтено. Конечно, над теорией ранней Вселенной работает много людей, разные независимые группы — всё перепроверено по много раз и достигнут консенсус. И обработкой данных WMAP занимается много народа.

Здесь стоит выразить признательность агентству NASA, которое уже десятилетиями выкладывает все данные разных экспериментов в открытый доступ. Их может скачать любой исследователь вместе со всей сопутствующей информацией, необходимой для обработки. Это полезно сразу в нескольких отношениях.

Во-первых, если в данных есть «косяки», их обязательно обнаружит «народный контроль» из независимых исследователей разных стран. В частности, на раннем этапе накопления данных Павел Насельский, Олег Верходанов, Андрей Дорошкевич и Игорь Новиков обнаружили, что карта реликтового излучения, представленная командой WMAP как вариант, полностью очищенный от фона, на самом деле коррелирует с фоном по фазам гармоник, т.е. очищена плохо. Это заставило чистить лучше. Вообще, сама возможность контроля со стороны заставляет команду «вылизывать» инструмент и подготовку данных до предела возможного.

Во-вторых, открытость данных мобилизует народ в данную область исследований. И, наконец, команда эксперимента, как правило, «снимает сливки», но не может выкопать из данных всё, что там содержится. Это делают многочисленные волонтеры по собственной инициативе.

Вообще, принцип открытых данных настолько важен, что заслуживает лирического отступления. По убеждению автора, в нем заключается будущее науки, связанной с дорогими экспериментами.

Под открытыми данными следует понимать не обработанную справочную информацию типа каталогов небесных объектов, таблицы сечений ядерных реакций и т.п., а исходные данные: отсчеты частиц в детекторах, «сырые» снимки обзора неба в цифровом виде прямо с электронной ПЗС-матрицы, гамма-кванты, зарегистрированные космическим гамма-телескопом, и многое другое. При современных информационных технологиях нет никаких проблем держать исходные данные в открытом доступе. Данные, о которых идет речь, отличаются от справочной информации тем, что посторонний исследователь самостоятельно может найти в них нечто совершенно новое.

Многие экспериментаторы хотят быть хозяевами своих данных, так что принцип пробивает себе дорогу, преодолевая нешуточное сопротивление. Пожалуй, NASA было первой крупной организацией, сформулировавшей политику открытых данных примерно с таким лозунгом:

Данные оплачены налогоплательщиками и являются общественным достоянием. Следовательно, они должны быть доступны всему научному сообществу, причем, поскольку национальная и мировая наука неразделимы, то и всему мировому сообществу. Авторам эксперимента — все почести и годичная задержка открытия данных миру, чтобы успели «снять сливки» и «вылизать» эксперимент.

Конечно же, далеко не все научные организации ринулись брать пример с NASA. Возражения всякие:

1. *Данные будут использоваться неквалифицированными людьми, которые будут на их основе делать неправильные работы, подрывая репутацию эксперимента.*
2. *Авторы эксперимента теряют мотивацию. Зачем вкладывать душу в сложнейшую установку, работая годами, если потом работать с этими данными, лезть в них своими грязными руками, извлекая из них новую физику, смогут все.*
3. *Только авторы эксперимента могут правильно обработать данные, учтя всевозможные тонкости, особенности и погрешности.*

Пару слов по поводу последнего аргумента. Он справедлив для очень многих экспериментов из-за всяких «соплей» — подвязочек, подпорочек, короче говоря, халтуры, связанной с желанием сделать побыстрей. Это обычно и есть «тонкости и особенности». Открытость данных требует высокого качества эксперимента: стабильной работы установки, точного знания ее свойств и погрешностей, отличной документации. Если эти условия не соблюдены, то дотошные посторонние исследователи выявят все косяки. Получается, что открытость данных чревата дополнительной ответственностью за качество работы.

Вопрос, открывать данные или нет, связан со смыслом самих экспериментов. Вспомним о налогоплательщике. Что надо добропорядочному налогоплательщику, например, от космического гамма-телескопа «Ферми»? Последний, среди прочего, открыл множество новых источников гамма-излучения на небе. Налогоплательщику вряд ли нужны эти источники. Ему нужно, чтобы общество умнело и развивалось, чтобы его дети и внуки становились не оболтусами или религиозными фанатиками, а образованными, самостоятельно мыслящими гражданами. И добропорядочный налогоплательщик понимает, что наука этому способствует — не конкретный результат, а вовлеченность людей в науку. Поэтому для налогоплательщика гораздо важнее не то, чтобы группа исследователей опубликовала хороший каталог новых источников, а чтобы как можно больше людей имело возможность выявлять эти источники и самостоятельно возиться с ними.

Как бы там ни было, принцип открытости данных постепенно побивает себе дорогу. Он давно практикуется в биологии — открыты данные по всевозможным геномам. И не исключено, что он доберется и до физики высоких энергий, которая до сих пор отличалась закрытостью — даже внутри одной коллаборации «выделение» данных на обработку обычно происходит в порядке жесткой субординации. Уже идут разговоры о том, чтобы открыть данные экспериментов ЦЕРНа, пусть не сразу, а с четырехлетней задержкой, но это всё равно стало бы преодолением последнего крепкого рубежа сопротивления.

На одной международной конференции по астрофизике зашла речь о необходимости как-то организовать сотрудничество разных

групп, регистрирующих гамма-кванты самых высоких энергий — 100 ГэВ и выше. Это наземные сети телескопов, улавливающих черенковский свет от ливней частиц в атмосфере. Проблема в том, что таких установок несколько, каждая держит свои данные при себе, и их очень трудно объединить. Прозвучал вопрос к аудитории: что делать? В ответ прозвучала реплика:

— Зачем выдумывать что-то? Откройте данные, и это решит все проблемы!

В зале наступила слегка затянувшаяся тишина. Наконец, представитель одной из групп разъяснил:

— Это не просто. Дело в том, что эти эксперименты делаются в основном выходцами из физики высоких энергий. А там не принято делиться данными — конкуренция велика, и все боятся упустить приоритет.

На этом дискуссия о способах сотрудничества закончилась. Думаю, если откроют данные Большого адронного коллайдера, держать под замком данные с других больших установок станет совсем неприлично.

Правда, что касается Большого адронного коллайдера — там есть еще одна проблема. Открыть сырые данные физически невозможно из-за их объема. И самостоятельно обработать их практически невозможно. Поэтому речь может идти лишь об открытии данных высокого уровня — адронные струи, мюоны и фотонные ливни.

Однако вернемся к данным WMAP и к их интерпретации. В результате работы многих независимых групп теория с небольшим числом подгоночных параметров великолепно описывает наблюдения. Более того, взгляните снова на рис. 32.2: параметры Вселенной, приведенные выше, найдены только по точкам WMAP, которые идут лишь до мультипольного момента ~ 1000 (разрешение $0,2^\circ$). Однако теоретическая кривая с этими параметрами идет дальше до мультиполей ~ 2000 и великолепно описывает точки, полученные в других экспериментах, хотя они не учитывались при подгонке! Автор, профессионально занимаясь астрофизикой, впервые сталкивается со случаем, когда сложная кривая, подогнанная по точкам на левой половине рисунка, столь триумфально совпадает с нетривиально расположенными экспериментальными точками на правой половине рисунка.

Успех означает, что космологи действительно хорошо понимают и умеют количественно описывать то, что происходило в ранней Вселенной. На детальном уровне — всё, что происходило после первых долей секунды. На более качественном — ощущают эпоху 10^{-35} с, когда формировался спектр неоднородностей Вселенной. Мы знаем, какова амплитуда этих неоднородностей, каков наклон спектра, и близки к тому, чтобы сделать выбор в пользу той или иной модели инфляции. Это и есть почва под ногами ученых, которые залезли в такие масштабы мироздания, о возможности исследования которых еще недавно никто не догадывался.

35. Последний штрих

Структуру нынешней Вселенной дали ничтожные квантовые флуктуации метрики, имевшие место на стадии инфляции. Но эти флуктуации образовали не только неоднородности плотности, они же родили реликтовые гравитационные волны, которые тоже растягивались инфляционным «конвейером», тоже имеют изначально плоский спектр и существуют и поныне как реликт ранней Вселенной. В отличие от микроволнового излучения, являющегося реликтом эпохи рекомбинации, имевшей место спустя 380 тыс. лет после Большого взрыва, гравитационные волны — прямой реликт эпохи космологической инфляции, развернувшейся за 10^{-35} с до Большого взрыва.

Амплитуда этих волн слишком мала, чтобы их можно было зарегистрировать рукотворными детекторами. Но тут на помощь опять приходит тот самый барьер, который закрывает от нас раннюю Вселенную, — плазма эпохи рекомбинации. Она и играет роль детектора, «записывая» результат в том же реликтовом излучении, которое принесло нам остальную информацию. Конкретно, гравитационные волны можно увидеть двумя способами: в поляризации реликтового излучения и в угловом спектре мощности его анизотропии, показанном на рис. 32.1. Первый способ более прямой, с него и начнем.

Поляризация реликтового излучения — довольно тривиальная вещь. Она возникает при последнем комптоновском рассеянии фотонов на электронах: у фотона появляется линейная поляризация, перпендикулярная плоскости рассеяния. Если среда однородна и не движется, никакой поляризации нет — всё замыывается, нет выделенного направления. Но среда, как мы видим по карте реликтового излучения, неоднородна и участвует в сложных движениях. И поляризация, как мы видим, тоже есть: WMAP ее прекрасно чувствует. Но причем здесь гравитационные волны?

Оказывается, гравитационные волны дают другую картину поляризации, нежели обыкновенные неоднородности. Их вклад можно отличить и выделить. Грубо говоря, так:

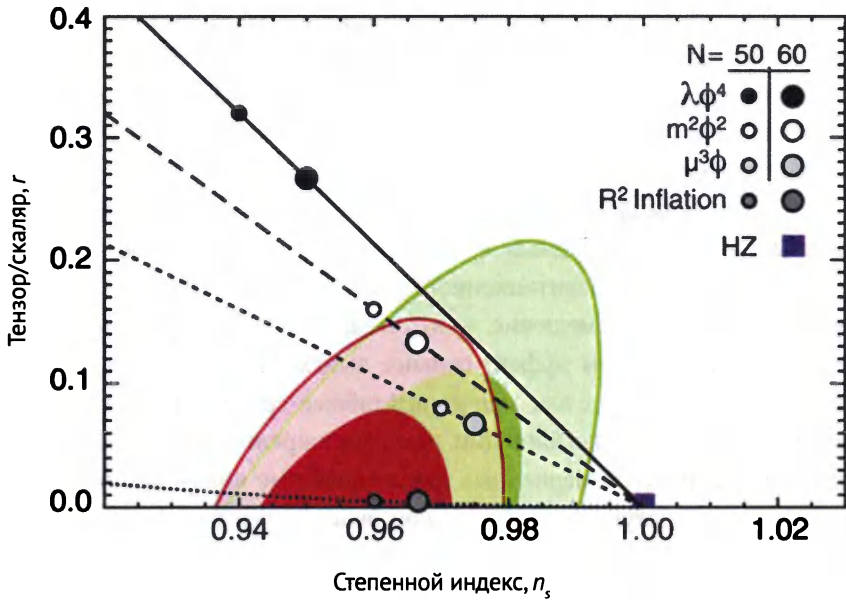


Рис. 35.1. Ограничения, поставленные экспериментом WMAP на амплитуду реликтовых гравитационных волн. По горизонтали — наклон степенного спектра первичных возмущений, который закладывается в теорию. По вертикали — отношение мощности тензорных возмущений (гравитационных волн) к мощности скалярных возмущений, традиционно обозначаемое как r . Красным показана область согласия с экспериментом на уровне 1σ , розовым — 2σ . Точками, соединенными пунктирами, показаны разные модели инфляции. Нижняя (обозначенная как R^2) — модель Старобинского. Число N означает число растяжений пространства в e раз от момента, когда данный участок спектра сгенерировался в результате квантовых флуктуаций, до конца инфляции (см. рис. 27.2)

Картинка поляризации на небе выражается полем черточек, имеющих направление и длину. Такое поле может выглядеть как электрическое — может быть представлено как результат статического распределения зарядов. А может выглядеть как магнитное, наведенное статическим распределением токов. Эти поля четко различаются на языке дифференциальной геометрии. Первый тип поля называется Е-модой, второй В-модой. Любое произвольное поле поляризации можно разложить на Е и В составляющие. Оказывается, что В-моду могут дать только гравитационные волны, но никак не неоднородности плазмы и их акустические колебания. Некоторый вклад в В-моду в области высоких мультиполей (малых угловых масштабов) может дать гравитационное линзирование поляризованного реликтового излучения. Пока на карте поляризации существующих экспери-

ментов видна только Е-мода. Лучшее ограничение на В-моду получено с помощью наземного микроволнового телескопа VICEP (на Южном полюсе): предел на отношение спектров мощности гравитационных волн и скалярных неоднородностей плотности $r < 0,78$ (на уровне достоверность 95%).

Вторую возможность почувствовать первичные гравитационные волны дает так называемый эффект Сакса — Вольфа. Фотон, проходя через возмущения гравитационного поля, меняет частоту, испытывая красное или синее смещение, — это меняет температуру реликтового излучения. Причем эффект сильнее выражен для крупномасштабных возмущений, так как мелкомасштабные гравитационные волны затухают еще до рекомбинации из-за расширения Вселенной. Впервые идею о том, что первичные гравитационные волны могут давать вклад в температурную анизотропию реликтового излучения выдвинули В. Рубаков, М. Сажин и А. Веряскин в 1982 году. Эффект Сакса — Вольфа должен «приподнимать» спектр мощности температурных неоднородностей на малых мультиполях, слева от главного акустического пика (см. рис. 32.1), и затухать к большим мультиполям. Этого не наблюдается в данных WMAP, из чего следует верхний предел $r < 0,13$ (на уровне достоверности 95%).

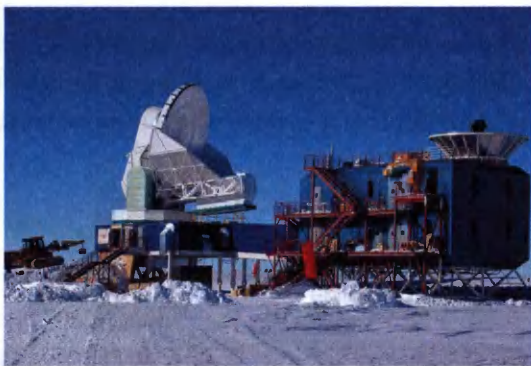
Этот предел уже поставил под сомнение некоторые конкретные модели инфляции. Пока наилучшим образом под него укладывается модель Старобинского, правда не она одна.

Следы гравитационных волн в поляризации реликтового излучения надо найти во что бы то ни стало. Если их изначальный спектр такой же, как и у неоднородностей плотности, т.е. очень близок к плоскому, это будет окончательным подтверждением факта космологической инфляции. Больше таким волнам вестись неоткуда.

Насколько сложно обнаружить следы реликтовых гравитационных волн и насколько это реально в обозримом будущем? Вполне реально, хотя есть серьезные проблемы, связанные с фоном. Некоторые надежды связывают с европейским аппаратом «Планк», аналогичным WMAP, но с лучшим угловым разрешением. Из наземных экспериментов большие надежды подает эксперимент SPTpol, недавно стартовавший на Южном полюсе. Выше уже был упомянут микроволно-

вый телескоп SPT с зеркалом диаметром 10 м. Сейчас на нем установлена специальная камера для измерения поляризации реликтового излучения. Есть еще несколько экспериментов, специально посвященных поиску гравитационных волн по поляризации реликтового излучения. Несколько из планируемых экспериментов будут тоже проводиться на Южном полюсе — это лучшее место для наблюдения реликтового излучения с земной поверхности.

35.2. Микроволновые телескопы SPT (слева) и VICEP (справа, внутри конусообразного экрана), расположенные на Южном полюсе



Из проектов будущих космических экспериментов весьма впечатляет недавно заявленный европейский PRISM (Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission). Это будет весьма универсальный инструмент, который, по замыслу, сможет очень хорошо отделять реликтовое излучение от всякого рода фонов, и в том числе извлекать чистую карту его поляризации. Заявленный уровень детектирования реликтовых гравитационных волн $r \sim 0,5 \cdot 10^{-3}$ (даже если подтвердятся наихудшие ожидания по поводу фона). Если обещанное будет исполнено, то PRISM откроет гравитационные волны даже если реализовался один из «пессимистических», но очень интересных вариантов инфляции, обсуждаемых ниже в интервью с Алексеем Старобинским и Андреем Линде. Эти варианты предсказывают $r \sim 3 \dots 4 \cdot 10^{-3}$.

...Время, в которое писалась эта книга, оказалось очень бурным в самых разных отношениях. История разворачивалась на наших глазах. Вместо того, чтобы переписывать главы, приводя их в соответствие с последними фактами, мы даем постскрипумы. Так лучше передается ощущение творящейся истории.

36. Р. С. к главам 31–35

После того, как четыре предыдущие главы были написаны, появились публикации космологических результатов миссии «Планк» по данным за первые 500 дней наблюдений. Качество данных лучше, чем у WMAP, ряд космологических параметров существенно уточнен, гравитационные волны пока не найдены, но сделаны измерения галактического фона, в первую очередь пыли, что должно сильно помочь в обнаружении первичных гравитационных волн.

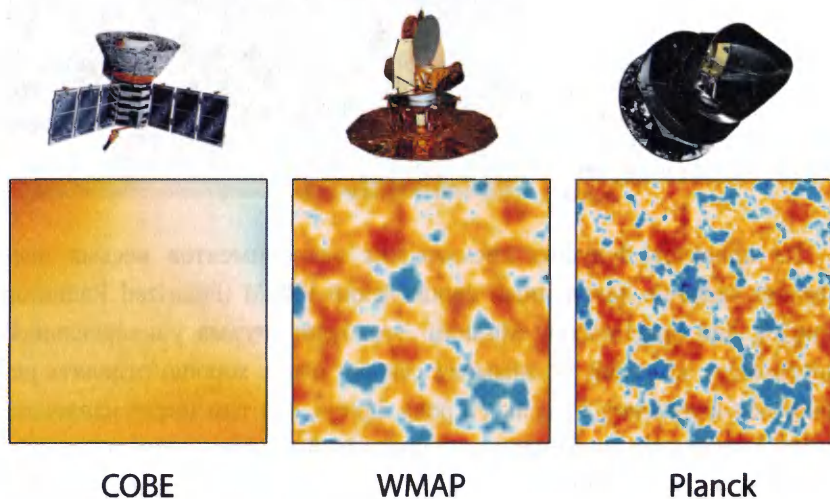


Рис. 36.1. Прогресс в разрешении космических микроволновых телескопов. Один и тот же участок неба, снятый COBE, WMAP и «Планком»

Несколько увеличилась доля темной материи и уменьшилась доля темной энергии, однако разница лишь немного выходит за одно стандартное отклонение. Предел на примесь реликтовых гравитационных волн остался примерно тем же, что и по данным WMAP. Оценка возраста Вселенной чуть увеличилась (до 13,8 млрд лет). Сравнение значений важных космологических параметров по данным WMAP и «Планк» дано на рис. 36.2. Значения с ошибками даны в двух вариантах: если брать только данные миссии и если дополнить их данными других наблюдений, в том числе, касающихся современной Вселен-

ной: они обозначены как WMAP+ и «Планк»+. Существенно для физиков то, что подтверждена оценка эффективного числа типов «нейтрино» — она тяготеет к трем, которые уже известны. Искать четвертую легкую слабо взаимодействующую частицу вроде бы нет резона. Почти вдвое уменьшен верхний предел на сумму масс трех типов нейтрино: если привлечь все силы, то натягивается предел 0,24 эВ. Хорошо и важно, что «Планк» подтверждает результат WMAP по наклону спектра первичных возмущений плотности Вселенной. Показатель наклона спектра $n = 0,96$ отличается от плоского на 0,04 как по данным WMAP+, так и по результатам «Планк»+, но «Планк» поднял статистическую значимость этого отклонения до 6 сигма. Верхний предел на вклад реликтовых гравитационных волн немного снизился, до $r < 0,11$. Радикально снижен предел на негауссовость флуктуаций реликтового излучения. Свойство гауссовости означает, что карта излучения является случайной суммой независимых флуктуаций и выражается в том, что фазы угловых мультиполей не коррелируют друг с другом. Возможно, это самый важный результат на настоящий момент. О значении нового предела говорится ниже в интервью с Андреем Линде.

Пока обработаны лишь 2/5 от накопленных данных «Планка». Поэтому есть надежда на дальнейшее уточнение параметров Вселенной, а может быть и на открытие новых эффектов. С особым нетерпением народ ждет публикации результатов по поляризации реликтового излучения — это внесет ясность в мистику реликтовых гравитационных волн, освещенную в следующем постскрипте.

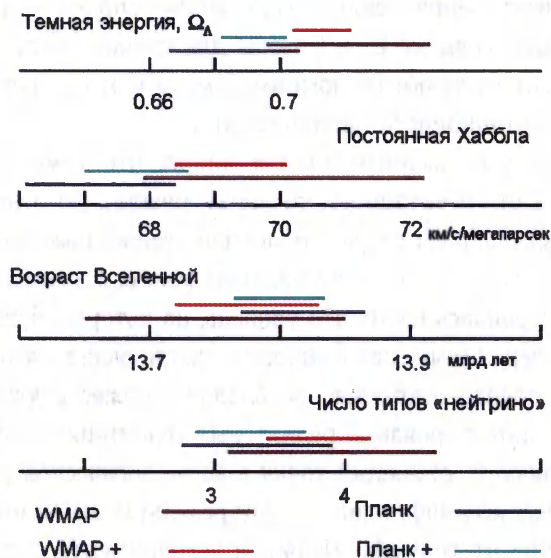


Рис. 36.2. Сравнение результатов «Планка» с результатами WMAP

37. P. P. S. к главам 31 – 36: Гравитационные волны обнаружены?

Когда книга близилась к завершению, 17 марта 2014 года мировые масс-медиа обошла сенсация: открыты реликтовые гравитационные волны! Авторы сенсации – коллектив эксперимента BICEP2, продолжающего упомянутый выше BICEP. В их электронном препринте (arXiv.org/1403.3985v2) сообщается об обнаружении В-моды поляризации реликтового излучения, которое интерпретируется как «отпечаток» реликтовых гравитационных волн. BICEP – довольно маленький по размеру микроволновый телескоп, расположенный на Южном полюсе. Угловое разрешение всего полградуса, зато очень низкие шумы и высокая чувствительность. Это, в частности, достигается за счет охлаждения жидким гелием основных элементов телескопа. Измерения, результаты которых опубликованы, проводились три сезона с 2010 по 2012 год.

На рис. 32.1 показаны снятые карты поляризации, разложенные на Е-моду (слева вверху) и В-моду (слева внизу). Длина черточек пропорциональна степени линейной поляризации, направление указывает направление поляризации. Справа – результат численного моделирования Е- и В-моды для случая, когда гравитационные волны отсутствуют (напомним, В-мода в этом случае появляется за счет гравитационного линзирования).

Невооруженным глазом видно, что В-мода заметно превышает фон от гравитационного линзирования. По отношению к скалярным возмущениям результат по гравитационным волнам выражается как $r = 0,2^{+0,07}_{-0,05}$, что неожиданно много. Научная общественность уже настроилась на то, что уровень, на котором будет обнаружен эффект от первичных гравитационных волн, окажется ниже. В комментариях по поводу открытия преобладает торжествующий тон. Действительно, детектирование реликтовых гравитационных волн – важнейший результат, ставящий точку в космологической революции, связанной с теорией инфляции. С виду результат выглядит надежным. Но в отличие от триумфа теории и эксперимента, состоявшегося в резуль-

тате экспериментов WMAP и «Планк», в данном случае остаются вопросы. Главный из них: не противоречит ли результат данным вышеупомянутых экспериментов? Иными словами, сигнал от гравитационных волн оказался подозрительно большим.

В принципе, величина $r \sim 0,2$ вполне вписывается в простейшие варианты теории инфляции. Но она на три стандартных отклонения противоречит верхнему пределу «Планка», поставленному с опорой на эффект Сакса – Вольфа из углового спектра мощности температурных флуктуаций. Вероятность случайного отскока результата на три стандартных отклонения – два шанса из тысячи. Маловато. Правда, ограничение $r < 0,11$ справедливо только в предположении, что распределение неоднородностей реликтового излучения по угловому размеру (спектр мощности) описывается чисто степенным законом. Если отказаться от этого предположения, можно сильно смягчить противоречие. В препринте BICEP2 приведена картинка из статьи по результатам «Планка» именно в той версии, где предположение о чисто степенном спектре снято. Поэтому возникает впечатление согласия.

