

ОТКРЫТИЯ,

Олег Фейгин

ВЕЛИКАЯ КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

КОТОРЫЕ

ПОТЯСЛИ

МИР

САМЫЕ
ЗАХВАТЫВАЮЩИЕ
ТАЙНЫ
МАТЕРИИ



ЭКСМО

Олег Фейгин

ВЕЛИКАЯ
КВАНТОВАЯ
РЕВОЛЮЦИЯ

Москва  ЭКСМО 2009

УДК 524
ББК 22.632
Ф 36

Фейгин О. О.

Ф 36 Великая квантовая революция / О. О. Фейгин. — М. : Эксмо, 2009. — 256 с. : ил. — (Открытия, которые потрясли мир).

ISBN 978-5-699-37891-3

В книге рассказывается об актуальных вопросах одной из самых выдающихся научных теорий XX века – квантовой физике. Описываются квантовые идеи, без которых невозможно понять особенности современной физической картины мира: квантовая телепортация, квантовые компьютеры, квантовая криптография и другие квантовые явления.

За порогом третьего тысячелетия физика не только проникла в удивительнейшие глубины атомов, ядер и элементарных частиц, но и подошла к таинственным границам фундамента Мироздания, за которыми скрывается основа окружающей нас действительности.

УДК 524
ББК 22.632

Никакая часть настоящего издания ни в каких целях не может быть воспроизведена в какой-либо форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, без письменного разрешения ООО «Издательство «Эксмо».

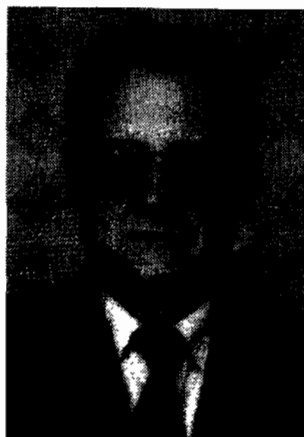
ISBN 978-5-699-37891-3

© Фейгин О. О., 2009
© ЧП «Аудиономикс», 2009
© ООО «Издательство «Эксмо», 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Об авторе	4
Предисловие	5
Глава 1. Квантовая революция в науке	18
1.1. Новая атомистика.....	21
1.2. Возникновение кванта	34
1.3. Парадоксальная реальность микромира	62
1.4. Квантовые коты и кошки	74
1.5. Запутанная путаница	86
1.6. Квантовая информатика	97
Глава 2. Многообразие реальности	114
2.1. Реальность многомирья	119
2.2. Голограмма Вселенной	130
2.3. На пути к теории «всего».....	141
2.4. Загадки субквантового сфинкса.....	153
Глава 3. Космология кванта	163
3.1. Начало всего Сущего.....	167
3.2. Большие проблемы Большого Взрыва.....	179
3.3. Демоны и демиурги Хроноса.....	193
3.4. Темные стороны Метагалактики	203
3.5. Квантовые провалы пространства-времени.....	220
Заключение.....	241
Приложение	248
Литература	251
Алфавитный указатель.....	254

Об авторе



Фейгин Олег Орестович — руководитель сектора теорфизики Института инновационных исследований Украинской академии наук, действительный член УАН.

Область научных интересов составляют специальные вопросы теоретической физики, квантовой механики, квантовой космологии и квантовой информатики.

Автор свыше 100 научных работ и научно-популярных книг:

«Обыкновенное научное чудо» (Х.: Основа, 2008); «Тайны Вселенной» (Х.: Фактор, 2008); «Великая тайна Вселенной» (Х.: Основа, 2009).

Все замечания и предложения Вы можете высказать автору по электронной почте folor@bigmir.net

Предисловие

«Хоть мы и говорим на каком-то определенном языке и используем определенные концепции, отсюда вовсе не обязательно следует, что в реальном мире имеется что-то этим вещам соответствующее».

*Роберт Оппенгеймер, выдающийся американский физик,
один из «отцов» атомной бомбы*

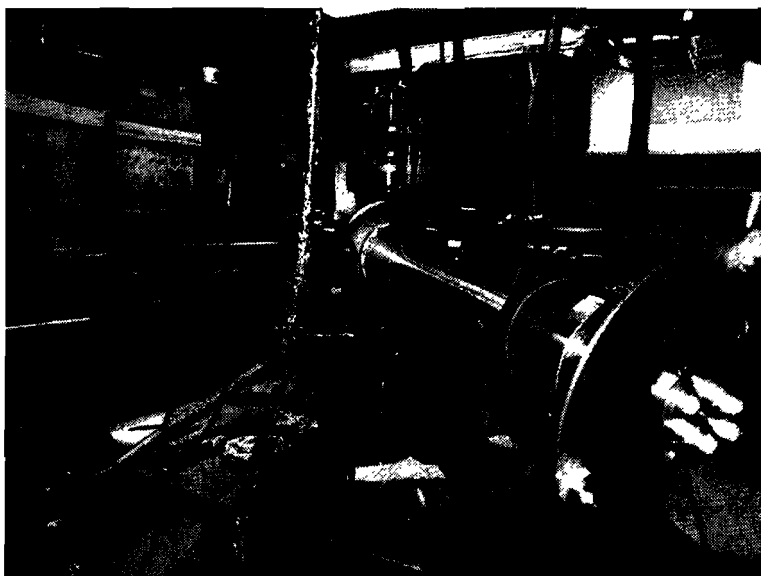


Рис. 1. Современный научный инструментарий

В лаборатории по исследованию квантовых явлений в линиях связи. В настоящее время исследовательские комплексы часто представляют собой громадные сооружения с устрашающими агрегатами, однако на переднем крае науки можно встретить и небольшие экспериментальные стенды, иногда чем-то напоминающие средневековые лаборатории алхимиков.

Нет, пожалуй, в современной науке термина, который был бы так широко известен, как слово «квант». Сегодня даже на

страницах желтой прессы, весьма далекой от науки, можно встретить фантастические репортажи о «квантовой медицине», «квантовой парапсихологии», «квантовой магии» и даже познакомиться с «квантовыми колдунами». Иногда на обложках глянцевого журналов вместе с пентаграммами и загадочными иероглифами соседствует формула и для энергии кванта $E = h\nu$. Наверное, по мнению журналистов и редакторов, подобные формулы сгущают завесу «научной» таинственности над разнообразной эзотерической и паранормальной чепухой. Впрочем, многие естественные и технические науки также охотно используют понятие «квантованности» самых разнообразных явлений и процессов, при этом часто далеко удаляясь от первоначального смысла этого фундаментального физического понятия.

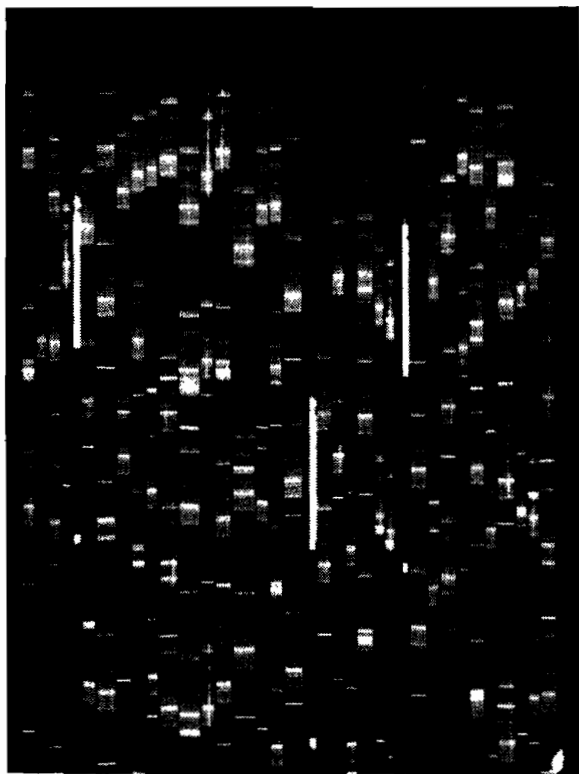


Рис. 2. Спектры далеких звезд (см. вклейку)

Образцы спектров трех звезд с различными температурами. Указаны атомы и ионы, ответственные за образование отдельных спектральных линий. В 1842 году французский философ Огюст Конт утверждал, что людям не дано познать, из чего состоят звезды — как может человек узнать что-то о светящейся точке на небе, до которой он никогда не доберется? Однако не прошло и двух десятилетий, как астрономы по спектру излучения стали определять химический состав звезд. Такие примеры свидетельствуют о том, что науке еще так далеко до ее полной завершенности, когда всякий «прохожий» может «ткнуть пальцем» в абсолютно любое явление, и квантовый компьютер (человеку обработать такую массу информации, конечно же, не под силу) тут же выдаст на монитор схемы, графики, картинки и формулы, полностью описывающие заданный процесс. Вообще-то говоря, философы считают, что человечество стоит сейчас всего лишь у самого начала осознания фундамента Мироздания, а многие вообще полагают, что в здании Вселенной — бесконечное количество этажей и ученые смогут освоить лишь их несколько десятков за отпущенный природой срок существования человеческой цивилизации...

Нельзя отрицать, что в современной фундаментальной физике сложилась напряженная ситуация. Многие ведущие физики современности, в частности те же Р. Пенроуз, С. Хокинг, С. Вайнберг, Ф. Вилчек и М. Гелл-Ман отмечали, что затянувшийся кризис в физической теории является признаком грядущих революционных потрясений в науке. Вполне возможно, что ключевой идеей, ведущей к «великому объединению» гравитации и квантовой теории, может стать переосмысление взглядов на природу такого привычного понятия, как физическое время, рассматриваемое сейчас в квантовой теории лишь как классический параметр. Кроме того, если вспомнить историю, то еще великий Альберт Эйнштейн убедительно показал, что наши понятия времени и пространства во многом иллюзорны. В действительности они нераздельны и образуют единый четырехмерный континуум, названный по имени его современника и учителя — Генриха Минковского. Представить это довольно трудно, ведь мы привыкли иметь дело только с тремя измерениями, но проек-

тивные изображения подобной абстракции можно встретить в специальных математических работах.

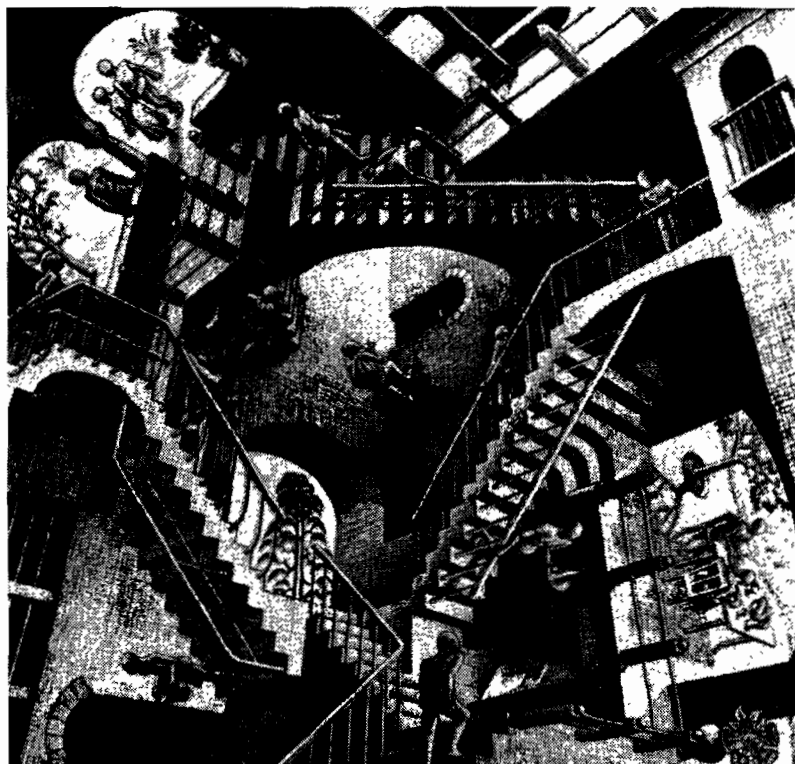


Рис. 3. Парадоксальный мир «перепутанных измерений» знаменитого голландского графика Мориса Корнелиуса Эшера

Осознание происходящего в мирах иных измерений вообще лежит за пределами обыденного трехмерного разума. Чтобы понять это, необходимо вырваться за рамки привычных понятий и хоть на миг попытаться вообразить себя неким «плоскунчиком», обитающим на листе бумаги. Как понять, представить и объяснить жителю плоского мира, что такое трехмерный объем? А ведь можно «переселиться» и в одномерный мир линии «длиннотиков»! Сможет ли «длиннотик» представить себе реальность «плоскунчиков», когда те попробуют объяснить ему понятие двухмерной площади?

Сложно говорить о квантовом Мире, не отдавая должного таким достижениям нашей цивилизации, как классическая физика и математика. Понятия об абсолютной «объективной реальности, существующей независимо от нашего сознания», о трехмерном евклидовом пространстве и равномерно текущем времени настолько глубоко укоренились в сознании, что мы не замечаем их. А главное, никакие достижения в современной науке не отменяют классического приближения для объяснения устройства Вселенной, а в противоположном случае попросту оказываются неверны.

Настоящая книга родилась из вопросов. Вопросы, звучащих на конференциях и симпозиумах, в студенческой аудитории, задаваемых друзьями и знакомыми, случайными попутчиками в дороге и в семейном кругу, произнесенными с экрана телевизора и вычитанными в журналах и газетах. Вопросы эти разные и, к сожалению, в большинстве своем порожденные нездоровыми околонучными сенсациями. Например такие:

— Что такое квантовый апокалипсис и когда его следует ожидать?

— Что произойдет при работе сверхмощного ускорителя частиц в Швейцарии? Не возникнет ли черная дыра, в которой исчезнет Земля?

