

ISSN 0032-874X

ПРИРОДА

7-89



ГОРЯЧИЕ ТОЧКИ КОСМОЛОГИИ

В июне прошлого года в Ленинграде проходила Международная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Александра Александровича Фридмана [1888—1925]. В конференции приняли участие около 250 советских и зарубежных специалистов в области космологии, теории относительности, астрофизики, физики элементарных частиц, а также механики и метеорологии.

Хотя спектр обсуждаемых вопросов был очень широк, но, конечно, на первом плане была космология, ведь именно с ней прежде всего связано имя Фридмана. Созданная им теория расширяющейся Вселенной не сразу получила всеобщее признание, путь к нему был нелегок. Даже и теперь, спустя 67 лет с момента ее создания, делаются попытки оспорить некоторые ее положения, а иногда и вообще объявить ее несостоятельной.

А что думают об этом специалисты-космологи? Каков современный статус фридмановской космологии, как формулируются ее наиболее актуальные проблемы? С этими и другими вопросами наш корреспондент Н. Д. Морозова обратилась к крупнейшим специалистам из разных стран мира.

3 АЧЕМ, по вашему мнению, нужна космология и почему вы посвятили себя именно этой науке!

Р. Рурфини. Космология, по моему глубокому убеждению, необходима каждому. В конце концов, мы живем только раз (правда, некоторые думают, что будут жить и после смерти, но лично я в этом сомневаюсь). Поэтому так важно понять наше место в жизни, нашу роль на этой планете, и, конечно, это очень трудно сделать. Возможно, гораздо проще ответить, как устроена Вселенная, описать ее объекты, их движение, понять механизмы, ими управляющие.

Более того, я считаю, что не две сотни специалистов, а все население планеты должно интересоваться этими вопросами. Просто удивительно, что космологией занимается так мало людей из 5 млрд жителей Земли!

Заниматься космологией в некотором смысле роскошь, но думаю, это необходимо, поскольку отличает человеческое существо, выделяет его во Вселенной прежде всего стремление понять окружающий его мир. Космология более, чем что-то другое, должна удовлетворять любопытство человека. Во всяком случае, больше, чем политика. Конечно, медицина тоже необходима для нашего существования, однако космология очень важна для цивилизации вообще,

поэтому должна, как минимум, развиваться на том же уровне. В конце концов, мы обеспечим наше выживание экономически и технически, но может возникнуть вопрос, в чем смысл всего этого. (Безусловно, это субъективная точка зрения.)

С другой стороны, это не только философский вопрос. Ведь понимание того, как мала наша планета, как хрупка по сравнению с другими объектами Вселенной, важно для перспектив человеческого существования. Если человек не поймет, как уникальна Земля с ее природой, он не будет заботиться о ее сохранении, а ведь только это гарантирует нам жизнь! Тем самым космология приводит нас к пониманию не только Вселенной, но и нашей уникальности и даже возможного одиночества в ней.

Х. Сато. Зачем людям космология? Это очень сложный вопрос, потому что в конечном итоге он связан с исследованием самого общества. Ведь космология содержит наиболее фундаментальные представления о природе, которые иногда влияют и на идеи, которыми живет общество. Мы должны заботиться о том, чтобы такого рода идеи, связанные с самой природой, всегда существовали и развивались, иначе наше общество будет загнивать.

Что же касается того, почему я стал



Ремо Руффини, заведующий кафедрой теоретической физики Римского университета (Италия).



Хумитака Сато, профессор Университета Киото (Япония).



Майкл Тернер, профессор Чикагского университета; работает также в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (США).

заниматься космологией, то ответ прост — из любопытства. Конечно, я должен зарабатывать на жизнь и заботиться о семье. Но я рад, что та область науки, которая удовлетворяет мое любопытство, одновременно и «кормит» меня.

М. Тернер. Откуда мы пришли, куда идем? Это фундаментальнейшие вопросы, которые, я думаю, должны интересовать всех. Мои же научные интересы давно связаны с космологией, конкретно — с ранними фазами существования Вселенной. Сейчас мы можем рассуждать о самых ранних стадиях ее эволюции. Мы понимаем, как устроена Вселенная до времен 10^{-2} с после Большого взрыва, и имеем теоретический аппарат, который позволяет судить о том, что было еще раньше. Может показаться, что вопрос этот чисто академический. Но на самом деле это не так: существуют глубокие вопросы фридмановской Вселенной, на которые пока нет ответов. Однако мы знаем, что ответы на них заключены в событиях, происходивших через доли секунды после Большого взрыва.

М. Демьянский. На ранних стадиях развития Вселенной, когда пространственные размеры были очень малыми, взаимодействие между элементарными частицами происходило при сверхвысоких энергиях. И то, как протекали эти процессы тогда, можно наблюдать сейчас на больших масштабах. Напомню, что до конца 60-х годов главным источником информации об элементарных частицах были ускорители. А сейчас эту роль выполняет Вселенная. На Земле невозможно построить ускорители, которые бы позволили получить

энергии, характерные для ранних фаз эволюции, не хватает нескольких порядков. В этом смысле космология вне конкуренции: Вселенная становится лабораторией, в которой физики проверяют свои идеи.

М. А. Марков. Я долгие годы занимался, да и сейчас продолжаю заниматься, физикой элементарных частиц. Как уже отмечалось, проблемы строения материи, и в частности элементарных частиц, тесно переплетаются с проблемами начальной стадии эволюции Вселенной. В результате мой интерес к элементарным частицам и привел меня в космологию.

Вот лишь один пример такой связи. В замкнутой Вселенной вся энергия частиц компенсируется гравитационным дефектом массы, так что полная энергия и масса такой системы равны нулю. Пусть случайно дефект массы оказался меньше, чем полная масса частиц, тогда Вселенная в целом имела бы массу, отличную от нуля. Масса эта должна быть очень малой и, в принципе, может соответствовать массе элементарной частицы. Тогда для внешнего наблюдателя Вселенная предстала бы как элементарная частица, а для внутреннего — бесконечным миром с галактиками, звездами и цивилизациями. Метрика этого мира была бы фридмановской, поэтому я в свое время назвал такую систему фридмоном.

«Даже гений Эйнштейна был зачарован идеей стационарной Вселенной. Потребовалась огромная смелость для математического исследования эволюционирующей и расширяющейся Вселенной, что впервые было сделано А. А. Фридманом», — писал на стра-



Мареk Демьянский, профессор Варшавского университета (Польская Народная Республика).



Моисей Александрович Марков, академик, заведующий лабораторией Института ядерных исследований АН СССР.



Андрей Дмитриевич Сахаров, академик, член Президиума АН СССР, главный научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР.

ницах «Природы» Я. Б. Зельдович¹. А как вы оцениваете значение работ Фридмана, что они дали космологии?

А. Д. Сахаров. Если в XIX в. человек понял, что жизнь на Земле эволюционирует, то в XX в. он осознал, что вся наша Вселенная представляет собой нечто изменяющееся, развивающееся. И тот, кто стоял у истоков этой идеи, был необыкновенным человеком.

Фридмановская концепция нестационарной Вселенной имеет огромное научное и общеполитическое значение. Среди проблем, сама постановка которых была невозможна в дофридмановский период, — барионная асимметрия Вселенной. Почему в наблюдаемой части Вселенной есть барионы и нет антибарионов? Чем определяется количественная величина барионной асимметрии? Мы ищем ответы на эти и другие вопросы мироздания.

М. А. Марков. Я бы сказал, что до Фридмана Вселенная Ньютона и Эйнштейна была безжизненным манекеном. Фридман вдохнул в нее жизнь — Вселенная ожила, у нее появилась история. И в этом он подобен Пигмалиону, «оживившему» статую Галатеи.