Однако для согласия между BICEP2 и «Планком» нужно так изогнуть спектр мощности, что это требует изрядного насилия над теорией. А если этого не делать, то эффект Сакса – Вольфа «задерет» спектр, показанный на рис. 32.1 слева ($l < 150$) примерно на 10%, что при данной точности будет явно противоречить данным.

Где возможна ошибка эксперимента, завышающая результат? Сразу надо сказать, что В-мода обнаружена достаточно уверенно, сам по себе результат сомнений не вызывает. Сомнения могут быть лишь в том, справедлива ли гравитационно-волновая интерпретация – нет ли других причин, дающих этот тип поляризации. Первое, что приходит в голову, – недооценили эффект гравитационного линзирования, способного имитировать В-моду. Вряд ли: эффект линзирования исследован вдоль и поперек, он дает основной вклад в более мелкие детали, чем те, на которых видят В-моду.

Авторы статьи рассматривают и другой возможный источник фона, имитирующего эффект: поляризованная пыль в Галактике, частицы которой ориентируются в космическом магнитном поле. Рассеяние фотонов на этой пыли дает поляризацию, способную имитировать любую моду. BICEP 2 не может выделить ее вклад, поскольку

ку принимает только одну частоту. Это может сделать «Планк». Авторы е-принта констатируют, что карты распределения пыли для исследованного участка неба нет — она вскоре появится в следующем релизе «Планка». Пока они используют модели распределения пыли и получают успокоительный вывод о том, что этот фон относительно безопасен для главного результата.

Но не будем гадать и забегать вперед — вряд ли вопрос о подозрительно большом вкладе реликтовых гравитационных волн зависнет на долгие годы. Во-первых, вскоре «Планк» должен прояснить ситуацию с фоном поляризованной пыли. Во-вторых, параллельно идут аналогичные эксперименты, в том числе и на Южном полюсе. Будут исследованы другие участки неба, появятся независимые результаты. Наверняка большие силы мобилизуются на изучение всевозможных эффектов, влияющих на результаты измерений. Вряд ли ответы заставят себя долго ждать.

Попробуем подытожить. Сделана серьезная заявка на важнейшее открытие, возможно, ставящее точку в космологической эпопее, начавшейся более 30 лет назад. Уже раздается звон бокалов, но с окончательным празднованием победы очередной революции в космологии, пожалуй, следует немного повременить. Еще не все концы сведены с концами и не все подозрения развеяны. Если результат подтвердится, то некоторые конкретные модели инфляции, обсуждаемые в этой книге как весьма перспективные и красивые будут поставлены под сомнение или отвергнуты. Это модель Старобинского, обсуждаемая в главе 19, и ряд других, затронутых в интервью с Андреем Линде. Но стоит ли спешно переписывать соответствующие главы? Пожалуй, лучше оставить всё как есть: взгляды, мнения и высказывания ключевых участников процесса имеют наибольшую историческую ценность, когда они не переписываются в связи с новыми обстоятельствами. Документы не редактируются!

Кстати, даже если результат не подтвердится, он всё равно явится полезной встряской, мобилизующей людей на прорыв в этой важнейшей задаче. Такое уже случалось в космологии. И привлеченное внимание широкой публики дорогого стоит. В этом смысле сенсацию можно назвать здоровой вне зависимости от того, подтвердится она или нет.

38. Что мы в результате знаем и чего не знаем о нашей Вселенной

Прежде, чем пойти дальше (а дальше очень даже есть куда пойти), полезно остановиться и подвести краткий итог.

Итак, мы хорошо знаем основные числа, характеризующие нашу Вселенную: состав, возраст, геометрию, динамику. Состав по вкладу в полную энергию: 5% — барионы, 26% — темная материя (эти две компоненты имеют практически нулевое давление) и 69% — темная энергия (с отрицательным давлением). Вселенная с хорошей точностью «плоская» (евклидова) и расширяется с ускорением.

Мы неплохо знаем историю Вселенной: как она расширялась в разные эпохи, как развивалась ее структура, чем она была заполнена, по крайней мере, после первых наносекунд — соответствующая физика частиц достаточно исследована на ускорителях.

У нас есть хорошо разработанная концепция механизма, благодаря которому Вселенная скорее всего возникла, механизма, имеющего право называться «первичным толчком», приведшим в действие всё остальное.

Мы достаточно хорошо можем прогнозировать будущее Вселенной на десятки и сотни миллиардов лет вперед, хотя не можем исключить каких-либо неожиданностей, например нового фазового перехода или неожиданного поведения темной энергии.

Однако, выявилось много такого, чего мы не знаем, не понимаем или перестали понимать.

Будем следовать правилу: «Если не можешь придумать новую метафору, используй самую избитую». Таковой в данном случае будет сопоставление научной картины мира со зданием — чего стоит одно слово «мироздание»! Так вот, мы хорошо различаем основные конструкции этого здания и понимаем их роль. Но мы не знаем, из чего сделаны некоторые важнейшие из них. Так, неизвестно, из чего «сделана» темная материя. Но здесь, по крайней мере, существуют более-менее обоснованные гипотезы относительно того, как она связана с обычной материей. Однако нет

никаких зацепок, чтобы понять, как связана темная энергия с известным зоопарком полей и частиц. Точно также мы в целом понимаем, как происходила космологическая инфляция, но не знаем, что именно было ее движущей силой — скалярное поле, «ложный вакуум»? Иначе говоря, непонятно, какова физика инфлатона и нужен ли последний вообще — модель Старобинского обходится без него, там дело делают любые, в том числе уже известные поля. В данный момент существуют десятки гипотез на этот счет, вероятно, в ближайшее время их число уменьшится благодаря новым данным «Планка», но не настолько, чтобы получить определенный ответ.

Если заглянуть еще глубже, остается непонятным, откуда вообще взялась спокойная среда, в которой могут существовать какие-то здания: почему энергия вакуума столь близка к нулю? И точно так же мы по-прежнему не понимаем, как устроен мир на планковских масштабах, — не исключено, что две последние загадки как-то связаны. То есть мы не очень понимаем природу фундамента, на котором наше здание стоит.

Как всегда, в ходе новой космологической революции одни загадки нашли объяснение, зато появились новые. И соотношение решенных и возникших загадок выглядит типичным для любых научных прорывов, т. е. концом физики и не пахнет. Правда, создается впечатление, что мы приближаемся к некому методологическому тупику: технические возможности для исследования новых энергетических масштабов в физике частиц и ранней Вселенной подходят к своему пределу.

Однако прямолинейный метод «грубой энергии» далеко не единственен. Есть другой путь в далекие масштабы физики и космологии: точность. Это прекрасно продемонстрировал эксперимент WMAP. Этот путь далек от исчерпания, да и ускорители еще могут наращивать энергию. Весь вопрос в том, готово ли мировое сообщество тратить силы и средства на выяснение фундаментальной картины мира, если эта картина непонятна большинству жителей Земли и с первого взгляда не несет практической пользы.

Кстати, так ли велики средства, требуемые для того, чтобы поднять инструментарий науки на очередную ступень вверх?

С чем сравнить затраты на фундаментальную науку? В былые времена подобные затраты измеряли в авианосцах или в долях авианосца. Иногда в танках (если речь шла о теоретиках и математиках). В настоящее время в данной стране популярным мерилom является Сочинская олимпиада — 50 млрд долларов, сумма, часто обозначаемая как «олимпиард» (после которой останется лишь инфраструктура непонятного качества и неочевидной востребованности). Цена Большого адронного коллайдера около 10 млрд долларов. За один олимпиард сейчас можно было бы построить коллайдер этак на 20 ТэВ, который скорее всего решил бы вопрос с темной материей и с наличием новой физики и новых выводов частиц выше энергии электрослабого объединения. Заметим, в первом случае это национальные затраты, во втором — всего развитого мира.

А если пойти с другой стороны и затратить те же деньги на целый спектр космических и наземных телескопов? Телескоп «Хаббл» обошелся в 2,5 млрд, правда, его ремонт, обслуживание на орбите и эксплуатация за 20 с лишним лет увеличили общие затраты до 10 млрд (одна пятая олимпиарда). Телескоп следующего поколения «Джеймс Вебб» оценивается в 6,5 млрд к моменту запуска (он увидит, как формировались первые галактики и отследит процесс рождения звезд неподалеку от нас). Накинем еще 8,5 млрд на эксплуатацию и раздувание бюджета. От фонда олимпиады осталось еще 35 млрд. Миллиардов десять с лихвой хватит на наземные и космические микроволновые телескопы, которые измерили бы вдоль и поперек реликтовое излучение и его поляризацию на новом уровне точности. Тут наверняка проявились бы и реликтовые гравитационные волны, и с моделью инфляции разобрались бы. А на оставшуюся половину олимпиарда можно было бы совершить новый прорыв в изучении экзопланет и посадить зонды на «перспективные» спутники планет-гигантов: Титан, Ганимед, Энцелад и Европу, между прочим.

Но нужны ли все эти достижения народным массам? Может быть, им та же Сочинская олимпиада нужна больше, чем все научные открытия вместе взятые? Похоже, именно так думают политики и капитаны масс-медиа. Трудно что-либо возразить: действительно, хлеб и зрелища издавна перевешивали в массах тягу к наукам и искусствам, особенно накануне краха империй. Но кто сказал, что выбор

пути и лицо цивилизаций определяется арифметическим большинством? И кто сказал, что наука интересна только тем, кто в ней разбирается? Вот несколько зарисовок из жизни.

Конец 1980-х. Автор, еще вполне советский человек с характерными комплексами, возвращается из Копенгагена с большой добычей дешевого ширпотреба. В соседнем кресле одетый с иголки японец. Разговорились. Он, банковский менеджер, узнав, что его сосед астрофизик и к тому же приезжал в Институт Нильса Бора (это вообще!), пришел в восторг и стал расспрашивать про черные дыры и Большой взрыв. И смотрел снизу вверх на полунищего советского кандидата наук.

Америка первой половины 1990-х. Сравнительно недавно Конгресс США прекратил финансирование ускорителя SSC, превосходившего по проектной энергии Большой адронный коллайдер. Хозяин квартиры, автомеханик, читает газету: «Пишут, что в тоннеле закрытого ускорителя собираются выращивать шампиньоны. Позор! Хотели исследовать тайны Вселенной, а будут выращивать шампиньоны!»

2010 год. Сын автора едет на машине по Тульской области и попадает гаишнику за обгон по встречной в запрещенном месте. Грозит лишение прав на месяцы или огромная взятка. Гаишник интересуется, где работает нарушитель, узнав, что физик, смягчается, а узнав, что он работает на Большом адронном коллайдере, с интересом расспрашивает и отпускает.

Лето 2012 года. Соседи по даче просят толком объяснить, что же там открыли в ЦЕРНе. А по телеканалу «Дождь» в тот же день журналисты и литераторша, не понимающие в физике ни бельмеса, с искренним воодушевлением говорят: наконец люди сделали что-то настоящее, и можно гордиться принадлежностью к человеческому роду. Это про открытие бозона Хиггса.

Эти эпизоды не претендуют на статистическую значимость и репрезентативность, просто немного поднимают настроение.

Миф о примитивности народных масс — не более, чем результат презрения к народу, свойственного политикам и бизнесменам от масс-медиа. Интересно, а если бы в подледном океане Европы жили существа, тождественные нам по разуму, они пробурили бы лёд ценой огромных затрат?

39. Сто пятьдесят миллиардов оксов

Координационный комитет Цивилизации собрался, чтобы рассмотреть вопрос о финансировании проекта скважины через ледяной панцирь. Комитет для того и был создан, чтобы выделять средства Объединенного фонда на глобальные проекты, каковым являлась скважина. Он состоял из делегатов субъектов Цивилизации: республик, империй, монархий, коммун, независимых мегаполисов, территориальных анархий, племен и прочих образований, вкладывавших и не вкладывавших средства в Объединенный фонд.

Зал заседаний был обычным амфитеатром, где у каждого делегата было свое место, оборудованное специальными фиксирующими ремнями. Перед началом заседания каждый делегат был обязан пристегнуться, иначе он считался отсутствующим. Он мог отстегнуться в любой момент, чтобы отлучиться, но для этого требовалось набрать цифровой код — произведение пары двузначных чисел (европиане, естественно, использовали восьмеричную систему), горящих на табло.

Эта система пристегивания была введена решением самого Комитета по следующей причине. Европиане весьма эмоциональны и вспыльчивы. Поэтому на заседаниях, как и в любом парламенте в эпоху становления парламентаризма, случались массовые драки. А трехмерная драка куда серьезнее двумерной, которые бывают в земных парламентах на твердой поверхности. Там дело обычно заканчивается образованием плотной толпы, где невозможно размахнуться и даже дотянуться до ненавистного оппонента. А в объемной драке можно дотянуться и сверху и снизу, да так, что совершенно невозможно понять, кто и откуда тебя схватил за затылочный гребень. В конце концов, образовывался плотный клубок, распутаться которому было не так просто. А если кто-то в панике выпускал электрический разряд, то дело кончалось еще хуже. Вот и решили делегаты поставить себя «на предохранитель» — пока перемножаешь числа и набираешь код, успеешь остыть.

На этот раз драки не предвиделось. Сумма на реализацию проекта требовалась беспрецедентная, но она не задевала ничьих амбиций и не имела конкурентоспособных альтернатив. Делегаты могли проголосовать «за» или «против», но без всяких бурных эмоций.

Перед собранием выступил один из лидеров проекта. Его речь была короткой, поэтому приводим ее полностью:

— Уважаемые члены Координационного комитета! Дорогие собратья!

Я сейчас буду просить денег, очень больших денег, для того, чтобы накопец, пробурить ледяной панцирь и увидеть, что снаружи. Все вы знаете, что природа преподнесла нам ценнейший подарок: огромный метановый купол, делающий фантастическую мечту многих поколений вполне реальной. Неужели у нас не хватит духа и сил, чтобы этим подарком воспользоваться?

Мы уже два периода работаем над проектом — считаем и моделируем, проектируем и разрабатываем, учимся взрывать лёд и намораживать воду в углеводородной среде, делаем модели шлюзов и барокамер, экскаваторов и тракторов для внешней поверхности. Мы предусмотрели множество ожидающих нас проблем, даже такую, как обломки льда, которые скопятся в куполе на границе раздела воды и метана. Сейчас можно твердо заявить: мы знаем, как пробурить лёд! Конечно, нас еще будут ждать неожиданности, которые невозможно предугадать, не начав. Мы готовы начать, но для этого должны быть приведены в движение огромные ресурсы, на что нужны деньги, ощутимые даже в глобальном масштабе.

Будем честными. Общественное мнение пока не на нашей стороне. Опросы показывают, что только один из трех жителей Мира готов пожертвовать свою долю в 120 оксов на проект. Двое из трех либо вообще не понимают, зачем это нужно, либо считают, что есть более насущные проблемы. В частности, бытует мнение, что лучше затратить эти деньги на глобальные спортивные состязания. Уважаемые члены Координационного комитета имеют полномочия, достаточные, чтобы принять решение о выделении денег своими голосами. Но я прекрасно понимаю, что двое из каждых трех жителей напряженно смотрят им в затылок. Поэтому, я буду говорить, обращаясь также к собратьям, находящимся за этими стенами, многие из которых слушают сейчас прямую трансляцию.

Итак, зачем нам эта дырка в пустоту? Неужели нам так обязательно надо заглянуть туда?

Это вопрос, на который есть несколько уровней ответа. Начнем с высшего. Кто мы и в чем смысл нашего существования?

Иногда полезно попытаться взглянуть на себя глазами далекого отстраненного наблюдателя. Что он увидит в нас? Давайте попробуем это сделать.

Многие из присутствующих верят в высших существ. Кто-то в нескольких специализированных высших существ, кто-то в одно наивысшее. Как бы вы хотели предстать перед высшими существами? В каком виде они бы нас оценили, эти высшие существа? Умеющими завязываться в узел и вертеть-

ся волчком в храме, бормоча славословия в их адрес, в знак величайшей покорности? Или распластывающимися, как кишечнополостные звезды, по мраморному полу собора, чтобы выклянчить благорасположение? Или прилегающими всю силу духа и разума, чтобы преодолеть панцирь, закрывающий от нас Внешнее Пространство? Попробуйте взглянуть на себя их глазами. Разве им всё равно, что они создали — достойных отпрысков, продолжающих великий замысел, или прожорливых ленивых попрошаек? Может быть этот лёд — экзамен для нас?

Конечно, я, как и многие здесь присутствующие, не верю в высших существ. Но я вместе со многими верю в равных существ. Они могут быть не так уж далеко — они могут жить под тем же Внешним Источником, который освещает снаружи наш ледяной панцирь. Представьте, что они связались с нами — стучат с той стороны льда. Нам что, наплевать, какими мы предстанем перед равными? Кого мы им предъявим как предмет для гордости? Своих мировых знаменитостей — доблестных долболобов, мастеров хедбола? Или тех, кто используя голову по назначению, вычислил орбиты трех миров, не видя их? Даже если мы никогда не встретимся с ними, представьте, какой вопрос первым зададут разумные существа другого мира, узнав о нашем существовании. Первый вопрос будет: «А они пробурили этот лёд?» В этом вопросе всё — и об уровне нашего развития, и о ясности разума, и о силе духа.

Наконец, можно не верить в посторонних равных существ, но у нас будут потомки, глядящие на нас с высоты будущего. Кстати, мы ведь тоже потомки. И кем из наших предков мы гордимся? Теми, кто закатывал роскошные аристократические празднества с гонками на дрессированных кальмарах? Или теми, кто в те же времена на кожаных бурдюках впервые достиг ледяного неба? Что скажут о нас потомки? Хотите ли вы, чтобы их вердикт был в том духе, что они могли, но не сделали этого, пожалев затрат? Предпочли затратить эти средства на глобальные состязания в прочности голов, скорости рывков и гибкости конечностей? А ведь полученный нами подарок судьбы, метановый мешок подо льдом, отнюдь не вечен.

Боюсь, что не все из тех, кто меня слушает, воспринимают этот уровень ответа. Спустился на одну ступеньку вниз.

Что мы увидим, пробуриив лёд? Стоит ли эта картина тех затрат? Что ж, давайте предположим, что мы не увидим там ничего интересного. Но и в этом случае мы избавим себя от вечных терзаний — а что же там?!

Но такого, чтобы мы не увидели там ничего интересного, не может быть. Мы уже знаем, что там есть, по крайней мере, шесть объектов, превосходящих Мир своими размерами, и, учитывая слабость наших методов, можно биться об заклад, что там есть много-много чего еще. Скорее всего, внешнее пространство

бесконечно, и в нем бесконечно много миров. Разнообразных миров. Неужели не интересно? А если, кому-то из слушающих меня сейчас это не интересно, то ради всего святого прошу учесть следующее: внешнее пространство и возможность его изучать зажжет искру таланта во множестве юных голов. Мало кто из них станет профессиональным исследователем, зато многие станут хорошими технологами, инженерами и сделают нашу жизнь комфортней и интересней.

Можно спуститься еще на одну ступеньку. Вы хотите иметь возможность, не выходя из дома, мгновенно связываться с любым обитателем мира, лицезреть его, доставать любую информацию из любого угла Цивилизации? Проекту требуется быстрая связь с помощью света, гибкие длинные световоды — если мы их научимся делать, это будет для всех. Вам не надоело возиться с химической обработкой фотопленок? Проекту нужны светочувствительные электронные матрицы — они сделают фотопленку достоянием истории и привередливых профессионалов. И мало ли что еще из новинок проекта войдет в жизнь!

Ну вот, возможно, я убедил кого-то, и теперь уже не двое из трех а, скажем, двое из пяти жителей смотрят с недобрым напряжением в затылок членам Комитета, а трое смотрят с надеждой.

Итак, мы просим 150 миллиардов оксов. Эта сумма включает проходку двух скважин — основной и коммуникационной, изготовление двух рабочих и двух резервных шлюзов, большие барокамеры-гостиницы на давление 0,6 токсма для рабочих. Без них на такой высоте они будут подобны полудохлым медузам. Эта сумма также включает изготовление десятков рабочих барокамер с манипуляторами — без них работать выше внутренней поверхности льда вообще невозможно, там ко всем прелестям высоты добавляется жуткий холод. Сюда же входят передвижные пилотируемые барокамеры на гусеничном ходу для исследования внешней поверхности, а также дистанционно управляемые зонды. Также две оптические системы с большими параболическими зеркалами для поиска и изучения далеких объектов во внешнем пространстве — они будут установлены на внешней поверхности. Там же будет установлена обитаемая станция комфортного давления в один токсм — там можно жить без инъекций прессинола. Остальные барокамеры для облегчения конструкции рассчитаны на 0,3 токсма, что позволит тренированным операторам работать в них до половины смены. Ну и, конечно, коммуникации — силовые кабели, уже упомянутые световоды для быстрой передачи информации. И всё это предстоит не только сделать, но и разработать. А иначе мы бы и не просили 150 миллиардов оксов.

Насколько рискован проект? В народе ходят ужасные пророчества, что через скважину вытечет наружу вся вода Мира и все погибнут. С этим ничего нельзя поделать — сколько в школе не вдалбливай, что лёд легче

воды, фантазия в паре с невежеством непобедимы. Но есть теоретический риск: если вдруг сорвет шлюзы — наружу вылетит вся смесь углеводов из купола. Снаружи это извержение будет смотреться красиво, но такая авария полностью погубит проект — скважина заполнится водой, которая замерзнет. Для страховки от такого предусмотрены аварийные шлюзы. А чтобы ни один шлюз не сорвало, мы будем намертво вмораживать их рамы в стены скважины. Лёд при температуре, которая там есть, прочен, как базальт.

Итак, перед вами всесторонне проработанный проект прорыва в неведомое внешнее пространство. Плод долгой и упорной работы многих ученых и инженеров, выполненной исключительно за счет участвующих лабораторий. Дальнейшее слово — за членами Комитета, а сейчас я готов ответить на вопросы.

— Кто будет тем счастливым, что первым увидит внешнее пространство?

— Вот над этим думали меньше всего. Какой-нибудь оператор экскаватора на последнем участке. А впрочем... Да пусть хоть сам Верховный Духовный! Если пониженное давление выдержит и прессонол переносит. Да хоть выбирайте счастливого голосованием Координационного комитета. Хоть всеобщим голосованием. Мы, гарантируя полную безопасность, приподнимем его, чтобы увидел, выразил это своими словами — и назад. Дальше всё равно пойдут профессионалы.

— А будет ли с той точки виден Большой Аттрактор?

— Будет — под 40 градусов к горизонту. И в этом нам второй подарок судьбы.

— А как он должен выглядеть?

— Должен выглядеть круглым, поскольку шар — единственная устойчивая форма тел очень большой массы. Про размер и цвет ничего сказать не могу.

— А не ослепит ли Внешний Источник, того, кто окажется снаружи?

— Хороший вопрос. Мы знаем прозрачность льда лишь приблизительно, поэтому не можем точно сказать, насколько там ярко. Видимо, весьма ярко, настолько, что это может травмировать зрение. Но вряд ли настолько, чтобы вообще ослепить, — тогда бы лёд растаял. Во всяком случае, следует соблюдать осторожность и запланировать первый выход, когда Внешний Источник загорожен Миром. Значит, первый наблюдатель его не увидит.

— Народ Желтой Равнины систематически недоедает и не доживает до второй зрелости из-за болезней и нехватки медикаментов. Денег, которые вы просите, хватило бы на то, чтобы вылечить наших больных детей и кор-

мить голодающих в течение десяти периодов. Не считаете ли вы, что это куда более важное назначение для ста пятидесяти миллиардов оксов?

— Я не политик и не дипломат, поэтому скажу то, что думаю. Народ менее плодородной Черной Равнины почему-то не только процветает, но и дает наибольший вклад в фонд Координационного комитета. Что, ваш народ убогий от рождения? Думаю, просто дело в том, что он издавна держится страхе и невежестве, зато ему внушается чувство собственного величия, богоизбранность и злоба к процветающим народам. Похмелье после подобной помощи окончательно превратит ваш народ в кишечнорастворимых существ. А скважина — такое событие, которое пробьется через любую пропаганду. Глядишь, несколько таких брешей, и ваш народ очнется, задумается, избавится от пастырей и заживет, как весь остальной Мир.

Здесь случился непредусмотренный перерыв. Представитель Желтой Равнины, выкрикнув: «Да как вы смеете подстрекать! Это вмешательство во внутренние...» — забился в истерику, переходящей в приступ паралепсии. Это была симуляция, но настолько искусная, что подоспевшие санитары сходу вкололи ему самый настоящий гракофен и оттранспортировали обмякшее тело в мобильный медпункт. Потеря делегата не повлияла на кворум, и заседание было продолжено.

— Что за оптические системы вы собираетесь установить?

— Как я уже сказал, параболические зеркала со светоприемниками. Мы условно называем эти системы «дальнозорами». Это похоже на акустические тарелки с матричными микрофонами. Только здесь тарелка — полированное зеркало, а приемник — уже упомянутая мной электронная матрица, с которой изображение можно считывать. Если бы не вода, с помощью дальнотера можно было бы распознать лицо любого члена Комитета с расстояния 5 свистов.