— Можно ли с помощью собственного сознания управлять ходом событий в микромире и как это может изменить окружающую реальность?

Трудно отвечать на все любопытные вопросы «вперемешку», так как у них разный смысл, разный уровень, разный подтекст, да и в ответах иногда хочется ограничиться краткой репликой, а в некоторых случаях — и обстоятельным комментарием. Все вместе это и подтолкнуло к созданию данной книги. Естественно, следуя Козьме Пруткову, «объять необъятное» не удалось, ведь даже выборочный перечень вопросов современной физики и постановка наиболее актуальных проблем с краткими комментариями составили бы отдельный колоссальный труд. Сравнительно недавно

замечательный обзор на эту тему «Физический минимум» на начало XXI века» написал видный физик современности, нобелевский лауреат, академик В. Л. Гинзбург.

Таким образом, после долгого отбора вопросов, следуя советам коллег и «литературным» консультациям у таких знаменитых популяризаторов физической науки, как Д. С. Данин, В. С. Барашенков, А. Б. Мигдал, И. Д. Новиков, А. Д. Чернин, А. И. Китайгородский и многих других выдающихся ученых, возник следующий «план-конспект» будущей книги.

Любой рассказ, как учат нас древние римляне, надо начинать *ab ovo* — «от яйца». «Яйцо» новой физики разбилось на грани прошлого и позапрошлого веков, наполнив наш мир целым сонмом открытий, загадок и парадоксов. О том, кто и как готовил «яичницу» нового знания и что из этого в конечном итоге получилось, рассказывается в первой главе.

Достаточно открыть электронную страничку любого виртуального книжного магазина или не полениться покопаться на пыльных полках библиотек — и вы обязательно встретите целый пласт литературы, посвященной «альтернативной истории». Что это — чистая ненаучная фантастика или литературное озарение? Рассказом о многообразии реальности многомирья и начинается вторая глава. Затем нам предстоит узнать, над чем бился гений Эйнштейна до самого ухода Великого Физика и в чем состоит самая заветная мечта любого теоретика, объединяющего в своих формулах необъединяемое.

«*Все проходит — и это пройдет*» — эта мифическая надпись с кольца царя Соломона прекрасно определяет философскую сущность предмета нашего рассказа из заключительной третьей главы — квантовую космологию. Уже более полувека ее развитие проходит под влиянием работ наших замечательных соотечественников, начиная с патриарха математической космологии А. Л. Зельманова и заканчивая творцом «инфляционных вселенных» А. Д. Линде. Три «великих» открытия последнего времени — ускоренного расширения Вселенной,

темной материи и темной энергии — приковали внимание к космологическим проблемам многих выдающихся теоретиков нашего времени, тем не менее эти загадки Мироздания еще очень далеки от окончательного решения. Ну а причем здесь сверхмикроскопические порции энергии — кванты? Вот об этом и рассказывается в последней «экскурсии» по миру квантовой физики.

Прекрасно сказал нобелевский лауреат, академик В. Л. Гинзбург об исторической перспективе развития понимания квантовой реальности нашего Мира в своей статье «К столетнему юбилею квантовой теории (несколько замечаний)», написанной им для сборника «100 лет квантовой теории (история, физика, философия)»:

«...В статьях некоторых физиков, не говоря уже о популяризаторах (журналистах), все еще приходится сталкиваться с утверждениями чуть ли не о «конце» физики. Имеется в виду мнение о том, что почти все вопросы решены, еще немного и будет создана «теория всего» (Theory of Everything). На самом же деле фундаментальных вопросов в физике осталось отнюдь не меньше, чем в прошлом...»

Несомненно, такое возрождение интереса к основам квантовой механики связано с колоссальными успехами в области экспериментальных исследований квантовых эффектов, особенно в оптике. Здесь важно подчеркнуть только одно: все новые опыты только подтверждают квантовую теорию (квантовую механику и квантовую оптику). Ни малейших отклонений от существующей теории не обнаружено».

Как же совместить столь различные стороны мнения Виталия Лазаревича? С одной стороны, ситуация в физике поразительно напоминает события интеллектуального кризиса столетней давности, а с другой — для самоуспокоения достаточно просто открыть любой фундаментальный курс физики...

Как-то в далеком прошлом мне посчастливилось в одной из командировок попасть на Общественный физический семинар Гинзбурга. Честно скажу, что не запомнились темы,

наверное, очень интересных докладов, но вот по окончании все же удалось пробиться в кружок спорящих вокруг Виталия Лазаревича и задать вопрос по очень тогда (и сейчас) интересовавшей меня теме квантовой гравитации. Ответ академика был скор и четок: «Это не физика...» А однажды, уже у себя дома, мне удалось задать этот же вопрос выдающемуся физику-теоретику М. И. Каганову, и Моисей Исаакович задумчиво произнес: «Это, наверное, физика будущего...»

Да... очень трудно расставить все точки над *i* в современной физике, а может быть, этого и не стоит делать из педагогических соображений. Но ведь наверняка подавляющая масса читателей хотела бы, наверное, знать, «как же работает современная физика на самом деле». Боюсь многих разочаровать, но сам я точно не знаю ответа, впрочем, мне вполне комфортно в компании таких «единомышленников», как С. Хокинг, Р. Пенроуз, М. Гелл-Ман и Х. Молдасена.

На сегодня среди многих ученых сложилось своеобразное мнение, что не стоит особо копаться в корнях квантовой теории, а надо просто пользоваться практическими выводами из ее формул. Это направление в науке получило название «квантовый реализм». Возникло оно далеко не на пустом месте, поскольку по мере усложнения и абстрагирования от окружающей реальности новые научные теории все больше концентрировались на прагматическом предсказании и управлении, а не на достоверном описании или объяснении природы. Имеет здесь значение и то, что практика внедрения результатов научных исследований показывает, как доминирующие теории могут изменяться самым непредсказуемым образом, а фундаментальные прошлые достижения науки нередко приходится отвергать как ложные. Вспомним печальную судьбу таких понятий, как «эфир», «теплород» и «флогистон» — значит, и в настоящий момент надо быть готовым к переменам в науке и к приходу радикально новых, более плодотворных идей.

Флогистон (от греч. *phlogistos* — горячий, воспламеняемый) — гипотетическая «сверхтонкая материя огненной субстанции», ко-

торая, по представлениям ученых XVIII–XIX веков, якобы наполняла все горючие вещества и высвобождалась из них в процессах горения. Флогистон представляли как невесомую жидкость, улетающую из вещества при сжигании. При этом считалось, что металлы представляют собой соединение «земли» (оксида металла) с флогистоном и при горении металл разлагается на «землю» и флогистон, который при этом неразделимо смешивается с воздухом. Флогистон наделяли «отрицательной массой», чтобы объяснить увеличение массы металла при сгорании. Способность выделять флогистон из воздуха приписывали растительным организмам.

Теплород — гипотетическая тепловая материя в виде невесомой жидкости. В XVIII–XIX веках насыщенностью тел теплородом объясняли все наблюдаемые тепловые явления: нагрев, охлаждение, теплообмен, тепловое расширение и пр. Теплороду, как и флогистону, приписывались необычные свойства: невесомость, сверхупругость и сверхтекучесть, способность проникать в мельчайшие поры тел и расширять их. Теория теплорода ушла из науки в начале XIX века, когда было доказано, что тепловые явления обусловлены хаотическим движением атомов и молекул, а нагрев тел может быть осуществлен за счет механической работы.

Эфир, мировой и светоносный — термин, возникший в античные времена, понятие трактовалось как наполнитель мировой пустоты, впоследствии стало обозначать гипотетическую всепроникающую среду, колебания которой обнаруживают себя как свет и электромагнитные волны. Гипотеза о существовании именно светоносного эфира была выдвинута в 1618 году французским философом, физиком и математиком Рене Декартом и просуществовала до начала XX века. В конце XIX века эфир рассматривался как промежуточная всепроникающая материальная среда, заполняющая мировое безвоздушное пространство и все промежутки между частицами обычных веществ; как носитель света и электромагнитных волн, передающий их своими колебаниями. До открытия Периодического закона Д. И. Менделеевым эфир считался основным кирпичиком, из которого сложено Мироздание.



Рис. 4. Лазер — сверхмощный промышленный оптический квантовый генератор

Практическое воплощение идей квантовой физики связано прежде всего с созданием квантовой электроники, включая знаменитые генераторы электромагнитных волн: лазеры (оптический диапазон), мазеры (радиоволны) и газеры (гамма-диапазон).

Например, для физиков реальность не могла оставаться прежней после очередного революционного переворота в естествознании, когда микромир перешел под власть квантовой механики. Согласно квантовой теории, служащей ныне фундаментом для множества современных технологий, энергия имеет дискретную природу, частицы могут быть волнами, объект может одновременно находиться в нескольких местах, пока кто-то не попытается измерить его параметры. Эти парадоксальные положения квантовой физики известны довольно давно, с двадцатых годов прошлого столетия, но и сейчас не утихает полемика о глубинной природе этих явлений.

Достаточно перелистать несколько обзорных физических журналов, чтобы определить главную «болеую точку» современной теоретической науки — это, конечно же, остающаяся нерешенной несовместимость двух важнейших физических теорий двадцатого века. Одна из них — квантовая физика, описывающая явления микромира, другая — общая теория относительности, изучающая структуру окружающего пространства-времени и развитие Вселенной в целом.

Разумеется, для излишнего пессимизма здесь нет почвы, ведь сейчас в распоряжении исследователей имеется множество технических средств, чтобы активно заняться извечными вопросами в самых различных сферах умственной деятельности. Например, физики-ядерщики сумели воссоздать в ускорителях энергию Большого Взрыва, одну десятиллиардную долю секунды властвовавшую над миром. Все это дает большие надежды на дальнейшее расширение и углубление научного знания, открытие новых фундаментальных законов эволюции окружающего материального Мира, что, конечно же, как-то «примирит» и кванты с гравитацией.

Как же правильно построить структуру научного метода познания окружающей объективной действительности? Ответ здесь ясен и предельно четок, собственно говоря, он прекрасно известен со времен великого Галилео Галилея — единственным критерием истины является практический опыт! Если бы наука не подтверждалась гигантскими массивами экспериментальных данных и не представляла собой единую эволюционирующую теорию, то можно было бы смело утверждать, что понимание истинного устройства мира нам никогда не будет доступно.

В отрочестве мне попало несколько книг блестящего научного популяризатора Д. С. Данина. Одна из них — «Неизбежность странного мира», посвященная становлению квантовой механики и физики элементарных частиц — на всю последующую жизнь определила мой профессиональный выбор. Отдавая должное литературному таланту Даниила Семеновича, мне хотелось бы и в настоящей книге напомнить о бурной интеллектуальной атмосфере 60-х годов прошлого

века, привнесшей многие плодотворные идеи, изменившие наше видение окружающей физической реальности. Нельзя сказать, что сегодняшняя обстановка в области фундаментальных физических исследований характеризуется самодостаточной успокоенностью.

В последнее время в области популяризации научного знания наблюдается любопытный парадокс. Ряд видных ученых, таких как Р. Пенроуз, К. Саган, А. Шимони, Д. Дойч, пытаются общедоступно объяснить относительную истинность новых теорий не как временный недостаток, а как принципиальную, неотъемлемую черту.

Вот, к примеру, английский физик-теоретик Роджер Пенроуз еще в далекие шестидесятые годы прошлого века убедительно доказал, что когда звезда сжимается под действием собственного веса, как бы безгранично падая внутрь самой себя, она, в конце концов, сжимается до нуля. При этом, естественно, ее поверхность и объем также будут стремиться к нулевой величине. Получается, что все вещество звезды будет сжато в нулевом объеме, так что ее плотность и кривизна пространства-времени станут бесконечными. Это не очень-то понятное с физической точки зрения состояние небесных тел Пенроуз и назвал сингулярностью. Вскоре после этого появились высказывания, что поскольку сингулярности Пенроуза ни понять, ни исследовать принципиально невозможно, то, похоже, в природе есть границы, вход за которые человеческому разуму воспрещен.

На этом история непознаваемого в природе не закончилась, поскольку в середине тех же 60-х другой английский физик Стивен Хокинг познакомился с теорией Пенроуза и решил распространить ее на всю Вселенную, изменив при этом направление времени на обратное так, чтобы сжатие перешло в расширение. Другими словами, он получил новую развивающуюся модель Вселенной, возникшей из особой сингулярности Пенроуза. Эта главная в истории нашего Мира сингулярность почему-то взорвалась и стала безудержно расширяться, дав начало окружающей нас реальности. Получается, что и происхождение пространства-времени скры-

то от нас за семью печатями в бездонных глубинах главной сингулярности Пенроуза.

Подобный подход к научному поиску ставит под сомнение истинность целых разделов накопленных знаний. Тогда следует признать, что мы имеем дело не с объективным объяснением физических явлений, а с описанием мира в духе субъективного идеализма Платона. Для демонстрации своих взглядов этот знаменитый античный мыслитель придумал образ «пещеры Платона». Все, что вы видите и воспринимаете вокруг — это всего лишь зыбкие тени на стенах пещеры, которые дают «истинные» образы предметов и явлений. Почему так происходит? Потому что существует истинный мир вещей, который причудливо «преломляется» в мнимых «миражах» каждого человека. Почему-то именно сегодня эти тысячелетние воззрения начали входить в моду и подаваться как новейшее достижение человеческой мысли...