По существу, до Фридмана Вселенная была мертвой системой без внутреннего развития. Фридман открыл, что Вселенная расширяется, т. е. что у нее было начало и, следовательно, может быть конец; именно в этом смысле у нее появилась история. Конечно, при этом возникло много проблем: нужно было объяснить ее рождение, проис-

хождение элементов в ней, образование галактик, звезд, всей глобальной структуры.

М. Демьянский. Огромная заслуга Фридмана в том, что исключительно из математических уравнений он предсказал, что Вселенная должна изменяться во времени. Это был действительно огромный шаг вперед, так как до него некоторые исследователи хоть и задумывались над этим вопросом, но на них воздействовали, я бы сказал, философские ограничения, или стереотипы мышления.

Например, Ньютон, создавший теорию всемирного тяготения, в своих вычислениях уже имел возможность показать, что Вселенная должна расширяться. И тем не менее стереотип сработал. Даже Эйнштейн — столь независимый ум — все-таки не смог преодолеть этот стереотип. И только Фридман оказался способен сделать это. Но хочу подчеркнуть, что во времена Фридмана идея расширения Вселенной была хоть и гениальной, но гипотезой. А подтверждением ее стало открытие Хабблом разбегания галактик.

М. Тернер. Я очень высокого мнения о работах Фридмана. Они оказали глубочайшее влияние на науку в начале этого века. Хочу подчеркнуть, что мы до сих пор имеем дело с моделями, которые были созданы более 60 лет назад.

Во время конференции я узнал, что в СССР недавно вышла книга о Фридмане². С удовольствием и интересом прочту о нем.

¹ Зельдович Я. Б. Современная космология // Природа. 1983. № 9. С. 12.

² Тропп Э. А., Френкель В. Я., Чернин А. Д. Александр Александрович Фридман. Жизнь и творчество. М., 1988.



Игорь Дмитриевич Новиков, доктор физико-математических наук, заведующий сектором Института космических исследований АН СССР.



Стенли Дезер, профессор Гарвардского университета (США).



Брэндон Картер, профессор Парижской обсерватории (Медон, Франция).

И. Д. Новиков. Открытие Фридманом нестационарных моделей Вселенной положило начало длительному развитию современной теоретической космологии на основе общей теории относительности (ОТО). В наши дни особенно бурно развиваются разделы космологии, пытающиеся понять загадку начала расширения Вселенной. Становится все очевиднее роль квантовых эффектов в рождении Вселенной. В этом начальном состоянии свойства пространства и времени могли кардинально отличаться от наблюдаемых в окружающем нас мире, скажем, число измерений и топология.

С. Дезер. Я не так много занимался космологией, гораздо больше времени посвятил ОТО, и мне бы хотелось отметить, что Фридман был одним из первых в мире, кто по-настоящему понял глубину, значимость ОТО.

Сознаюсь, до сих пор я очень мало знал о самом Фридмане. Несколько лет назад познакомился с краткой публикацией о нем в «Успехах физических наук», всего одна страница на английском языке (я не знаю русского). Там содержалось несколько интересных фактов, например сообщалось о его работах по теоретической метеорологии. Я совершенно не знаком с этой наукой, но моя дочь хорошо разбирается в ней, она-то и помогла мне.

Итак, если бы даже Фридман сделал только то, о чем сообщалось в этой маленькой заметке, этого было бы более чем достаточно, чтобы считать его великим ученым.

Б. Картер. Фридмановская формула из его первой работы, опубликованной в 1922 г.,

представляет собой формулу номер один. Когда вы начинаете преподавать космологию студентам, первое, что они должны понять,— это формулу Фридмана.

Что означает имя Фридмана для широкой публики на Западе?

Б. Картер. Я не думаю, что это имя знакомо широкой публике. (Но оно хорошо известно всем профессиональным космологам.) И дело, я думаю, в том, что профессиональные ученые не слишком большое внимание уделяют широкой публике. Ведь и другие великие ученые нашего века (исключение составил, возможно, только Эйнштейн) не очень известны. Быть может, в России публика лучше знакома с историей науки, яснее понимает ее значение.

Итак, Фридман «оживил» Вселенную, вдохнул в нее жизнь, или, как еще говорят, подобно Копернику, «заставившему» Землю обращаться вокруг Солнца, Фридман «заставил» Вселенную расширяться. С момента появления двух его основополагающих работ (1922—1924) прошло много лет. Какие открытия с тех пор в космологии, я имею в виду и теорию, и наблюдения, вы бы отнесли к наиболее важным, фундаментальным?

С. Хокинг. Открытие микроволнового реликтового излучения, предсказанного на основе фридмановской космологии.

Однозначно ответить на вопрос (о наиболее фундаментальном теоретическом результате.— Н. М.) трудно, но думаю, что это теорема о существовании сингулярности и, пожалуй, теория инфляции³.



Стивен Хокинг, профессор кафедры математики Кембриджского университета (Великобритания).



Андрей Дмитриевич Линде, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР.

М. Демьянский. Наверное, многие отметят, что, во-первых, это открытие Хабблом расширения Вселенной, и неудивительно, поскольку это действительно замечательное достижение.

А с точки зрения физических свойств Вселенной я бы выделил открытие микроволнового реликтового излучения. И здесь тоже сработал стереотип мышления наблюдателей. Ведь первым предсказал, что Вселенная должна быть горячей на ранней фазе, Гамов, ученик Фридмана. Он даже сделал оценку того температурного фона, который должен был дойти до нас. По его расчетам, эта температура составляла примерно 5 К.

С. Дезер. Я познакомился с Гамовым, когда он приехал в США. Тогда его работы не были замечены — мне кажется, они слишком опередили свое время. Но я считаю, что его теория Большого взрыва была абсолютно оригинальной.

М. Демьянский. Потом И. Д. Новиков и А. Г. Дорошкевич сделали очень важный шаг. Казалось, что этот реликтовый фон погружен в радиоизлучение галактики и звезд, т. е. почти невыделяем из них. Однако, подсчитав вид спектра, советские исследователи установили, что есть возможность наблюдать реликтовый фон, причем точно указали, в каком диапазоне длин волн. И опять этого никто всерьез не воспринял. Поэтому открытие фонового реликтового

излучения можно назвать в некотором роде случайностью.

Х. Сато. Я тоже считаю, что наиболее важными после Фридмана были работы Гамова. Я хочу остановиться на проблеме происхождения химических элементов на ранних стадиях Большого взрыва, сформулированной Гамовым. Мой учитель Хиосиро Хаяси внес важный вклад в решение этой проблемы после того, как Гамов предложил свою модель нуклеосинтеза. Это было в 1948 г. Дело в том, что в знаменитой работе Альфера, Бете и Гамова содержалась ошибка: рассматривая первичный состав вещества, они начинали свои расчеты с чистых нейтронов, т. е. предполагали, что вещество состоит из одних нейтронов. Именно эту ошибку и исправил Хаяси. Учителем Хаяси был профессор Юкава, он и обратил внимание Хаяси на работу Гамова.

А из наблюдательных результатов наиболее важными я считаю открытие Хабблом разбегания галактик, а также обнаружение Пензиасом и Вильсоном микроволнового реликтового излучения.

Р. Руффини. Наиболее выдающийся результат после Фридмана — понимание того, что Вселенная первоначально была очень горячей. Важным было открытие нуклеосинтеза во Вселенной. Но здесь я боюсь быть слишком субъективным. В этой работе, о чем многие сейчас уже забыли, участвовал Ферми, который впервые применил теорию ядерных реакций в космологии.

Обращаясь же к более близкому времени, я бы хотел сказать об исследованиях, проведенных тартуской группой под руко-

³ Лаконичность С. Хокинга станет понятной читателю, когда он познакомится с рецензией Я. А. Смородинского на его книгу в этом номере «Природы».