Прения были очень короткими. Прозвучало несколько дежурных выступлений в поддержку. Проголосовали 123 голосами «за» при 10 «против» и 15 воздержавшихся за выделение запрошенной суммы. Зато потом!..

Потом тут же решили рассмотреть вопрос о принципах выбора первого наблюдателя внешнего пространства и о возможных кандидатах. Что тут началось! Вот тут-то и пригодились ремни с кодовыми застёжками. Представители Крабовой Кальдеры и Верхних Увалов рванулись объяснить делегату Песчаной Анархии, что такое настоящая демократия, но кто способен в состоянии ярости перемножить два двузначных числа и набрать код?! Драка не состоялась. Страсти кипели до тех пор, пока уставшие депутаты не принялись ускользать один за другим, и председательствующий не обратил внимание, что кворума больше нет.

40. За 10^{-35} с до Большого взрыва (интервью с Алексеем Старобинским)

Напомним, Алексей Старобинский опубликовал первую, хорошо проработанную версию теории космологической инфляции. Однако его работа в то время не вызвала должного резонанса. Знаменитой стала работа Алана Гута, опубликованная немного позже и содержащая серьезную ошибку, касающуюся перехода от стадии инфляции к фридмановской горячей Вселенной. Впрочем, отечественная работа тридцатилетней давности дождалась внимания научного сообщества.

Б. Ш.: Итак, начнем с вопроса, который я уже пообещал задать в начале этой части книги: ты понимал значение своей работы, где предложил первую более-менее полную работающую модель инфляции? В том смысле, что механизм инфляции дает решение основных загадок — плоскостности и однородности Вселенной. Если понимал, то почему не написал об этом в той статье?

А. С.: Да, не написал. Просто считал общим местом — обо всем этом уже говорил Эраст Глинер чуть ли не за 10 лет до того. Увы, Глинеру не поверил никто, в том числе такие великие люди, как Зельдович и Сахаров, потому что у него была только гипотеза — ни модели, как



40.1. Алексей Старобинский.
Фото 2007 года
из личного архива автора

такой режим мог реализоваться в ранней Вселенной, ни идеи, как всё это можно проверить и доказать на опыте, не было. Кроме того, ты говоришь о статье 1980 года, а была еще статья 1979 года, в которой как раз и была предложена идея, как это можно доказать: измерив спектр неоднородностей во Вселенной в больших — космологических — масштабах. Уже давно возникла гипотеза, что начальный (возникший до стадии Большого взрыва) спектр возмущений плотности материи должен быть плоским — структура Вселенной успешно моделировалась именно в этом предположении. А сценарии инфляции (тогда слово «инфляция» еще не употреблялось, использовали термин «решение де Ситтера») с очевидностью давали именно плоский спектр. Предсказание спектра возмущений куда сильнее, чем просто объяснение плоскостности и однородности Вселенной. Это объяснение к тому же во многих случаях оказывается иллюзорным, что вскоре выяснилось на примере модели Гута 1981 года.

- Б. Ш.:** Кстати, когда стало ясно, что космологическая инфляция дает плоский спектр возмущений? Где-то это должно было быть впервые сказано.
- А. С.:** Как раз в моей работе 1979 года. Правда, на более простом примере первичных гравитационных волн. Было показано, что плоский спектр становится очевидностью, если объединить две ранее высказанные идеи. Первая — о первичной стадии де Ситтера, предшествующей Большому взрыву, вторая — о том, что все наблюдаемые неоднородности в современной Вселенной происходят из квантово-гравитационных вакуумных флуктуаций в далеком прошлом.
- Б. Ш.:** Собственно, почему генерация гравитационных волн — более простой пример?
- А. С.:** Как оказалось, потому, что для расчета первичных гравитационных волн не нужно строить конкретной модели инфляционной стадии, по крайней мере, если оставаться в рамках эйнштейновской общей теории относительности — как я это и делал в 1979 году. А вот для количественно правильного расчета возмущений плотности материи уже не обойтись

без последовательной и внутренне непротиворечивой модели, в которой есть не только инфляционная стадия, но и благополучный выход из нее на последующую стадию горячего Большого взрыва. Слово «благополучный» означает в данном случае, что переход между стадиями происходит без генерации больших неоднородностей.

Б. Ш.: Ты считал уже в 1980 году, что однородная плоская Вселенная как результат инфляции — общее место. Для тебя и твоего круга, может, это и было общим местом, но научная общественность о том не знала. Тогда в лучшем случае считали инфляцию чем-то экзотическим и заумным, а чаще просто не знали про нее. Все-таки Алан Гут сделал важнейшую часть задачи — занялся популяризацией и пропагандой этого механизма. Видимо, именно поэтому он считается отцом новой парадигмы.



40.2. Участники конференции в Кембридже 1982 года, посвященной теории инфляции. Алексей Старобинский — по центру над Хокингом. Слева от него — М.А. Марков. Второй справа в нижнем ряду — Алан Гут. Андрей Линде, также бывший на конференции, на фото отсутствует. Фото из личного архива Алексея Старобинского

- А. С.:** Конечно, пропаганда тоже необходима. Удача Гута во многом была связана с тем, что он нашел правильный язык для физиков частиц, которые составляли большую часть его аудитории. Скалярное поле, великое объединение, фазовый переход — это именно их бизнес. Но модель у него неверная — там не получается благополучный выход из инфляции. Знаешь об этом?
- Б. Ш.:** Да, я об этом уже написал выше, не будем повторять. Но зато всё понятно и впечатляюще. А у тебя в статье, небось, техника в основном...
- А. С.:** На самом деле статья достаточно простая. И короткая, всего четыре страницы. А у Гута — страниц 20.
- Б. Ш.:** Зато у него, вероятно, большую часть составляет легко читаемая дискуссия. Кстати, а в твоей модели как обстоит дело с выходом из инфляции?
- А. С.:** Выход благополучный и вполне элегантный. Тот же самый механизм квантовых флуктуаций, который дает спектр возмущений, он же обеспечивает и «выгорание» вакуума с большой плотностью энергии — его переход в частицы. Не нужно искать специального механизма, он уже есть. Это, кстати, было одной из целей — я искал не только сценарий с решением де Ситтера, но и как из него элегантней выйти в фазу Большого взрыва — горячей фридмановской Вселенной.
- Б. Ш.:** Ты всё говоришь про спектры возмущений и что они были главной твоей целью. Но как основополагающая работа по этой части известна статья Вячеслава Муханова и Геннадия Чибисова 1981 года — вроде бы они посчитали спектр...
- А. С.:** Да, а чью модель они использовали? Я уже сказал, что без последовательной модели спектр возмущений материи правильно посчитать нельзя.
- Б. Ш.:** Ну, твою. Правильно ли я понимаю, что плоский спектр скалярных возмущений далеко не так очевиден, как для гравитационных? И что главное достижение Муханова с Чибисовым, в том что они доказали, что и тут спектр близок к плоскому?
- А. С.:** Они еще описали отклонение спектра от плоского — именно то, что сейчас видят WMAP и «Планк». Тот самый параметр n_s ,

который, по новым данным, чуть отличается от единицы, как они и предсказали. Точнее, они получили зависимость наклона спектра N от числа раздуваний в e раз, произошедших от рождения неоднородностей до конца инфляции. Для интересующих нас возмущений, которые дали крупномасштабную структуру, N где-то в районе 50–60. То есть они родились с размерами всего на несколько порядков больше планковского и должны были увеличиться за время инфляции в e^{60} раз, чтобы к настоящему времени стать размером в мегапарсеки. Чтобы посчитать точный спектр, требуется довольно много технической работы, и они сделали ее быстрее меня.

Кстати, они упростили себе работу, не рассматривая, что происходит с возмущениями после конца инфляционной стадии и до выхода на стадию доминирования излучения, и считая их постоянными. Эта гипотеза естественна, но верна не всегда (опять-таки, модель Гута 1981 года — это пример, когда это не так). Для того, чтобы доказать эту гипотезу, нужно сначала строго вывести уравнения для возмущений в моей модели во всех ее режимах, а не только в инфляционном. Это было сделано только в моей работе 1981 года уже после выхода статьи Муханова и Чибисова. Тем самым задним числом гипотеза, на которой основана их статья, была доказана — черновая, но необходимая работа. Кроме того, они посчитали только скалярные моды (возмущения плотности энергии) — гравитационные волны позже посчитал я, обобщив свою статью 1979 года на случай неэйнштейновской теории гравитации, к которой относится моя модель. Это оказалось очень важным сейчас, когда из данных WMAP и «Планк» извлекли верхний предел на амплитуду первичных гравитационных волн. Он исключает некоторые другие модели, имеющие такую же величину n_s , в том числе самую простую инфляционную модель со скалярным полем — просто со свободным массивным полем, но оставляет допустимой мою модель.

Б. Ш.: Ты говоришь, подход Гута понятней для физиков частиц. Я по своему воспитанию и ментальности тоже, скорее, физик частиц, и рассуждения в терминах инфляции за счет скалярно-

го поля мне ближе по духу, чем твоя модификация уравнений Эйнштейна с добавлением члена, пропорционального R^2 . Твоя модель, как выяснилось, эквивалентна варианту со скалярным полем в режиме «медленного скатывания», который придумали позже. У меня такой вопрос: какой именно потенциал скалярного поля надо взять, чтобы получить полную тождественность с твоей моделью?

А. С.: Примерно как квадрат гиперболического тангенса. Это при положительных значениях эффективного поля, а при отрицательных потенциал растет экспоненциально. Вблизи нуля это будет квадратичная зависимость, а потом она выполаживается в сторону положительных значений, что очень благоприятствует медленному скатыванию.

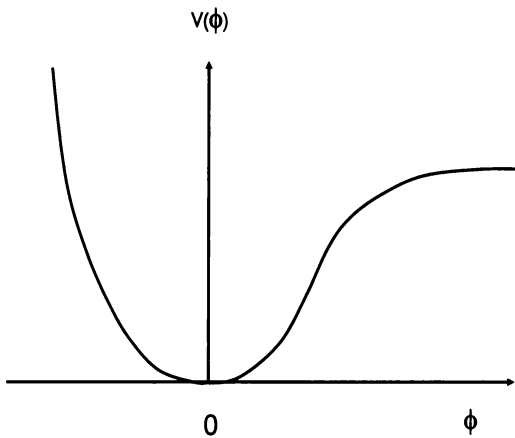


Рис. 40.3. Потенциал поля инфлатона, дающего эффект, эквивалентный модели Старобинского

Такой потенциал сильно облегчает старт инфляции — к начальной конфигурации поля предъявляется меньше требований. Ты начал со слов: «Инфляция объясняет то и се». На самом деле я не совсем согласен с такой

формулировкой. Правильнее сказать: «Инфляция в рамках адекватных моделей объясняет то и се». Основные же достоинства инфляционного сценария в целом — эстетическое изящество и полная предсказуемость всей дальнейшей эволюции Вселенной, которая может согласовываться, а может и не согласовываться с наблюдательными данными.

Что же касается медленного скатывания, то оно в действительности появилось не после, а до всех работ по инфляции, — еще в моей статье 1978 года, где я рассматривал сценарий «от-

скока»: замкнутая вселенная сжимается, включается решение де Ситтера, сжатие переходит в расширение, минуя сингулярность. Андрей Линде в своей работе 1983 года, где он предложил хаотическую инфляцию, сделал важный шаг: отбросил стадию сжатия, с которой были связаны некоторые проблемы, и предложил идею произвольных начальных условий (однако при достаточно большом значении скалярного поля — больше планковского) — где-нибудь они окажутся подходящими для старта инфляции. А сами уравнения, в том числе и эффект медленного скатывания, уже существовали.

- Б. Ш.:** Ну да, собственно, хорошие простые уравнения, типа гармонического осциллятора с трением, везде всплывают. Как понимаю, в случае хаотической инфляции было важно показать, что это работает и там. В твоей работе меня больше впечатлило другое: я написал, что твой механизм инфляции похож на эффект Казимира. Там металлические пластины влияют на плотность энергии вакуума, а у тебя — кривизна пространства дает тот же эффект. Ты одобряешь эту метафору?
- А. С.:** Одобряю, только надо добавить, что это динамический эффект Казимира. Кривизну дает ускоренное расширение. Кстати динамический эффект Казимира сейчас пытаются зарегистрировать экспериментально — с помощью движущихся пластин.
- Б. Ш.:** Насколько, по-твоему, теория инфляции доказана? По мнению Валерия Рубакова, для того, чтобы она была окончательно принята и за нее можно было бы давать Нобелевскую премию, нужно обнаружить предсказываемые ею гравитационные волны, которые могут быть выявлены по карте поляризации реликтового излучения.
- А. С.:** Я согласен с ним лишь частично. Действительно, гравитационные волны надо регистрировать, и это стало бы окончательным подтверждением. Но есть и другие способы проверки, пока не будем о них рассказывать.
- Б. Ш.:** А ты уверен, что гравитационные волны когда-нибудь будут зарегистрированы? Ведь уже видно по данным WMAP и «Планка», что «оптимистические» модели, предсказывающие большую амплитуду реликтовых гравитационных волн, не проходят.

А. С.: Мое предсказание: отношение амплитуды гравитационных волн к амплитуде возмущений плотности — примерно полпроцента. Сейчас верхнее ограничение на эту величину, обычно обозначаемую как r , составляет около 10%. Дело в том, что в большинстве популярных моделей r обратно пропорционально числу N (числу раздуваний в e раз, о котором сказано выше), причем с коэффициентом в числителе порядка десяти (точное значение зависит от модели). Поскольку $N \sim 50 \dots 60$, то отношение должно быть 15–20%. Это уже противоречит данным. Модели инфляции с потенциалом скалярного поля $V \sim \phi^4$ уже надежно отвергнуты. Самая простая и популярная модель с $V \sim \phi^2$ поставлена под сомнение — она противоречит данным на уровне 2σ . А в моей модели в знаменателе стоит N^2 и отношение r должно быть на уровне полпроцента. Верхнему пределу еще далеко до этой величины.

Б. Ш.: Ты думаешь, при отношении полпроцента гравитационные волны в принципе обнаружимы?

А. С.: Экспериментаторы обещают достичь уровня 10^{-4} .

Б. Ш.: Это на каком угловом масштабе неоднородностей? Следующие измерения, специально ориентированные на поляризацию реликта, собираются проводить с земли — в Антарктиде. С земли вроде бы легче наблюдать мелкомасштабные неоднородности. По крайней мере, до сих пор было «разделение труда»: космические станции снимали широкомасштабную карту и строили график разложения по мультиполям примерно до тысячи, а наземные телескопы измеряли мелкую пятнистость и дополняли общий график до мультиполей несколько тысяч.

А. С.: Нет, следы гравитационных волн лучше искать на довольно малых мультиполях — от 10 до 50 (угловой масштаб от 2 до 10°) — там соотношение амплитуд больше. Авторы эксперимента утверждают, что могут строить и достаточно широкоугольные карты поляризации реликта.

Б. Ш.: Андрей Линде, в отличие от Рубакова, считает, что инфляцию уже можно считать несомненным фактом, поскольку есть масса подтверждающих свидетельств с разных сторон.

А. С.: В какой-то степени я с ним согласен, потому что нет достойной альтернативы. Конечно, есть и другие сценарии возникновения Вселенной, но они все втискиваются в общую картину с явным напряжением и не дают никаких новых предсказаний. Сценарий инфляции превосходит их именно тем, что объясняет все непринужденно и содержит предсказания, которые уже подтвердились, и такие, которые еще предстоит проверить.

Одно из интересных предсказаний теории инфляции: вселенные появляются в бесконечном количестве, причем возникают «выводки» похожих вселенных. Вместе с нашей появилось множество других вселенных, где тоже горят звезды, где законы физики и физические константы тождественны нашим.

Б. Ш.: Ты имеешь в виду вечную инфляцию? Что область с одним и тем же вакуумом успевает расширяться и дает много одинаковых вселенных?

А. С.: Да, можно нарисовать это вот таким образом:

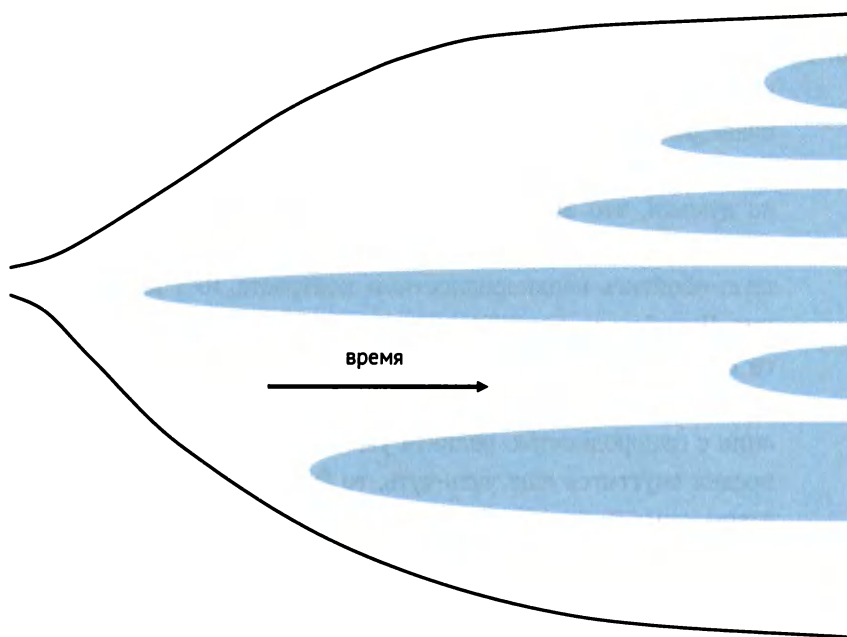


Рис. 40.4

Здесь светлый фон — раздувающееся пространство с одним и тем же вакуумом, каким он был в самом начале. Серые «залиты» — новые вселенные, образовавшиеся в одинаковых условиях.

- Б. Ш.:** Но ведь возможны еще фазовые переходы после окончания инфляции. Например, если был фазовый переход, связанный с великим объединением, и если в нем задействовано несколько скалярных полей, то результат такого фазового перехода может случайным образом влиять на физику.
- А. С.:** В принципе это может быть и так. Вопрос о возникновении разных вариантов физики при фазовых переходах надо задавать физикам частиц, и ответить на него они пока не могут. Может быть так, а может быть, и нет. Но в любом случае есть бесконечное число вселенных, в которых физика в момент окончания инфляции одинакова. Всё, что касается компактификации дополнительных измерений или образования бран, уже произошло раньше, до горлышка, из которого разворачивается этот куст вселенных.
- Б. Ш.:** Да, очень интересно! Действительно, вечная инфляция дает пучки родственных вселенных. В голову не приходило, а ведь очевидно! Но вернемся к истории. В восьмидесятых наблюдения давали слишком однородную карту реликта — сначала думали, что неоднородности должны быть на уровне 10^{-3} , их не оказалось. Потом избрали темную материю, позволившую обойтись неоднородностями контраста 10^{-5} , но наблюдения Парийского на РАТАН-600 прошли и этот уровень, ничего не обнаружив. Это обеспокоило очень многих. В частности, помню доклад Андрея Линде 1986 года — он говорил, что ситуация с однородностью реликта уже тревожная, и если верхний предел опустится еще чуть-чуть, то будет совсем плохо. Плохо в том смысле, что невозможно объяснить образование галактик — космологию ждет тупик. Как ты тогда воспринимал эту проблему, она тебя тоже напрягала?
- А. С.:** Пожалуй, нет. Я просто не верил в результат Парийского. Видимо, у меня есть чутье, каким данным стоит верить, каким — нет, и оно мне подсказывало, что результат неверен.

Потом мы вместе с Парийским в 1992 году взяли его данные и нашли-таки в них флуктуации на нужном уровне — авторы эксперимента сначала просто не смогли извлечь эти неоднородности из данных.

Б. Ш.: А как ты воспринял открытие темной энергии в 1998 году? Твое чутье что-нибудь подсказывало по этому поводу? Тебя это порадовало?

А. С.: Порадовало, но не удивило. Тут дело даже не в чутье, а в косвенных свидетельствах, которые были и раньше. Если современная постоянная Хаббла H_0 больше 60 км/с/мегапарсек, то космологическая постоянная просто необходима, чтобы свести концы с концами. Иначе Вселенная оказывается моложе некоторых звезд. По поводу постоянной Хаббла долгое время шли споры. Аллан Сэндэйдж и Густав Тамманн твердо стояли на том, что значение H_0 находится в районе 50 км/с/мегапарсек — при таком значении не возникает никаких противоречий. Но со временем всё больше данных указывало на то, что H_0 около 70–75 км/с/мегапарсек. И когда по сверхновым увидели, что Вселенная расширяется с ускорением, и одновременно измерили, что H_0 действительно находится в этом диапазоне, все восприняли это как должное. Всё встало на свои места.

Б. Ш.: А как ты отнесся к открытию акустического пика, а потом и нескольких пиков? Я в то время, в 1990-х — начале 2000-х, был вне этой темы, но задним числом акустические пики поразили меня до глубины души.

А. С.: Меня это тоже порадовало, но я ждал, что теория подтвердится и здесь. Так что особого удивления не было.

Б. Ш.: Есть ли сейчас люди (я имею в виду серьезных исследователей), которые настроены против теории инфляции?

А. С.: Есть. Например, Пол Стейнхардт. Он привык мыслить в терминах скалярного поля, где потенциал выражается степенью: $V \sim \phi^a$. Новые данные, а именно наклон спектра и верхний предел на гравитационные волны, ставят под сомнение такую возможность.

Четвертая степень отброшена с гарантией, вторая степень противоречит данным на уровне 2,5 сигма — т. е. поставлена под

сомнение. Остается линейная зависимость, но она не очень естественна. Другая трудность теории инфляции, про которую часто говорят, — начальные условия. Чтобы запустить процесс, требуется большое и более-менее однородное поле в области размером нескольких горизонтов. Но это не очень большая трудность.

- Б. Ш.:** Видимо, вероятность реализации таких начальных условий мала, но не исчезающе мала? И «попыток» реализации разных начальных условий наверно происходит немало? И коль уж процесс пошел, то его ничто не остановит?
- А. С.:** Примерно так. Проблема действительно не принципиальна. В отличие от альтернативных сценариев, где есть принципиальные проблемы. Либо нет проверяемых предсказаний.
- Б. Ш.:** Когда Яков Борисович, наконец, признал теорию инфляции? Как выше по тексту уже сказал Володя Лукаш, Зельдович устроил разнос Глинеру, когда тот рассказывал про сценарий отскока с «физическим» космологическим членом, что было неким прототипом инфляции. А спустя десять с чем-то лет не признавать ее было уже трудно.
- А. С.:** Пожалуй, это произошло в районе 1980 года — кажется, мне удалось его убедить. Вариант с модифицированной общей теорией относительности ему оказался ближе, чем сценарий с отскоком в чисто гидродинамической модели Глинера с заданными руками уравнением состояния или в моей модели 1978 года с массивным скалярным полем (меня он тогда по критиковал тоже, и не только он).
- Б. Ш.:** Ну и в заключение. Пример с твоей моделью и сценарием Гута показывает, насколько в науке важна пропаганда...
- А. С.:** Конечно, в науке пропаганда необходима, но кто-то должен делать правильные работы, чтобы у пропагандистов был адекватный предмет для пропаганды.

41. Четыре железобетонных следствия и еще одно (интервью с Вячеславом Мухановым)

Это интервью было взято позже всех остальных, уже после объявления о детектировании реликтовых гравитационных волн в эксперименте BICEP2.

Борис Штерн: Когда ты понял, что инфляция — это именно то, что надо для светлого будущего?

Вячеслав Муханов: В 1980 году, еще до соответствующей работы Старобинского и тем более до работы Гуса. В 1979 году Гена Чибисов предложил заняться квантовыми флуктуациями в ранней Вселенной: нельзя ли получить из них галактики? Когда-то, еще в 1960-х, подобной задачей занимался Сахаров, но у него ничего не получилось — возмущения в галактических масштабах оказались слишком маленькими. А больше никто этого не пробовал.

Уйма времени у меня ушла на технические вещи — как проквантовать скалярные возмущения.

Б. Ш.: Вроде Володя Лукаш делал то же самое?