В своей книге я настойчиво придерживаюсь «немодных» и «устаревших» взглядов диалектического материализма, что, возможно, некоторым читателям покажется совершенно несовременным, однако, как писал в свое время академик А. Б. Мигдал: *«Навязывание природе умозрительных идей — один из источников заблуждений»*. В этом плане материалистический подход включает в себя очень простые вещи: весь Мир материален и воздействует на нас только материальным же образом, отражая себя через наши же органы чувств. Весь Мир абсолютно познаваем, и вопрос лишь в том, хватит ли времени на его познание. В нашем Мире не может существовать принципиально непознаваемых сингулярностей, даже придуманных таким замечательным ученым, как Пенроуз. Если же вам встречается такой странный объект, можно быть совершенно уверенным — это мираж, симулякр или просто умозрительный трюк теоретиков.

Глава 1

КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ В НАУКЕ

«Существование кванта действия приводит к противоречию между концепцией строгой локализации в пространстве и во времени и концепцией динамического развития. Каждая из них в отдельности может быть использована для описания действительного мира. Однако их нельзя одновременно применять со всей строгостью».

Луи де Бройль. «Революция в физике»

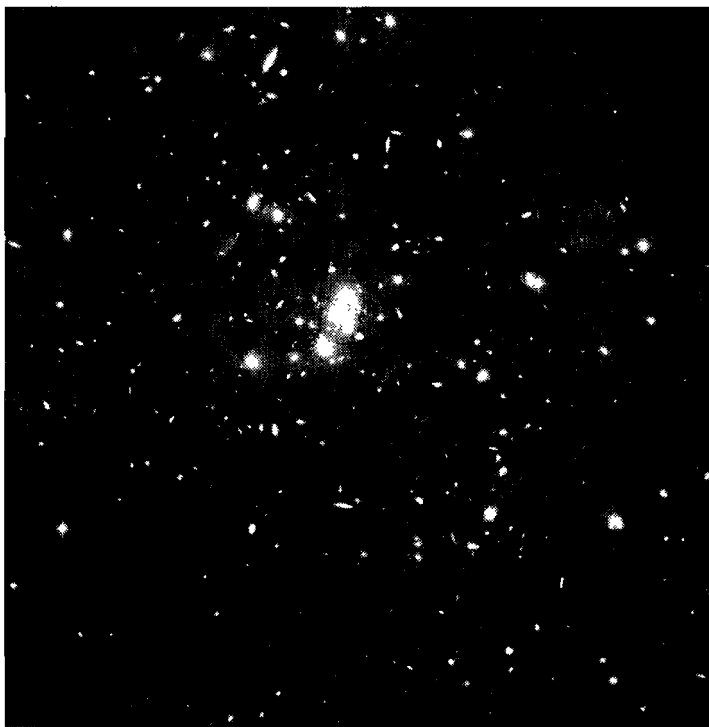


Рис. 5. Вселенная насыщена темной материей и энергией

Чем дальше астрофизические приборы проникают своим «взглядом» в глубину Вселенной, тем чаще ученые сталкиваются с малообъяснимыми космическими явлениями. Несомненно, что одним из главных открытий ушедшего века стала темная энергия — таинственная полевая субстанция, обеспечивающая ускоренное расширение Вселенной.

Тысячелетний марафон развития атомистических представлений завершился в двадцатых годах прошлого века, дополнившись и обновившись на основе новых представлений о фундаментальной делимости не только вещества, но и энергии. Возникла новая квантовая физическая реальность окружающего Мира.

Квантовая физика породила квантовую химию, а та, в свою очередь, — квантовую биохимию и генетику. Так, с пятидесятих годов минувшего столетия наконец стало понятно, как выглядят и функционируют гены — основа основ разумной белковой жизни во Вселенной. Квантовая теория Большого Взрыва, в результате которого возникли элементарные частицы, атомы, звезды, планеты и галактики, была также выдвинута в середине прошлого века. Одно время казалось, что свод основных законов природы надежно установлен. Но вот пришло третье тысячелетие нашей эры и принесло открытие темной энергии, вместе с темной материей составляющих основу Вселенной, отбросив ученых опять далеко от финишной черты окончательного знания...

Остались только ностальгические воспоминания о таком успешном начале штурма неведомого микромира в конце позапрошлого столетия целой плеядой блестящих теоретиков и экспериментаторов!

Настоящая глава посвящена очень краткому историческому экскурсу в бурный период формирования новых квантовых представлений, удивительно совпавший со временем рождения релятивистской физики. История открытия принципов описания квантовой сущности окружающего нас пространства-времени прежде всего связана с построением парадоксальных теоретических моделей, перевернувших все обыденные представления, так хорошо входившие в класси-

ческую физику. В этом смысле доквантовую физику и особенно ее основной раздел — классическую механику — можно было бы назвать «зрительной» наукой обыденного здравого смысла.

Все великие подразделы настоящей науки формировались в условиях непрекращающейся критики ученых-ортодоксов. Вспомним историю становления закона всемирного тяготения Ньютона, развития электродинамики Максвелла или настоящую трагедию термодинамики Больцмана.



Людвиг Больцман (1844–1906) – выдающийся австрийский ученый, которому удалось совершенно новым образом обосновать второе начало термодинамики «только от горячего к холодному», рассмотрев зависимость упорядочения атомов и молекул от времени. Однако известный «физик-консерватор» лорд Кельвин (в свое время отрицанием переменного тока чуть не доведший до самоубийства

Н.Теслу и до тяжелого невроза Дж. Вестингауза) и его последователи подвергли теорию Больцмана резкой критике. Основным аргументом было то, что она не объясняла связи между первым и вторым началами термодинамики: ведь если большие системы сделаны из маленьких, обратимых во времени систем, то почему большие не могут самопроизвольно обращаться? Вы же никогда не видели, чтобы стакан горячего чая вдруг покрылся коркой льда! В 1877 году Больцман нашел ответ своим критикам, что когда большое состояние соответствует многим равновероятным малым состояниям, то вероятность реализации большого состояния связана с числом малых состояний. То есть вероятность получить из стакана кипятка лед есть, но для этого надо всего лишь прожить сотню миллиардолетий! Сейчас подход Больцмана называется «вероятностной интерпретацией энтропии» (меры упорядоченности) и играет центральную роль в современном понимании необратимости явлений нашего Мира. Получается, что само направление течения времени от прошлого

к будущему, поэтично называемое «стрелой времени», определяется механическими законами Ньютона плюс статистика неисчислимого количества атомов и молекул, плюс законы вероятности квантового микромира. Вот так мы живем в парадоксальном вероятностном мире, где «судьба постоянно играет в кости» (Альберт Эйнштейн), но поведение костяшек, в конечном итоге, определяют законы теории вероятностей. К сожалению, аргументы Больцмана не были приняты, что вызвало у него тяжелейшую депрессию, и в 1906 году, находясь с семьей на отдыхе в Триесте, он повесился в номере гостиницы, пока жена и дочь загорали на пляже. А уже через несколько месяцев в печати появилось сразу несколько работ видных физиков, подтверждающих полную правоту теории Больцмана...

Не избежала всестороннего критического анализа и квантовая физика, тем более что даже достаточно поверхностный анализ квантового фундамента нашего Мира приводит к глубоким «идеологическим» парадоксам поведения микрочастиц.

Даже сейчас из глубины следующего столетия трудно без изумления изучать интеллектуальный взрыв на грани предыдущих веков, высветивший целую плеяду блестящих умов человечества, создавших сразу три фундаментальных раздела науки — квантовую механику, специальную и общую теорию относительности. Однако нарисованная картина была бы далеко не полной без четвертой составляющей этой самой бурной научной революции в истории человечества — экспериментальной атомной физики, породившей ядерную физику, физику элементарных частиц и радиационную физику твердого тела.

1.1. Новая атомистика

«Итак, для понимания пестрого многообразия явлений следовало найти в нем формальный единый принцип, который можно выразить математическим языком. В результате об-

наруживается тесная связь между понятным и прекрасным. Ведь если в прекрасном видеть согласие частей друг с другом и с целым и если, с другой стороны, та же формальная взаимосвязь впервые делает возможным какое бы то ни было понимание вообще, переживание прекрасного почти отождествляется с переживанием понятой или хотя бы предугаданной взаимосвязи».

Вернер Гейзенберг

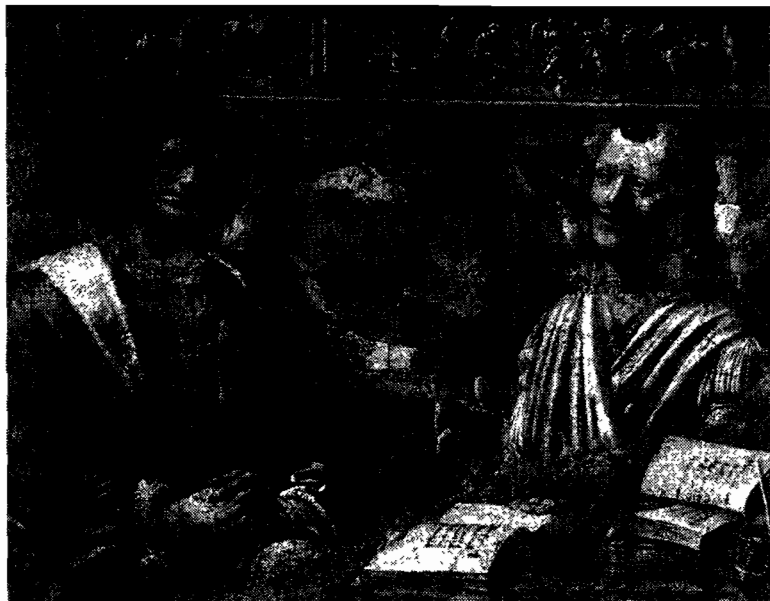


Рис. 6. Старинная фреска: Гераклит и Демокрит

Традиция связывает первые философские умозаключения о строении окружающего Мира из мельчайших неделимых частичек-атомов с именами древнегреческих философов — Гераклита из Эфеса и Демокрита из Абдера. Считается, что Демокрит прожил легендарно долгую жизнь в сто семь лет и написал свыше семидесяти работ по самым различным областям знаний, включая физику, математику, риторику, медицину и философию. В основе мира, согласно Демокриту, лежат два начала, связанные с *атомами и пустотой*. Сам по себе термин «*атомос*» переводится с греческого как «неделимое». Атомы Демокрит считал

мельчайшими, неделимыми частицами, которые носятся в пустоте и отличаются друг от друга лишь формой, величиной и положением. По его и Левкиппа учению, атомы численно бесконечны. Сталкиваясь и сцепляясь между собой, они образуют тела и вещи, с которыми мы имеем дело в повседневной жизни. Окружающие нас вещи, считал Демокрит, мы воспринимаем с помощью чувств, тогда как атомы постигаются разумом.

История науки связывает возникновение первых атомистических воззрений с именами античных ученых Гераклита, Левкиппа и Демокрита, живших в начале пятого века до нашей эры. К глубокому сожалению, из столь далекой древности до нас не дошло практически никаких материальных источников трудов первых атомистов. Все, что известно современным историкам науки, так это лишь многократные пересказы содержания некогда многочисленных произведений Демокрита. О трудах Гераклита и Левкиппа известно еще меньше, уцелела лишь строка из его манускрипта «Об уме»: «Ничего не происходит зря, для всего имеется необходимое основание».

В общем-то, разумные положения античной атомистики, несмотря на их примитивизм, просуществовали без явных изменений вплоть до середины девятнадцатого века, когда начался расцвет экспериментальной науки. На протяжении всей второй половины позапрошлого века физики активно изучали загадочные катодные лучи. Простейший аппарат, в котором они наблюдались, представлял собой герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом, в которую с двух сторон было впаяно по электроду: с одной стороны — катод, подключавшийся к отрицательному полюсу электрической батареи; с другой — анод, подключавшийся к положительному полюсу. При подаче на электроды высокого напряжения разреженный газ в трубке начинал светиться. Это свечение ученые и приписали катодным лучам.

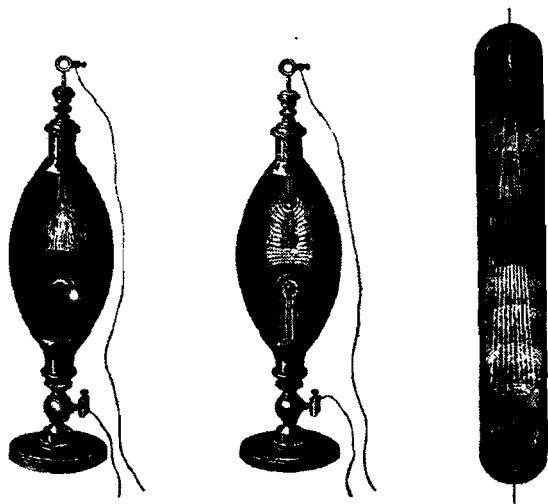


Рис. 7. Электронно-лучевые лампы и катодно-лучевая трубка
(рисунки времени экспериментов)

В ходе своих экспериментов Томсон усовершенствовал катодно-лучевую трубку, дополнив ее электрическими катушками, создававшими внутри трубки магнитное поле. Он также применил набор параллельных электрических пластин, создававших внутри трубки электрическое поле наподобие конденсатора. Таким образом появилась возможность исследовать поведение катодных лучей при совместном воздействии магнитного и электрического полей.

Дискуссия о природе таинственных лучей сразу же приняла весьма бурный характер. В то время в науке господствовали представления о «всепроникающем светоносном эфире», и большинство видных ученых склонялось к тому, что катодные лучи представляют собой — подобно свету — волновые возмущения эфира. Меньшая часть естествоиспытателей придерживалась мнения, что катодные лучи состоят из ионизированных молекул или атомов самого газа.

У каждой стороны имелись веские доказательства в пользу своей гипотезы. Наконец в 1897 году молодой английский физик Дж. Дж. Томсон положил конец этим спорам раз и на-

всегда, а заодно прославился в веках как первооткрыватель первой элементарной частицы — *электрона*.