водством Эйнасто по изучению крупномасштабной структуры Вселенной. Если бы лет 10 назад вы спросили, является ли вся материя во Вселенной такой же, как и на Земле, т. е. протонами, нейтронами и электронами, многие, и среди них известные физики, ответили бы утвердительно. А сейчас — и мне кажется, это самый фундаментальный результат — ясно, что на долю обычной материи приходится не более 10 % вещества во Вселенной, поскольку остальные 90 % — это «темная», или невидимая, материя. Что она собой представляет? Возможно это, как говорит Игорь Новиков, разнообразные «ино» (фотино, глюино, гравитино и т. д.). Сейчас мы пытаемся, в основном теоретически, идентифицировать эти «ино», т. е. оценить, какие у них массы, спины и т. д.

Все эти экзотические «ино» предсказываются современными теориями элементарных частиц. Кроме того, эти теории предсказывают и несохранение барионного заряда, что очень важно для космологии. Насколько я знаю, Андрей Дмитриевич, ваша работа 1967 г. была первым шагом к решению проблемы барионной асимметрии Вселенной. А как обстоят дела сейчас?

А. Д. Сахаров. В настоящее время мы имеем скорее избыток различных сценариев происхождения барионной асимметрии. Все они обладают как определенными достоинствами, так и существенными недостатками. Выбрать какой-либо один в качестве предпочтительного мне не представляется сейчас возможным. По-видимому, это дело будущего. Но принципиальных трудностей здесь нет.

Все существующие схемы возникновения барионной асимметрии основываются на трех известных предпосылках: отсутствии закона сохранения барионного заряда, и следовательно, распад протона; отличие частиц от античастиц, проявляющееся в нарушении СР-инвариантности; нестационарность Вселенной. Если два последних положения не вызывают сомнения, то с нестабильностью протона дело обстоит сложнее. 20 лет назад единственным аргументом в пользу этой гипотезы был факт барионной асимметрии Вселенной. С тех пор появились теории Великого объединения, в которых несохранение барионного заряда возникает естественно. Однако экспериментально обнаружить распад протона пока не удалось.

Кажется, вопросов в космологии сейчас гораздо больше, чем ответов, которые она смогла пока дать. Но можно ли, тем не ме-

нее, выделить те узловые проблемы, горячие точки этой науки, которые необходимо изучать в первую очередь? Естественно, субъективизм в оценке здесь неизбежен.

С. Хокинг. Проблема космологической постоянной и вопрос о том, почему пространство-время четырехмерно.

М. А. Марков. Очень важен в космологии вопрос о существовании темной материи. В 1963 г. я опубликовал заметку о том, что если у нейтрино есть масса, то могут существовать нейтринные звезды, обладающие колоссальной плотностью. При массе нейтрино 30 эВ, данные группы ИТЭФ, этого достаточно, чтобы составить из них всю темную материю. Но, может быть, масса нейтрино меньше, как предполагают сейчас некоторые исследователи. В этом случае нам могут помочь другие экзотические частицы, например максимоны⁴, если они на самом деле существуют, ведь их вклад в скрытую материю может быть существенным.

Р. Руффини. Полагаю, я вправе сказать, что актуальны те проблемы, над которыми я работаю сейчас, иначе бы я занимался чем-нибудь иным. Меня интересуют проблемы скрытой массы во Вселенной, крупномасштабной структуры, которая, я думаю, описывается так называемым фрактальным законом, и, наконец, проблема устойчивости галактик. Удивительно, но еще лет 10 назад считалось, что задача об устойчивости системы, состоящей из большого числа гравитационно связанных тел, почти тривиальна. Сегодня ясно, что это далеко не так. Можно провести параллель с электромагнетизмом. В нем задача о движении одной заряженной частицы в электромагнитном поле решается просто. Но если заряженных частиц много, как в плазме, то возникают сложные, так называемые коллективные взаимодействия, и найти решение очень нелегко. То же можно сказать и о галактиках, состоящих из огромного числа взаимодействующих звезд. В них также возникают коллективные моды, типичным примером которых являются спиральные рукава. Думаю, это одна из наиболее интересных проблем, над которой сейчас работают специалисты.

М. Демьянский. Нерешенных вопросов в космологии много. Но прежде всего я бы от-

⁴ Максимоны — элементарные частицы большой массы, сравнимой с планковской ($\sim 10^{-5}$ г.); возможно, они представляют собой элементарные черные дыры. Понятие о максимоне впервые введено М. А. Марковым.

метил, быть может, не самый важный, но наиболее близкий к решению вопрос — проблему происхождения галактик. Несмотря на применимость современных физических теорий к изучению этой проблемы, как образовались галактики, пока еще до конца не ясно. Специалисты находятся, я бы сказал, в странном состоянии — ведь нет никаких тайн с точки зрения физики; казалось бы, все понятно, но связать совокупность данных в единую теорию не удается.

А к самым важным проблемам современной космологии я бы отнес проблему «начала» Вселенной.

Х. Сато. На мой взгляд, наиболее значимые проблемы космологии сейчас — инфляция и квантовое рождение Вселенной. Думаю, ситуация с теорией Великого объединения в настоящее время очень деликатна. Девять лет назад, когда эта теория создавалась для объединения всех сил в рамках единой теории, ситуация казалась более обнадеживающей. Сейчас на создание подобного объединения возлагается не так много надежд. Оно не получило пока конкретных экспериментальных подтверждений. Так, на установке «Камиока» не удалось наблюдать предсказанный этой теорией распад протона. Правда, с ее помощью был обнаружен нейтринный всплеск от сверхновой 1987А.

И все-таки я отношусь к теории инфляции и квантовому рождению Вселенной с некоторым скептицизмом, поскольку в лаборатории мы еще не обнаружили ни скалярных, ни хиггсовских частиц. Но пока у теории инфляции нет конкурентов, и, конечно, она должна интенсивно развиваться.

В чем суть теории инфляции? После пионерской работы Гуса она стала стремительно развиваться, и сейчас на нее возлагаются большие надежды. Как вы считаете: теория инфляции — это уход от Фридмана или логическое развитие его идей?

А. Д. Линде. В конце 70-х годов во фридмановской космологии назрела кризисная ситуация, когда, по мнению многих специалистов, существующая теория эволюции Вселенной стала несовместимой с теорией элементарных частиц.

Все началось в 1978 г., когда Зельдович и Хлопов показали, что, согласно единой теории слабых, сильных и электромагнитных взаимодействий, в горячей Вселенной Фридмана должно рождаться недопустимо много сверхтяжелых частиц — магнитных монополей. Попытки решить эту проблему в рамках стандартной космологической тео-

рии оказались безуспешными. При переходе к более сложным теориям элементарных частиц трудности не уменьшились, а, наоборот, увеличились, возникла, например, проблема реликтовых гравитино и ряд других.

Специалисты по теории элементарных частиц стали припоминать и другие неясные моменты фридмановской космологии и задавать вопросы, которые раньше казались почти метафизическими. Что было до начала расширения Вселенной? Почему Вселенная однородна и изотропна? Почему разные ее части, далеко удаленные друг от друга, так похожи, хотя формировались независимо?

Еще несколько лет назад казалось, что ответы на эти вопросы выходят за рамки целей и возможностей науки. Именно поэтому столь большой интерес вызвала предложенная в начале 80-х годов теория инфляционной, раздувающейся, Вселенной, в которой одновременно удалось и решить проблему монополей, и ответить на большую часть приведенных вопросов.

Общая черта различных вариантов инфляционной теории — существование стадии очень быстрого (экспоненциального) расширения Вселенной в вакуумоподобном состоянии с огромной плотностью энергии. Эта стадия и называется стадией инфляции. После нее вакуумоподобное состояние распадается, образующиеся при этом частицы взаимодействуют друг с другом, устанавливается термодинамическое равновесие, и лишь вслед за этим Вселенная начинает эволюционировать согласно стандартной теории горячей Вселенной Фридмана.