В. М.: Да, мы с ним в какой-то момент пересеклись по этому поводу. Я тогда был аспирантом, а он уже ученым с репутацией. При этом формальная часть теории квантовых скалярных возмущений оказалась почти той же самой. Даже встал вопрос о том, чтобы опубликовать совместную работу



41.1. Вячеслав Муханов
(фото из «Википедии»)

на эту тему — это было предложение Зельдовича. Но было неясно, как в этой теории получить возмущения, достаточные для образования галактик и вообще всей структуры во Вселенной. В результате Лукаш быстро опубликовал формальную теорию, а мы с Чибисовым попытались найти какую-либо модель ранней Вселенной, где эта теория могла бы объяснить, как образовались галактики. Долгое время не получалось ничего. Я испробовал разные модели с нормальным веществом, и во всех этих моделях возмущения были слишком маленькими. Наконец, возникла идея: а что, если попробовать решение де Ситтера — скалярное поле и немного радиации? И всё получилось! Оказалось, что квантовые флуктуации нужным образом усиливаются и растягиваются. Всё встало на свои места.

Б. Ш.: Получается, вы подобрались к инфляции совсем с другой стороны. Другие хотели от нее плоской однородной Вселенной, вы — затравочных неоднородностей для галактик.

В. М.: Так это не менее, а в каком то смысле даже более важно: мы вполне могли бы существовать и во вселенной с геометрией Лобачевского, а без галактик — никак. Этот результат про возмущения в мире де Ситтера был опубликован в середине 1980 года в виде препринта ФИАН (на английском). А журнальная публикация появилась только через два года в *Monthly Notices (MNRAS)*. Рецензент (Бернард Карп) полностью переписал наш английский, потом надо было всё перепечатать, ну и почта в Англию и обратно шла месяцами.

Хоть в этой первой работе мы и полностью осознали, что без де-ситтеровской (инфляционной) стадии не можем никак обойтись, если хотим образовать галактики из квантовых возмущений, детальную структуру возмущений в нашей модели было всё же невозможно рассчитать, поскольку первоначальная модель была слишком упрощенной. В декабре 1980 года я решил посмотреть, что происходит с квантовыми флуктуациями в модели, которую предложил Старобинский, с тем, чтобы решить проблему начальной сингулярности. В этой модели предполагалось, что вселенная бесконечно долго находилась в де-ситтеровском состоянии, а уже потом образовалась наша

Вселенная. В результате наших расчетов оказалось, что квантовые флуктуации разрушают де-ситтеровскую вселенную за довольно короткое время, и таким образом проблему сингулярности оказалось решить нельзя. Так что если иметь в виду первоначальную цель этой модели, то мы ее закрыли. С другой стороны, мы нашли, что если всё же предположить, что по каким-либо причинам вселенная всё же прошла в течении короткого времени через такую стадию, то проблема образования галактик решена. Квантовые флуктуации действительно усиливаются и ведут в дальнейшем к галактикам и в конечном итоге к жизни. На этот раз я не рискнул послать статью за границу, и она была опубликована в «Письмах в ЖЭТФ» в мае 1981 года.

В этой статье нам удалось полностью предсказать спектр возмущений, который удалось померить только спустя 30 лет в экспериментах WMAP и «Планк». Наблюдения блестяще подтвердили наши с Чибисовым предсказания тридцатилетней давности.

Б. Ш.: Этот спектр — специфическая характеристика модели Старобинского? Что если взять другую модель инфляции?

В. М.: Как оказалось, конкретная модель здесь играет очень незначительную роль. Впоследствии мне удалось показать, что независимо от модели инфляции возмущения, образовавшиеся после инфляции, всегда слегка растут с ростом масштаба. И в какой-то момент я четко осознал, что если подтвердить этот рост возмущений с масштабом экспериментально, то это будет однозначным доказательством того, что мы все произошли из квантовых флуктуаций. Кроме того, наша теория также предсказывала, что возмущения должны быть адиабатическими и гауссовыми. В начале 1980-х было невозможно даже представить, что наш спектр когда-либо удастся измерить с необходимой точностью. Более того, адиабатические, гауссовы возмущения противоречили астрономическим наблюдениям. Тем не менее, это не помешало мне защитить кандидатскую диссертацию в 1982 году.

Б. Ш.: Ну вот, не прошло и тридцати пяти лет...

В. М.: Не прошло... И все предсказания нашей теории были блестяще подтверждены экспериментально.

Б. Ш.: Да, я выше уже это охарактеризовал как триумф науки.

В. М.: Что касается инфляции и квантового происхождения галактик, то это в высшей степени удивительно, что единственное предположение о том, что наша Вселенная прошла в прошлом через стадию темной энергии, которая усилила квантовые возмущения, ведет к пяти четким предсказаниям:

1. Вселенная с высокой точностью «плоская» (см. главу 32).
2. Возмущения плотности — чисто адиабатические (см. врезку).
3. Они же — гауссовы (см. Р. S. к главам 31–35).
4. Начальный спектр возмущений слегка (логарифмически) растет с масштабом.
5. Существуют первичные гравитационные волны.

Первые четыре предсказания в настоящее время подтверждены экспериментально с огромной степенью точности. Что касается пятого предсказания — амплитуда гравитационных волн может оказаться ниже экспериментально достижимого уровня. В принципе, это не катастрофа, поскольку остальные — highly robust...

Б. Ш.: Железобетонные...

В. М.: Да, железобетонные. Они были подтверждены, и я думаю, никаких сомнений здесь быть не может; абсолютно ясно, что все мы произошли из квантовых флуктуаций. Если бы хоть одно из этих предсказаний было опровергнуто, большинство физиков усомнилось бы в том, что мы действительно знаем что-то о ранней Вселенной. Меня, например, неоднократно спрашивали на докладах: если n_s , характеризующий наклон спектра, окажется $0,99 \pm 0,01$, согласишься ли ты с тем, что теория не работает? Я отвечал: соглашусь! Правда, Андрей Линде говорил: ну, можно придумать такую модель, которая даст почти точно единицу. Но, по-моему, это уже не настоящая физика. Изобретательство всяческих лазеек — совсем другой бизнес.

- Б. Ш.:** Ну, Андрей ниже, в интервью с ним, говорит как раз то же самое про гауссовость, как народ делал бизнес на моделях инфляции, нарушающих гауссовость.
- В. М.:** Вот! Перед публикацией результатов «Планка» был пущен слух, что «Планк» нашел негауссовость, и даже было организовано несколько конференций в предвкушении этой сенсации. К счастью, «Планк» всё расставил по своим местам.
- Б. Ш.:** Андрей уже весьма красочно рассказал про это.
- В. М.:** Или взять недавний результат по гравитационным волнам. Он довольно серьезно противоречит результатам «Планка». Тем не менее многие тут же стали подстраиваться так, чтобы, как говорится, «угодить и нашим, и вашим», ввели переменный спектральный индекс и т. д., короче, полный бред... И всё это вместо того, чтобы просто подождать, пока экспериментаторы выяснят, кто же из них прав.
- Б. Ш.:** Я уже писал об этом (P.P.S. к главам 31–36), что это насилие над теорией. И Рубаков то же самое думает.
- В. М.:** Я вообще сильно не удивлюсь, если история с результатом BICEP2 окажется аналогичной истории со сверхсветовыми нейтрино (в 2011 году было объявлено об экспериментальном измерении скорости нейтрино, оказавшейся чуть выше скорости света, что вызвало вал теоретических работ, но оказалось тривиальной технической ошибкой. — *Б. Ш.*). При всем том, что результаты BICEP2 не подтверждены и есть куча вопросов, посмотри, какая поднялась шумиха в самых разных газетах, журналах, по телевидению. Когда были опубликованы куда более мощные результаты WMAP и «Планка», кто об этом написал в России? Боря Штерн в «Троицком варианте» да еще раз-два и обчелся. А тут — девятый вал.
- Б. Ш.:** Может быть, это и не так плохо. Сколько народа узнало, что существуют гравитационные волны, что есть такая теория инфляции, что есть такая наука — космология...
- В. М.:** Тут такая проблема. После сенсации со сверхсветовыми нейтрино, закончившейся скандалом, простая публика наверное даже усомнилась в открытии бозона Хиггса: может, опять разъем перепутали... Такие истории дискредитируют науку.

- Б. Ш.:** С одной стороны — да. Каждая лопнувшая сенсация подобна ложному крику «волки»! Но все-таки нет худа без добра — народ видит, что в науке что-то происходит. Кстати, результат ВИСЕР2 вряд ли лопнет с таким треском — неправильный учет фона — это все-таки не разъем неправильно воткнуть. И все-таки есть шанс, что результат подтвердится. Конечно, им надо было чуть-чуть подождать — «Планк» уже скоро должен выдать данные по фону. Но, видимо, хотелось быть впереди всех.
- В. М.:** Вообще, уровень журналистики, когда речь заходит о науке, ужасен. По телевизору иногда слушаешь и в ужас приходишь! Я, кстати, подписался на российское телевидение. Извини, но всё, кроме «Дождя» такое...
- На этом разговор перешел на политику и назад уже не вернулся. Он происходил в самом начале апреля 2014 года.

Адиабатические возмущения

Когда среда сжимается или расширяется, она соответственно нагревается или охлаждается. Если процесс проходит без передачи тепла от одних областей другим, то он называется адиабатическим. При этом энтропия в сопутствующем объеме (сжимающемся или расширяющемся вместе с веществом) не меняется. Неоднородности с постоянной удельной энтропией (энтропией, деленной на сопутствующий объем) называются адиабатическими возмущениями. В космологии удельную энтропию удобно измерять как отношение числа фотонов к числу барионов.

Альтернатива адиабатическим возмущениям — энтропийные возмущения, где число фотонов на барион меняется. Если адиабатические возмущения плотности космической среды каким-то образом заморозить, то из-за диффузии фотонов они превратятся в энтропийные: температура выровняется, а плотность останется переменной. Однако в ранней Вселенной диффузия фотонов для достаточно больших возмущений была незначительной, и возмущения, родившиеся как адиабатические, таковыми и оставались. Возмущения, родившиеся в ходе инфляции, автоматически становились адиабатическими при «выгорании» инфлатона. То, что возмущения изначально были адиабатическими, видно по положению пиков на рис. 32.1. Если бы они были энтропийными, акустические колебания среды в ранней Вселенной вели бы себя по-другому, и пики оказались бы в других местах.



ЧАСТЬ IV БОЛЬШОЙ ФЕЙЕРВЕРК

Теория инфляции повела ученых дальше, чем это можно было представить после появления первых работ. Оказалось, что инфляция продолжается не 10^{-35} с, как это предполагалось в первых статьях, — однажды начавшись, она не может прекратиться и продолжается вечно, рождая новые вселенные. Вместо Большого взрыва получается большой, немыслимый, бесконечный фейерверк вселенных.

42. Антропный принцип

Среди простых вопросов, ставивших космологов в тупик до появления теории инфляции (см. главу 9), был один, который мы до сих пор не рассматривали. Есть много физических постоянных, значения которых вроде бы ниоткуда не следуют. Но если мы попытаемся представить мир, где какая-нибудь из этих констант немного изменена, жизнь в таком мире оказывается невозможной: не образуются атомные ядра, не горят звезды и т.п. Что так подогнало значения констант, чтобы мы могли существовать?

Что это за константы, и чем их изменение фатально для нас? Самой капризной вещью во Вселенной оказываются звезды, без которых мы не можем существовать. Повторим широко известные факты на этот счет:

- Ядро тяжелого водорода, дейтрон, оказывается довольно слабо связанным, что играет большую роль в процессе горения водорода (в основном протон-протонном цикле) в звездах. Если чуть-чуть увеличить ядерную силу притяжения между протоном и нейтроном, то вероятность одной ступени протон-протонного цикла — соединение протона с дейтерием в ядро гелия-3 упадет, и звезды будут еле тлеть. Если силу притяжения ослабить, дейтрон исчезнет и протонный цикл оборвется
- В главе 6, посвященной Фреду Хойлу, упоминалась тройная гелиевая реакция как его главное достижение и как единственный мостик от легких к тяжелым элементам в звездном нуклеосинтезе. Эта реакция идет благодаря резонансу ядра углерода при удачной энергии. Стоит немного изменить константу ядерных взаимодействий, и реакция блокируется, а Вселенная остается без тяжелых элементов.
- Звезды горят потому, что во Вселенной осталось много водорода, и образовалось только 20% «негорючего» гелия. Если бы чуть усилить сильные взаимодействия относительно электромагнитных, появилось бы новое стабильное ядро — дипротон.

И тогда всё вещество Вселенной в первые минуты перешло бы в форму гелия. Звезды бы не зажглись.

Еще более ужасающая возможность — облегчить нейтрон на одну тысячную, тогда он бы стал стабильным, и не было бы ни электронов, ни атомов — одни нейтроны.

Есть и другие способы разрушить наше комфортное мироздание, слегка чего-нибудь изменив в нем. О некоторых мы поговорим ниже, а пока сказанного достаточно, чтобы понять, что объем в пространстве значений физических констант, допускающий существование жизни, ничтожно мал. Будто физические константы специально подогнаны таким образом, чтобы мы могли существовать.

Теперь давайте взглянем на Землю: на ней тоже всё как будто специально подогнано для нашего существования: температура, атмосфера, вода, стабильная орбита, хороший наклон оси вращения, слабая бомбардировка астероидами благодаря Юпитеру, очистившему пространство от космического мусора. Но ведь мы точно знаем о существовании других планет и множества других планетных систем, где условия совсем иные. Так там никто и не живет. Мы могли появиться лишь в одном из относительно немногих миров — в том, который благодаря стечению обстоятельств как будто специально подогнан под существование жизни.

То же самое и со Вселенной, если:

- вселенных очень много, возможно, бесконечно много;
- все они разные, возможно, с разными законами физики, разными константами взаимодействий, разными наборами частиц, причем конкретная реализация случайна.

Вот мы и появились там, где могли, где нейтрон тяжелее пары протон + электрон, где углерод имеет ядерный резонанс с нужной энергией и так далее. Возможно, в пространстве параметров существуют и другие благоприятные «острова», где возможна какая-то другая жизнь, совсем не похожая на нашу. И там разумные обитатели будут удивляться удачной подстройке физических величин. А в большинстве вселенных, где не произошло благоприятной случайности, некому посетовать на неудачные значения физических констант.

Это и есть суть антропного принципа.

Он снимает некоторые вопросы, перекладывая ответственность за какие-то факты на случайность. Почему именно таковы массы кварков? Они определяются константами взаимодействия кварков с полем Хиггса, и величина этих констант ниоткуда не следует. Но если их изменить — «поедет» всё — энергия резонанса ядра углерода, стабильность и энергия связи ядер, — и мир изменится так, что мы не сможем жить. Антропный принцип намекает, что эти константы — результат случайности в биографии нашей Вселенной, и вместо объяснения этих конкретных значений заставляет искать механизм, дающий случайные реализации физических констант. Это делает поиск более осмысленным. В данном конкретном случае мы пока не знаем точного ответа, но имеем ряд правдоподобных гипотез. Например, фазовый переход вакуума в самой ранней Вселенной (см. главу 16). Есть и другой механизм случайной реализации, о нем будет сказано ниже.

Антропный принцип предполагает существование огромного множества вселенных. Предположение о множественности вселенных становится естественным сразу, как только Вселенная признана физическим объектом. Но хотелось бы еще знать, каков конкретный механизм производства этого огромного множества. Оказывается, космологическая инфляция делает и это, что первым понял Андрей Линде.

43. Вечная инфляция

Оказывается, инфляция, раз начавшись, не может закончиться! Напомним, «мотором» инфляции является скалярное поле (инфлатон), скорость инфляции пропорциональна квадрату корню из плотности его энергии. Для определенности предположим, что плотность энергии растет с величиной поля (это не обязательное, но удобное предположение, имеющее место во многих моделях). Если пренебречь квантовыми эффектами, то величина поля постепенно снижается, плотность энергии тоже. Причем, чем ниже падает плотность энергии, тем быстрее ослабляется поле — всё заканчивается его диссипацией в частицы и переходом на фридмановскую стадию расширения.

Существует некий люфт в терминологии, требующий уточнять понятия по мере углубления в предмет обсуждения. Что такое Большой взрыв? Многие понимают под Большим взрывом некое самое-самое начало расширения пространства. Можно было бы назвать Большим взрывом некий старт инфляции. Однако исходя из сказанного ниже этот «старт инфляции» теряет всякую определенность. Но в истории Вселенной есть совершенно четкий момент: окончание инфляции, связанное с ним «выгорание» поля-инфлатона и переход к горячей Вселенной, расширяющейся по закону Фридмана. Будем называть «Большим взрывом» именно этот момент — как только он произошел (а он происходит за очень короткое время), вселенная с ее огромной энтропией и большим будущим состоялась. Именно это и есть общепринятое определение Большого взрыва в среде профессиональных космологов. Однако, оно не общепринято среди популяризаторов науки, примером чего служит рисунок, обошедший недавно мировые средства массовой информации. Он иллюстрирует историю Вселенной, где Большой взрыв изображен неким ярким сферическим ореолом, предвещающим стадию инфляции. Но вернемся к процессу инфляции.

Если пренебречь квантовыми эффектами, то инфляция идет везде одинаково и везде одинаково заканчивается: Большой взрыв произойдет одновременно во всем пространстве (будем считать его замкнутым). Возникнет одна гигантская однородная вселенная.

Теперь вспомним про квантовые эффекты. В главе 26 мы писали про то, что при расширении пространства вакуумные квантовые колебания инфлатона переходят в реальные неоднородности — флуктуации плотности. У этих неоднородностей есть типичный размер (в принятых выше предположениях — 10^{-27} см) и характерное время формирования, типа 10^{-37} с. Их амплитуда скорее всего относительно невелика, но и поле меняется медленно. Может оказаться так, что флуктуация по амплитуде больше, чем изменение поля за время ее появления, — это выполняется легко. Если это флуктуация со знаком плюс, тогда она может увеличить значение поля, если со знаком минус — поле уменьшается быстрее, чем обычно.

Фокус заключается в том, что положительные флуктуации получают преимущество.

Действительно, если поле возросло, увеличилась и плотность его энергии, а значит, и темп расширения пространства в данной области. В результате, положительная флуктуация растянулась вместе с пространством на больший объем, чем отрицательная. Потом на эту положительную флуктуацию «салятся» новые, в том числе и новые положительные — там объем растет еще быстрее, и т.д. Получается, поле за счет квантовых флуктуаций местами лезет вверх вместо того, чтобы падать.

Всё происходит очень быстро: если бы не флуктуации, инфляция закончилась через 10^{-35} – 10^{-34} с после начала. Так и происходит где-то в раздувающемся пространстве: поле падает, диссипирует в частицы, происходит новый большой взрыв, знаменующий рождение новой вселенной. Но в других областях поле держится, через 10^{-34} с даже усиливаясь, — инфляция продолжается. Пространство, увеличиваясь вдвое каждые 10^{-37} с, продолжает раздуваться. Условно говоря, каждые 10^{-35} – 10^{-34} с производится новое поколение больших взрывов, дающих начало новым вселенным, — в каждом поколении их число экспоненциально увеличивается. И так миллиарды лет — инфляция

никогда не может закончиться, поскольку всегда где-то есть область сильного поля, раздувающегося быстрее других.

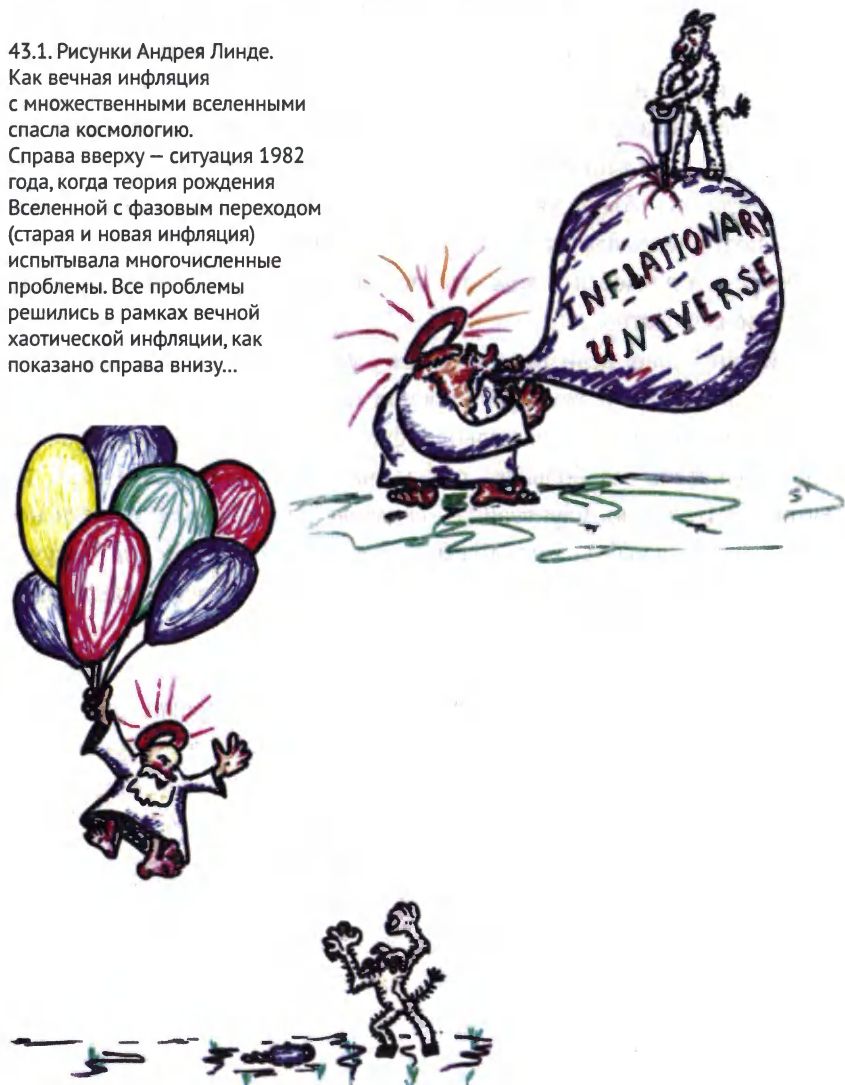
Это все имеет четкое математическое описание, которое, конечно, зависит от конкретной модели инфлатона. Придумать такую модель, в которой нет вечной инфляции и квантовые флуктуации не способны поднимать величину поля и плотность энергии, можно, но для этого надо напрягаться — такие модели есть, но они менее естественны, чем те, что дают вечную инфляцию.

43.1. Рисунки Андрея Линде.

Как вечная инфляция

с множественными вселенными
спасла космологию.

Справа вверху — ситуация 1982
года, когда теория рождения
Вселенной с фазовым переходом
(старая и новая инфляция)
испытывала многочисленные
проблемы. Все проблемы
решились в рамках вечной
хаотической инфляции, как
показано справа внизу...



Куда помещаются все эти мириады рождающихся вселенных вместе с продолжающимся раздуваться пространством? Напомним, что раздувание идет со скоростью, превышающей скорость света: уже две точки, отстоящие друг от друга на 10^{-26} см, удаляются друг от друга быстрее света и теряют друг с другом причинную связь. Это не противоречит теории относительности, коль скоро эти точки находятся в причинно не связанных областях. Простым сложением имеем скорость удаления точек, отстоящих друг от друга на сантиметр, — 10^{26} скоростей света и т.д. Еще раз: подобная скорость нефизична, но данное число вполне способно проиллюстрировать, куда это всё помещается.

Конечно, весь этот бесконечный фейерверк больших взрывов никто не может увидеть: нет такой точки, откуда бы открывалась панорама на грандиозный апофеоз творения. Любой наблюдатель ограничен собственным горизонтом, радиус которого исчезающе мал в сравнении с масштабом картины. Мы можем воспроизвести вечную инфляцию только силой воображения, опираясь на математику.

44. В роли внешнего сверхъестественного наблюдателя

Пожертвуем одним из пространственных измерений и вспомним про модель вселенной в виде надуваемого шарика. Двумерное пространство вселенной — поверхность шарика. Себя представим находящимися в дополнительном измерении, взирающими на это со стороны благодаря сверхъестественным способностям, без всяких ограничений в скорости сигнала. Мы видим уже не шарик, но по сути — бесконечную плоскость, до которой этот шарик раздулся. Пусть плоскость будет цветной: цвет будет обозначать величину инфлатона. Самое сильное поле пусть будет представлено фиолетовым, менее сильное — синим и т.д. по спектру.

Плоскость продолжает растягиваться. Затормозим время в 10^{38} раз, чтобы успеть что-нибудь рассмотреть. Тогда расстояние между любыми двумя точками будет удваиваться за 10 с. Мы увидим желтые и красные пятна всевозможных размеров и форм на синем фоне, которые постепенно образуются то здесь, то там. Желтые пятна растут медленнее, чем разлетаются друг от друга. Синие и фиолетовые промежутки между ними растут быстрее, но на синем появляются новые желтые пятна.

Что происходит с пятнами теплых оттенков? Величина поля в них продолжает с какого-то момента необратимо падать (есть критическое значение, ниже которого она уже не может расти из-за квантовых флуктуаций) — всё быстрее, пока поле-инфлатон не «выгорает», передав свою энергию частицам. Изобразим области с «выгоревшим» полем белым цветом. Появление белого пятна — очередной большой взрыв — рождение вселенной. Несмотря на слово «взрыв», рост каждого белого пятна начинает сильно отставать от общего расширения — переходит на степенной режим.