Используя трубку новой конструкции, Томсон выяснил, что соотношение между электрическим и магнитным полями, при котором их действие уравнивается, зависит от скорости, с которой движутся частицы. Проведя ряд измерений, Томсон смог определить скорость движения катодных лучей. Оказалось, что они движутся значительно медленнее скорости света, из чего следовало, что катодные лучи могут быть только частицами. Эти неизвестные частицы Томсон назвал «корпускулами», но вскоре они стали называться «электронами».

Сразу же стало ясно, что электроны обязаны существовать в составе атомов — иначе откуда бы они взялись? 30 апреля 1897 года — дата доклада Томсоном полученных им результатов на заседании Лондонского королевского общества — считается днем рождения электрона. И в этот день отошло в прошлое представление о «неделимости» классических атомов.

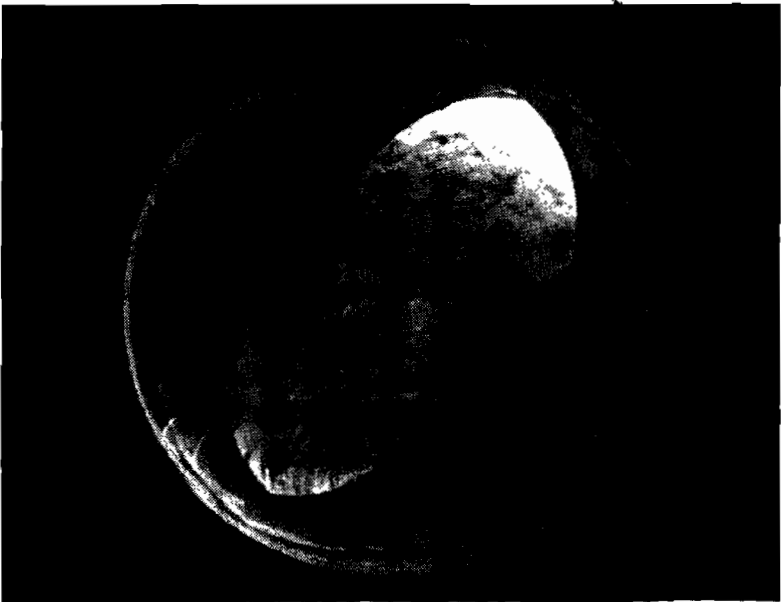


Рис. 8. Интерференция света внутри стеклянного шара (см. вклейку)

В повседневной жизни имеется два способа переноса энергии в пространстве — посредством частиц или волн. Чтобы, скажем, скинуть со стола костяшку домино, балансирующую на его краю, можно придать ей необходимую энергию двумя способами. Во-первых, можно бросить в нее другую костяшку домино (то есть передать точечный импульс с помощью частицы). Во-вторых, можно построить в ряд стоящие костяшки домино, по цепочке ведущие к той, что стоит на краю стола, и уронить первую на вторую: в этом случае импульс передастся по цепочке — вторая костяшка завалит третью, третья — четвертую и так далее. Это — волновой принцип передачи энергии.

В обыденной жизни между двумя механизмами передачи энергии видимых противоречий не наблюдается. Так, в бильярде шары передают друг другу энергию при столкновении, как частицы, а произнесенное слово несет энергию звуковой волны.

Однако в микромире сверхмалых масштабов все обстоит отнюдь не так просто. Даже из простейших опытов с микроскопическими объектами становится ясно, что на этом уровне организации материи привычные нам принципы и законы макромира не действуют. Свет, который мы привыкли считать волной, порой ведет себя так, будто состоит из потока частиц — фотонов, а элементарные частицы, такие как электрон или даже массивный протон, нередко проявляют свойства волны.

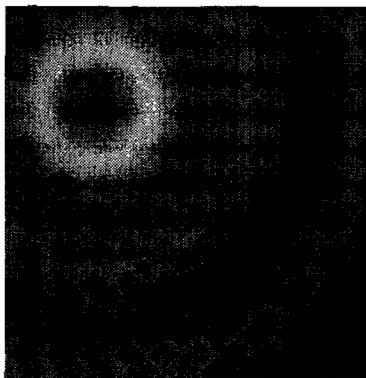


Рис. 9. Интерференционная картина рассеивания электронов на атомах кристалла (см. вклейку)

Если направить на кристалл пучок электронов, на экране будут прослеживаться свойственные волнам полосы пиков и спадов интенсивности излучения, то есть электрон будет вести себя как волна. С другой стороны, если «выстреливать» электроны по одному, каждый из них будет оставлять четкий след на экране, ведя себя как частица. Самое интересное, что то же самое будет, если вместо пучка электронов взять луч света, состоящий из фотонов: в пучке они будут вести себя как волны, а по отдельности — как частицы.

Возьмем экран с двумя тонкими горизонтальными прорезями и направим на него луч света. Естественно предположить, что частицы света будут проходить через оба отверстия прямо и за экраном возникнут две четкие световые полосы. Однако на практике мы наблюдаем совершенно иной эффект. Каждая из прорезей играет роль независимого источника вторичных световых волн, как поплавков на воде, и за экраном образуется сложная картина из перемежающихся полос света. Причем часть из них будет располагаться в «мертвой зоне» вне прямой линии попадания света. Это полностью соответствует модели звуковых волн, исходящих из двух стереодинамиков и дающих пик громкости стереоэффекта на линии равного удаления между ними.

Итак, совершенно очевидно, что частицы света ведут себя принципиально иначе, чем окружающие нас объекты.

Почему это происходит? Это очень важный и сложный вопрос, над которым околонуточные философы бьются уже целое столетие. На самом же деле корпускулярно-волновой дуализм означает, что в любом материальном теле содержится «зародыш» его волновой природы. И чем меньше становится материальный объект, тем больше его вторая «волновая сущность». Так и фотоны представляют собой не волны и не частицы, а нечто совершенно особенное по своей внутренней природе, трудно поддающееся описанию в терминах нашего повседневного опыта.

Здесь мы перелистаем несколько страниц захватывающей истории атомной физики. Научный поиск все эти годы, конечно же, не стоял на месте, были открыты другие составные

части ядра атома — протон и нейтрон. Следующее неожиданное открытие пришло из высокогорных лабораторий, изучающих состав космических лучей, бомбардирующих нашу планету. Космические ливни высокоэнергетических частиц и в наше время называют «ускорителем для бедных», а в те далекие годы космические странники были чуть ли не единственным источником нового знания о микромире.

Там вскоре начали открывать всевозможные частицы, не имеющие ни малейшего отношения к классической атомной триаде — электрону, протону и нейтрону. Сначала в опытах Томсона был открыт электрон.

В частности, были обнаружены совершенно немыслимые по своей природе *античастицы*.

Мир античастиц — своего рода зеркальное отражение знакомого нам мира. Масса античастицы в точности равняется массе частицы, которой она вроде бы соответствует, но все ее остальные характеристики противоположны прообразу. Например, электрон несет отрицательный электрический заряд, а парная ему античастица — «позитрон» («позитивный электрон») — положительный. У протона заряд положительный, а у антипротона — отрицательный. И так далее. При встрече частицы и ее античастицы происходит мгновенный микровзрыв (физики называют это явление взаимной *аннигиляцией*) и обе частицы прекращают свое существование, а их масса преобразуется в энергию, которая рассеивается в пространстве в виде вспышки фотонов и прочих сверхлегких частиц.

Существование античастиц было впервые теоретически предсказано видным английским ученым Полем Дираком.



Поль Адриан Морис Дирак (1902–1984) — британский физик-теоретик. Родился в Бристоле в семье иммигрантов из Швейцарии. Окончил Бристольский университет, после чего преподавал математику и физику в Кембридже, где получил докторскую степень и стал почетным профессором математики. В 1928 году Дирак

опубликовал работу, впервые объясняющую поведение электрона с точки зрения теории относительности, а именно — с позиции сочетания принципов данной теории и квантовой механики. Именно в этой работе было предсказано существование античастиц, и за нее Дирак несколько позже — в 1933 году — получил Нобелевскую премию по физике, разделив ее с Эрвином Шредингером.

Дирак предположил, что весь наш Мир погружен в море электронов. В обычных условиях волны электронного моря Дирака ненаблюдаемы. Но если извлечь каким-либо образом электрон из моря Дирака, то на его месте тут же возникнет пустое незанятое состояние — антиэлектрон позитрона. Все это очень напоминает некоторые процессы в кристаллических твердых телах.

Мой учитель, видный кристаллофизик и блестящий педагог, профессор Я. Е. Гегузин, в свое время написал две замечательные научно-популярные книги — «Пузыри» и «Живой кристалл». Обладая несомненным литературным талантом ученого-популяризатора, Яков Евсеевич потрясающе интересно читал свой университетский курс «Физика конденсированного состояния». Свободных мест на его лекциях не было! Наряду со студентами, научными сотрудниками, аспирантами и докторантами в аудитории встречались и седовласые профессора с других кафедр. При этом ни один его лекционный курс, несмотря на строгие методические требования и инструкции чиновников Министерства образования, не повторялся. Каждый раз сухой лекционный материал превращался у Якова Евсеевича в увлекательнейший рассказ, расцвеченный новыми подробностями и занимательными фактами будней и свершений настоящей науки. Долгое время, вплоть до кончины нашего любимого преподавателя, посещал и я его лекции. Именно здесь возник незабываемый образ модельного ряда диалектически единых и в то же время противоположных физических элементов, определяющих в своих взаимопревращениях эволюцию нашего Мира. Это и океан кипящего вакуума виртуальных частиц, дырочно-электронная плазма в полупроводниках, и вакансионные подрешетки кристаллов, и, конечно же, электронно-позитронное море Дирака.



Рис. 10. Детектор элементарных частиц Большого адронного коллайдера «АТЛАС». С помощью новых уникальных детекторов элементарных частиц ученые надеются наконец-то обнаружить частицы «темной материи», наполняющей Вселенную (см. вклейку)

Возвращаясь в далекие годы становления атомной физики, надо отметить, что, пока шло теоретизирование вокруг античастиц, молодой ученый Карл Андерсон (1905–1991) под руководством знаменитого физика-экспериментатора Роберта Милликена придумал установку для регистрации космических лучей, получившую название «конденсационная камера». Установка состояла из мишени, помещенной в мощное магнитное поле. Андерсон смог зарегистрировать частицы, возникающие в результате столкновения космических лучей с мишенью, по следам (трекам) из капелек конденсата, которые можно было сфотографировать и по полученным фотографиям изучать траектории движения частиц. Точно так же ведет себя высотный реактивный самолет, оставляя после себя в атмосфере инверсионный след.

Вскоре удалось зарегистрировать ряд столкновений, в результате которых образовывались частицы с массой, равной массе электрона, однако отклонялись они под воздействием

магнитного поля в противоположную сторону по сравнению с электроном и, следовательно, имели положительный электрический заряд. Так была впервые экспериментально выявлена античастица – позитрон. Все следующие за позитроном античастицы были экспериментально обнаружены уже в лабораторных условиях – на ускорителях. Сегодня физики-экспериментаторы имеют возможность буквально штамповать их в нужных количествах для текущих экспериментов и чем-то из ряда вон выходящим античастицы давно не считаются.

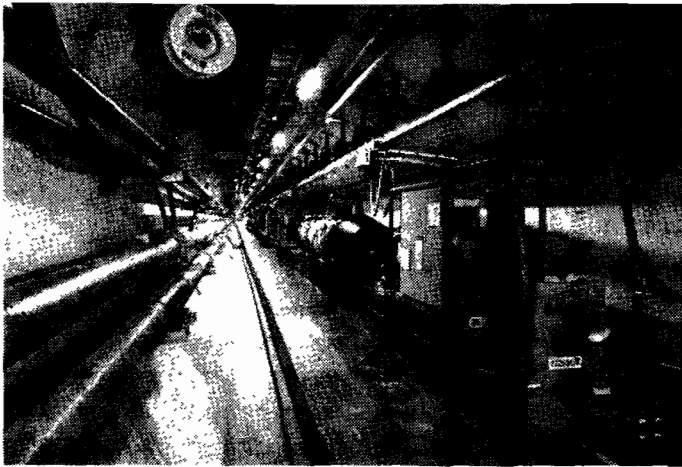


Рис. 11. Здесь исследуют кварковое строение материи (БАК, ЦЕРН, Швейцария)

В начале 60-х годов прошлого века физики-теоретики поняли, что закономерности элементарных частиц можно объяснить с помощью более фундаментальных структурных единиц – кварков.

Сейчас ученым известно четыре вида сил, определяющих рождение и жизнь элементарных частиц. Сильное взаимодействие элементарных частиц вызывает процессы, протекающие с наибольшей сравнительной интенсивностью, и приводит к возникновению самой сильной связи между элементарными частицами. Именно оно обуславливает связь протонов и нейтронов в ядрах атомов. Элек-

тромагнитное взаимодействие обеспечивает связь ядер и электронов в атомах и молекулах вещества и тем самым определяет устойчивость окружающих нас вещей. Слабое взаимодействие элементарных частиц вызывает очень медленно протекающие с ними процессы, в том числе радиоактивные распады. Данное взаимодействие гораздо слабее не только сильного, но и электромагнитного взаимодействия, но гораздо сильнее гравитационного.

На протяжении двух последних веков ученые, интересующиеся строением Вселенной, искали базовые строительные блоки, из которых состоит материя, — самые простые и неделимые составляющие материального мира. Атомная теория объяснила все многообразие химических веществ, постулировав существование ограниченного набора атомов так называемых химических элементов, объяснив природу всех остальных веществ через различные их сочетания. Таким образом, от сложности и многообразия на внешнем уровне ученым удалось перейти к простоте и упорядоченности на элементарном уровне.