Роль вакуумоподобного состояния может взять на себя, например, достаточно однородное медленно меняющееся классическое скалярное поле. Поля такого типа часто используются для нарушения симметрии между различными типами взаимодействий в единых теориях элементарных частиц (так называемые поля Хиггса). Все проявления такого постоянного однородного скалярного поля выглядят одинаково как для движущегося, так и для покоящегося наблюдателя. В этом смысле однородное скалярное поле отличается от любой другой материальной среды и по сути является лишь несколько измененным вакуумным состоянием. Однако оно может обладать большой плотностью энергии, от величины которой зависит скорость расширения Вселенной.

В типичных моделях инфляции стадия раздувания продолжается всего 10^{-35} с, но за это время раздувающиеся области Вселенной успевают увеличить свой размер в 10^{10^5} — $10^{10^{10}}$ раз. (Точные цифры зависят от

выбора конкретной теории элементарных частиц и механизма, обеспечивающего раздувание.) Затем геометрия пространства внутри раздувающейся области Вселенной становится почти неотличимой от евклидовой геометрии плоского мира, так же как свойства поверхности воздушного шара по мере увеличения его объема все меньше отличаются от свойств плоскости.

Растяжение пространства выбрасывает монополи и другие неоднородности за пределы наблюдаемой области Вселенной размером 10^{28} см. Это одновременно решает и проблему однородности Вселенной, и проблему монополей. А поскольку вся наблюдаемая часть Вселенной образовалась за счет раздувания одной причинно-связанной области ничтожно малого размера, нет ничего удивительного, что свойства различных удаленных друг от друга областей видимого нами мира оказываются в среднем одинаковыми.

«Сглаживая» исходные неоднородности, раздувание одновременно приводит к генерации других неоднородностей из начальных квантовых флуктуаций. А они, в свою очередь, порождают неоднородности плотности, необходимые для последующего образования галактик. Кроме того, любая область раздувающейся Вселенной, содержащая достаточно большое скалярное поле, может постоянно порождать новые и новые раздувающиеся области с большим полем, и этот процесс продолжается бесконечно.

В таком сценарии эволюция Вселенной в целом не имеет единого конца и может не иметь единого начала, до которого пространства и времени вообще не существовало.

Таким образом, наши представления о ранних стадиях эволюции Вселенной и о ее свойствах в предельно больших масштабах могут кардинально измениться. Инфляционная теория предсказывает большое разнообразие глобальных структур Вселенной и в то же время объясняет, почему теория Фридмана правильно описывает структуру той ее части, которая доступна наблюдениям. Иначе говоря, исследования последних лет приводят не к опровержению фридмановской космологии, как опасались в конце 70-х годов, а к ее дальнейшему развитию и обобщению, подобно тому как это произошло с классической механикой при создании квантовой теории.

А. Д. Сахаров. Обращаясь к прошлому Вселенной, можем ли мы сказать с полной уверенностью, что вначале она была очень плотной, горячей? Если говорить о временах порядка 1 с после начала, то она, безусловно,

была очень горячей. Но если речь идет о времени 10^{-44} с, то тут мы пока еще ничего определенного не знаем. Возможно, в этот момент был абсолютный вакуум, абсолютная пустота, т. е., наоборот, было очень холодно. Однако не нужно забывать, что это не простая пустота со всеми ее свойствами изотропии и равной нулю температуры, а это — вакуум, обладающий энергией и отрицательным давлением.

Сейчас это лишь одна из тех веточек на нашем древе познания, которая, быть может, соответствует действительности, а возможно, мы должны «вырастить» совсем другие веточки, двигаясь назад во времени, и именно их оставить на древе. Идея красивая, но, к сожалению, природа не всегда стремится к такой элементарной красоте, иногда она находит еще более высокую красоту, о которой мы и не подозревали. Но в общем мне нравится идея начального вакуума.

Стандартные инфляционные модели предсказывают, что средняя плотность вещества во Вселенной должна с высокой степенью точности быть равна критической плотности (т. е. $\Omega=1$). Сейчас известно, что плотность видимой материи во много раз меньше критической. Поэтому, если $\Omega=1$, то основной вклад в массу Вселенной должна вносить темная (невидимая) материя. Каковы перспективы обнаружения этого темного вещества во Вселенной? Существуют ли вообще какие-либо эксперименты, которые могли бы подтвердить или, наоборот, опровергнуть инфляционную модель?

М. Тернер. Имеется «провокационная» идея, согласно которой большая часть темной материи состоит из экзотических частиц — фотино, аксионов, нейтрино с ненулевой массой покоя и т. д. Нужны эксперименты для проверки этой идеи.

В США уже создана установка для поиска аксионов. Это большой резонатор. Если через него проходит аксион, то с малой вероятностью он может превратиться в фотон с энергией 10^{-5} эВ. Иными словами, аксион возбудит СВЧ-колебания в резонаторе. Уже получены предварительные результаты, но пока чувствительность установки недостаточна.

Ведется еще один эксперимент — по поиску фотино. Для этого используется детектор общей массой около 10 кг, охлаждаемый до 10^{-3} К. Если фотино пройдет через детектор, то оставит в нем энергию порядка 1 кэВ (в эксперименте фиксируется всплеск температуры).

Кроме того, в горах Италии строится огромный детектор для поиска монополей, гораздо больше того зала, в котором проходит наша конференция.

Хочу напомнить, что в СССР выполнен эксперимент по определению массы покоя нейтрино. Это очень красивый и сложный эксперимент, и мне бы хотелось, чтобы его удалось повторить в других лабораториях. Есть указания, что масса покоя нейтрино около 10 эВ. Пока это предварительный результат. Сейчас над проблемой работают группы в Швеции и Японии. Но, повторяю, эксперимент очень сложен.

Еще одна проверка теории инфляции — непосредственное измерение средней кривизны пространства на расстояниях, превышающих расстояния между галактиками. Кроме того, нужно проводить подсчеты числа галактик N в зависимости от величины красного смещения Z , так как характер распределения $N(Z)$ зависит от кривизны пространства. Конечно, очень осложняют дело эволюционные эффекты. Поэтому сейчас астрофизики намечают перейти к ИК-частотам, где свечение галактик создается в основном старыми звездами и эволюционные эффекты менее значимы.

Итак, есть три неизбежных следствия простейшей версии инфляционной теории, которая, надо отметить, сейчас пышно расцветает:

полная плотность вещества во Вселенной равна критической ($\Omega=1$), т. е. Вселенная плоская;

имеют место адиабатические возмущения плотности, т. е. инфляционные модели предсказывают определенные спектры возмущения плотности, которые необходимы для образования галактик. В стандартной инфляционной модели — это адиабатические возмущения с плоским спектром, предложенным в свое время Зельдовичем, в котором характерная амплитуда возмущений одна и та же в разных масштабах;

и, наконец, при инфляционном раздувании должны рождаться гравитационные волны со специфическим нетепловым спектром — так называемое фоновое реликтовое гравитационное излучение. Мы уже знаем, что существует микроволновое реликтовое излучение, нейтринный фон; если верна инфляционная теория, мы должны зарегистрировать и гравитационный реликтовый фон.

Время идет очень медленно, и приходится долго ждать результатов экспериментов. Но те из них, которые будут ставиться в США по поиску темной материи, возможно, дадут результаты лет через десять. А может быть, и раньше.

Все космологические теории основаны на ОТО. Но ведь есть и другие теории гравитации. Какую космологию предсказывают они! Вообще, как вы относитесь к альтернативным теориям гравитации?

М. Тернер. Мы четко знаем, что на коротких расстояниях и малых временах ОТО должна быть заменена квантовой теорией гравитации. Однако на классическом уровне я не вижу ничего, что могло бы сравниться со стандартной ОТО. Классический уровень соответствует временам, превышающим 10^{-43} с. И насколько мы понимаем космологию, и в частности теорию инфляции (правда, возможно, мы ее неверно понимаем), инфляция имеет место при временах, больших 10^{-43} с. Поэтому классическая гравитация адекватна для описания всей истории Вселенной, начиная с инфляции.

С. Хокинг. ОТО — единственная приемлемая теория гравитации, по крайней мере, при энергиях вплоть до планковских.