Мы определенным образом преобразовали время, но не указали пространственный масштаб. Его можно и не указывать — картинка будет той же самой и на микронах, и на парсеках, она близка к фрактальной — не в математическом (дробная размерность),

а в «обывательском» смысле: самоподобие в широком диапазоне масштабов (чтобы получить фрактал в строгом математическом смысле, можно нарисовать, например, линии уровня инфлатона). Свойство фрактальности имеет то же происхождение, что и плоский спектр первичных космологических неоднородностей: скорость растяжения пространства много больше скорости изменения инфлатона. На масштабах квантовых флуктуаций (10^{-27} см) никакой фрактальности нет, там есть выделенный размер, с которым рождается большинство неоднородностей. Допустим, мы видим картинку с разрешением один микрон и полем зрения метр или с разрешением метр и полем зрения тысяча километров, тогда в первом случае мы видим неоднородности, начавшие раздуваться в среднем на $2 \cdot 10^{-36}$ с позже (если характерное время удвоения 10^{-37} с), только и всего. Даже за время обычной инфляции никаких глобальных изменений за такое время не произойдет, не говоря о вечной.

До сих пор мы для простоты рассматривали картину вечной инфляции как подвижную расцвеченную плоскость (напомним, плоскость отображает трехмерное пространство, одной координатой которого мы пожертвовали для наглядности). При более внимательном рассмотрении эта картина становится неадекватной, и нам придется усложнить ее, чтобы сделать шаг к большей достоверности.

Представим себе фиолетовое пятно очень сильного поля, окруженное синим фоном более слабого. Фиолетовое растягивается быстрее, чем синее, поэтому диаметр пятна должен расти быстрее, чем его окружность. Это означает, что пространство в масштабе фиолетового пятна искривляется.

Представить себе кривизну трехмерного пространства мы не можем, но с двумерным проще, поскольку природа дала нам объемное воображение. Мы можем представить кривизну, изгибая его в третьем измерении, которое недоступно для двумерных наблюдателей, живущих в этом двумерном пространстве. Для математического описания и формулировок физических законов дополнительное измерение не нужно — только для нашего воображения.

Итак, воспользуемся третьим измерением и представим, что на синем фоне вверх выпячивается фиолетовый бугор. Разница в скорости расширения синего и фиолетового не так уж и велика, но если

вспомнить, что эти скорости стоят в экспоненте, фиолетовый бугор начнет превращаться в гигантский пузырь, горловина которого будет тоже расти, но с отставанием. Далее, на поверхности этого пузыря возникнут новые выступы и пузыри, и вечная инфляция предстанет в виде безудержно пузырящейся пленки, с ускорением расширяющегося во все стороны уже трехмерного пространства. Картина при этом остается фрактальной уже и в трех измерениях. Напомним, третье измерение введено нами для наглядности, но тут уже и оно перестает помогать нашему воображению. Сразу представляется коллизия: пузыри не умещаются в трехмерии и наезжают друг на друга — на самом деле ничего подобного не происходит, это лишь дефект нашего представления.

Кстати, очень интересная метаморфоза происходит с горловиной раздувающегося пузыря. Здесь замешаны достаточно сложные эффекты общей теории относительности. Это тот случай, когда лучше просто сослаться на мнение эксперта. Адекватным экспертом в данном случае является Игорь Ткачѳв, поскольку еще в 1980-х годах они с Виктором Березиным и Вадимом Кузьминым решили похожую задачу. Вывод таков: горловина превращается в так называемую кротовую нору, связывающую одно пространство с другим. Со стороны пространства, где инфляция закончилась и образовалась новая вселенная, эта кротовая нора выглядит как обыкновенная черная дыра. Масса этой черной дыры может быть любой — все зависит от конкретных обстоятельств выдувания пузыря. В частности, эта масса может составлять стони миллионов или миллиарды солнечных масс — как у черных дыр в центрах галактик. Правда, вероятность, что подобная кротовая нора есть в наблюдаемой части нашей Вселенной, ничтожна — пока инфляция заканчивается и кротовая нора формируется, всё успевает разлететься на огромные расстояния и произвольный наблюдатель уносится далеко за пределы досягаемости. Вероятно, все черные дыры в центрах галактик — продукт истории Вселенной после Большого взрыва и никакого отношения к реликтовым кротовым норам не имеют. Путешествовать по вселенным из одной в другую через кротовые норы невозможно, даже если повезет оказаться вблизи кротовой норы — попытка прыгнуть в нее приведет наблюдателя в горловину, где плотность скорее всего

близка к планковской и никакие классические объекты существовать не могут. Правда, теоретики изобретают разные варианты уравнивания состояния материи, с которыми плотность в горловине оказывается ниже, но все равно такие прыжки крайне не рекомендуются, тем более, что заранее убедиться в правоте теоретиков едва ли возможно.

Таким образом, перед нами открывается картина вечной инфляции в виде растущих и множащихся пузырей разных размеров. На раздувающихся пузырях образуются пятна сильного поля, выдувающиеся в новые пузыри, которые расширяются быстрее. Каждый пузырь со временем превратится во вселенную, пройдя через стадию большого взрыва, но до этого от него ответвятся новые пузыри с сильным полем. Горловины превратятся в кротовые норы, связывающие вселенные. Некоторые из кротовых нор, у которых масса мала, испаряются в соответствии с механизмом Хокинга, тогда связь между вселенными теряется. Образуется бесконечная сеть сложной топологии, которая растет по экспоненциальному закону.

И так во веки веков.

Новые вселенные продолжают образовываться здесь и там. Они разносятся в стороны, порождают новые и т.д. В широком поле зрения мы видим мириады вселенных. Каков их размер и возраст? Возраст подавляющего большинства порядка 10^{-34} с или меньше. Доля старых вселенных катастрофически мала: расстояние между вселенными типа нашей удвоилось 10^{54} раз и составляет $10^{10^{18}}$ (всё равно чего — сантиметров или парсек). Тем не менее, число старых вселенных тоже огромно — таков закон инфляции. Что касается размера рождающихся вселенных — тут разброс может быть каким угодно: наша родилась диаметром не менее метра (на момент Большого взрыва), а верхний предел может быть любым.

Через миллиарды лет картина не изменится: все новорожденные вселенные, упомянутые выше, созреют и будут разнесены на гигантские расстояния — в каких-то из них возникнет жизнь. За это время число вселенных опять удвоится 10^{54} раз и т.д.

Мы попытались решить очень сложную для нашего воображения задачу. Насколько это решение оказалось удачным, сильно зависит от индивидуального восприятия читателя. Облегчающим обстоятель-

ством является то, что задача, по крайней мере, на данном уровне рассмотрения (дальше будет хуже), описывается довольно простой математикой.

По-видимому, эта сильно упрощенная умозрительная модель вечной инфляции — крайний рубеж, на котором наше воображение еще на что-то способно. Скорее всего, реальная картина гораздо сложнее — в ходе тотального раздувания пространства меняется число измерений, могут возникать так называемые браны — миры меньшего числа измерений, вложенные в пространства большего числа измерений. Топологические курьезы, которые там могут возникать, представить невозможно. Однако математика давно работает с понятиями, которые невозможно представить, поэтому наука не собирается отступать на этом рубеже.

45. В роли внутреннего наблюдателя

Итак, в роли внешнего наблюдателя, стоящего вне пространства и законов физики, мы видим грандиозный вечный акт творения экспоненциально растущего числа вселенных. Теперь лишим себя одной из сверхъестественных возможностей — видеть пространство всё сразу «извне» — и представим, что, тем не менее, можем телепортироваться внутрь разных мест пространства. Если мы телепортировались в область идущей инфляции, нам нужно уменьшиться до околоспланковских размеров, иначе разорвет. Ничего интересного мы не увидим — горизонт будет составлять 10^{-27} см, всё разлетается, всё всюду одинаково с точностью до квантовых флуктуаций. Фактически мы лишены возможности передвигаться: к сверхъестественному свойству двигаться быстрее света не прибегаем, а свет в масштабе всей грандиозной картины движется очень медленно. Однако если подождать, будет интересно. Рано или поздно поле ослабнет, потом катастрофически быстро передаст свою энергию частицам. Несмотря на то, что инфляция вечная, для каждого конкретного наблюдателя это произойдет обязательно, причем довольно быстро: вечность в инфляции для него закрыта. Как это объяснить?

В каждой точке пространства вероятность изменения поля инфлатона вниз (т.е. в сторону меньших значений) больше, чем вверх, поскольку есть общий плавный дрейф поля вниз и наложенные на него случайные квантовые флуктуации, равновероятные в обе стороны. У тех флуктуаций, что подбросили поле вверх, больше перспектива, но попасть в них трудней. Это легче представить на примере лабиринта.

Допустим, мы на входе в бесконечный ветвящийся лабиринт. В каждом ветвлении ход разделяется на шесть ходов, четыре из которых заканчиваются тупиком с ловушкой, из которой нет хода назад, а два ведут дальше к новому ветвлению. Лабиринт бесконечен, и число открытых ходов растет по экспоненте. Но если путник при каждом ветвлении выбирает ход случайно (а в процессе инфляции судьбой наблюдателя в данной точке управляет именно случай-

ность), он довольно скоро окажется в ловушке. Вероятность пройти до второго ветвления $1/3$, до третьего — $1/9$ и т.д., вероятность пройти дальше экспоненциально убывает, несмотря на то, что число открытых ходов экспоненциально растет.

В случае с космологической инфляцией роль тупика с ловушкой играет большой взрыв. Наблюдатель увидит, как поле спадает и возникают частицы огромных энергий, — он попал в новую горячую вселенную, расширяющуюся по закону Фридмана, уже с торможением, а не с ускорением. Горизонт станет расти, температура частиц падать. Если подождать еще, откроется большая однородная вселенная, но вероятность увидеть внутри горизонта какие-нибудь родовые дефекты, типа кротовой норы в пространство с другой биографией, исчезающе мала.

Телепортировавшись в произвольную зрелую вселенную, мы не знаем заранее, какой пейзаж встретим и будут ли там звезды и галактики — это может зависеть от ряда случайных факторов, которые обсуждаются ниже.

Наверняка нарисованная картина вечной инфляции в чем-то неверна и заведомо неполна. Отчасти это проблема воображения, отчасти — сложности всевозможных проистекающих явлений. Особенно сложные вещи будут происходить в тех местах, где поле заброшено вверх до таких величин, что плотность его энергии стала порядка планковской. Об этом будет сказано ниже в несколько другом контексте.

Интересно, если вернуться к европианам: им будет легче или сложнее представить пространство за ледяным панцирем, чем нам вечную инфляцию? И да, и нет. С одной стороны проще — за панцирем то же самое евклидово трехмерное пространство, не требуется математических трюков и диких чисел для его описания. С другой стороны сложнее — они знают о нем гораздо меньше, чем мы о возможных механизмах космологической инфляции, — им неоткуда знать, что такое звезды, у них нет зацепок, чтобы представить межзвездные расстояния и природу других планет. У них, выросших в полумраке с максимальной дальностью видимости в немногие сотни метров и привыкших больше полагаться на звуковую локацию, оковы воображения должны быть куда теснее наших.

46. Дежурный по границе

В метановом куполе действовали весьма жесткие правила навигации. Никто не имел права отклоняться от фарватера, идущего вверх по сжимающейся спирали, обозначенного цепью акустических маяков. Ни одно судно не имело права пересекать границу вода-метан иначе, чем через иллюминированный «бублик». Пространство непосредственно под скважинами было самым запретным: под одной вертикально шли кабели, под другой время от времени самоходом отправлялся вниз лёд и контейнеры с отходами. Эти запреты не относились только к дежурным по границе, ответственным за уборку льда и отходов.

Очередной дежурный дождался, когда наверху из тьмы проступило несколько голубых огней. Он застабилизировал буксир, вколол себе дозу пресонола, спустил давление в рубке и выплыл наружу. Это формально не было нарушением правил, но только потому, что их составители и в страшном сне не могли подумать, что кто-то из дежурных может выкинуть такой фортель. Кроме этого Дежурного никто такого и не выкидывал. Вообще-то на дежурстве запрещалось даже вести посторонние разговоры по сотовой связи, не то, что покидать буксир.

Целью странного поступка Дежурного было полюбоваться тем, что произойдет, когда связка глыб льда достигнет границы. Из рубки он насладиться зрелищем не мог.

Где-то далеко наверху в каждой из двух скважин проходчики высверлили отверстия, аккуратно подорвали очередной слой льда так, что он раскололся на четыре сектора — как круглый торт, поделенный на четверых. Глыбы опустились на сетку. Из восходящей скважины их перетянули по горизонтальному штреку в нисходящую, где ждали еще четыре глыбы. Все восемь сцепили в гирлянду, к каждой прикрепили голубой светодиод и отпустили свободно погружаться — сначала по скважине, потом в открытой толще метана до границы с водой. Дежурный сам был проходчиком, поэтому очень хорошо знал, как всё это делается. Администрация предпочитала направлять рабочих на разные участки работы, чтобы каждый хорошо представлял себе всю цепочку, — так было меньше нестыковок и накладок. Большинство не любило дежурить у границы — большинство, но не этот.

Гирлянда, собравшись в комок, пересекла границу, затормозилась и пошла вверх. Дежурный, закрыв глаза, чтобы лучше сосредоточиться, начал изо всех сил отрывисто свистеть. Он «видел», как вздымается огромная кольце-

вая волна между водой и метаном, поднимая мелкую ледяную шугу. Кольцевой холм начал медленно расходиться, а в центре, куда опустилась гирлянда, начал подниматься новый бугор — он тоже превратился в расходящееся кольцо — и так несколько раз. Волны отличались от земных кругов на воде огромными размерами и медлительностью — результат слабой гравитации и сравнительно небольшой разницы в плотности воды и углеводородов.

Никто из европиан никогда не видел волн! Вообще, никто из них до сих пор не видел поверхности, по которой могут ходить волны. И наблюдать их было здорово — это стоило риска любых дисциплинарных взысканий. Почему эволюция одарила разумных существ тягой к невиданным явлениям вместо того, чтобы снабдить рациональным страхом? Дежурный заморожено следил за кругами, пока поверхность чуть не успокоилась — надо было срочно выполнять основную обязанность.

Он вернулся на буксир, восстановил давление и направил судно к гирлянде. Зацепив кольцо с красным маячком, он не спеша потянул гирлянду, которая не успела смерзнуться в бесформенный комок (а бывало и такое) за пределы купола в ледовый отвал. Это тоже было зрелище! Глыбы льда, неся в себе космический холод, быстро покрывались новым намерзающим льдом, приобретая более округлые очертания. Светильники тоже оказались под толстым слоем льда, и теперь глыбы светились изнутри — Дежурный любовался гирляндой в зеркало заднего вида. Путь был неблизкий, и можно было вволю пофантазировать.

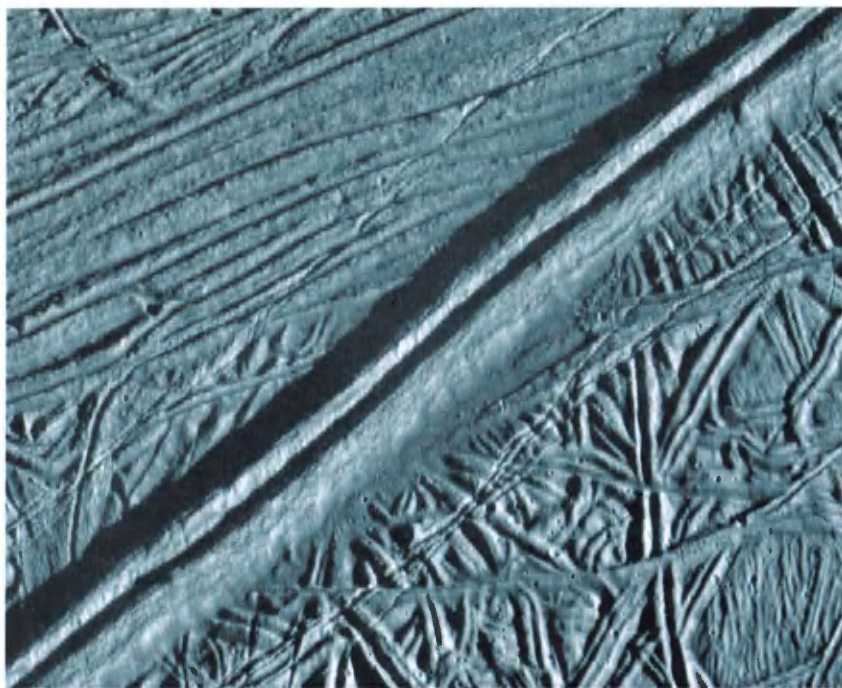
Всем проходчикам было торжественно обещано, что они смогут своими глазами увидеть внешнее пространство. Возможно, это был опрометчиво: почти все теперь не могли отделаться от фантазий, что они там увидят. Каждый представлял это по-своему — Дежурный не мог отделаться от образа плавающих в пространстве ледяных миров, подсвеченных изнутри: буксировка десятков гирлянд сделала свое дело — воображение переклинило. Как только он пытался представить, что увидит, поднявшись в барокамере из последнего шлюза на телескопической стреле, перед глазами вставал хоровод миров — ледяных шаров, светящихся внутренним светом. Дежурный знал, что миры освещаются снаружи, знал, что лёд, покрывающий целый мир, не может выглядеть прозрачным, но знание не помогало — он тряс головой, но воображаемые миры оставались полупрозрачными, светящимися сами по себе. Но это был еще не худший случай. Бригадир, начитавшись одного известного фантаста, не мог представить себе внешнее пространство без огромных прозрачных тварей, испускавших синеватое свечение.

А самое сложное заключалось в другом. Все становились в тупик от осознания, что там, за ледяным панцирем, средством восприятия далеких пред-

метов становится не слух, а зрение. Никто никогда не видел глазами ничего дальше четверти свиста. А тут требовалось вообразить что-то за сотни тысяч и миллионы свистов, воспринимаемое через глаза. Зрительное воображение бастовало и не могло предложить ничего, кроме подсвеченных ледяных глыб, крупных тварей с биолюминесценцией и прочих атрибутов глубоководного мира. Далекие миры появлялись скорее в звуковом воображении, хотя все понимали, что во внешнем пространстве нет и не может быть никаких звуков. Вообразить космос жителям океанских глубин не проще, чем нам представить кривое и тем более замкнутое трехмерное пространство.

Буксир с гирляндой покинул Купол — впереди замаячил свет отвала. Аккумуляторы светодиодов, вмерзших в лёд, были рассчитаны на тридцать смен — гирлянды в отвале смерзались между собой, образовав сияющий монолит. Проходка скважин уже наградила участников неожиданными красотоми, кажется, предвещавшими совершенно феерическое зрелище в конце. Но до конца было еще далеко — треть проходки, монтаж четырех аварийных шлюзов, основных шлюзов и самые сложные последние пласты льда. А сейчас еще предстояло прочесать границу на предмет обломков льда и мусора, такого, что тонул в метане, но всплывал в воде.

Буксир вернулся в Купол и выпустил трал: сеть, грузила, легкие поплавки, пограничные стабилизирующие поплавки. Чистить границу — занятие простое, но долгое и монотонное. Зато можно чуть расслабиться и подумать — о внешнем пространстве или о доме, куда он попадет через десять смен, помечтать о теплых базальтовых полях, куда отправится в отпуск. Собственно, и сама проходка скважин состояла из простых однообразных действий, разве что капсула аппарата была тесней рубки буксира, да рычажков и кнопок управления в ней куда больше. Прижать фиксаторы к стене, включить их обогрев, выключить, дождаться сигнала примораживания, проверить, прочно ли примерзли, выставить дрель по лучу лазера, включить дрель, расслабиться и подумать или помечтать, вынуть бур, вставить заряд, переместить дрель на новую позицию. После нескольких отверстий включить обогрев фиксаторов, когда отмерзнут — переместить аппарат на новую позицию, приморозить фиксаторы, выставить дрель и так далее... Потом — долгожданное разнообразие: все в своих аппаратах убираются в соседнюю скважину через штрек, остается включить сирену, подорвать заряд, дождаться эха от внешней поверхности, попытаться снова «рассмотреть» ее рельеф, несмотря на искажения, возникающие от того, что сидишь в проклятой капсуле. В эхе просматривалась прямая ровная гряда, проходящая неподалеку от места, куда выйдет скважина. Бригадир уверял, что она двойная:



46.1. Гряда на поверхности Европы, ставшая предметом спора Дежурного и Бригадира. Снимок сделан космической станцией NASA «Галилео» (photojournal.jpl.nasa.gov). Размер поля снимка 14 x 12 км. Высота гряды 350 м

— Ну как ты не слышишь?! Она разделена на две одинаковые параллельные гряды, посередине желоб — так и идут они ровнехонько, насколько хватает эха!

— Ну не знаю, может, мне жмор дрынем слух отшиб, но нет, по-моему, там никакого желоба посередине. Тебе мерещится.

— Постучи по затылку, потряси головой в следующий раз...

И так далее. Этот спор происходил едва ли не после каждого подрыва.

Буксир отправился за пределы Купола с полным тралом. Дежурный подумал: «Как, по сути, просто всё это делается. Говорят, величайший проект цивилизации. Внизу нас считают чуть ли не героями. А тут одна рутина. Сделал то, сделал се, сделал третье — как ракушки лузгать, а если что забыл, напомним автоматика. Кругом защита от дурака, и не зря — от такой работы в пору действительно стать круглым идиотом...»

Теперь действительно всё шло как по маслу. Дежурный подзабыл, как он сам учился управлять аппаратом, как переживал нервные срывы от тесноты капсулы, как однажды так запутал аппарат в силовом кабеле, что пока его распутывали, едва не кончилось жизнеобеспечение. Трудно было пред-

ставить, что не так давно ни одна душа не имела представления о том, как работать в среде, где любого ждет гарантированная смерть сразу от двух причин: низкого давления и мгновенного замораживания. Уже не вспоминалась война двух школ разработчиков — автономщиков и пилотажников. Первые хотели создать полностью автоматический гигантский буровой механизм (нет проблем с жизнеобеспечением проходчиков), вторые — легкие пилотируемые аппараты с разнообразными манипуляторами, управляемыми из капсулы, где поддерживаются комфортная температура и давление. Как видно из вышесказанного, победили вторые, хотя первый вариант поначалу казался проще. Проект автоматического бура споткнулся о проблему температурного контроля всех движущихся частей, чреватую безнадежным вмораживанием гигантского механизма в лёд. К счастью, вмерзли лишь уменьшенные прототипы в пробных скважинах. Зато три — один за другим. Так что было всё — и драмы, и героизм, и тяжелые ошибки, и жертвы были. Поначалу казалось, что отладить процесс проходки скважин, так, чтобы не было регулярных аварий и переделок, не удастся никогда. Но два глаза боются, а восемь рук делают, и теперь все идёт как по маслу за исключением мелких дряг и неурядиц.

Снова показалось зарево отвала. Дежурный пытался представить гряду на внешней поверхности — то ли простую (по его впечатлению), то ли двойную (на чем настаивал Бригадир). Он ведь ее увидит своими глазами, когда придет тот самый момент — не слухом, а глазами. Как это — увидеть глазами такую огромную гряду? Так же четко, как он видит свою руку, но размерами во много свистов, что в родном Мире не только не увидишь, но и не отсвистишь! Как это представить? А если бы вдруг Мир внезапно стал таким же прозрачным, как внешнее пространство? По крайней мере, если верить ученым, которые утверждают, что внешнее пространство абсолютно прозрачно для зрения. Что он увидит, если Мир полностью просветлеет для глаз и заполнится светом? Сразу все горы, города, ледяное небо! Это будет красиво или устрашающе? А если увидеть это сверху, отсюда! Ландшафт с крохотными городами далеко внизу, как на карте, закругляющийся и исчезающий за выпуклостью мира. И серо-голубое волнистое небо, тоже закругляющееся и уходящее за выпуклостью... Он вдруг понял, что мог бы внезапно умереть — то ли от страха, то ли от восторга, если бы действительно случилось такое.

Дежурный осознал, что мысли завели его слишком далеко, и лучше вернуться к чему-то попроще и поприятнее, например, к теплым базальтовым полям...

47. Где Бог играет в кости?

Мы попытались описать, как в ходе вечной инфляции рождаются мириады вселенных. Насколько они разные? Антропный принцип предполагает, что они должны существенно различаться, иначе как среди них появится хоть одна с тонко подобранными физическими константами, благоприятствующими жизни? Где может иметь место случайность, определяющая законы и судьбу вселенной?