Но простая картина атомного строения вещества вскоре столкнулась с серьезными проблемами. Прежде всего, по мере открытия все новых и новых химических элементов, стали обнаруживаться странные закономерности в их поведении, которые, правда, удалось прояснить благодаря вводу в научный обиход Периодической системы Д. И. Менделеева. Однако представления о строении материи все равно сильно усложнились.

В начале прошлого столетия стало ясно, что атомы отнюдь не являются элементарными «кирпичиками» материи, а сами имеют сложную структуру и состоят из еще более элементарных частиц — нейтронов и протонов, образующих атомные ядра, и электронов, которые эти ядра окружают. И снова усложненность на одном уровне, казалось бы, сменила простота на следующем уровне детализации строения вещества. Однако и эта кажущаяся простота продержалась недолго, поскольку ученые стали открывать все новые и новые элементарные частицы.

В обычной ньютоновской физике любая сила — это либо притяжение, либо отталкивание, изменяющее характер движения тела. Но в современных квантовых теориях сила, действующая между элементарными частицами, интерпретируется несколько иначе. Считается, что сила возникает в результате того, что две частицы обмениваются третьей.

Приведем следующую аналогию. Представьте себе пару фигуристов на катке, едущих навстречу друг другу. Приблизившись, один из них вдруг выплескивает на другого ведро воды. Тот, кто выплеснул воду, из-за этого затормозит и изменит направление движения. И тот, кто получил порцию воды, также затормозит и изменит направление. Таким образом, «обменявшись» водой, оба фигуриста изменили направление движения. Согласно законам механики это означает, что между фигуристами произошло силовое взаимодействие. В приведенном примере нетрудно увидеть, что эта сила возникла из-за (или, как сказали бы физики, передалась «через» или «посредством») обмена водой.

Еще один пример касается двух лодочников, гребущих на встречных курсах. Один гребец перебрасывает массивный предмет партнеру, когда они проплывают друг мимо друга. В результате действия закона сохранения импульса, когда первый гребец сделал бросок, курс его лодки отклонился от прямолинейного в противоположную сторону, а когда второй гребец поймал предмет, его импульс передался ему, и вторая лодка также отклонилась от прямолинейного курса, но уже в противоположную сторону. Таким образом, в результате обмена предметом обе лодки изменили направление движения. Согласно классической механике это означает, что между лодками произошло силовое взаимодействие. Но ведь лодки не вступали между собой в прямое соприкосновение? Здесь мы и видим наглядно, и понимаем интуитивно, что сила взаимодействия между лодками была передана носителем импульса — переносчиком взаимодействия.

Как же построить строгий физический образ такого парадоксального микромира? Уже свыше столетия для этого служит одна из самых удивительных научных теорий — квантовая физика.

1.2. Возникновение кванта

«Можно понять, какое существенное влияние было оказано на само направление развития человеческих знаний в тот день, когда кванты исподтишка вошли в науку. В тот самый день величественное и грандиозное здание классической физики было потрясено до самого основания, хотя никто тогда еще и не отдавал себе ясного отчета в этом. В истории науки не много было подземных толчков, сравнимых по силе с этим».

Луи де Бройль,

основатель волновой квантовой механики

«С большой пользой для себя я постоянно следил за тем, как Бор развивал физическое толкование формул; я же предпочитал использовать формальный математический принцип, то есть своего рода эстетический критерий суждения. В конце концов, оба метода, к счастью, дали одинаковый результат, и я убеждал Бора, что так всегда бывает при наличии простой и ясной теории».

Вернер Гейзенберг,

основатель матричной квантовой механики

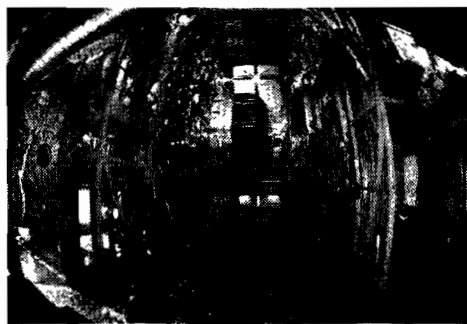


Рис. 12. Самый мощный в мире ускоритель элементарных частиц (БАК, ЦЕРН, Швейцария)

Методы исследования природы у химиков сводятся к проведению всяческих реакций, у биологов — анатомированию разных организмов, у астрономов — наблюдению небесных тел и лишь у квантовых физиков мы имеем дело с фундаментом материи, проявляемым в разнообразных столкновениях

и рассеяниях элементарных частиц, ускоренных до субсветовых скоростей.

Одним из самых таинственных и притягательных разделов физики уже долгое время (практически с момента возникновения) остается *квантовая механика*. Второе название данной области науки — *волновая механика* — теория, которая устанавливает способ описания и законы движения микрочастиц (элементарных частиц, атомов, молекул, атомных ядер) и их систем, а также общую связь величин, характеризующих микромир частиц, с физическими величинами окружающего нас большого мира (макромира).

Исторический путь развития идей квантовой механики и ее математического аппарата был довольно сложным. Это отмечал создатель поразительного физического образа «волн материи», нобелевский лауреат Луи де Бройль: *«Авторы, пишущие сейчас трактаты о квантовой механике, почти уже не говорят о тех основных идеях, которые ее породили. Они даже, видимо, предпочитают этот термин «квантовая механика» термину «волновая механика», который, как им кажется, вызывает в представлении неточный или бесполезный физический образ. А между тем именно волновая механика и выведенные из нее волновые уравнения остаются в основе всего математического развития современных квантовых теорий; без них сейчас, может быть, и не было бы трактатов о квантовой механике».*



Рис. 13. Модель излучения абсолютно черного тела (см. вклейку)

В начале XX века возник глубокий парадокс при анализе законов излучения *абсолютно черного тела* (АЧТ). Моделью АЧТ в идеальном случае может служить замкнутая полость с зеркальной внутренней поверхностью. В окружающем мире хорошее приближение к АЧТ дает внутренний жар костра с ровным белым пламенем, вагранка (окошко) в мартеновской печи или внутренняя поверхность солнечных пятен.

В классической механике Галилея и Ньютона макроскопические частицы описываются координатами в пространстве, скоростями движения и зависимостями этих величин от времени. Осознание того, что незыблемость классической физики является лишь частным случаем в познании природы неразрывно связано с одним из важнейших этапов во всей истории развития науки — становлении квантовой теории в начале прошлого столетия.

Изначальными этапами здесь были:

- открытие Планком его формулы для излучения абсолютно черного тела;
- квантовая природа фотоэффекта в истолковании Эйнштейна на основе понятия о фотонах;
- формулировка Бором его постулатов о стационарных состояниях атомных систем и о частоте света, испускаемого системой при переходе из одного стационарного состояния в другое.

Крупнейший физик-теоретик прошлого века, нобелевский лауреат, академик Лев Давидович Ландау рассказывал своим ученикам, что изучение работ основоположников квантовой теории Эрвина Шредингера и Вернера Гейзенберга принесло ему ощущение силы человеческого гения, величайшим триумфом которого является то, что человек способен понять вещи, которые он уже не в силах вообразить.

Результаты научных исследований неотделимы от личности их автора, а квантовая физика началась с Макса Планка. Планку пришла в голову гениальная мысль, что нужно ввести в теорию излучения некоторый новый элемент, развивающий на ином уровне классические представления всеобщие

го атомизма, и он выдвинул знаменитый постулат: *вещество не может испускать энергию излучения иначе как конечными порциями, пропорциональными частоте этого излучения*. Коэффициент пропорциональности при этом есть некоторая универсальная постоянная, имеющая размерность механического действия. Это и есть знаменитая постоянная Планка h . Введя эту парадоксальную гипотезу, Планк построил теорию теплового равновесия и вывел новый закон распределения спектральной плотности энергии излучения, который носит его имя.

Здесь необходимо сделать небольшое отступление и вспомнить, что позапрошлый век пришел к своему финишу со всесторонне цельной и кажущейся вполне самодостаточной картиной Мира. Лишь несколько легких облачков омрачали ясный горизонт науки и среди них — «ультрафиолетовая катастрофа».

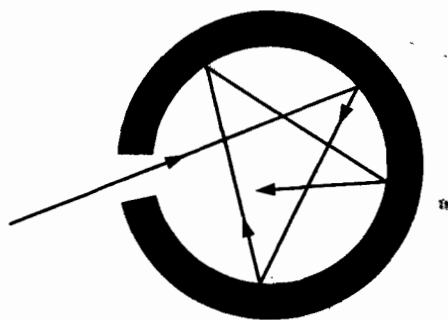


Рис. 14. Внутри полости абсолютно черного тела

Чтобы понять этот физический парадокс с таким устрашающим названием (на самом деле, конечно же, никакой катастрофы не существует), представим себе массивный елочный шар, покрытый сверху черным бархатом, с зеркальной внутренней поверхностью. Луч света может проникнуть в такой

шар только через горловину, оставшуюся от рожка стеклодува, и при достаточно малом входном отверстии он навсегда остается внутри, бесконечное количество раз отражаясь от стенок. Тело, не отражающее свет, а полностью поглощающее его, физики называют абсолютно черным (АЧТ). Естественно, что ничего абсолютного в реальном Мире не существует и подобная теоретическая модель, по своей сути, является физической абстракцией. С микроскопической точки зрения поглощенный АЧТ свет должен взаимодействовать с атомами внутренней зеркальной поверхности, последовательно поглощаясь ими и испускаясь до определенного момента достижения состояния равновесного насыщения. При нагревании АЧТ до равновесного состояния интенсивность испускания и поглощения лучей внутри его уравнивается, поскольку при поглощении некоего количества света определенной частоты одним атомом другой атом где-то внутри одновременно испускает такое же количество света той же частоты. Таким образом, количество поглощенного света каждой частоты внутри АЧТ остается неизменным, хотя поглощают и испускают его разные атомы тела.

«Катастрофические» проблемы в доквантовой физике начались после анализа баланса энергии излучения внутри полости АЧТ в равновесном состоянии. Выяснилось, что чем выше частота и короче длина излучения, тем больше его доля внутри АЧТ. Однако чем выше частота волны, тем большую энергию она несет, и, соответственно, мы сразу же приходим к «катастрофическому» выводу о том, что энергия излучения внутри АЧТ должна стремиться к бесконечности. Поскольку высокочастотное излучение лежит в ультрафиолетовой части спектра, данный физический парадокс и получил название «ультрафиолетовая катастрофа».

Вначале Планк просто угадал правильную формулу излучения АЧТ, правда, на это «просто» ушло около двух лет перебора различных вариантов. На публикацию статей в серьезных научных журналах уходят годы, крайне редко — месяцы, ну а экспериментальная проверка новых теоретических результатов может занять и десятилетия. Всего этого счаст-

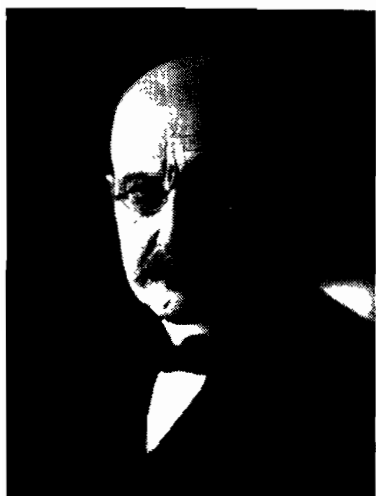
ливо удалось избежать Планку. На очередном заседании Немецкого физического общества 19 октября 1900 года рассматривались новые опытные данные по спектру АЧТ. Докладывал друг Планка физик-экспериментатор Рубенс, в заключительной полемике слово взял Планк, предложив свою формулу. Вот тут демон кванта (правда, пока без имени) и был выпущен на волю!

Истории не известно, спал ли сном праведника в ночь после заседания Планк, но Рубенс и его коллега Курлбаум бодрствовали абсолютно точно. Они тщательно сравнили все спектральные измерения с новой формулой и уже наутро сообщили, что соотношение Планка полностью справедливо для всего спектра АЧТ.

Вот тут и начался трудный процесс создания новой квантовой физики. Как физик-теоретик Планк не мог считать свою работу законченной без объяснения смысла своей формулы. После двух месяцев тяжелых раздумий он пришел к парадоксальному выводу, что элементы внутренней поверхности АЧТ излучают и поглощают энергию *парциально*! Ну а сами энергетические порции описываются простейшей формулой $\Delta E = h\omega$, где h — новый коэффициент пропорциональности, ω — частота тепловых колебаний. По законам классической физики интенсивность может падать с увеличением их частоты по экспоненте. При этом высокочастотные колебания будут вносить незначительный вклад в общее количество излучаемой тепловой энергии. Так разрешился парадокс несостоявшейся «ультрафиолетовой катастрофы».

Все это и докладывал Планк на знаменитом декабрьском заседании физического общества. Закон излучения Планка изумительно точно описывал процессы излучения, что позволило быстро определить значение коэффициента h , получившего название «постоянная Планка».

Планк положил начало настоящему перевороту в научных представлениях, по своему мировоззренческому значению сравнимому с великими открытиями Коперника, Галилея и Ньютона.



Макс Планк (1858–1947) — выдающийся немецкий физик. Его отец вначале был профессором права в Кильском университете, а в 1867 году семья переехала в Мюнхен. Здесь по окончании школы Планк изучал в Мюнхенском университете физику и математику. Затем он защитил докторскую диссертацию и через несколько лет занял должность профессора теоретической физики в Берлинском университете, был избран в члены Прусской Академии наук (1894 г.) и впоследствии стал ее неперменным секретарем с 1902 года.

Область научных изысканий Планка была весьма обширна: термодинамика сложных систем и лучистой энергии, приведшая его к статистической физике и к открытию кванта действия; попытки сочетать квант действия с электродинамикой Максвелла; серия статей по релятивистской термодинамике; развитие понятия энтропии, работы по методологии физики.