С. Дезер. Моя позиция в этом вопросе такова — нет состоятельных альтернативных теорий. ОТО — единственная самосогласованная теория из предложенных до сих пор. Я очень рад, что на эту тему у вас были написаны статьи такими учеными, как Фаддеев, Зельдович и Гришук.

М. Демьянский. Мне кажется, ответ на этот вопрос касается внутренних взглядов исследователя. Я бы привел такую аналогию: смотря на одну картину, люди по-разному воспринимают ее. То же я бы отнес и к альтернативным теориям. Мой взгляд таков — я руководствуюсь принципом ограничения: пока нет наблюдательных фактов и экспериментальных данных, которые бы противоречили ОТО, не имеет смысла всерьез рассматривать отклонения от нее, поскольку никто еще не наблюдал их. А в теоретическом плане, если отказаться от общего фундамента ОТО, возможностей так много, что непонятно, в какую сторону идти. Тем более, применительно к столь сложной системе, как Вселенная. Прежде всего мы должны исследовать все возможности описания Вселенной в рамках ОТО, и если окажется, что этого недостаточно, следует подумать о какой-то альтернативной теории. Но я считаю, что пока такое время не настало.

Р. Руффини Я работал с очень умным человеком, это был Иордан. Он предложил альтернативную теорию, за которой последовала теория Дикке. Его мнение состояло в

том, что обе эти теории еще больше подчеркнули красоту теории Эйнштейна.

Мне тоже кажется, что альтернативные теории помогают понять, насколько хороша стандартная теория Эйнштейна. Вообще же нужно дождаться решения проблемы ее квантования, но, думаю, сейчас нет особых оснований отказываться от этой теории.

Поскольку речь зашла о соответствии существующих теорий той совокупности наблюдаемых данных о Вселенной, которую мы имеем на сегодня, мой следующий вопрос — профессору Картеру. Вы один из авторов антропного принципа⁵. Не может ли он помочь выбрать «хорошую» теорию!

Б. Картер. Действительно, в свое время я ввел этот термин, который с тех пор стал даже более популярен, чем я мог себе представить. Однако сейчас он далеко вышел за рамки того первоначального значения, которое я ему придавал. Его используют в различных формулировках, не со всеми из которых я могу согласиться.

Поэтому я хочу прокомментировать антропный принцип в его первоначальном, более ограниченном смысле. На мой взгляд, антропный принцип особенно важен как принцип отбора различных физических теорий. Согласно ему, мы не должны а priori отвергать теории, в которых условия возникновения Вселенной, подобной нашей, маловероятны. Потому что есть такие Вселенные, пусть и в небольшом количестве, в которых жизнь все-таки возможна. И мы живем в такой Вселенной постольку, поскольку в другой Вселенной жизнь невозможна и некому задавать подобные вопросы.

В данном случае антропный принцип накладывает ограничения на константы в современных теориях элементарных частиц. Не исключено, что он также будет полезен в оценке «жизнеспособности» тех теорий, согласно которым могли рождаться отличающиеся по своим свойствам Вселенные; я имею в виду, в частности, работы Линде и других.

Хочу подчеркнуть, что следует быть особенно осторожным, когда решается, какая теория является «хорошей». Ведь иначе исторически, в первую очередь, на основе критерия правдоподобия следовало бы отвергнуть теорию Большого взрыва (что, кстати, и сделал Дирак), поскольку для ее реализации потребовалось совпадение боль-

ших чисел⁶. Например, числа протонов внутри видимой Вселенной (10^{80} , с квадратом отношения констант электромагнитного и гравитационного взаимодействия, оно равно 10^{40}). Проще всего было бы объяснить это совпадение, отвергнув стандартную эйнштейновскую теорию и заменив ее теорией с переменной гравитационной постоянной.

Согласно антропному принципу в моей формулировке, это число, 10^{80} , связано с конкретным моментом времени, не случайным, а характеризующим стадию звездной эволюции, итогом которой, можно сказать, стало возникновение жизни. Так что, скорее уж это число, 10^{80} , необходимо, чтобы возникла жизнь.

Вот вам пример того, как на основе даже столь удивительных совпадений больших чисел все же не стоит отвергать стандартные теории. И в этом, на мой взгляд, основное современное значение антропного принципа.

С. Хокинг. И все-таки, если бы фундаментальные физические константы чуть-чуть отличались, Вселенная была бы совершенно другой. Я не могу поверить, что она создана в конечном счете для возникновения и воспроизводства «обезьян» на маленькой планете у средней заурядной звезды.

Как вы считаете, сегодня «устройство» Вселенной нам понятнее, чем во времена Фридмана, иными словами, количество оставшихся без ответа вопросов уменьшилось или увеличилось?

С. Хокинг. Конечно, со времен Фридмана мы узнали очень много, но сегодня мы понимаем, как много на самом деле нам непонятно.

Х. Сато. Число нерешенных проблем увеличивается и будет продолжать увеличиваться, пока мы будем изучать Вселенную. Я не думаю, что все проблемы найдут решение в будущем.

Р. Руффини. Эйнштейн говорил, что наиболее непостижимая особенность Вселенной — это то, что она постижима. Тот факт, что человек что-то узнает о Вселенной, делает его гораздо могущественнее. Это один из наиболее привлекательных аспектов в жизни современного общества. Кроме того, сегодня на Земле живет больше математиков и физиков, чем за всю историю человечества, это также вселяет оптимизм.

⁵ Подробнее см.: Казютинский В. В., Балашов Ю. В. Антропный принцип: история и современность // Природа. 1989. № 1. С. 23—32.

⁶ Там же. С. 26—27.

М. Демьянский. На этот вопрос трудно ответить однозначно. В некотором смысле глобальная картина эволюции Вселенной понятна: взрыв—расширение—образование элементов—отделение излучения от вещества—появление галактик, звезд и т. д. В таком общем сценарии уже почти никто не сомневается. Но в деталях его последней фазы (образования галактик, крупномасштабной структуры) много неясного. Кроме того, я уже говорил, что нет законченной теории «начала», имеются только различные гипотезы.

Не в связи ли с этим вы стали заниматься «многомерием»? Можно ли на «пальцах» объяснить, как проявляются «многомерные» эффекты?

М. Демьянский. Это сложно, потому что все наблюдения и лабораторные эксперименты практически не зависят от того, существуют ли добавочные измерения. Единственную возможность зафиксировать связь между дополнительными измерениями и наблюдаемыми эффектами дает космология.

Попытаюсь объяснить, в чем суть «многомерия». Эта идея возникла в теории элементарных частиц. Оказалось, чтобы простым способом описать взаимодействие элементарных частиц, построить теорию элементарных частиц как геометрическую (наподобие ОТО), удобно ввести многомерное пространство. К этому можно относиться по-разному. Либо считать это математической картиной, удобным способом описания, либо попытаться придать многомерному пространству физический смысл. Во втором подходе необходимо, правда, пояснить, почему в нашем 4-мерном пространстве-времени мы не наблюдаем дополнительных измерений. Единственное объяснение на сегодня — размеры мира вдоль дополнительных координат столь малы, что мы их практически не чувствуем, они ненаблюдаемы с помощью частиц и энергий, которыми мы располагаем. Но на ранних стадиях развития Вселенной существовало полное «равноправие» между всеми степенями свободы, т. е. между измерениями, которые мы наблюдаем теперь, и добавочными пространственными координатами.

И о каком же числе измерений идет речь?

М. Демьянский. В теории элементарных частиц их может быть, например, 9 или 11,

существуют разные варианты теорий. Но это не принципиальное различие, гораздо важнее, как они «свертываются», как сжимается пространство вдоль добавочных измерений, и как это может проявиться в наблюдениях.