Выше шла речь о фазовых переходах в ранней Вселенной, при которых менялась физика — массы частиц и характер их взаимодействия. Не могла ли случайность реализоваться именно здесь, не приводят ли в разных вселенных те же самые фазовые переходы к разной физике? Мы же видим, как лёд на поверхности воды в ведре на легком морозе образует случайный узор!

По сути дела, мы хорошо понимаем лишь один фундаментальный фазовый переход, связанный с электрослабым объединением. В этом случае ответ известен, и он отрицательный. Там нет никакого параметра, который влиял бы на результат перехода (параметра порядка), — он подобен фазовому переходу вода — пар, где нет никакого произвола. И вода, и пар не имеют структуры.

Но могли быть и другие фазовые переходы, более ранние, при температурах, до которых не способна добраться экспериментальная физика высоких энергий. Напомним: из экстраполяции данных, полученных при доступных энергиях, угадывается еще одно объединение, где к электрослабым взаимодействиям добавляется сильное — великое объединение, уже упоминавшееся выше.

Электрослабый фазовый переход связан с полем Хиггса: пространство заполнилось однородным скалярным полем, и физика частиц изменилась — электромагнитные и слабые взаимодействия стали разными. А если существует великое объединение, то был и другой фазовый переход, когда сильные взаимодействия отщепились от электрослабых. И тот фазовый переход тоже связан с появлением однородного скалярного поля. Разница в том, что при великом объеди-

нении могло быть несколько скалярных полей, и пространство оказалось заполнено их некоторой комбинацией. Какой именно комбинацией, с какими именно коэффициентами вошли в нее составляющие скалярные поля — это может быть делом случая. И от этого случая будут зависеть массы частиц и их взаимодействия.

Может ли подобный фазовый переход дать необходимое разнообразие вселенных, чтобы некоторые из них оказались пригодны для жизни? Мы не способны точно реконструировать модель великого объединения, в частности, среди физиков существует и такая точка зрения, что его вообще не существует. Но есть проблема, общая для любых мыслимых моделей.

Обитаемость вселенной зависит от многих констант: массы разных частиц, констант разных взаимодействий. И в этом многомерном пространстве констант есть небольшой обитаемый «островок». Может быть, такой «островок» не один, но, несомненно, эти «островки» занимают ничтожный объем в пространстве. И нам надо «выбросить кости» так, чтобы они указали координаты одного из «островков». А если измерений много, а «костей» мало? Тогда может оказаться так, что, сколько ни кидай кости, ни на один «островок» не попадешь.

Допустим, есть трехмерное пространство констант (на самом деле число «измерений» больше) и в нем — островки-пузырьки, где значения параметров пригодны для жизни. Допустим, есть один случайный параметр, указывающий точку в этом пространстве по какой-то формуле. Если бесконечное число раз выбирать этот параметр случайным образом, указанные им точки дадут одномерное множество — линию. Какова вероятность, что эта линия попадет на один из маленьких островов-пузырьков, затерянных в пространстве констант? Если пространство параметров конечно, то что-нибудь типа $(v/V)^{2/3} N$, где v — типичный объем обитаемого «островка», N — число «островков», а V — объем всего пространства констант. Если «островков», благоприятных для обитания, не так много, то эта вероятность будет мала. Таким образом, когда число степеней свободы («костей») при случайном выборе существенно меньше размерности пространства параметров, то обитаемая вселенная скорее всего вообще не появится: линия исходов «бросания костей» пройдет мимо всех «остров-

ков». Именно этот случай имеет место при фазовом переходе типа того, что мог произойти в связи с великим объединением. Источник случайности должен быть более богатым, более многомерным, и его надо искать где-то еще.

Место, где его ищут, — теория струн. С самого начала автор книги решительно намеревался избежать серьезного экскурса в эту теорию. Чтобы понимать суть теории струн, надо хотя бы иметь представление о математике, которая лежит в ее основе. Ознакомление с этой математикой находится за пределами житейских возможностей автора данной книги. А без понимания основ лучше не писать вообще. Пусть теория струн остается героем повествования, который маячит за кулисами, не выходя на сцену, но неявно влияет на ход событий. Об этой теории должны быть написаны другие книги другими людьми.

Однако сейчас, чтобы разобраться с антропным принципом, совсем обойти молчанием теорию струн невозможно. В таких случаях полезно прибегать к цитированию людей, которые разбираются в предмете лучше тебя. Одним из таких является научный редактор данной книги. В качестве подходящей цитаты можно использовать интервью, взятое автором у Валерия Рубакова в связи с первым присуждением премии Мильнера, среди лауреатов которой были классики теории струн. Оно опубликовано в «Троицком варианте» в августе 2012 года и цитируется в слегка адаптированном виде.

Борис Штерн: Что касается струн, то там уже никаким экспериментом ничего не докажешь, но они тоже, видимо, имеют огромное мировоззренческое значение.

Валерий Рубаков: Не только. Еще огромное значение для математики. Суперструны наплодили большое количество интересных математических объектов, до которых сами математики не додумались. Да и просто для развития мозгов имеют немалое значение.

Суперструны вначале вводятся аналогично частицам в релятивистской квантовой механике — уравнение вроде Клейна — Гордона для свободных частиц, только объекты имеют вид струн — открытых или замкнутых, где есть квантовые уров-

ни разных мод колебаний. Эти возбуждения можно ассоциировать с частицами. Далее сразу применяется теория возмущений, есть аналог диаграмм Фейнмана, только вместо линий там трубы, которые могут сливаться подобно штанинам брюк, ну и дополнительные интегралы надо брать.

Б. III.: Когда появились струны?

В. Р.: В первом варианте еще в 1960-х — начале 1970-х в попытке описать взаимодействия адронов. Поначалу теория давала неприятный артефакт — тахионы,двигающиеся быстрее света и нарушающие причинность. Потом появились суперструны, избавившие теорию от тахионов. Потом самосогласованные теории суперструн без всяких внутренних противоречий вообще. Причем они возможны только в пространстве большего числа измерений, минимум 10. Я очень хорошо помню, как в Москву приезжал Виттен, кажется в 1985 году. Выступая на семинаре в ФИАН, он заявил типа: друзья, всё, теория сформулирована! Есть две и только две самосогласованные модели — они должны описать всё. Остались технические трудности, но, осилив их, мы выжмем всё, мы сможем из первых принципов получить такие вещи, как заряд и массу электрона.

Б. III.: Получается, не осилили. Где основная засада?

В. Р.: С тех пор выяснилось, что всего самосогласованных моделей пять, сделан действительно огромный вклад в математику, а настоящего, окончательного аппарата всё еще нет. Основная засада, полная сарсынь, как выражаются твои европиане, появилась в неожиданном месте: оказалось, что в теории суперструн



47.1. Эдвард Виттен.
Институт перспективных исследований
(Принстон, США)

есть примерно 10^{500} разных вакуумов, причем все они практически стабильны. И мы не знаем, в котором из этих вакуумов живем...

Б. Ш.: Видимо, такое чудовищное число может взяться только из комбинаторики. Что именно комбинируется?

В. Р.: Конечно. Есть гигантское число способов, которыми можно редуцировать изначальное 10- или 11-мерное пространство в наш четырехмерный мир. Можно свернуть лишние измерения так, можно смять, вакуумная топология одного поля может быть такой, другого — сякой. Ну и так далее. Понятно, что исследовать 10^{500} возможностей нереально. А то, как будет работать теория суперструн, что она будет предсказывать, зависит от конкретного вакуума, в котором мы находимся. Определить это невозможно ни теоретически, ни экспериментально. Люди пытались действовать следующим образом: возьмем такой-то подкласс суперструнных вакуумов, где их всего миллион — с этим числом уже можно работать. Посмотрим, нет ли в этом миллионе вариантов, где появляется нечто похожее на стандартную модель. Потребуем, чтобы при данном вакууме был легкий электрон, — 99% вариантов отсеивается. Потребуем, чтобы там были три поколения кварков, — остается всего 200 из миллиона. Потребуем еще, чтобы заряды были правильными, — не выживает ни один вариант. И что делать дальше с оставшимися 10^{500} за минусом миллиона?

Похоже, это и мог бы быть ответ. Десять в пятисотой разных вакуумов означает десять в пятисотой разных комплектов физических констант в разных вселенных. Конечно, такое число «точек» должно плотно заполнить любое пространство физических констант. И это один из аргументов в пользу теории струн: она обеспечивает простор для антропного принципа.

Суперструны, между прочим, «живут» на планковском масштабе. И опять, возвращаясь к метафоре Бога, мы снова вынуждены поселить его именно там, на сей раз для игры в кости. В планковский масштаб упирается гравитационный коллапс, из него берет начало

космологическая инфляция и там же, похоже, случайно генерируется физика вселенных.

Но как при этом быть с вечной инфляцией? Ведь она — классическое явление, мы ее понимаем лишь постольку, поскольку плотность вакуума стала ниже планковской. Тут возможен следующий сценарий.

Допустим, инфляция идет в некоем конкретном суперструнном вакууме, сформировавшемся на самом ее старте на планковском масштабе. Вспомним, что при инфляции плотность энергии вакуума местами «лезет» вверх за счет квантовых флуктуаций. Где-то она приближается к планковским значениям, при этом вакуум может перестроиться, всё изменится вплоть до числа измерений. То есть и при вечной инфляции «игра в кости» продолжается.

48. Где кончается рациональность и начинается капитуляция?

Мы писали о применении антропного принципа для объяснения значений констант, единственная специфика которых заключается в их благоприятности для жизни (например, энергия резонанса ядра углерода). Здесь данный принцип выглядит естественным и не вызывает отторжения. А следует ли его применять для объяснения каких-либо выделенных значений? Например, если какой-то параметр строго равен единице (две величины в точности равны друг другу). Или какой-то другой параметр неотличим от нуля. Если близость одного параметра к единице, а другого к нулю являются условием нашего существования, следует ли нам объяснять эту близость антропным принципом?

Как отмечено выше, в 1970-х годах люди не понимали, почему так идеально подогнаны начальные условия Большого взрыва, в частности, почему плотность так близка к критической ($\Omega \sim 1$), что предполагало равенство с точностью до 10^{-60} в начале Большого взрыва на околоскопических масштабах. А ведь если бы они не были подогнаны так точно, то и нас не было: Вселенная бы уже сколлапсировала или расширялась так быстро, что не успели бы образоваться галактики и звезды. Не возникает ли соблазн привлечь для объяснения факта антропный принцип? Если знать основное содержание этой книги — соблазна не возникает. Но в 1970-х годах никто этого не знал, и время от времени такая идея всплывала: ну, требуется попадание с вероятностью 10^{-60} , но кто мешает предположить, что «попыток сотворения» вселенных было куда больше, чем 10^{60} ? Владимир Лукаш отметил в своем интервью, что упование на антропный принцип считалось в школе Зельдовича моветоном. И это правильно: если величина близка к выделенному значению, надо искать рациональное объяснение, а привлекать антропный принцип лишь в самую последнюю очередь, когда всё исчерпано. И в том случае правило сработало: вскоре была сформулирована концепция космологической инфляции, давшая рациональное объяснение близости Ω к единице.

Но осталась другая фундаментальная загадка: близость плотности энергии вакуума к нулю. Сейчас мы знаем, что есть темная энергия с плотностью около 10^{-8} эрг/см³, или, если выражать в единицах массы, 10^{-29} г/см³. Возможно, это и есть плотность энергии вакуума. Мы не имеем рационального объяснения, почему она столь мала. Опять антропный принцип? Мы уже упоминали выше именно эту точку зрения.

Если считать, что плотность энергии вакуума равновероятна от планковского до минус планковского значений, то вероятность получить столь малую величину, 10^{-123} , гораздо меньше, чем случайно получить вселенную с современной плотностью материи, столь близкой к критической. Впрочем, где 10^{60} вселенных, там и 10^{123} найдется, чтобы в одной из них вакуум оказался столь слабо тяготеющим, чтобы там смогли возникнуть мы. И есть люди, которые вполне серьезно именно это и утверждают. Но есть и те, кто считает такой подход моветоном и готовы бросить навсегда занятие наукой, если антропный принцип в данном случае окажется единственным возможным объяснением. Автор очень хорошо понимает вторых, но есть одно обстоятельство, которое вроде бы поддерживает точку зрения первых.

Механизм космологической инфляции, ответственный за близость плотности к критической, сделал свое дело гораздо точнее, чем необходимо с точки зрения антропного принципа. Мы бы могли появиться при современном значении параметра $\Omega \sim 0,1$ или $\Omega = 2$. Если бы этот параметр выпадал случайно, мы бы, скорее всего, обнаружили его где-то в этих пределах, заметно отличающимся от 1. Но измерения показывают, что Ω отличается от единицы не более, чем на 0,01. И мы понимаем, это потому, что есть механизм, обеспечивающий равенство $\Omega = 1$ с огромной точностью. Скорее всего, отличие Ω от единицы на много порядков меньше.

А в случае с плотностью энергии вакуума? Антропный принцип требует, чтобы она по абсолютной величине была не больше 10^{-28} г/см³ (число дано весьма приблизительно), иначе из-за ускоренного расширения не смогли бы образоваться галактики и звезды поколения Солнца. А на самом деле, если трактовать темную энергию как плотность энергии вакуума, то она составляет $\sim 10^{-29}$ г/см³. От механизма, обеспечивающего малую плотность вакуума, мы были бы впра-

ве ждать гораздо меньшей величины. А тут подозрительно близко к тому, что требуется для обитаемости вселенной. Достаточно малая величина, чтобы мы смогли появиться, но не более того: всего порядок разницы. Наводит на мысль, что это действительно может быть результатом случая. И некоторые серьезные ученые принимают этот аргумент. Соблазн при этом довольно велик: отпадает необходимость искать причину малой плотности вакуума: это просто случай, выпавший с вероятностью 10^{-123} в бесконечном числе вселенных. И над странным энергетическим масштабом темной энергии, никак не связанным с известными масштабами взаимодействий, не надо ломать голову: случай!

Насколько этот подход рационален?

Он был бы более-менее рационален, если наблюдаемое значение плотности энергии вакуума было бы произвольным с точки зрения законов физики и истории Вселенной. Так ли это?

Нет никаких гарантий того, что темная энергия — вакуум с ненулевой плотностью. Под вакуумом, напомним, мы понимаем состояние с постоянной и однородной плотностью энергии, с уравнением состояния $p = -\varepsilon$. Однако вполне возможно, что плотность настоящего вакуума равна нулю, а темная энергия — скалярное поле, переменное во времени, например, находящееся в режиме медленного скатывания к нулевой плотности. Это заведомо не вакуум, и уравнение состояния здесь другое, напомним: $p = -\omega\varepsilon$, где $\omega < 1$, что соответствует квинтэссенции. Здесь есть варианты теории, когда нынешнее значение плотности темной энергии, близкое к плотности материи, получается естественным образом. То есть существуют возможные объяснения наблюдаемой плотности темной энергии без привлечения антропного принципа. И что важно, они могут быть подтверждены или опровергнуты. В частности, квинтэссенцию можно отличить от вакуума, измерив величину ω , что вполне реально.

Подведем итог. Антропный принцип — метод понимания окружающего мира, который говорит нам важные вещи: вселенных много, они разнообразны, в формировании их физической картины участвует случайность. Это следует из значений физических констант, характерных единственно тем, что они благоприятны для появления жизни. Но есть условия другого типа, тоже необходимые для жиз-

48. Где начинается капитуляция?

ни: что-то с высокой точностью равно чему-то, а что-то удивительно мало. Автор, как и многие исследователи, придерживается той точки зрения, что привлекать в данном случае антропный принцип — нечто сродни капитуляции, которая оправдана лишь в случае полной безнадежности найти прямое объяснение. Пока загадка малой энергии вакуума остается одной из тяжелейших, но до полной безнадежности еще далеко.

49. Как за полчаса изменился мир (интервью с Андреем Линде)

Пожалуй, текст, приведенный ниже, можно назвать скорее рассказом, чем интервью. У автора были заготовлены вопросы, но Андрей регулярно предвосхищал их — оставалось только слушать и запоминать.

Борис Штерн: Начнем с истории. Когда вам стало ясно, что теория инфляции — это и есть самый главный ответ на главные вопросы космологии?

Андрей Линде: Пожалуй, это было растянуто по времени, лучше изложить цепь событий. Мы ходили вокруг да около еще в 1976 году, когда с Давидом Абрамовичем Киржницем занимались фазовым переходом по электрослабому взаимодействию. Мы видели, что Вселенная может застрять в переохлажденном состоянии, когда в плотности энергии надо всем доминирует поле типа полей Хиггса, причем застрять надолго. Это как раз то, что потом стало базой для первых инфляционных моделей, но у нас тогда были совсем другие задачи, в этом направлении мы совсем не думали. Мы думали о том, как из этого получить нужную энтропию, как объяснить с помощью переохлаждения барионную асимметрию (напомним, барионная асимметрия требует нарушения теплового равновесия, что и дает фазовый переход с переохлаждением. — *Б. Ш.*). На эту тему у нас была



49.1. Андрей Линде

работа с Геной Чибисовым в 1978 году — у нас там тоже сталкивались пузыри новой фазы, как и в сценарии Гуса (фамилию Guth в русской речи произносят и как Гут, и как Гус, поскольку адекватного произношения для Guth в русском не существует, в данном случае автор придерживается произношения собеседника. — *Б. Ш.*). Но у нас не было идеи посмотреть, как фазовый переход влияет на динамику Вселенной, нас интересовало рождение барионов.

Первое самосогласованное описание того, как может возникнуть мир де Ситтера, появилось в 1980 году в работе Алексея Старобинского. Это была блестящая работа, в России она оживленно обсуждалось на семинарах и конференциях. Помню, Сахаров находился в состоянии радостного возбуждения по поводу работы Алексея. Но было одно обстоятельство, которое меня озадачивало. Ранняя Вселенная, описываемая в его модели решением де Ситтера, была не сингулярной — ее история могла быть неограниченно продолжена назад во времени, минуя состояние бесконечной плотности. Но мир де Ситтера вместе с тем оказывался нестабильным, и эта нестабильность делала такое предположение невозможным. Кроме того, Алексей в своей работе писал следующее: «Наш сценарий прямо противоположен мизнеровскому изначальному хаосу». Это противоречило основной идее инфляционной космологии: нужно описать, как Вселенная стала такой «хорошей», стартовав с чего угодно. Это есть и в сценарии Гуса, и во всех последующих. А у Алексея наоборот — Вселенная начинается с «хорошего» чистого состояния, с мира де Ситтера, а потом уже с ней происходят всякие пертурбации.

Но эти проблемы были исправимы. Вскоре вышла провидческая работа Зельдовича, где он предлагает трактовать модель Старобинского как сценарий рождения Вселенной из ничего. Потом это формализовал Саша Виленкин. Затем, в 1983-м, после выхода моей статьи о хаотической инфляции, Алексей модифицировал свою модель на подобной основе, и его модель стала частью более стандартного подхода к инфляционной космологии.

Несмотря на бытовавшие в то время сомнения, Слава Муханов и Гена Чибисов решили отодвинуть в сторону все эти проблемы, взять модель Старобинского и посмотреть, как будут вести себя в ней квантовые флуктуации метрики — какой спектр возмущений они дадут. Ранее самой популярной гипотезой был плоский спектр Гаррисона — Зельдовича, однако он был взят с потолка, просто чтобы объяснить данные по крупномасштабной структуре Вселенной. Муханов и Чибисов обнаружили, что из модели Старобинского в первом приближении получался именно такой спектр. Они также рассчитали отклонение от плоского спектра — он на самом деле логарифмический, и сейчас именно это видно по данным WMAP и «Планка». Из работы Муханова с Чибисовым следовало, что галактики и их скопления не что иное, как бывшие квантовые возмущения, сначала растянутые инфляцией, а потом усилившиеся из-за гравитационной неустойчивости. Поначалу такое утверждение вызвало массовое неприятие: как огромный классический объект может появиться в результате квантовых процессов?! Сейчас это общее место.

В то время многие стали задаваться вопросом, как получить большую однородную Вселенную, но все сталкивались с какими-то проблемами. Я попал на семинар Рубакова — они пытались объяснить, почему Вселенная большая и плоская исходя из модели Колемана — Вайнберга. Но из этого ничего не получилось. Когда мне позвонил Лев Борисович Окунь и сказал про работу Гуса, я сразу объяснил, почему это работать не будет, — мы уже имели дело с распадом переохлажденного скалярного поля. Вообще то время запомнилось ужасным эмоциональным состоянием — чувствовалось, что ответ близок, но всё что-то не клеилось.

В модели Старобинского чего-то не хватало в ее начале, на старте. Модель Гуса очень хорошо обоснована, но не работает в ее конечной стадии. Успех работы Гуса связан не с тем, что он ездил и всюду о ней рассказывал. Ему удалось зажечь аудиторию ясной подробной аргументацией — через всю статью проходит чистая линия мысли. После его статьи всё стало прозрачным, не-

смотря на то, что проблема в целом еще не была решена. Зельдович вынужден был сказать: «Мы прошляпили инфляцию!» Кстати, в Америке широкое общественное мнение насчет инфляции так и застряло в 1981 году. Согласно популярным статьям и учебникам, Алан Гус — единственный герой новой космологической парадигмы. Но он сам нашел, что его теория не работает, а год спустя подтвердил этот вывод.

Б. Ш.: Новый сценарий возник на следующий год?

А. Л.: Да, очень скоро. Игорь Ткачёв уже отчасти рассказал про то, над чем я бился в то время. Действительно, я пытался понять, куда происходит туннельный переход скалярного поля в сценарии Гуса, при этом пришлось использовать компьютер, с которым я не был дружен. Получилось, что иногда поле перескакивает под барьером почти по горизонтали — т.е. оказывается высоко на склоне потенциала. А дальше — проще: оно мед-

ленно скатывается вниз по склону (соответствующее уравнение было известно больше сотни лет назад — это уравнение гармонического осциллятора с вязким трением), и пока оно скатывается, пузырек за счет экспоненциального раздувания успевает вырасти в целую вселенную! Но тогда зачем вообще нужен барьер? Пусть поле просто скатывается с пологой вершины... Показалось, что я на правильном пути.



49.2. Андрей Линде и Валерий Рубаков. Киото, 1985 год

Это было в начале лета 1981 года, поздним июньским вечером. Семья уже спала. Я взял телефон и забрался с ним в ванную комнату, чтобы не будить детей, позвонить Рубакову и спросить его, что он думает по этому поводу (есть люди, с которыми нельзя делиться идеями, а есть те, с которыми можно без всяких опасений). Валера ответил, что слышит про такой сценарий впервые, и сам над этим не думал. Я рассудил, что если он до этого не додумался, то скорей всего не додумался никто, и надо действовать срочно. Разбудил жену и обсудил с ней всё это (жена Андрея — Рената Каллош, известный физик-теоретик, работающий в области теории струн. — *Б. Ш.*) Очень быстро написал статью, отправил в Главлит (Главлит — это не журнал, как могут подумать некоторые молодые читатели, это советский цензурный орган, миновать который, находясь в России, было невозможно. Типичное время прохождения составляло два-три месяца, иногда дольше. — *Б. Ш.*), но разрешение на публикацию пришло только через несколько месяцев в октябре 1981 года. В то время в ГАИШ проходила конференция, на которую приехал Стивен Хокинг. Меня попросили переводить на русский его доклад. Выглядело это так: Хокинг произносил слово, которое могли разобрать только хорошо знающие его люди. Это слово «переводил» на английский его аспирант. А потом я переводил это слово на русский. Это стало удручающим, и я стал забегать вперед, экстраполируя речь докладчика. Хокинг доказывал, что модель Гуса спасти нельзя. Он сказал, что у Линде была замечательная идея, как это сделать, но она не работает, и оставшуюся часть доклада я переводил аргументы, почему моя идея работать не может. В более глупом состоянии я никогда не находился: в зале сидели лучшие физики Москвы, от которых зависело мое будущее, а я при них публично себя ругал.

После доклада я сказал Хокингу, что не согласен с его аргументацией, и около двух часов объяснял ему, почему моя идея все-таки должна работать. Он внимательно слушал и время от времени произносил: «О!» — и его студент переводил: «Но вы же раньше об этом не говорили!» Вскоре Хокига хватились

перепуганные организаторы конференции. Пропажка иностранца, да еще знаменитого — это было ужасно! В конце концов нас нашли в аудитории около доски, видимо, испытав огромное облегчение.

После этого Хокинг пригласил меня к себе в отель. Дискуссия продолжалась, затем он стал показывать фотографии своей семьи и пригласил меня на конференцию в Кембридже, которая в основном была посвящена моему сценарию. Туда поехало несколько человек из России, включая нас со Старобинским. В ходе конференции мы поняли, что новый инфляционный сценарий, который я придумал в 1981 году, нужно менять.

Б. Ш.: Пока шла речь о новой инфляции. Как возникла хаотическая?