Планк в жизни был исключительно скромным человеком. Он удостоился многих почестей; в 1920 году ему была присуждена Нобелевская премия. Нравственный и научный авторитет Планка был непререкаем для физиков во всем мире. Имя Планка заслуженно вошло в золотой фонд человеческой культуры. Искренний и честный сын своего времени и своего народа, он был неустанным тружеником науки. Открытие универсальной мировой постоянной — кванта действия, носящей его имя, — величайшая ему награда.

Одним из первых открытие Планка применил великий Альберт Эйнштейн. В судьбоносном для мировой науки 1905 году он опубликовал работы, в которых заложил основы теории относительности и применил понятие «квантованности излучения» в теории фотоэффекта.

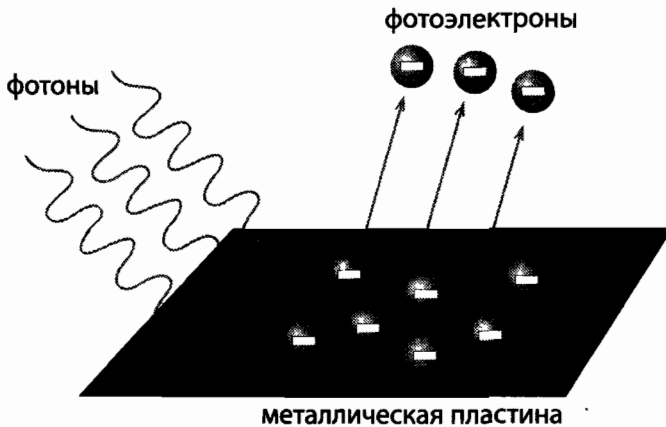
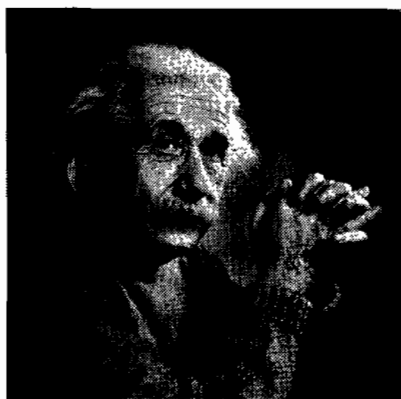


Рис. 15. Схема фотоэффекта

Явление фотоэффекта впервые наблюдалось немецким ученым Генрихом Герцем в 1887 году, затем его основные закономерности были экспериментально исследованы замечательным русским физиком, профессором Московского университета А. Г. Столетовым. Основатель русской школы физиков-экспериментаторов, Столетов исследовал далекий прообраз будущих электронных ламп в виде герметичной вакуумированной колбы с двумя внутренними пластинками — электродами. При освещении этих пластинок ртутной лампой во внешней электрической цепи возникал ток. Столетов дал правильную трактовку своих опытов, считая, что под действием света происходит испускание электронов (фотоэлектронов) веществом электродов, при этом они начинают упорядоченно двигаться во внешнем электрическом поле, образуя электрический ток (фототок).

При исследовании фототока выяснилась парадоксальная закономерность, противоречащая классической электродинамике. Согласно классической теории, падение световой вол-

ны на поверхность проводника приводит к попаданию электронов вблизи поверхности в переменное электромагнитное поле волны. Под действием электромагнитных сил электроны начинают разгоняться, наращивая энергию. Постепенно их энергия становится достаточной для преодоления притяжения атомов проводника и электроны вырываются наружу. Здесь и начинаются противоречия, ведь по классической электродинамике накопление энергии электроном требует вполне определенного времени. И это время, по расчетам, должно составлять около минуты! Это полностью противоречит опытным данным, ведь фототок возникает мгновенно — после падения света на поверхность проводника. В то же время покинувшие поверхность проводника электроны, по волновой теории света, «энергонасыщаются» пропорционально амплитудам падающих волн и интенсивности излучения в целом. Тут можно применить своеобразную гидродинамическую аналогию, уподобив электроны частичкам вещества, плавающим на поверхности волн. Чем больше волны, тем сильнее возрастает энергия плавающих частичек. Опытные данные здесь опять полностью противоречат классической теории, ведь энергия вызванных электронов совершенно не зависит от интенсивности света, но линейно зависит от частоты.



Альберт Эйнштейн (1879–1955) — великий немецкий физик, создатель теории относительности, квантовой теории и статистической физики. По окончании Цюрихского политехникума в 1900 году работал учителем, затем в 1902 получил место эксперта в федеральном патентном бюро в Берне, где работал до 1909 года. В эти годы им была создана специальная теория относительности,

проведены исследования по статистической физике, броуновскому движению и теории излучения. В 1909 он был избран

профессором Цюрихского университета, а в 1913 году — членом Прусской и Баварской Академии наук. В этот период Эйнштейн переехал в Берлин, где занял должность директора физического института и профессора Берлинского университета. В этот период он завершил создание общей теории относительности и развил квантовую теорию излучения. За открытие законов фотоэффекта и работы в области теоретической физики ему была присуждена Нобелевская премия по физике 1921 года. В 1933 году Эйнштейн эмигрировал в Принстонский институт высших исследований (США). Здесь он занялся разработкой единой теории поля и вопросами космологии.

Главным научным достижением Эйнштейна является теория относительности пространства, времени и тяготения. В 1905 году он опубликовал статью, где показал, что масса тела пропорциональна его энергии. Анализируя природу гравитации, уравнения гравитационного поля и законы его распространения, Эйнштейн постулировал фундаментальный принцип эквивалентности гравитационной и инертной масс. Развивая этот принцип, он пришел к идее зависимости геометрии пространства-времени от материи и вывел в 1915 году уравнение гравитационного поля, заложив основы общей теории относительности. В 1916 году Эйнштейн завершил построение общей теории относительности, предсказав существование гравитационных волн и решив задачу о распространении гравитационного возмущения. В 1917 году он применил свое уравнение к изучению глобальных свойств Вселенной, положив начало релятивистской космологии.

Разрабатывая основы квантовой теории, Эйнштейн ввел представление о дискретной структуре поля излучения и на этой основе вывел законы фотоэффекта, а также объяснил люминесцентные и фотохимические закономерности. В 1916 году он приходит к разделению процессов излучения на самопроизвольные (спонтанные) и вынужденные (индуцированные) и вводит параметры, определяющие вероятность этих процессов (коэффициенты Эйнштейна). Эта работа Эйнштейна лежит в основе современной квантовой электроники. Применяя статистическое рассмотрение к колебаниям кристаллической решетки, он создает теорию теплоемкости твердых тел, а в 1909 году выводит формулу для флуктуации энергии в поле излучения.

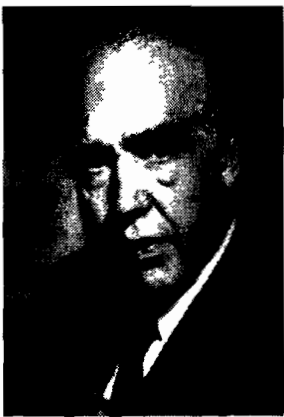
В 1924 году, познакомившись со статьей Ш. Бозе по статистике световых квантов и оценив ее значение, Эйнштейн указал на непосредственное обобщение теории Бозе для идеального газа. Так возникла статистика Бозе-Эйнштейна в квантовой теории идеального газа. Разрабатывая теорию подвижности молекул (1905) и исследуя реальность токов Ампера, порождающих магнитные моменты, Эйнштейн пришел к предсказанию и экспериментальному обнаружению совместно с нидерландским физиком Ван де Хаазом эффекта изменения механического момента тела при его намагничивании (эффект Эйнштейна-де Хааза).

Научные труды Эйнштейна сыграли определяющую роль в развитии современной физики. Специальная теория относительности и квантовая теория излучения явились основой квантовой электродинамики, квантовой теории поля, атомной и ядерной физики, физики элементарных частиц, квантовой электроники, релятивистской космологии и астрофизики. Эйнштейн изменил господствовавшие в физике со времен Ньютона механистические взгляды на пространство и время и привел к новой, материалистической картине окружающего мира. Особое значение идеи Эйнштейна имеют для развития современной теории динамической, расширяющейся Вселенной.

В работе Эйнштейна содержалась новая важная гипотеза, развивающая идеи Планка о квантованности энергии излучения. Эйнштейн уже считал, что свет и существует только в виде квантованных порций. Используя представления о частицах света — фотонах, легко объяснить все парадоксы явления и даже предсказать существование красной границы фотоэффекта, определяемой наименьшей энергией фотонов, достаточной для «выбивания» электронов. Теория Эйнштейна объясняла, как энергия фотона расходуется на ионизацию атома вещества, совершая работу отрыва электрона и переходя в его кинетическую энергию. Исследования фотоэффекта были одними из самых первых квантово-механических исследований. Они наглядно показали, что классические представления о волновой природе света нуждаются в пересмотре. В определенном смысле Эйнштейн возродил модель ньютоновской световой корпускулы. Однако тут же возвратились

вопросы интерференции и дифракции света, так и не решенные великим Ньютоном. Так возник парадокс под названием «квантовый корпускулярно-волновой дуализм», сыгравший впоследствии исключительную роль в истории современной физики.

Тут надо заметить, что, вообще говоря, последняя великая научная революция начала прошлого века имела не два, а как минимум четыре главных русла развития. Кроме теории относительности, распавшейся на специальную и общую части, возникла атомная физика, из которой несколько позже выделилась ядерная физика и физика элементарных частиц. Вот на атомной физике и прошла свою вторую «апробацию» теория квантов. 1913 год знаменит в истории атомной физики выходом в свет основополагающего исследования структуры атома, проведенного великим датским теоретиком Нильсом Хенриком Давидом Бором. Он рассмотрел один из вариантов «планетарного» строения атома (в центре массивное ядро — Солнце, вокруг вращаются электроны — планеты). К этому времени планетарная модель находилась в глухом тупике противоречий: дело в том, что, вращаясь с центростремительным ускорением вокруг атомного ядра, электрон по законам электродинамики должен мгновенно излучить энергию и упасть. Бор разрубил этот Гордеев узел своими знаменитыми постулатами поведения электронов в атоме.



Нильс Хенрик Давид Бор (1885–1962) — выдающийся датский физик. Создал квантовую теорию атома, а затем участвовал в разработке основ квантовой механики. Внес значительный вклад в развитие теории атомного ядра и ядерных реакций, процессов взаимодействия элементарных частиц со средой. В 1908 году он окончил университет в Копенгагене и стажировался в Кембридже у Дж. Дж. Томсона и в Манчестере у Э. Резерфорда. В 1916 году получил кафедру

теоретической физики в Копенгагене, а с 1920 года и до конца жизни руководил созданным им Институтом теоретической физики в Копенгагене, который теперь носит его имя. В 1943 году эмигрировал в США, где участвовал в работах по созданию атомной бомбы. Работая в Манчестере, он развивал планетарную модель атома Резерфорда, введя в нее идеи квантования энергии электронов в соответствии с правилами, названными постулатами Бора. В 1927 году Бор сформулировал принцип дополнительности, утверждающий, что для полного описания явлений микромира необходимо применять два взаимоисключающих («дополнительных») набора классических понятий. Например, дополнительными в квантовой механике являются пространственно-временная и энергетически-импульсная картины. Этот принцип получил очень широкое распространение. Его пытаются применять в психологии, биологии, этнографии, лингвистике и даже в литературе.

В 1936 году Бор сформулировал фундаментальное для ядерной физики представление о характере протекания ядерных реакций, предложив модель составного ядра. В 1939 году он совместно с Дж. Уилером развил теорию деления ядер — процесса, в котором происходит освобождение огромных количеств ядерной энергии. В 40–50-х годах Бор занимался проблемами взаимодействия элементарных частиц со средой. Он являлся членом Датского королевского научного общества (Академии наук), а также членом многих академий и научных обществ мира и лауреатом Нобелевской премии (1922).

Осмыслением полученных теоретических моделей и подкрепляющих их практических результатов в тот период занималась целая плеяда блестящих теоретиков начала прошлого столетия, однако лидировала все же копенгагенская научная школа Бора. Опираясь на различные физические эксперименты, Бор, его сотрудники и ученики много размышляли о природе физической реальности, дискутируя о своих выводах с Гейзенбергом, Шредингером и видным нидерландским физиком Паулем Эренфестом. В ходе этой плодотворной полемики Бор и выдвинул свои знаменитые постулаты, описывающие состояние атомных объектов и их взаимодействие.

Согласно им электрон может не излучать энергии, двигаясь по определенному набору орбит. Излучение же происходит только при переходе с одной орбиты на другие с квантованной частотой. При этом существует орбита с наименьшей из возможных энергий, на которой электрон может находиться в течение неограниченного периода времени. Боровские правила квантования атомных орбит объяснили не только удивительную стабильность окружающих нас атомов, но и тот удивительный факт, что атомы испускают свет строго определенных частот. Данные частоты Бор выразил через величины зарядов ядра и электрона, их массы и постоянную Планка. Таким образом, загадочные по своему смыслу правила квантования Бора описывали все главнейшие свойства атомов.