На мой взгляд, единственный способ уловить их — следить за фоном гравитационных волн. Сам этот фон пока недоступен для наблюдений, но если он существует, то должен проявиться в анизотропии микроволнового реликтового излучения. Какова амплитуда этой анизотропии? Пока, к сожалению, есть только верхние оценки этой величины: $\Delta T/T \leq 2 \cdot 10^{-5}$. Главное сейчас — наблюдения, повышение чувствительности измерений этой анизотропии.

Надо сказать, что оценки величины ожидаемого эффекта зависят от многих параметров, часть из которых мы пока не знаем. Поэтому делается попытка решить обратную задачу: из отсутствия видимой анизотропии реликтового излучения получить ограничения на гравитационный фон.

Но если анизотропию обнаружат, станет ли это тем самым критическим экспериментом, т. е. докажем ли мы, что наш мир многомерен?

М. Демьянский. К сожалению, все не так просто. Существует много источников анизотропии, и их трудно различать. Необходима полная информация не только об амплитуде, но и о спектре искажений реликтового микроволнового излучения. Не говоря уж о том, что надо знать конкретную величину $\Delta T/T$, а не ее верхний предел.

Я же хочу обратить внимание на уникальность информации, которую можно получить с помощью гравитационных волн. Ведь «свертывание» дополнительных измерений на ранних фазах эволюции Вселенной не прямо связано с анизотропией реликтового фона. Вначале испускались космологические гравитационные волны, а уж потом — реликтовое излучение. Более того, фоновые гравитационные волны приносят информацию об этих событиях неискаженной, поскольку очень слабо взаимодействуют с веществом, в отличие от электромагнитного излучения, которое на своем пути из прошлого сильно «перерабатывается» веществом. Поэтому, если удастся обнаружить фон гравитационных волн, — это будет огромным шагом вперед на пути понимания ранних стадий эволюции Вселенной.

Планируются ли сейчас какие-либо эксперименты в этой области?

М. Демьянский. Уже ведется космический эксперимент «Реликт» (в Институте космических исследований АН СССР), одна из задач которого — определение анизотропии реликтового излучения. В готовящемся там же проекте «Радиоастрон» будет предпринята попытка обнаружить фоновые гравитационные волны. На основе двух радиоантенн (одна на Земле, другая в космосе) будет создан суперрадиоинтерферометр со сверхдлинной базой, обладающий огромной чувствительностью. С его помощью исследователи надеются обнаружить гравитационные волны, которые могут влиять на фазу волны, проходящей на интерферометр. По искаженному фронту волны можно получить по крайней мере верхнее ограничение на величину плотности космологических гравитационных волн.

Существуют также аналогичные американские проекты «Аэлита» и «Коби».

Можно сказать, что в наши дни центр тяжести космологических исследований переместился к проблеме «начала», когда, по выражению Фрийдмана, «пространство было точкой», а время существования Вселенной не превышало 10^{-43} с. Чтобы понять, что происходило тогда во Вселенной, необходимы новые теории. Попытки их построения сейчас предпринимаются. Например, Вселенную рассматривают как некоторый квантовый объект, в котором на самом раннем этапе пространство и время не существовали. Вселенные могли рождаться «из ничего»⁷, и для этого не требовалось никаких усилий. Более того, наша Вселенная может быть лишь одной из многих. Что вы об этом думаете!

М. А. Марков. Сейчас считается, что в ранней Вселенной не было разнообразия материи. Вселенная возникла из вакуума, т. е. материя в начальной фазе существования Вселенной напоминала, как мне кажется, материю древнегреческого философа Анаксагора, определившего ее так: «Эта форма первичной материи лишена какой-нибудь способности движения. До начала космообразования бесконечно малая частица этой среды первоначально находилась каждая на своем месте, не изменяясь и не перемещаясь, ибо не было ничего, что бы побуждало их изменяться и перемещаться»⁸.

Когда, например, сейчас речь идет об

инфляционной Вселенной, то предполагают, что вся материя возникла в результате распада некоторой (ее называют иногда вакуумной) формы материи. Она лишена всякой структуры, какого-либо движения и в этом смысле близка, на мой взгляд, к материи Анаксагора. Я считаю, что материя произошла из распада этой праматерии и, если Вселенная замкнута, то при ее последующем сжатии все формы материи должны вернуться в исходное, первичное состояние. Как это может произойти и как избежать возникновения сингулярности при коллапсе Вселенной, т. е. состояния, в котором физические величины (плотность материи, кривизна пространства и т. д.) обращаются в бесконечность?

Я предположил, что плотность материи не может бесконечно расти, она имеет предельную величину — как скорость не может быть больше скорости света. Эту предельную (планковскую) плотность можно составить из универсальных констант: скорости света, гравитационной постоянной и постоянной Планка; ее значение равно 10^{93} г/см³.

Казалось бы, дальше все просто — Вселенная коллапсирует, плотность достигает предельного значения, и что-то должно произойти, возможно, снова начнется расширение. Правда, и тогда возникают сложности, связанные с гравитационным полем, поскольку из ограничений на плотность вещества в общем случае (при учете малой анизотропии Вселенной) еще не следует ограничения на кривизну. Вообще говоря, Вселенная и в случае существования предельной плотности может быть сингулярной, т. е. в некоторый момент времени кривизна в ней формально может быть бесконечной.

Думаю, существует несколько выходов из подобной ситуации. Например, можно предположить, что энергия, заключенная в гравитационных волнах, при коллапсе полностью «перекачивается» в энергию обычного вещества за счет рождения максимонов. При этом из ограничений на плотность могут следовать и ограничения на кривизну.

А можно с самого начала сформулировать более общее утверждение — конечно не плотность, а кривизна. Тогда ограничения на плотность получаются автоматически. Далее, надо как-то затормозить коллапс. Все современные теории ранней Вселенной основаны на том, что в начале расширения пространство было пространством де Ситтера. Для вакуумного состояния вещества в таком пространстве характерна

⁷ См., напр.: Зельдович Я. Б. Возможно ли образование Вселенной «из ничего»? // Природа. 1988. № 1. С. 16—26.

⁸ Цит. по: Рожанский И. Д. Анаксагор. М., 1983. С. 29.

антигравитация. Это связано с тем, что в ОТО «весит» не только плотность энергии E , но и давление p . В уравнение для гравитационной силы в сферически симметричном случае эти величины входят в комбинации $E+3p$. Для обычного вещества $0 < p < E$ и величина $E+3p$ положительна, т. е. гравитация является притягивающей, в то время как для вакуумного состояния $p = -E$ и $E+3p = -2E < 0$ при $E > 0$, т. е. гравитация отталкивает (это и есть антигравитация). Поэтому вакуумное состояние вещества может затормозить коллапс. В этом случае фридмановский мир при сжатии переходит в мир де Ситтера.

Но что же будет со Вселенной дальше? По моей гипотезе, замедлившись, а затем и остановившись, она опять начнет расширяться, и, таким образом, опять образуется Вселенная Фридмана. В некотором смысле коллапс Вселенной подобен коллапсу черной дыры. Что произойдет при коллапсе черной дыры (если справедливы выдвинутые гипотезы о предельной кривизне и вакуумном уравнении состояния при экстремальной кривизне пространства-времени)? Мы исследовали этот вопрос в нашей совместной с Мухановым и Фроловым работе. Оказывается, в центре черной дыры сингулярность не образуется, метрику черной дыры можно «сшить» с метрикой де Ситтера. А, распадаясь, это пространство де Ситтера может породить другую фридмановскую Вселенную, которая лежит в абсолютном будущем по отношению к нашему миру. Следовательно, в этом случае черные дыры служат источником новых замкнутых и полужамкнутых миров, которые образуются при коллапсе «внутри» черной дыры. Не исключено, хотя и маловероятно, что распад мира де Ситтера, возникшего при коллапсе вещества в нашей Вселенной, приведет к рождению «белой дыры» (т. е. выбросу вещества) в другой Вселенной.