А. Л.: С новой инфляцией была проблема: предполагалось, что инфлатонное поле, ответственное за раздувание Вселенной, сначала должно прийти в термодинамическое равновесие, чтобы оказаться в нуле — на вершине холма, но времени на это оказывалось очень мало. А если поле не успело термализоваться и находится где-нибудь на склоне потенциала? Написал уравнения — увидел простое решение: поле всё равно успевает раздуть Вселенную, если потенциал достаточно полог, и путь вниз

достаточно длинный.

Вроде можно обойтись и без термализации. Но в этом была психологическая проблема: Вселенная должна быть горячей изначально — к этому все привыкли! Идея горячей Вселенной была всем близка, и отказаться от нее было очень трудно.

Логика хаотической инфляции была такая: да-



49.3. Стивен Хокинг, 2007 год.
Фото NASA

вайте не пытаться решить сразу все вопросы. Предположим, что у природы есть выбор, с чего начать. И если природа пробует разные варианты, то наверняка и те, для которых простые уравнения показывают вход в режим инфляции.

Большая часть людей была полностью перпендикулярна этой идее. Тут уже речь идет не о логике, а о психологии или даже о социальном эффекте. Люди долго и упорно занимались горячей Вселенной, потратили на это массу времени и сил. И тут им кто-то пытается сказать, что это всё напрасно, что всё работает совершенно по-другому. Первая естественная реакция в таком случае — отправить проспаться того, кто какое говорит. Это всё равно, что ломают твой дом, который ты обжил.

Б. Ш.: Ну сейчас-то эта главная идея стала общим местом.

А. Л.: Сейчас — да, общее место, но тогда это был болезненный перелом. До сих пор большинство учебников, говоря об инфляции, преподносят старую версию, базирующуюся на сценарии Гуса и на моей «новой инфляции». Многие так и не поняли, что эти две идеи умерли тридцать лет назад и были заменены идеей хаотической инфляции, которую я предложил в 1983 году. Еще более трудный перелом я пережил в 1986 году.

Б. Ш.: Вечная инфляция?

А. Л.: Да. Она открывалась мучительно. Зато очень четко запечатлелся миг узнавания.

Первые проблески вечной инфляции появились еще на уровне модели Гуса, но там это был недостаток. Затем Стейнхардт обратил внимание, что в новой инфляции это тоже имеет место. Тут же я выпустил препринт, где утверждал, что это как раз очень интересно: всё время, пока инфляция продолжается, возникают новые вселенные с разными свойствами. Тоже самое относилось и к случаю новой инфляции. Это был 1982 год. В 1983 году Саша Виленкин сделал более элегантную работу на ту же тему. Он показал, что даже если поле где-то сползло с центрального бугра, квантовые флуктуации могут забросить его назад, и инфляция продолжится.

Ну а в 1986 году произошел момент кристаллизации: то же самое можно сделать и в рамках хаотической инфляции! Пона-

чалу это казалось безумием — то же самое, постоянный заброс поля наверх, может происходить и на склоне потенциала! Причем это откровение произошло в момент тяжелейшего душевного кризиса.

Тогда уже началась горбачевская перестройка и среди прочего — перестройка Главлита с целью упрощения. Но старую систему закрыли, а с новой протянули целый год, и в этот год мы не могли публиковать статьи. Это было тяжелым ударом. К тому же я писал книгу, и она плохо шла — всё время приходилось что-то переписывать, а тогда приходилось всё делать на бумаге с ножницами и клеем — менять листы, переклеивать ссылки, что выбивает из колеи. В довершение я учился водить машину, а в том возрасте моторика уже не та, что в юности. И когда я в очередной раз загонял машину в сугроб, инструкторы орал на меня матом. В результате я пребывал в очень плохом виде, чувствовал себя ужасно, без сил. Ничего не мог делать — валялся на диване и читал детективы.

В это время вдруг позвонили из ФИАН — надо ехать в Италию со странной миссией — читать популярные лекции в рамках каких-то договоренностей. Причем лекции по астрономии, что не является моей основной специальностью. В то время действовал негласный лимит — одна поездка за границу в год. Жаль было тратить этот шанс на такое. Решил отвертеться по болезни, тем более, что действительно чувствовал себя совершенно больным. В конце концов справку о том, что я болен, подписал Гинзбург.

Однако, вскоре раздался еще один звонок. Мне было сказано: если вы больны сегодня и не способны выздороветь к моменту поездки, то может быть вы вообще не в состоянии ездить за границу? Я понял, что дело серьезно. Встал, взял такси, что было в то время для меня ответственным финансовым решением, поехал в поликлинику и, пройдя за день всех врачей, получил справку, что абсолютно здоров (тогда для выезда за границу требовалась справка о здоровье, причем медосмотр был на порядок серьезней, чем нынешний для прав на вождение. — *Б. Ш.*). После этого я два дня отлеживался, потом встал

и за день оформил все бумаги, на что обычно уходил месяц или два. Мне позвонили опять и сказали, что итальянцы хотели бы видеть текст моих лекций. «Когда?» — «Завтра!»

Всё это выглядело безумием. Но мне пришло в голову, что в этом есть хорошая сторона. В течение года я не мог ничего из своих работ опубликовать за границей, а сейчас, если я что-нибудь интересное сделаю, они пошлют мою работу сами без всякого Главлита дипломатической почтой. Глупо эту возможность упускать, но и старое печатать незачем. Что я могу придумать нового за полчаса, чтобы тут же напечатать и завтра отправить? Я обхватил голову руками и стал раскачиваться из стороны в сторону: что я могу придумать за полчаса?

И через полчаса у меня была теория вечной хаотической инфляции. Это было одним из самых сильных эмоциональных потрясений моей жизни. Конечно, напечатать это за один вечер у меня уже не было сил, но через месяц, уезжая в Италию, я вез с собой три новых работы на эту тему, которые я отправил оттуда в три разных журнала.

Так, вероятно, и бывает в жизни: когда судьба скручивает человека, сжимает его как пружину: если он при этом не ломается, то потом распрямляется с той же силой.

Сначала это показалось невероятным: поле-инфлатон за счет квантовых флуктуаций при достаточно общих предположениях способно скакать вверх по склону потенциала — вплоть до планковских значений плотности энергии. Когда потенциал достигает значений, близких к плановскому, возбуждаются большие флуктуации всех остальных полей. А это значит, что вакуум может перестроиться, — поле снова покатится вниз, раздувая пространство уже с другим вакуумом, с другими законами физики. Как будто повязка с глаз спала! Мир изменился, и это был шок.

Я понял, что должен заново переписать книжку, над которой работал. В статье я написал: не надо пытаться объяснять, почему мир именно таков, каким мы его видим. Когда-то Эйнштейн настаивал именно на таком подходе: нужно объяснить, почему законы физики и физические константы именно та-

кие, какие есть, а другого не может быть. Но мир не единственен, и набор законов природы тоже. Они таковы, потому что мы можем жить только там, где законы нам позволяют жить. Рыба может жить только в воде. Мы — только на суше под слоем атмосферы и т.д. Надо объяснять совсем другое: как образуется много разных частей Вселенной (или разных вселенных) с разной физикой, чтобы в каких-то из них могли жить мы или кто-то еще.

Б. Ш.: Это было более четверти века назад. С тех пор кое-что изменилось, в том числе открыто ускоренное расширение Вселенной, которое можно назвать современной демонстрацией того, что механизм работает. Данные WMAP и «Планка» льют воду на ту же мельницу. Насколько вообще космологическая инфляция утвердилась в общественном сознании, и есть ли конкурентоспособные альтернативы?

А. Л.: Как сказал Черчилль: «Демократия — худшая форма правления, за исключением всех остальных, которые пробовались время от времени». Конечно, в теории инфляции есть проблемы. И, конечно, очень важно исследовать все возможные альтернативы — только после этого можно быть уверенным в теории. Очень интересно, если удастся найти нечто разумное. Вопрос в том, как исследуются альтернативы. Если человек делает это честно, как, например, Валера Рубаков, это очень полезная деятельность. А если человек просто делает карьеру на альтернативных теориях, это порой выглядит удручающе. Например, люди, занимающиеся альтернативными теориями, говорят: «Мы уже всё решили». Им указывают на конкретные ошибки. Через год они, слегка подправив модель, говорят: «Мы опять уже всё решили». И т.д. Самое плохое в этом то, что таким образом отвращается от науки молодежь. Наблюдая подобный цирк, легко прийти к заключению, что вся наука такова. Получается так, что одни занимаются физикой, другие — обустройством социальной ниши.

Конечно же, нельзя исключить, что вдруг появится нечто более мощное, чем теория инфляции. В этом случае я был бы первым, кто это приветствовал. И уж точно лучше не отсижи-

ваться в кустах, подобно Остапу Бендеру, когда их догнал настоящий автопробег. Я бы чувствовал себя в подобной позиции отвратительно! Но пока на горизонте не видно ничего, чтобы могло составить реальную конкуренцию. Кстати, еще один важный момент. В отличие от альтернативных моделей, в теории инфляции не важно, через что проходит Вселенная, перед тем, как раздуться. Это может быть стадия сжатия некой предшествующей вселенной. Это может быть обычная космологическая сингулярность — инфляция стартует от состояния, близкого к планковскому, независимо от того, откуда последнее взялось.

Естественно, в теории есть неясные места. Никакая версия инфляции не идеальна. Основные проблемы начинаются при приближении к самому началу — к планковским масштабам. Но эти проблемы носят общий характер — как сшить гравитацию с квантовой механикой? Какова роль теории струн? Мы привыкли работать в классическом времени, а как с ним работать в условиях квантовой гравитации в режиме, когда все часы и линейки немедленно ломаются, и говорить о «времени», когда родилась Вселенная, становится трудно?

Б. Ш.: Наконец, благодаря WMAP и «Планку» дошло дело до того, что данные позволяют выбирать между разными версиями инфляции. Найдут ли все-таки гравитационные волны и на каком уровне?

А. Л.: Не так давно делались ставки, что отношение амплитуды гравитационных волн к амплитуде скалярных возмущений, обозначаемое как η , будет найдено на уровне 15%. Уже проехали (см., однако, главу 37. — *Б. Ш.*) Есть несколько вариантов теории, которые предсказывают отношение η на уровне $3...4 \cdot 10^{-3}$.

Б. Ш.: Так это ровно то, что называл Алексей Старобинский для своей модели, — полпроцента!

А. Л.: Да, но тут не только его модель, что само по себе является удивительным. Например, Михаил Шапошников с Фёдором Безруковым придумали хиггсовскую инфляцию, где инфлатоном выступает поле Хиггса, но не просто так, а имея неминимальное взаимодействие с гравитацией. Их модель совершенно не

похожа на модель Старобинского. А предсказания дает точно такие же. Их точки не просто попадают в ту же область, разрешенную данными, а просто сидят на точках модели Алексея в координатах $r - n_s$ (n_s — наклон спектра возмущений, см. главу 35, рис. 35.1. — *Б. Ш.*). И не они одни. Например, мы с Ренатой Каллош тоже пробовали строить разные потенциалы на основе супергравитации и нашли огромный класс теорий с такими же предсказаниями. Может быть, в этом странном факте заключена какая-то важная подсказка, которую мы пока не понимаем?

Б. Ш.: Дойдут ли наблюдатели до этого уровня?

А. Л.: Возможно. Причем, скорее на наземных установках. Их преимущество перед космическими экспериментами — возможность неограниченного наращивания. Появились новые деньги — поставили новые приемники в дополнение к старым — точность возросла. Правда, подавляющее большинство суперструнных моделей инфляции дают вообще безнадежно малый вклад гравитационных волн — ниже порога регистрации любого мыслимого эксперимента.

Что касается данных «Планка», с ними связана довольно драматическая история. Простые и наиболее естественные модели инфляции говорят, что реликтовое излучение должно быть с хорошей точностью гауссовым (математически гауссовость выражается как отсутствие корреляций между фазами разложения по ортогональным мультиполям. Физически это означает, что карта возникла как сумма независимых друг от друга возмущений. — *Б. Ш.*). Тем не менее существуют модели инфляции с несколькими взаимодействующими друг с другом полями, где гауссовость нарушается. Людей, занимающихся такими моделями, много — это достаточно широкая социальная ниша.

В какой-то момент пошли слухи, что команда WMAP намерила отклонение от гауссовости. Народ из вышеупомянутой ниши взбодрился. Я позвонил одному из членов команды, он сказал, что слышит такое впервые — никаких отклонений они не видят. Мы, затаив дыхание, ждали результатов «Планка». Жили,

как на вокзале — пока не было ответа наблюдателей, рот был заткнут. Наконец в марте прошлого года космологические результаты «Планка» были опубликованы. Практически никаких отклонений от гауссовости, предсказания простейших моделей инфляции подтверждены.

Люди, занимающиеся сложными моделями инфляции, были несчастны. А для нас как будто плотину прорвало! Значит, можно ничего не бояться и продолжать заниматься тем, что представляется наиболее красивым и естественным.

Б. Ш.: Так, пожалуй, это и есть главный результат «Планка» на данный момент. В остальном — только уточнение относительно WMAP.

А. Л.: Согласен, это и есть главный результат.

На этом интервью завершилось без пафосно закругляющегося конца, поскольку оба устали — Андрей устал говорить, а автор, принципиально не пользующийся электронной записью, устал воспринимать и фиксировать сказанное закорючками на бумаге.

P. S. Интервью было взято до объявления результатов по обнаружению гравитационных волн экспериментом BICEP2 в Антарктиде (см. главу 37). Вот что Андрей написал вдогонку: «Недавние результаты полученные на установке BICEP2 рядом с Южным полюсом, показывают, что амплитуда гравитационных волн может оказаться очень большой, вплоть до $r = 0,2$, близко к тому, что предсказывают простейшие варианты хаотической инфляции. Если эти результаты подтвердятся, то это достижение будет сопоставимо по значению с открытием бозона Хиггса. Но пока еще рано подводить итоги. Нужно провести независимую проверку и понять причины разницы в результатах BICEP2 и предыдущих попыток найти сигнал от гравитационных волн. Одно несомненно: мы живем в эпоху великих космологических открытий!»

50. Интервью с адвокатом дьявола

Иногда, особенно к концу, полезно становиться и отрефлексировать: не слишком ли мы увлеклись одной стороной картины? Не слишком ли тешим себя тем, что всё ясно и прозрачно? В таком случае полезно поговорить с умным человеком, который берет на себя роль адвоката дьявола.

Борис Штерн: Я попробую сделать сильное утверждение: теория космологической инфляции благодаря WMAP и «Планку» утвердилось настолько, что ее можно считать победившей окончательно и бесповоротно.

Адвокат дьявола: Когда мне говорят, что теория инфляции доказана, я обычно отвечаю, что это не теорема. Да, свидетельств в ее пользу много, но «окончательно и бесповоротно» — это перебор.

Б. Ш.: Хорошо, давай по порядку. Перечислим подтвержденные предсказания теории инфляции так, как это сделал Вячеслав Муханов в интервью (глава 41). Предсказано, что Вселенная с подавляющей вероятностью должна быть неотличима от абсолютно «плоской». Подтверждено с точностью около процента.

А. Д.: Во всех альтернативных теориях Вселенная тоже получается «плоской», иначе такие теории никто и рассматривать не стал бы.

Б. Ш.: Хорошо, к тому, как это получается в альтернативных теориях, вернемся позже. А сейчас — предсказание спектра мощности неоднородностей плотности. Теория инфляции предсказывает почти плоский спектр — он и есть почти плоский. Предсказано, что он чуть-чуть отличается от плоского — он и отличается на столько, на сколько предсказано.

А. Д.: Плоский спектр проистекает из общего свойства масштабной инвариантности. Это естественное свойство и некоторых других теорий. А отклонение спектра от плоского может появиться как небольшое нарушение этой самой инвариантно-

сти — тоже ничего сверхъестественного, многие симметрии в природе нарушены.

- Б. Ш.:** Дальше у нас гауссовость. Анизотропия аналогична белому шуму. Предсказали — подтвердили, во всяком случае, подтвердили на уровне, который закрывает целый ряд хитрых моделей.
- А. Д.:** Если амплитуда возмущений 10^{-5} , то и негауссовость должна быть маленькой. Да, есть модели, где она велика, но это отнюдь не абсолютный индикатор инфляции. Например, конформная симметрия дает малую негауссовость. Между прочим, негауссовость, если ее на каком-то уровне обнаружат, может оказаться очень информативной. Это ведь не число — это функция, корреляционная функция. По ее виду можно судить о теории, работавшей в момент генерации неоднородностей.
- Б. Ш.:** Дальше адиабатичность. Еще одно подтвержденное предсказание.
- А. Д.:** Ну, это общее место. Почти в любой модели есть адиабатичность. Достаточно, чтобы в начале горячей стадии было полное термодинамическое равновесие — дальше всё пойдет как по рельсам. Почти в любой модели есть адиабатичность.
- Б. Ш.:** Хорошо. Дошли до последнего следствия — гравитационных волн. Если результат BICEP2 верен — вопрос закрыт. Но предлагаю считать, что его не стоит использовать как аргумент в споре на данный момент — слишком много неясностей и подозрений. Слишком велики шансы, что эффект проистекает от поляризованной пыли в близкой оболочке сверхновой. Итак, есть предсказание гравитационных волн, но нет четких предсказаний на их амплитуду. Почему именно гравитационные волны так важны?
- А. Д.:** Гравитационные волны были бы прямым указанием на высокий энергетический масштаб: сгенерировать гравитационные волны достаточной амплитуды можно только при плотности энергии, не слишком сильно отстоящей от планковской. Или очень большой постоянной Хаббла, что то же самое. А это и будет значить, что идет инфляция.

Б. Ш.: Предположим такое. Пройдет несколько месяцев. «Планк» выдаст результаты по поляризации, и окажется, что результат BICEP2 объясняется пылью, а В-мода на уровне, доступном для нынешних установок, отсутствует. Тогда следующим перспективным уровнем окажется $g \sim 0,5\%$, как это предсказывает модель Старобинского, хиггсовская инфляция и еще целый ряд моделей. Андрей Линде считает, что попадание предсказаний целого ряда очень разных моделей в одну точку — некая подсказка.

А. Д.: Да, вполне возможно, что подсказка...

Б. Ш.: Ну так вот, вдруг окажется, что реликтовых гравитационных волн на уровне нескольких процентов нет. Тогда придется ждать эксперимента PRISM, который достанет до уровня модели Старобинского и других. Но ждать придется довольно долго. Если так случится, будет ли это означать, что теория инфляции останется подвешенной на годы?

А. Д.: Да, останется подвешенной, в том смысле, что альтернативные модели останутся актуальными. Впрочем, в теории инфляции есть элемент, который не имеет реальных альтернатив. Это механизм генерации возмущений, рассчитанный Мухановым и Чибисовым, — усиление вакуумных квантовых флуктуаций скалярного поля. Другого механизма никто не предложил, и во всех альтернативных моделях используется именно он.

Б. Ш.: Перейдем к альтернативам. У многих на слуху экпиротическая модель. Пиротехническая, как назвал ее Андрей Линде. Есть еще модели с отскоком...

А. Д.: Экпиротическая модель и есть одна из моделей с отскоком. Там в чем проблема? Если при расширении вселенной рост возмущений происходит не очень быстро, то при сжатии перед отскоком он резко усиливается. И всё, за что борются, — несингулярное однородное состояние — ломается. Вселенная перед отскоком становится сильно неоднородной и хаотичной — совсем не то, что нужно. Это, кстати, давно известный результат Белинского, Лифшица и Халатникова. Чтобы этого избежать, придумали очень жесткое уравнение состояния: давление больше плотности энергии со знаком плюс.

- Б. Ш.: Надо же такое придумать! Но Андрей говорил, что эту модель не спасает ничего — он считает это социологическим явлением, когда люди создают себе замкнутую экологическую нишу и цитируют друг друга.
- А. Д.: Да, жесткое уравнение состояния не спасает — там остается неустойчивость по Ляпунову — малейшее отклонение начального параметра от требуемого значения растет и уводит систему совсем не туда, куда хочется.
- Б. Ш.: Ну какая же альтернатива тогда жизнеспособна?
- А. Д.: Моя любимая альтернатива — старт с конформной симметрии. Есть конформно-симметричные теории поля...
- Б. Ш.: Инвариантные относительно растяжений масштаба?
- А. Д.: Да, но не только. Там целый класс преобразований. Но, главное, там действительно нет выделенного масштаба.
- Б. Ш.: Но квантовая механика-то есть? А если есть квантовая механика, у любой частицы с массой есть комптоновский радиус.
- А. Д.: При конформной симметрии нет частиц с массой, которые, конечно, эту симметрию бы нарушили.
- Б. Ш.: Ну, хорошо, но планковский размер-то есть! Вот и выделенный масштаб!
- А. Д.: Планковский масштаб связан с гравитацией. Гравитация тоже нарушает конформную симметрию. Предполагается, что изначально пространство пустое и гравитации нет. Потом эта симметрия спонтанно нарушается — появляется гравитация, частицы и всё остальное.
- Б. Ш.: Подожди, это происходит одновременно во всем пространстве? А как же проблема горизонта? Как причинно не связанные области узнают, что надо нарушать симметрию вместе с другими? Та же самая проблема, что стояла до инфляции.
- А. Д.: А здесь опять конформная симметрия работает. Нет выделенного масштаба — нет проблемы горизонта!
- Б. Ш.: И после нарушения симметрии оно разогревается и выходит на стадию Фридмана? А как получается, что оно правильно выходит — почему Вселенная «плоская» оказывается?
- А. Д.: Точно так же. Радиус кривизны — уже выделенный масштаб. Нет выделенного масштаба — нет кривизны.

Б. Ш.: Очень круто! Дай прийти в себя... Я не могу спорить по поводу работоспособности тех или иных моделей в силу непрофессионализма в этом деле. Но хочу призвать в помощь старика Оккама. Мое утверждение: теория инфляции требует наименьших усилий по части привлечения новых сущностей. Более того, я бы отдал предпочтение тем моделям инфляции, которым новые сущности нужны в наименьшей степени. С этой точки зрения лидер — модель Старобинского, там вообще ничего не нужно, работают все существующие поля. А вот хиггсовскую инфляцию, я бы, наоборот, понизил в ранге. Там требуется особое взаимодействие поля Хиггса с гравитацией. При том, что общая теория относительности строилась как геометрическая теория — в основе был принцип универсальности: все формы материи равны перед гравитацией. А тут получается, что поле Хиггса равнее всех. Оккам был бы против. Инфляция со скалярным полем уже проще — есть идея великого объединения, где требуется подходящее поле, т.е. новая сущность тут более востребована. Ну и, конечно, модель Старобинского еще проще в этом плане. Я имею в виду идеологическую простоту с точки зрения критерия Оккама, а не техническую.

А. Д.: Это верно. Но все-таки везде свои проблемы. Та же модель Алексея. Почему именно R^2 , а не какая-то другая функция $f(R)$?

Б. Ш.: Ну, R^2 — просто следующий член разложения.

А. Д.: На самом деле следующие члены типа R^4 тоже могут быть большими. Впрочем, ладно, наверное это уже брюзжание. Модель хорошая. Но еще раз повторю: теория инфляции, какой бы привлекательной и многообещающей она ни была, не теорема. Ее нельзя считать окончательно и бесповоротно утвердившейся пока не зарегистрировали гравитационные волны. И до той поры надо продолжать попытки развивать альтернативы.

С точки зрения автора адвокат дьявола выполнил свою миссию лишь отчасти. Он не поколебал уверенности в том, что теория инфляции и есть ответ на вопрос «Откуда взялась Вселенная?» — слишком много у нее достоинств. С другой стороны, автор соглашается, что:

- риторика типа «доказано», «окончательно и бесповоротно» неправомерна;
- альтернативы в данном случае — полезное и правильное занятие. Даже если все они однажды будут отвергнуты. Останется опыт и возможные побочные продукты.

51. Вся картина, ее свет и тени

Попробуем просуммировать сказанное. Начнем с того, что нового мы знаем о нашей Вселенной в свете теории космологической инфляции.

Ее размер, скорее всего, конечен, но несомненно огромен. Формально для него мы можем лишь дать нижний предел: в сто раз больше, чем расстояние до горизонта. Мы знаем это из современных измерений кривизны Вселенной. Но в сто раз больше — это крайне маловероятно; скорее, в миллиарды или, скажем, на 20 или на 50 порядков больше. Мы понимаем это из характера космологической инфляции — это экспоненциальный процесс. Ее продолжительность неизвестна и до какой-то степени случайна, а продолжительность стоит в показателе степени. Если для создания Вселенной размером с ее наблюдаемую часть инфляция должна была продолжаться по меньшей мере 10^{-35} с, то при времени раздувания $2 \cdot 10^{-35}$ с ее размер будет на 30 порядков больше наблюдаемого (цифры приблизительны). То есть мы с подавляющей вероятностью видим лишь «микроскопическую» часть Вселенной.