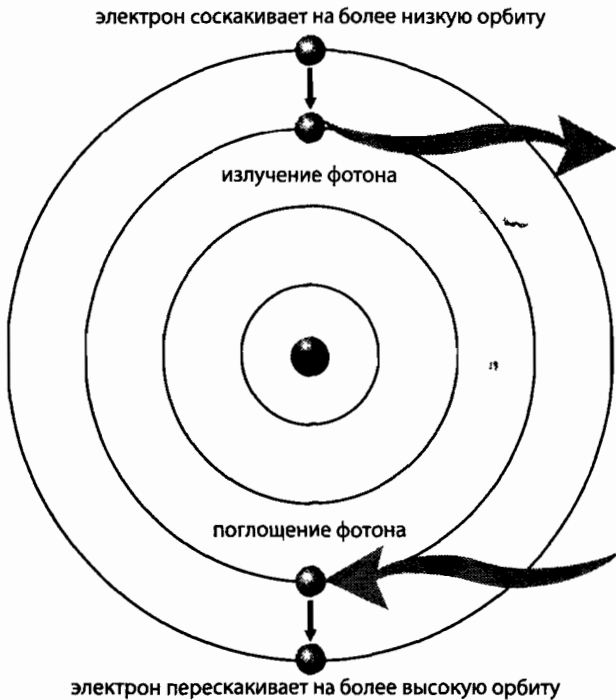


Рис. 16. Схема атома Бора

Согласно модели атома Бора электрон перескакивает на более высокую орбиту при поглощении фотона и соскакивает на более низкую при его излучении.

Большой вклад в дальнейшее развитие модели атома Бора внес видный немецкий физик Арнольд Иоганнес Вильгельм Зоммерфельд. В своих рассуждениях он считал, что, если атом подобен Солнечной системе, электроны, как и планеты, могут вращаться по эллипсам. При этом эллипсы с одинаковыми большими полуосями могли бы соответствовать электронам одинаковой энергии с одними и теми же *главными квантовыми числами*. Для характеристики вытянутости эллиптических орбит Зоммерфельд предложил последовательность целых орбитальных квантовых чисел. Оценивая вклад Зоммерфельда, Планк писал: *«После того как Зоммерфельд показал, что при надлежащем распространении закона распределения квантов на систему со многими степенями свободы, при условии учета изменяемости массы, требуемой теории относительности, получается волшебная формула, по которой спектры водорода и гелия должны были открыть загадку своей тонкой структуры, насколько она вообще могла быть определена измерениями, тончайшими из всех ныне возможных (достижение, вполне равноценное знаменитому открытию планеты Нептун, существование и элементы орбиты которой были вычислены Леверье раньше, чем ее видел человеческий взгляд), — после всего этого даже те, кто, видя количественные совпадения, которые при чрезвычайной точности спектроскопических измерений должны быть особенно убедительны, все еще склонялись считать все это игрой случая, в конце концов, вынуждены были оставить последние сомнения»*.

Сущность квантования атомных орбит несколько прояснилась спустя десятилетие, после того как французский физик, будущий нобелевский лауреат Луи де Бройль выдвинул предположение, что все микроскопические объекты — частицы, атомы и даже молекулы — обладают таким же корпускулярно-волновым дуализмом, что и свет.

Эта удивительная гипотеза была подтверждена уже через несколько лет в опытах по волновой дифракции электронов. Электрон действительно проявил свою волновую природу и вел себя, как некая «волна материи»!

Следующий по значению этап в развитии квантовой физики связан с именем опять-таки будущего нобелевского лауреата Эрвина Шредингера, сумевшего обобщить и развить гипотезу де Бройля. Борн писал впоследствии: «Что существует более выдающегося в теоретической физике, чем его первые шесть работ по волновой механике?». Именно в этих работах впервые появились и «уравнение Шредингера», и «представление Шредингера», и «функция Шредингера», которые затем вошли в золотой фонд физической науки.

В самом конце первой четверти прошлого века Шредингер прочитал в одной из научных работ Эйнштейна ряд положительных замечаний касательно теории «волн материи» де Бройля. Это привело его не только к поддержке теоретических построений французского коллеги, но и к развитию их до логического окончания. В своих рассуждениях он опирался на важный принцип классической физики под названием «оптико-механическая аналогия».

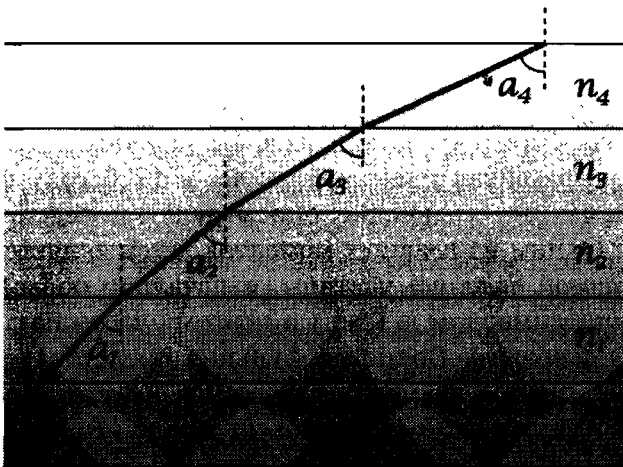


Рис. 17. Оптико-механическая аналогия

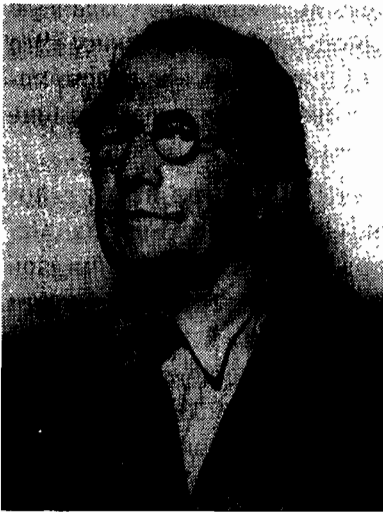
Гамильтон получил новый физический принцип, сводящийся к тому, что движение частицы по траектории можно представить как распространение луча света без учета его волновых свойств. Примером может служить траектория луча в плоском слое неоднородной оптической среды, где показатель преломления зависит только от высоты (α — угол преломления; n — показатель преломления (оптическая плотность среды)).

В 1834 году знаменитый астроном Уильям Роуан Гамильтон предположил, что формальная аналогия между траекториями движения частицы и светового луча может иметь строгое математическое обоснование. Гамильтон наглядно доказал, что в механике можно заменить траекторию частицы движением фронта определенной волны. Таким образом ему удалось записать уравнения движения механики в таком виде, что они полностью совпали с уравнениями геометрической оптики для луча света без учета его волновых свойств, получившие впоследствии название «оптико-механическая аналогия».

Шредингер прекрасно знал, что оптико-механическая аналогия Гамильтона справедлива лишь для геометрической оптики и пренебрегает волновыми параметрами излучения. Он сделал смелое предположение, что оптико-механическую аналогию можно распространить и на волновую среду в целом, так что любое движение частиц будет подобно распространению соответствующих волн.

Звезда Шредингера зажглась на научном небосклоне, когда он, развивая идеи де Бройля, в 1926 году получил свое знаменитое уравнение, описывавшее поведение волн-частиц. Одним из главных моментов здесь является понятие *волновой функции* частицы, изначально обозначаемой греческим символом ψ (пси) и поэтому часто называемой ψ (*пси*)-*функцией*. Волновая функция представляет собой наиболее полное возможное описание квантовых систем. Если в классической механике полное описание системы заключалось в задании местоположений и скоростей всех ее частиц и это описание позволяло описать все будущее

и прошлое системы, то в квантовой механике некоторые параметры описать принципиально невозможно. Согласно квантовой механике описание системы заканчивается на уровне волновой функции и только на уровне волновой функции возможно описать будущее и прошлое микроскопических объектов. Тут надо сразу же подчеркнуть, что физический смысл ψ -функции является одним из самых сложных вопросов квантовой теории. Окончательно, вернее общеудовлетворительно для всего сообщества физиков и философов, не решен он и в настоящее время.



Эрвин Шредингер (1887–1961) — австрийский физик-теоретик. Родился в Вене в семье богатого промышленника, питавшего интерес к наукам; получил хорошее домашнее образование. Учился в Венском университете, Шредингер до второго курса не посещал лекций по теоретической физике, однако докторскую диссертацию защитил именно по этой специальности. В годы Первой мировой войны служил офицером в артиллерийских войсках, но и тогда находил время для изучения новых

статей Альберта Эйнштейна. После войны, сменив должности в нескольких университетах, Шредингер обосновался в Цюрихе. Там он и разработал свою теорию волновой механики, которая и поныне является фундаментальной основой всей современной квантовой механики. В 1927 году занял должность заведующего кафедрой теоретической физики Берлинского университета, сменив на этом посту Макса Планка. Будучи последовательным антифашистом, Шредингер в 1933 году эмигрировал в Великобританию, стал профессором Оксфордского университета и в том же году получил Нобелевскую премию по физике. В 1936 году он вернулся в Австрию (Грац), где приступил к работе в местном университете.

После аншлюса Австрии в марте 1938 года Шредингер был уволен и возвратился в Оксфорд. Эймонт де Валера, премьер-министр Ирландии, в свое время был профессором математики в Оксфорде. Желая заполучить великого ученого к себе на родину, де Валера распорядился о строительстве специально под него Института фундаментальных исследований в Дублине. Пока институт строился, Шредингер принял приглашение прочитать курс лекций в Генте (Бельгия). Когда в 1939 году разразилась Вторая мировая война и Бельгия была оккупирована, Шредингеру с помощью де Валера, снабдившего ученого письмом о благонадежности, удалось выехать в Ирландию. В Дублине он оставался до 1956 года, после чего вернулся в Вену, чтобы возглавить специально созданную для него кафедру. В 1944 году Шредингер опубликовал книгу «Что такое жизнь?», которая сформировала мировоззрение целого поколения ученых-биофизиков и где он предсказал существование генетического кода, скрытого в молекулах жизни.

Свои теоретические построения Шредингер начал с попыток ввести в квантовую теорию атома классическое математическое описание волн. Первая попытка закончилась неудачей, поскольку скорости атомных электронов в теории Шредингера были близки к скорости света. А это в соответствии с теорией относительности привело к нереальному увеличению масс электронов. Много позже выяснилось, что причиной неудачи был неучет спина электрона — вращения вокруг собственной оси, о котором в то время было мало известно. При следующей попытке ученый выбрал достаточно небольшие скорости электронов, и она увенчалась успешным выводом знаменитого волнового уравнения Шредингера. Его решения и представляют собой те самые «волны материи» де Бройля.

К этому времени физики уже убедились, что постулат еще одного знаменитого немецкого физика, также будущего нобелевского лауреата Вернера Гейзенберга — *«не существует понятия траектории электрона в атоме»* — вполне справедлив, и электроны действительно не занимают определенного положения в атоме, тем более не вращаются по орбитам наподобие спутников планет или Солнца. Само по себе понятие

«движение» пришло из классической механики и часто мало применимо к квантовым объектам. Так, «движение» в атоме электрона не сопоставимо с какими-нибудь определенными траекториями, электрон просто рассредоточен в некотором объеме пространства. Именно эта не совсем ясная на первых порах идея и содержалась в знаменитом уравнении Шредингера. Впоследствии он рассказывал, что на помощь ему пришли физическая интуиция и догадливость и ему самому не вполне ясно, как это удалось сделать. Шредингер назвал свою теорию «волновой механикой». Решения его волнового уравнения полностью отвечают экспериментальным данным, и их всесторонний анализ вплоть до настоящего времени составляет одну из главных задач квантовой механики.

Практически одновременно со Шредингером новые принципы для описания и объяснения атомных спектров излучения нашел Гейзенберг. В своих поисках он обратился к созданию оригинального математического аппарата, однако другой выдающийся современник Планка и впоследствии также нобелевский лауреат Макс Борн в «математическом открытии» Гейзенберга сразу же узнал хорошо известный специалистам аппарат матричного исчисления. Так возник еще один раздел квантовой физики – матричная квантовая механика.

О математических понятиях чрезвычайно трудно рассказывать на пальцах, а часто это просто, невозможно без сильного искажения смысла. Наверное, это одна из причин наличия многочисленных «популярных», «занимательных» и «для всех» физик при практическом отсутствии чего-либо подобного в математике. Поэтому и мы ограничимся самыми общими замечаниями, а за подробностями отошлем самых любознательных читателей к приложению и книгам из списка литературы.

Математика имеет дело с величинами и символами, и каждый символ в ней подчиняется своим правилам. Одни законы математики применимы для арифметических действий с простыми числами и совершенно иные — в случае более сложных объектов, таких как отрицательные числа, комплексные

выражения и, конечно же, матрицы. Матрицы — это таблицы величин, для которых существуют свои, строго определенные операции сложения и умножения. Так, результат перемножения двух матриц зависит от порядка действия. Вообще говоря, это и является одним из главных отличий матриц от других математических формализмов. В популярной литературе смысл матриц часто объясняют с помощью «шахматного образа», в котором положение фигур описывается буквенно-численными параметрами по вертикали и горизонтали. Тут надо заметить, что законы царицы наук математики принципиально независимы от физики, да и всех иных наук. Математические закономерности описывают символическим образом все возможные причинно-следственные связи в нашей реальности. Разумеется, априори, без практического опыта, понять, какие именно связи соответствуют математическим образам, невозможно. Иногда это можно лишь угадать, что близко понятию «научная спекуляция».

Математические матрицы были известны задолго до начала квантовой эры в естествознании. Тем не менее для физиков-теоретиков было большой неожиданностью, что подобные весьма странные математические конструкции с необычными свойствами управляют квантовыми объектами.