Когда-то Амбарцумян предположил, что в центрах галактик имеются источники огромных энергий. Что они собой представляют? По давней гипотезе Новикова, а затем Неемана, наша Вселенная расширяется неравномерно — некоторые области на какое-то время задержались с расширением. Но оставалось неясным, в чем причина такой задержки. Если же предположить, что имеет место «просачивание» из другой Вселенной, тогда понятно, откуда источники огромных энергий в центрах галактик.

Но пока все это гипотезы. Согласно им, наша Вселенная может все время пополняться, т. е. возникают совершенно новые представления об ее эволюции. Кроме того,

по-новому ставится вопрос о множественности Вселенных, потому что каждая черная дыра при коллапсе может дать новую Вселенную, замкнутую или связанную с нашей узкой горловиной.

И. Д. Новиков. Уже первая космологическая модель Эйнштейна предполагала, что трехмерное пространство Вселенной замкнуто подобно сфере и отличается от бесконечного пространства Ньютона. Замкнутые трехмерные пространства рассматривались и в моделях Фридмана.

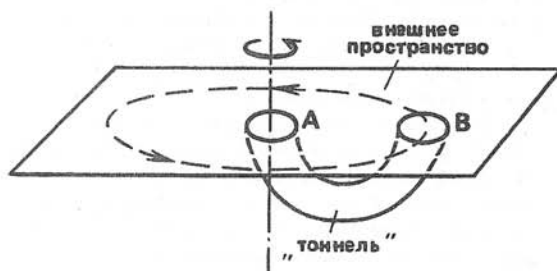
Когда такие пространства появились в теории, они казались очень необычными. Но сегодня физики к ним привыкли, такие теории уже не кажутся ни парадоксальными, ни экзотическими, и не исключено, что пространство нашей Вселенной именно такое. Поэтому вполне логично вслед за рассмотрением моделей Вселенных, в которых замкнуты пространственные направления (т. е. кратчайшая линия, соединяющая данную точку с какой-то другой и продолжаемая все дальше и дальше, обойдя мир, возвращается к исходной точке), рассмотреть мир, в котором замкнуто время. «Линии времени» в таком мире, продолжаемые в будущее, оказываются изгибающимися, возвращающимися в прошлое, замыкающимися на самих себя.

По-видимому, одной из первых моделей такого рода была модель Геделя, предложенная в 1949 г.: в ней расстояние между галактиками не меняется (т. е. Вселенная не расширяется). Тогда она рассматривалась как математический курьез, так как, во-первых, не согласовывалась с данными наблюдений о движении галактик, а, во-вторых, некоторые «линии времени» в ней оказались замкнутыми. Это означало, что частица, двигаясь вдоль такой линии, может вернуться в собственное прошлое. Иными словами, в таком мире невозможно отделить будущее от прошлого, что казалось физическим абсурдом.

С тех пор отсутствие замкнутых линий времени считалось обязательным свойством «добропорядочных» моделей пространства-времени. Это свойство как «очевидное» предположение часто использовалось в теоретических работах при доказательстве важных (и очень сложных) теорем о пространстве-времени внутри черных дыр. Но вот совсем недавно вопрос о возможности путешествий в собственное прошлое был поставлен вновь.

Профессор Калифорнийского технологического института Торн с сотрудниками, а затем я предложили два варианта такой

«машины времени», или, по образному выражению Торна, «кротовой дыры» в пространстве, которая позволяет путешествовать в прошлое. Оба варианта предполагают создание сначала сложной топологии трехмерного пространства. В этой конструкции есть два отверстия в пространстве, созданных сильнейшим полем тяготения коллапсирующего



вещества; отверстия соединены искривленным «тоннелем» — другим проходом из одного отверстия к другому, помимо обычного пути во внешнем пространстве. «Тоннель» можно сделать очень коротким по сравнению с расстоянием между отверстиями во внешнем пространстве. (Все это нелегко вообразить, так как мы не привыкли наглядно представлять искривленное трехмерное пространство.)

Чтобы превратить эту конструкцию в «машину времени», надо заставить одно из отверстий быстро двигаться по отношению к другому, например в предложенном мной варианте отверстие В быстро вращать относительно А. Тогда, с точки зрения путешественника во внешнем пространстве, как следует из специальной теории относительности, часы в В отстанут от часов в А; скажем, по часам А пройдет 5 лет, а по часам В — всего 5 дней. Но если смотреть из отверстия В на отверстие А через короткий «тоннель», то, поскольку часы А будут находиться все время рядом с В, их показания почти не будут отличаться.

Пусть теперь путешественник движется от А к В во внешнем пространстве. Он быстро достигнет В (часы там показывают в этот момент 5 дней); заглянув в это отверстие, он видит часы А, которые тоже показывают 5 дней (ведь это «тоннель»). Путешественник быстро перемещается по короткому «тоннелю» и выходит из отверстия А практически в тот же момент времени, т. е. когда часы А показывают 5 дней. Теперь вспомним, что стартовал он, когда на часах А было 5 лет, а вернулся, когда они показывают 5 дней, т. е. попал в прошлое. Обратный переход приведет его в будущее.

Таковы предсказания теории. Надо специально подчеркнуть, что до какой-либо экспериментальной проверки еще очень далеко. Все сказанное — чистая теория. Да и в теории еще совсем не все ясно; сама возможность создания такой «машины времени» будет проверяться и перепроверяться.

Но разве при этом не нарушаются причинно-следственные связи?

И. Д. Новиков. Действительно, возникают вопросы, кажущиеся парадоксальными. Например, в таких замкнутых «петлях времени» вообще нельзя делить события на прошлые и будущие, как нельзя в непрерывной веренице людей, движущихся по кругу, определить, кто идет впереди, а кто сзади; можно только уточнить, кто за кем следует. Так и в «петле времени» нет глобального прошлого и будущего, все события влияют друг на друга. Поэтому совсем по-иному выглядят причинные связи. Возможность получать информацию из будущего, связанная с необычной топологией пространства-времени, способна изменить саму форму законов движения тел и полей вблизи «машины времени»; в этих законах проявится, как говорят физики, нелокальность, обусловленная «петлями времени».

Мы заговорили о парадоксах времени.

А что такое время вообще? Как на этот фундаментальный вопрос отвечают сегодня космологи?

С. Дезер. Время — отнюдь не то, что мы под этим понимаем в обычном смысле, хотя, естественно, каждый человек считает, что понимает, что такое время. Все зависит от масштабов. Так, мы легко можем представить себе, что такое расстояние порядка размера Земли (или меньше), что такое интервал времени порядка года (период обращения Земли). Но мы не в состоянии понять, что такое время в начале расширения Вселенной и время в конце ее жизни (т. е. интервал 10^{-43} с) — столь фантастически эта величина отличается от обычных мерок времени.

Очень легко, имея дело со временем, прийти к парадоксам. Например, можно написать уравнения, в которых время идет в обратную сторону. Или представьте себе, что мы находимся в нуле по оси времени, в логарифмическом масштабе — это бесконечность. Повторяю, мы не сможем объяснить, что такое время, используя обывательский язык. Возможно это только на уровне того большого синтеза, который и есть наука, т. е. на уровне нашего понимания, что такое

мир, потому что именно наука пытается объяснить нам, как устроен наш мир за пределами обычных масштабов. Поэтому те концепции времени, которыми мы пользуемся, тоже должны зависеть от масштаба.

Скажем, квантовая механика не может быть последовательно описана в обычных понятиях, т. е. на обычном классическом языке. В сущности, это справедливо для всех областей науки. Мы изобретаем язык, который должен быть логичным и четким и в котором термины что-то значат. Поэтому, чтобы понять, что такое время, нужно ставить вопрос в точной, адекватной форме.

Например, Сахаров использует понятие «стрелы времени» в направлении роста энтропии. В таком контексте время — макроскопическая величина, и в определенном диапазоне вполне допустимо пользоваться этим термином. Но для очень малых времен, мне кажется, уже нет такой связи: время → рост энтропии.