Экспоненциальность инфляции говорит и о том, что за горизонтом — то же самое, что мы видим: такая же крупномасштабная структура, такое же соотношение между обычной и темной материей и темной энергией. По крайней мере, наш пейзаж скорее всего продолжается на расстояниях несравненно больших, чем размер горизонта. Однако нельзя дать голову на отсечение, что Вселенная вся одинакова. На момент инфляции вакуум всей Вселенной и целого огромного куста вселенных был одним и тем же — одного происхождения (см. выше аргумент Алексея Старобинского). Но если этот вакуум подвержен фазовым переходам с образованием разных доменов (как в том же ферромагнетике), то могут появиться области с разной физикой, отделенные друг от друга доменными стенками с огромной плотностью энергии (к том же движущимися с околосветовой скоростью). Но мы не знаем, так ли это, просто надо допускать и такую возможность, связанную с неизвестной нам физи-

кой недоступных энергий. Огромный размер Вселенной и ее однородность — хорошо обоснованные предположения, тогда как домены и прочая экзотика, скорее, относятся к теневой стороне картины — это ближе к научным гаданиям.

Мы хорошо понимаем, откуда взялась структура Вселенной — стенки, пустоты (войды), сверхскопления, скопления галактик, сами галактики. Это опять же результат инфляции, точнее, микроскопических квантовых флуктуаций во время инфляции. Понятно, как эти флуктуации растянулись в пространстве, как выросла их амплитуда — это всё хорошо считается, и результат соответствует тому, что мы видим в современной Вселенной, и тому, что мы видим на карте реликтового излучения. Здесь все концы с концами великолепно сходятся, хотя был драматический момент, когда казалось, что их не свести. Напомним, что важную роль в сведении концов сыграла темная материя, которую мы также наблюдаем в галактиках по их динамике и по гравитационному линзированию. Мы неплохо знаем свойства темной материи и точно знаем, сколько ее есть во Вселенной, но не знаем, как она связана с обычной материей.

То же самое с темной энергией. Мы точно знаем ее плотность, знаем, как она влияет на Вселенную, и в будущем сможем уточнить ее состояние — это вакуум или меняющееся скалярное поле. Но мы опять же не знаем, как связана темная энергия с известными частицами и полями. То есть мы прекрасно видим темную материю и темную энергию, понимаем их роль важнейших элементов конструкции Вселенной, но не знаем, из чего они сделаны.

Кроме объяснения структуры Вселенной, инфляция дает ключ к пониманию ее происхождения. Теперь мы можем довольно четко ответить на часто задаваемый вопрос: «Что было до Большого взрыва?» Правильный ответ: была космологическая инфляция. Именно благодаря ей Вселенная и возникла. А что было до инфляции?

В принципе, для того, чтобы инфляция сделала свое дело, достаточно 10^{-35} с. Но она могла продолжаться сколько угодно времени — это следует из очень простых соображений. Мы можем «отмотать» время назад, пока есть классическое пространство-время, а в процессе инфляции оно существует. Правда, когда-нибудь мировая линия, протянутая назад через Большой взрыв, назад сквозь инфляцию,

упрется в планковское состояние (или сингулярность, если пользоваться терминами классической теории), где понятие времени теряется. То есть цепочка вопросов «а что было до того», «что было еще раньше» рвется. Исчезает это «раньше». Как далеко по времени назад от Большого взрыва можно провести эту самую мировую линию? Может быть, до 10^{-30} с, что с точки зрения инфляции есть огромное время. А может быть, до миллиардов лет. Каждая мировая линия, протянутая назад, конечна, но, по-видимому, всегда найдется другая, уходящая дальше в прошлое. Это и есть математическое определение бесконечности, в данном случае — бесконечного прошлого. О бесконечном будущем мы уже писали. Впрочем, это уже, скорее, из области фантазий. Чтобы делать обоснованные утверждения в данном случае, нужна квантовая гравитация, которой, по сути, нет.

Мы уверенно говорим о космологической инфляции, не зная многих важных вещей. Мы не знаем, что такое «мотор» инфляции — инфлатон. Это должно быть некое скалярное поле, но мы его не можем ощутить и исследовать, не можем получить квант этого поля, подобно бозону Хиггса, поскольку его масса должна быть огромной.

Впрочем, есть еще модель Старобинского, в которой никакого специального инфлатона не нужно. Это еще одно из ее преимуществ. Напомним, там условие для инфляции создает кривизна пространства, деформирующая вакуум подобно эффекту Казимира, от чего у него появляется большая плотность энергии. Чтобы дать старт инфляции, на языке модели Старобинского нужна большая и достаточно однородная кривизна пространства в некоторой области. На языке инфлатона нужно поле с высоким значением, достаточно однородное в такой же области. Дальше всё идет одинаково.

Конечно, физическая основа инфляции остается тенью в нашей картине мира, мы не знаем, какая именно физическая сущность играет роль ее «мотора». Тем не менее, большинство физиков уверено, что такая сущность есть и выполнила работу, часто приписываемую Богу, — создание Вселенной среди бесконечного множества других вселенных, как похожих на нашу, так и совершенно невообразимых. Почему мы уверены в теории инфляции?

- Теория хорошо и просто отвечает на тяжелые, почти метафизические вопросы про исключительную точность и сбаланси-

рованность «начального толчка», давшего жизнь большой однородной Вселенной, — слишком хорошо, чтобы оказаться неверной. Она же великолепно объясняет происхождение затравочных неоднородностей, из которых возникли галактики и крупномасштабная структура.

- Теория находит подтверждение в современных данных по реликтовому излучению — не только в первом приближении (спектр флуктуаций почти плоский), но и во втором — спектр все-таки чуть-чуть отличается от плоского именно так, как предсказывается.
- Современное ускоренное расширение Вселенной воочию показывает, что механизм инфляции работает, мы его непосредственно наблюдаем, правда, совсем в другом масштабе.
- Конкурирующие теории существуют, но все они требуют новых сущностей, и ни одна из них не может сравниться с теорией инфляции в простоте и естественности.

Можно ли считать теорию признанной окончательно и бесповоротно? Здесь мнения расходятся. Кто-то считает, что аргументов за нее более чем достаточно. Кто-то считает, что давать Нобелевскую премию за теорию инфляции еще рано — надо подождать открытия реликтовых гравитационных волн. И обязательно найдется какой-нибудь новый фред хойл, который откажется принимать теорию инфляции до гробовой доски.

Итак, теория инфляции объясняет, откуда взялась Вселенная, и ее неоднородности, эволюционировавшие в наблюдаемую структуру. Что она может сказать по поводу других вселенных?

То, что эти другие вселенные могут существовать, следовало допустить уже тогда, когда Вселенная получила статус физического объекта, описываемого уравнениями общей теории относительности. Настойчивый намек на огромное число вселенных дал антропный принцип — способ осмыслить тот факт, что физические константы удивительно хорошо подогнаны под существование жизни. Причем этот принцип намекал не только на то, что вселенных очень много, но и на то, что они разные, с разными физическими константами. И вот теория инфляции прямо показывает, как это бесконечное мно-

жество вселенных получается: раз стартовав, инфляция не останавливается никогда, плодя новые и новые вселенные.

Ясная картина заканчивается густой тенью вблизи планковского масштаба. Из этой тени проступает красивая многообещающая конструкция — теория струн, но нет никаких доказательств того, что эта конструкция реальна. Впрочем, не совсем так — теория стала реальной интересной областью математики, обретя собственное существование, не зависящее от физики. Теория струн, в частности, привлекательна тем, что в ней содержится та самая случайность, которая дает почти бесконечное разнообразие вселенных, подводя фундамент под антропный принцип. Это же самое разнообразие делает невозможной проверку ее предсказаний — мы находимся в одной из 10^{500} реализаций теории струн, неизвестно, в какой.

Видимо, для того, чтобы высветить эту затененную часть картины мира, потребуется новый прорыв. Возможно, кто-нибудь из читателей его дождется.

52. Внешнее пространство. Вместо эпилога

Писатель Дурдам Збинь, поднимаясь по бесконечному тоннелю в тесной барокамере, испытывал смешанные чувства. Он выиграл право первым взглянуть во внешнее пространство благодаря книге и снятому по ней фильму «Смерть снаружи», где как раз живописалось это самое пространство и путешествия в нем.

Пространство было населено исполинскими, но легкими и проницаемыми светящимися космомедузами, которые питались светом Внешиса (эта ласковая аббревиатура была изобретена Дурдам Збинем и являлась предметом его гордости) и испарениями миров, передвигались с помощью магнитных полей, пронизывающих пространство. Эти существа были восхитительно красивы и безобидны, всё пространство чуть светилось голубоватым светом мириадов космомедуз.

Миры, покрытые ледяными панцирями, в несметном количестве совершали шествие вокруг Внешиса. Некоторые были связаны с аттракторами — маленькими черными центрами сильного тяготения, вращаясь вокруг них и вместе вокруг центрального светила. Европиане выходили во внешнее пространство через скважину сквозь ледяной панцирь в кораблях, которые в земных терминах можно охарактеризовать, как космические аквариумы высокого давления, и передвигались в нем с помощью ядерной энергии.

Экспедиции европиан достигли ледяной поверхности других миров, и на одной из них они услышали стуки изнутри. Стуки, будучи расшифрованы, оказались мольбой о помощи: в этом мире извергался вулкан и выбросил огромное количество ядовитого жидкого вещества, которое скопилось в куполе, протаявшем во льду. Вещество постепенно растворялось в воде и отравляло весь океан. Его жители уже начали гибнуть. Единственный шанс к спасению этого мира был в помощи извне. Надо было пробить лёд над мешком с ядовитой жидкостью, чтобы вода выдавила ее во внешнее пространство.

А у европиан на борту как раз был мощнейший кумулятивный гиперзаряд, предназначенный для проникновения в другие миры через лёд. И они решили использовать его во спасение. Естественно, по законам жанра, оказалось, что у гиперзаряда не работает дистанционный триггер. Поэтому командир приказал всем взлететь на корабле, подорвал заряд вручную и по-

гиб. Фильм, снятый по книге, венчала сцена, в которой скорбящая команда наблюдает огромный газовый фонтан зловонно-зеленого цвета, бьющий из спасенного мира.

И вот, автор всего этого, испытывая смешанные чувства, поднимался по скважине, чтобы первым увидеть внешнее пространство. Чувства были смешанными, поскольку, с одной стороны, это было захватывающе интересно. С другой стороны, писатель понимал, что участвует в постановке, в которой ему надлежит сыграть роль шута: наверняка рабочие и технари уже всё видели, но молчат ради сценария, в котором от него требовалось лишь сморозить какую-нибудь глупость на публику. А сами будут потешаться!

И Дурдам Збинь думал, что же он скажет. Ну, шут так шут, но он должен хорошо сыграть роль. Может быть, там лишь непроницаемая тьма. Но сказать что-то надо, ведь миллионы хотят услышать от него хорошие важные слова. У него в голове крутилось фраза: «Один беглый взгляд — прозрение всего Мира», — но изречение казалось слишком напыщенным и глуповатым. Надо что-то попроще. Что-то попроще...

Раздался металлический грохот. Барокамера остановилась. Жидкость вокруг, вскипела и вскоре исчезла. Остались только стенки тоннеля, между ними и барокамерой — жуткая пустота. Камера медленно продолжила подъем. Выключилось электрическое освещение, но остался слабый свет, и это точно был свет снаружи. Режиссер сказал через наушники, что трансляция включена. А свет снаружи становился чуть ярче. Что же сказать?! Сейчас он увидит... И он увидел!

— Са-арс-сы-ынь о-ох-хряс-сна-ая!

— Э-э-э! Трансляция включена, миллионы слушают, дети слушают, как можно! — закричал в наушниках режиссер.

— Дурдам Збинь, кажется, увидел нечто о-очень необычное... — смущенно промямлил ведущий.

— Сейчас, сейчас, извините... — тряся головой, отреагировал Дурдам Збинь. — Он огромный! Он просто гигантский и потрясающий. Как огромная чаша, огромная полосатая чаша!

— Кто он, что за чаша?

— Это должен быть Большой Аттрактор — как раз там. Потрясающе!

— Почему чаша? Он должен быть шаром.

— Да, похоже, шар — граница нерезкая. Наверное, я вижу только освещенную часть. Но он не просто полосатый! Там вихревые дорожки, как след подкрашенной струи гоночного снаряда — чудесные завитки, а еще овальные пятна между дорожками. Это невозможно объяснить! Всё такое огромное! Это надо видеть!

— А какого он цвета?

— Там все цвета, только неяркие, приглушенные. Бежевый, бурый, красноватый, голубоватый. Овальные пятна почти белые. И там еще желтый полукруг маленький... О! Это не просто полукруг, это шарик — нижняя освещенная половина желтая, верхняя — черная на фоне Аттрактора. И какие-то темные крапины на нем. Это, наверное, и есть Первый мир.

— Зритель задает вопрос: «А как там насчет космомедуз?»

— Не надо смеяться над старым честным писателем, — он чуть было не сказал «дураком». — Я старался, как мог, и не думал, что придется отдуваться... Впрочем, погодите, там что-то есть... Точно! Са... Ого! Огоньки! Много! Очень много. Как люминетки в брачный сезон — их мириады! Тоже есть яркие, но гораздо больше слабых. Только они жестче люминеток. Везде — везде, а в этом окне особенно — еще больше. Что это такое?! Они не движутся. А там, где темная часть Аттрактора, их нет ни одной. Они, наверное, все дальше его, много дальше... Подождите, дайте прийти в себя. Дайте посмотреть на всё это молча!

На этом мы оставляем Дурдам Збиня с его потрясением. Ему еще предстоит обратить внимание на бледно-серебристую, всхолмленную белыми ровными грядами внешнюю поверхность Мира и рассказать о ней.

На этом мы также оставляем и европейан в целом, не потому, что их дальнейшая история неинтересна, как раз наоборот. Просто их дальнейший процесс познания Вселенной в общих чертах повторяет наш.

Благодаря своим «дальнозорам» на твердой поверхности, но без атмосферных помех, они сразу перескакивают почти на уровень «Хаббла» в инструментальном отношении, правда, оказываются пока далеко позади нас по части осмысления увиденного.

Наша космологическая эпопея, если сравнивать ее с этапами познания окружающего мира вымышленными европейанами, скорее, аналогична их открытиям Солнца по еле ощутимому свету, а также Юпитера и галилеевых спутников по движениям ледяного панциря. Это тоже прорыв за край мира, но не столь буквальный, как прокладка скважины через препятствие. Перед нами тоже своеобразный панцирь: эпоха рекомбинации, «сфера» реликтового излучения, по которой мы реконструируем более далекие горизонты. Наш сюжет еще не завершен, зато уже понятно, что осталось, понятно, как сделать последний шаг: увидеть следы гравитационных волн.

А возможен ли в будущем такой прорыв, когда перед нами разом откроются новые горизонты, словно и мы пробурили какой-то панцирь? История науки показывает, что зарекаться от новых прорывов не стоит. Сейчас мы не видим предпосылок, разве что суперструны, подобно паззлу, вдруг сложатся в отчетливую картину. Но, скорее всего, это будет что-то другое, более неожиданное. И это точно не будет прорывом в некое «внешнее» пространство — скорее во «внутреннее» или какое-то еще, для которого рано подбирать эпитет.

У космологии есть серьезный недостаток: она не зрелищна. Ни разу в ее длинной истории, продолжавшейся десятки лет, не было открывшейся панорамы, когда бы у очевидцев вырвалось неконтролируемое восклицание, подобное тому, каким челябинские мужики встретили метеорит. Может быть, отдельные ученые испытали потрясение, например, впервые увидев акустический пик на спектре угловых гармоник реликтового излучения. Тогда появилась громкая метафора «Лицо Бога» или «Улыбка Бога» — это по поводу карты реликта с неоднородностями нужной амплитуды. Но чтобы испытать при этом восторг и потрясение, надо много знать и заранее напрягать голову. Если же внезапно вывалить на неподготовленного человека квинтэссенцию нашей истории, пусть в виде короткого фильма с самыми раскомпьютерными эффектами, реакцией будет, скорее, ступор, чем потрясение, скорее, неприятие, чем восторг.

Это не значит, что всё безнадежно, что современная космология с ее панорамой останется достоянием лишь горстки яйцеголовых. Конечно, современная картина мира во всей ее красе доступна меньшинству. Но это меньшинство составляет многие миллионы. То же самое можно сказать про серьезную музыку, настоящую и сложную. Ее восприятие требует постоянных целенаправленных душевных усилий — усилий с разных сторон, как со стороны исполнителя, так и со стороны слушателя. Эти усилия достойно вознаграждаются.

Поэтому просьба к тем читателям, кто, словно выковыривая изюм, вычитывал из этой книги лишь эпизоды про европиан, вернуться и попытаться прочесть другие фрагменты. Это усилие окупится не с первой, так со второй или с третьей попытки пониманием того, что такое Вселенная и откуда она взялась вместе с бесконечным числом других, как похожих на нашу, так и совершенно немыслимых.

Благодарности

Автор благодарен многим людям, и прежде всего — научному редактору **Валерию Рубакову**. Отвечая на множество глупых вопросов автора по телефону и при встречах, прочитывая длинные тексты по несколько раз и вылавливая в нем всевозможные неточности и «ляпы», он, безусловно, стал фактическим соавтором книги. Тем более, в книге присутствует его прямая речь — как от своего лица, так и от имени адвоката дьявола.

Книга сильно выиграла от прямой речи участников описываемых событий, создававших теорию инфляции: **Владимира Лукаша, Алексея Старобинского, Вячеслава Муханова и Андрея Линде** (перечисление в порядке появления в книге). Автор признателен им за данные интервью и кропотливую работу по доведению этих интервью до ума. Можно надеяться, что эти интервью станут вполне заметным вкладом в историю науки.

Автор благодарен **Игорию Ткачёву** за консультации по ряду конкретных вопросов, связанных с теорией инфляции. Особую признательность автор выражает **Павлу Насельскому** за комментарии по поводу проблем в вопросе детектирования гравитационных волн разными методами. Автор также благодарит за полезные дискуссии **Олега Верходанова, Игоря Новикова, Андрея Дорошкевича, Дмитрия Компанейца, Павла Иванова, Елену Михееву**.

Наконец, отдельную благодарность автор выражает **Максиму Борисову**, который вычитал книгу, привел ее в порядок, оформил и сверстал, а также **Татьяне Васильевой**, помогавшей Максиму.

Указатель имен

Айвазовский Иван 72
Альбрехт Андреас (Andreas Albrecht) 135
Альфер Ральф (Ralph Alfer) 48 49
Безруков Фёдор 280
Белинский Владимир 285
Бербидж Джеффри (Geoffrey Burbidge) 44
Бербидж Элеонор (Eleonor Burbidge) 44
Березин Виктор 250
Бернардис Паоло (Paolo Bernardis) 112
Богоявленский Олег 112
Бонди Герман (Hermann Bondi) 43
Борисов Максим 299
Браут Роберт (Robert Brout) 65
Бреан Друм 104 109
Брюсов Валерий 88
Васильева Татьяна 299
Верходанов Олег 197 299
Веряскин Александр 204
Виленкин Александр 271 276
Вилкинсон Дэвид (David Wilkinson) 112
Вильсон Роберт (Robert Wilson) 47 48 49
Виттен Эдвард (Edward Witten) 263
Гамов Георгий 48 49
Ганн Джеймс (Gunn James) 114 141
Герман Роберт (Robert Herman) 48 49
Гильберт Давид (David Hilbert) 75
Гинзбург Виталий 277
Глинер Эраст 115 116 118 121 222 232
Голд Томас (Thomas Gold) 43
Грищук Леонид 117 118
Гумилёв Николай 149
Гуревич Лев 116

- Гурович Виктор 119
 Гут Алан (Alan Guth) 116 118 120 121 125 126 132 133 222 224 271 2
 72 273
 Дали Сальвадор (SalvadorDali) 93
 Де Ситтер Виллем (Willem de Sitter) 83
 Дикке Роберт (Robert Dicke) 49 113
 Дорошкевич Андрей 49 112 198 299
 Дурдам Збинь 294 295 296
 Дымникова Ирина 116 118
 Зельдович Яков 111 115 116 117 120 151 186 187 232 234 271
 Иванов Павел 299
 Казанос Демосфенес (Demosphenes Kazanos) 121
 Казимир Хендрик (Hendrik Casimir) 62
 Каллош Рената 274 281
 Капица Сергей 38 190
 Кардашёв Николай 112
 Карр Бернард (Bernard Carr) 234
 Кацухико Сато (Sato Katsuhiko) 120
 Киржниц Давид 98 270
 Колб Роки (Rocky Kolb) 120
 Коллинз Берри (Berry Collins) 112
 Колумб Христофор 47 130
 Компанеец Дмитрий 299
 Коперник Николай 130
 Кузьмин Вадим 250
 Кук Джеймс (James Cook) 52
 Леметр Жорж (Georges Lemaitre) 27 28
 Линде Андрей 98 120 128 133 134 137 138 145 206 208 224 227 228 2
 29 236 243 270 285 286 299
 Лифшиц Евгений 285
 Лукаш Владимир 111 120 141 232 233 266 299
 Маккеллар Эндрю (Andrew McKellar) 47
 Максвелл Джеймс (James Maxwell) 71
 Марков Моисей 223
 Мелвилл Герман (Herman Melville) 67
 Мельхиори Франческо (Francesco Melchiori) 112

Мизнер Чарлз (Charles Misner) 112
 Михеева Елена 299
 Муханов Вячеслав 126 140 159 194 225 233 272 283 299
 Нарликар Джайант (Jayant Narlikar) 45
 Насельский Павел 197 299
 Новиков Игорь 49 112 120 197 299
 Новиков Сергей 112
 Оккам Уильям (William Ockham) 287
 Окунь Лев 272
 Парийский Юрий 112 151 231
 Паули Вольфганг (Wolfgang Pauli) 99
 Пензиас Арно (Arno Penzias) 47 48 49
 Пенроуз Роджер (Penrose Roger) 178
 Перлмуттер Сол (Perlmutter Saul) 141
 Пиблс Джим (Jim Peebles) 113 186
 Поппер Карл (Popper Karl) 139
 Пуанкаре Анри (Henri Poincare) 73
 Рис Адам (Reiss Adam) 141
 Рубаков Валерий 99 204 227 228 237 262 272 274 279 299
 Сажин Михаил 204
 Сафронова Валентина 67
 Сахаров Андрей 102 116 183 184 186 188 271
 Скулачёв Дмитрий 112
 Слайфер Весто (Vesto Slipher) 27 30
 Смут Джорж (George Smoot) 112
 Старобинский Алексей 118 120 125 126 206 221 224 234 271 280 289
 299
 Стейнхардт Пол (Steinhardt Paul) 135 232 276
 Струков Игорь 112
 Сэндэйдж Алан (Allan Sandage) 231
 Сюняев Рашид 186 187
 Тали Брэнд (Brand Tali) 113
 Тамман Густав (Gustav Tamman) 231
 Тинсли Беатрис (Tinsley Beatrice) 114 141
 Ткачёв Игорь 133 250 273 299
 Уилер Джон (John Wheeler) 93

Фаулер Уильям (William Fowler) 44 46
Фейнман Ричард (Richard Feynman) 88
Фок Владимир 120
Фридман Александр 26 27
Хаббл Эдвин (Edwin Hubble) 26 27 28 30 31 45 130
Халатников Исаак 285
Хиггс Питер (Peter Higgs) 65
Хойл Фред (Fred Hoyle) 30 43 44 45 46 241
Хокинг Стивен (Steven Hawking) 112 178 224 274 275
Хруам Мзень 104 106 109 174 175 176
Хурум Браз 169 170
Черчилль Уинстон (Winston Churchill) 279
Чибисов Геннадий 126 159 194 225 233 235 270 272
Шапошников Михаил 100 280
Шмаонов Тигран 48
Эйнштейн Альберт (Albert Einstein) 26 74 82 120 278
Энглер Франсуа (Francois Englert) 65
Юй Цзе-Тай (Yu Jie-Tai) 186

Борис Е. Штерн

Прорыв за край мира

О космологии землян и европейцев

В оформлении обложки использованы
фото из «Википедии» и с сайта NASA
Автор заставок — Владимир Овчинников

АНО «Троицкий вариант»

Издательство «Тровант»

ЛР 071961 от 01.09.99

142191, г. Москва, г. Троицк, м-н «В», д. 52;

телефоны: (495) 775-43-35, (495) 851-09-67

e-mail: info@trvscience.ru, интернет-сайт: trv-science.ru

Подписано в печать 15.06.14.

Формат 60х90/16. Печ. л. 19.

Гарнитура Margarita. Печать офсетная. Бумага офсетная.

Тираж 3 000 экз.

Заказ № 0465/14.

Отпечатано с готовых файлов заказчика

в ООО "ИПК Парето-Принт",

г. Тверь, www.pareto-print.ru