А. Д. Сахаров. То течение времени, которое мы наблюдаем в повседневной жизни, целиком и полностью связано со статистической необратимостью, т. е. с ростом энтропии. Пусть при $t=0$ имеет место состояние ложного вакуума с минимальной, нулевой, энтропией. Энтропия, по определению, всегда неотрицательна, т. е. при $t>0$ и $t<0$ она возрастает при удалении от точки $t=0$. Такое явление можно назвать «поворотом стрелы времени» при $t=0$. Что эта формальная возможность означает с философской точки зрения, я пока не знаю.

С. Дезер. У теоретиков существует свой язык, и он сильно отличается от обиходного. С другой стороны, мы обычные люди, и что-то поняв, хотим донести свое понимание до других. Впрочем, я не думаю, что знаю о том, что такое время, больше, чем мои коллеги.

А что, на ваш взгляд, способствует лучшему взаимопониманию среди самих ученых?

Р. Руффини. В арсенале космологии сегодня и космические аппараты, и межпланетные станции, и 6-метровый оптический телескоп, и огромные антенны радиотелескопов, и многое другое. Сюда же следует отнести и компьютеры. Если обратиться к истории, можно увидеть, что почти 20 веков потребовалось человеку, чтобы переместить центр Вселенной от Солнца. Затем для выдающихся открытий требовались десятилетия. А теперь открытия происходят каждый год, а иногда и чаще. И поэтому очень важна, особенно

для советских ученых, возможность быстро установить контакт с коллегами в любой точке земного шара. Ведь без этого неизбежно отставание уже «на старте».

Совершенно необходимо, чтобы ученый мог свободно передвигаться, имел доступ к компьютерам, к оперативному обмену данными. Надо, чтобы организационные формы сотрудничества ученых соответствовали тем огромным сдвигам в технике и технологии, которые происходят на наших глазах.

Хотелось бы также подчеркнуть важность научных школ. Ведь чтобы «производить» науку, необходима школа, ныне это не может быть индивидуальным актом. Для создания настоящей школы нужен учитель, средства, яркие студенты, хорошая библиотека, секретариат, причем все в одном месте. Необходима совместная работа над идеями. И это очень деликатный процесс. В истории науки много примеров того, как разрушались школы. А вот как они возникают, не вполне ясно. Для этого нужны не только материальные условия, но и мощные духовные стимулы. Тогда и рождается чудо научной школы. Мы должны работать вместе, творить эти чудеса.

М. Демьянский. Я работаю в Варшавском университете, но тесно связан с Коперниканским астрономическим центром АН ПНР. У меня широкие контакты с зарубежными научными центрами (в том числе и в СССР), наиболее стабильные — с Институтом релятивистской астрофизики в Риме, Центром теоретической физики в Остине и Принстонским университетом (США). Самое главное — возможность обмена не столько данными наблюдений, сколько идеями. Время, необходимое для возникновения идеи, — секунды, а на передачу ее стандартным путем (препринт, статья в журнале) уходят месяцы, если не годы. А общение с коллегами на уровне сегодняшних требований должно происходить тоже за секунды. Я надеюсь, что такие способы передачи информации будут развиваться. Расширение контактов среди ученых выгодно всем!

С. Дезер. Мне тоже хочется остановиться на значимости научных школ и необходимости широких международных контактов. Попытаюсь объяснить это на собственном примере. Моим учителем был Швингер (недавно я имел огромное удовольствие организовать конференцию по случаю его 70-летия). Я получил степень доктора за работы в области физики элементарных частиц, потом попал в Институт высших ис-

следований в Принстоне, где мне посчастливилось встречаться с Эйнштейном. Там же я познакомился с Опенгеймером. Затем два года работал у Бора в Копенгагене. Потом на год вернулся в Гарвардский университет, где работал Швингер. Таким образом, я получил образование в нескольких научных школах. Конечно, не могу утверждать, что сумел взять от этих школ все, но пользу такого «разностороннего» образования трудно переоценить.

Сейчас у меня несколько студентов (кстати, Швингер «репродуцировал» себя в 70 докторов. Это одни из лучших специалистов в США, у них самих уже есть научные «дети» и «внуки»). Я много сотрудничаю с исследователями из разных стран. Часто бываю восхищен работами советских ученых. По существу, физика стала полем международного сотрудничества. Если что-либо интересное опубликовано в Москве, не позднее, чем через неделю, мы узнаем об этом.

И в заключение нашей беседы: что вы думаете о будущем космологии, о возможных открытиях в ней? Можно ли фантазировать в этой и без того фантастической науке!

Р. Руффини. Однажды Чандрасекар сказал мне (и я с ним согласен), что выдуманное человеком никогда не было так фантастично, как сама реальность. Человек консервативен в своих фантазиях, реальность глубже и неожиданнее того, что мы способны себе представить. И если мы обратимся к предсказаниям фантастов, то увидим, что они менее интересны, чем то, что было потом реализовано. Нам нет нужды заниматься научной фантастикой, мы должны заниматься наукой!

М. Демьянский. Мне кажется, не следует ожидать в наших представлениях о Вселенной каких-либо изменений революционного характера, сравнимых с открытием Фридманом расширения Вселенной. Но есть много возможностей уточнить эту картину. Прежде всего, я бы отметил проблему анизотропии реликтового излучения, обнаружения фона гравитационных волн, фона нейтрино и т. д.; таким образом, в экспериментальном плане перспективы весьма широкие.

Х. Сато. А мне кажется, что перспективы довольно туманны. В 1980 г. у меня было гораздо больше надежд. В то время теория Великого объединения казалась очень перспективной. Дальше виднелась теория Сверхвеликого объединения. Но сейчас все это мне представляется куда менее определенным.

Я внимательно слежу за развитием физики элементарных частиц. В теории Великого объединения считалось, что вплоть до огромных энергий не возникнет никакой новой физики. Говорили о «пустыне» между энергиями 10^3 и 10^{15} ГэВ. Но природа, возможно, устроена хитрее, и не исключено, что в этой «пустыне» нам предстоит обнаружить много интересного. Поэтому упрощенное представление о том, что за хромодинамикой идут теории Великого, а затем — Сверхвеликого объединений, может остаться только желанием. И, возможно, на самом деле все будет не так. Поэтому мы должны продвигаться шаг за шагом и ни в коем случае не «перепрыгивать» через такие интервалы энергий. Это и есть мои представления о будущем.

С. Дезер. Наука развивается от парадокса к парадоксу. Как только мы формулируем парадокс, мы делаем следующий шаг. Думаю, что новые ускорители, а также новые космологические и астрофизические наблюдения позволят нам сформулировать новые парадоксы. Но все это очень не просто. И потому мы собираемся на конференции, подобные этой, и делаем на них то, о чем говорил Опенгеймер: «То, что мы не понимаем, мы объясняем друг другу». Именно для этого и проводятся конференции.

М. А. Марков. Хочу привести высказывание Фридмана: «К счастью, нам не дано видеть будущего». Ведь всякое представление о будущем содержит элементы сдерживающего нас настоящего. Действительность и история всегда богаче самой необузданной фантазии. Поэтому все, что может произойти, трудно предсказать заранее. И я не хотел бы выступать в данном случае в роли пророка, ибо мы мыслим о будущем на основе сегодняшних подходов. Это ограничивает наше мышление. Разве мог предсказать Максвелл, что возникнет в результате открытия им уравнений электромагнитного поля? Разве можно оценить в рублях и вещах то, что сделал Ньютон? Наша фантазия ограничена сегодняшними проблемами, о которых и шла речь.

А. Д. Сахаров. Но тем не менее фантазия очень нужна. Это наш метод работы.

М. А. Марков. Безусловно, фантазия нужна. Она может быть либо правильной, либо ошибочной. Но я хотел бы подчеркнуть, что в будущем сокрыто значительно больше неожиданных практических применений и прочих атрибутов фантастики, чем это видится нам сейчас.