Здесь произошел удивительный исторический казус, который американский физик и популяризатор Эдвард Кондон описывает так: *«Летом 25-го года, когда волновой механики еще не существовало, а матричная только-только появилась на свет, два геттингенских теоретика пошли на поклон к знаменитому Давиду Гильберту — признанному главе тамошних математиков. Бедствуя с матрицами, они захотели попросить помощи у мирового авторитета. Гильберт выслушал их и сказал в ответ нечто в высшей степени знаменательное: всякий раз, когда ему доводилось иметь дело с этими квадратными таблицами, они появлялись в расчетах «как своего рода побочный продукт» при решении волновых уравнений.*

— *Так что, если вы поищите волновое уравнение, которое приводит к таким матрицам, вам, вероятно, удастся легче справиться с ними, — закончил он.*

Оба теоретика решили, что услышали глупейший совет, ибо Гильберт просто не понял, о чем шла речь. Зато сам Гильберт потом с наслаждением смеялся, показывая им, что они могли бы открыть шредингеровскую волновую механику на шесть месяцев раньше ее автора, если бы повнимательней отнеслись к его, гильбертовым словам».

$$\begin{bmatrix} 1.20000000, & 0., & 2.121320343, & 0., & 1.22474872, & 0., & 0., & 0., & 0., & 0 \\ 0., & 5.250000000, & 0., & 6.123724358, & 0., & 2.738612788, & 0., & 0., & 0., & 0 \\ 2.121320343, & 0., & 12.25000000, & 0., & 12.12435566, & 0., & 4.743416493, & 0., & 0., & 0 \\ 0., & 6.123724358, & 0., & 22.25000000, & 0., & 20.12461180, & 7.245688375, & 0., & 0., & 0 \\ 1.22474872, & 0., & 12.12435566, & 0., & 35.25000000, & 0., & 30.12474067, & 7.245688375, & 0., & 0 \\ 0., & 2.738612788, & 0., & 20.124724358, & 0., & 51.25000000, & 0., & 13.74772708, & 0., & 0 \\ 0., & 0., & 4.743416493, & 0., & 30.124724358, & 0., & 70.25000000, & 0., & 56.74772779, & 0 \\ 0., & 0., & 0., & 7.245688375, & 0., & 42.124724354, & 0., & 92.25000000, & 0., & 72.12489166 \\ 0., & 0., & 0., & 0., & 10.24696476, & 0., & 56.124724379, & 0., & 117.25000000, & 0 \\ 0., & 0., & 0., & 0., & 0., & 13.74772708, & 0., & 72.124724166, & 0., & 145.25000000 \end{bmatrix}$$

Рис. 18. Численная матрица для негармонического осциллятора (произвольно колеблющегося маятника)

В матричном представлении каждая физическая величина имеет два значка — индексы, определяющие начальное и конечное состояния системы. Так, координате соответствует совокупность матричных элементов, составляющих матрицу в виде прямоугольной таблицы, где два индекса определяют соответствующие состояния системы. Гейзенберг получил матричные уравнения, из которых, в принципе, можно найти все наблюдаемые величины. Однако в своей первоначальной форме матричная механика Гейзенберга казалась неоправданно сложной по сравнению с волновой механикой Шредингера. Впрочем, практически сразу же Шредингер показал полную эквивалентность данных подходов. Так матричная и волновая механики объединились в квантовую.

Этому предшествовала оригинальная ситуация, когда к окончанию первой четверти двадцатого века на физической арене начали борьбу за приоритет описания микромира

сразу две квантовые теории с различными исходными концепциями. В матричной механике Гейзенберг при поддержке Бора доказывал корпускулярную природу электронов, отражая это в своих системах матриц. Совершенно иной, на первый взгляд, подход предлагал Шредингер при поддержке де Бройля, отражая волновую природу электрона в своем уравнении. Подход Гейзенберга основывался на оперировании только наблюдаемыми величинами, и он, в принципе, не рассматривал понятия каких-либо атомных траекторий. Со своей стороны Шредингер тоже избегал «планетарного» смысла орбит электронов вокруг «солнечного» ядра и ограничивался абстрактным образом таинственной ψ -функции в своем уравнении. Великий судья всех физических споров — опыт — также оказался в совершенно беспомощном положении, ведь часть экспериментов обнаруживала у электрона корпускулярные, а часть — волновые свойства! Это был период бурных дебатов, разделивших тогда еще совсем немногочисленных физиков на два непримиримых лагеря: приверженцев пионерской матричной механики и сторонников математически прозрачной волновой квантовой физики. В этой непростой ситуации главным парламентом в 1927 году и выступил Шредингер, убедительно продемонстрировав скептикам и своим сторонникам, что обе квантовые теории в своей математической сущности едины. Отсюда сразу же следовал и основной вывод о физической эквивалентности двух механик в описании Боровского атома. Иначе говоря, представления матричной теории о корпускулярном образе электрона так же достоверны, как и представления волновой квантовой механики о волнах электронов.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

В тридцатых годах среди физиков-теоретиков возникло понятие квантовых грифонов, или кентавров, для микроскопических объектов. Для них представления матричной теории о корпускулярном образе, скажем, электрона, так же достоверны, как и представления волновой квантовой механики о волнах электронов.

Можно считать, что на этом первый период развития квантовой физики, в общем, закончился. На следующем этапе необходимо было решить главный вопрос о том, что же представляет собой главный инструмент новой теории — волновая ψ -функция. В квантовой теории волновая функция служит для описания объектов, заменяя множество механических физических параметров, включая координату, скорость, энергию, импульс и т. п. Если исходить из идеи волновой функции, то микрообъект в квантовой механике оказывается как бы с распределенными значениями этих параметров и эта «параметрическая неопределенность» следует из самого характера волновой функции.

Здесь имеется много аналогий с теорией волновых явлений интерференции и дифракции, которая была разработана еще задолго до описания природы света с помощью электромагнитных уравнений Максвелла. Изначально считалось, что источник света испускает некие волны, а интенсивность света пропорциональна квадрату параметра, определяющего волновой характер процесса. Это полностью укладывается в современную квантовую парадигму, где волновая функция частицы не связана с физическими полями, а представляет собой формальную запись результирующей вероятности наблюдаемого процесса.

Загадочную волновую функцию можно представить себе как некоторую «волну вероятности»: например, вероятность того, что квантовая частица находится в точке с заданными координатами, равна квадрату ее волновой функции, аргументом которой является координата. Соответственно, вероятность того, что частица имеет определенный импульс, равна квадрату волновой функции с импульсом в качестве аргумента. Поэтому у квантовой частицы нет определенной координаты или импульса — они принимают то или другое значение лишь с какой-то вероятностью. Однако измерение этих величин сразу же делает их определенными: так, пропустив частицу через щель, можно утверждать, что ее координаты равны координатам отверстия. При этом волновая функция частицы оказывается ненулевой только в месте либо прохож-

дения через щель, либо расположения щели. Подобная процедура измерения носит название «коллапсионной редукции волновой функции» — она как бы «схлопывается», коллапсирует, сокращая (редуцируя) свои значения к «классикомеханическим» координатам в месте регистрации.

Смысл квантовой картины Мира и классические механические представления впервые удалось связать видному теоретику Паулю Эренфесту. Суть его исследований можно образно выразить в следующем: «Пусть мы не можем представить себе квантовых движений. Пусть неясно, как понимать координату и импульс электрона. Но точно известно, что средние значения квантовых величин подчиняются уравнениям классической механики». В этом и состоит основное содержание принципа соответствия, который в 1918 году ввел Бор и в 1927 году доказал Эренфест. Тогда же Бор сформулировал свой философский принцип дополнительности, тесно связанный с еще одним событием этого очень значимого для физики года. Вернер Гейзенберг открыл еще один очень важный принцип квантовой теории — соотношение неопределенности. Долгое время, анализируя разнообразные теоретические схемы по одновременному определению скорости и координат микрочастиц, он пришел к совершенно поразительному с точки зрения классической физики выводу: точность измерения одного параметра неразрывно связана с точностью измерения другого!

Простейшим примером может быть уточнение координаты того же электрона. Для того чтобы точнее определить его место в пространстве, необходимо взять как можно более короткую электромагнитную волну, «осветить» его и при этом посмотреть в некий сверхсильный «микроскоп». Из оптики известно, что подобный метод определения местоположения микрочастицы дает погрешность порядка длины волны использованного света. Следовательно, для уточнения координаты можно было бы максимально уменьшить длину волны освещения, но при этом скорость электрона становится неопределенной из-за эффекта отдачи при взаимодействии с волной. Чем короче волна, тем выше ее энергия, тем больше

эффект отдачи. Понизим энергию — возрастет длина и неопределенными станут пространственные координаты...

Соотношение Гейзенберга гениально просто: $\Delta q \Delta p \geq \hbar$, где Δq — неопределенность координаты, Δp — неопределенность импульса, \hbar — постоянная Планка.

Принцип неопределенности Гейзенберга касается и других характеристик элементарных частиц. Еще одна такая взаимосвязанная пара — это энергия и время протекания квантовых процессов. Чем быстрее проходит процесс, тем более неопределенно количество энергии, задействованной в нем, и наоборот — точно охарактеризовать энергию можно только для процесса достаточной продолжительности. Именно здесь заложено зерно возможной фундаментальной дискретности потока времени и существования атомов времени — хроноквантов.

Бор считал, что принцип неопределенности отлично иллюстрирует его принцип дополнительности. Ведь те же координаты и импульсы одновременно ограничивают и дополняют друг друга.

Подводя итоги историческим аспектам и параллелям развития квантовой механики, необходимо заметить, что ее основные идеи, сформулированные Бором, Шредингером, де Бройлем, Эренфестом и Гейзенбергом, дали не только математический аппарат расчета энергетических состояний атомов и молекул. Стандартная формальная модель для вычисления матричных элементов межорбитальных переходов была не только незамедлительно востребована экспериментальной физикой, но и содержала определенный философский подтекст. На первое место при анализе квантовых явлений вышла вероятность протекания того или иного процесса локализации микрообъекта или же его делокализации.

Итак, бурный период становления квантовой физики завершился созданием стандартной теории, основанной на копенгагенской интерпретации и позволяющей описывать поведение микрообъектов на основании решений уравнения Шредингера и включающей в себя ряд принципов: неопре-

деленности, дополнительности, соответствия и пр. На стандартной теории основывается вся атомная и ядерная физика, ее использует микроэлектроника и астрофизика, с ее помощью созданы сверхминиатюрные радиоэлектронные микрочипы и гигантские лазеры. Однако на вопрос, почему именно так, вероятностным образом, устроена физика глубин мироздания, она ответа не дает. Ее основу составляют интуитивно угаданные природные закономерности и их общепризнанное обоснование. Ответить на поставленный вопрос — дело науки будущего.

Все это, конечно, не означает, что физики с самого начала не пытались объяснить изначальную природу квантовых явлений. Все эти попытки, в конечном итоге, привели к двум обширным направлениям исследований. К первому относятся построения для единичных микрочастиц, например, одного-единственного электрона, летящего в вакууме. А ко второму — моделирование групп, то есть ансамблей взаимодействующих между собой микрочастиц (к примеру; поток электронов в луче осциллографа или кинескопе телевизора), проявляющих себя статистическим образом наподобие того, как давление газа проявляет себя статистически бесчисленными ударами молекул о стенки сосуда.

Так, вышеупомянутая копенгагенская интерпретация, иногда называемая ортодоксальной, основывается на теории одной микрочастицы, волновая ψ -функция которой максимально полно описывает физическую реальность микромира. Исторически копенгагенская интерпретация квантовой механики была тесно связана с квантовой теорией атома Бора.

В противоположность ортодоксальным трактовкам квантовой механики ее статистические, или ансамблевые, интерпретации предполагают, что каждая микрочастица ансамбля (например, электрон в пучке) характеризуется своими, присущими именно ей значениями физических величин, обнаруживаемых при измерении. При этом каждая из частиц ансамбля, конечно же, имеет свои индивидуальные «черты характера» вне всякой зависимости от того, проводится ли в данный момент соответствующее измерение или нет. Уже

это в корне противоречит одному из главных тезисов копенгагенской школы Бора о том, что до измерения говорить о параметрах микрочастицы бессмысленно.



Рис. 19. Нильс Бор и Альберт Эйнштейн — полемика гениев

У истоков ансамблевой интерпретации стоял сам Альберт Эйнштейн, который в разгоревшейся полемике с Бором широко использовал свой любимый метод мысленных экспериментов. Сама суть полемики Бора — Эйнштейна свелась к принципам устройства окружающего мироздания. Может ли объект быть принципиально непредсказуемым в своем поведении? Или его непредсказуемость — лишь недостаток нашего знания об устройстве Вселенной на «сверхквантовом» уровне? Тогда какие новые параметры микрообъектов здесь могут скрываться?

Можно сказать, что точка зрения Бора с самого начала превалировала в «официальной физике», однако всегда находились «еретики», подобные Дэвиду Бому и Хьюго Эверетту, которые предлагали свои версии того, что лежит за границей

квантового мира, внося изрядный переполох и сумятицу в общество теоретиков. Мы, конечно же, еще не раз вернемся к этому великому противостоянию гениальных ученых, а пока отметим лишь две любопытные реплики в их споре. Эйнштейн: «Я не верю, что бог бросает кости...», Бор: «Альберт, не стоит указывать богу, что ему делать...».

1.3. Парадоксальная реальность микромира

«Философия успокоения Гейзенберга — Бора (или религия?) так тонко придумана, что предоставляет верующему до поры до времени мягкую подушку, с которой его не так легко спугнуть. Пусть спит... Большой первоначальный успех квантовой теории не может заставить меня поверить в лежащую в основе всего игру в кости».

Альберт Эйнштейн

«Мы многократно повторяли, что уравнения квантовой механики отличны от уравнений классической механики. Поэтому движение квантовых объектов ни описать, ни представить в классических понятиях и образах нельзя. Примерно так же, как нельзя отметить на глобусе все движения пассажира, пересекающего на пароходе Атлантику. Однако как бы волны ни качали корабль и чем бы ни занимался при этом пассажир, в среднем он все-таки перемещается в соответствии с заданным курсом».

Пауль Эренфест

«Открытие принципа неопределенности показало, что человек в процессе познания природы может оторваться

от своего воображения, он может открыть и осознать даже то, что ему не под силу представить».

Лев Давидович Ландау

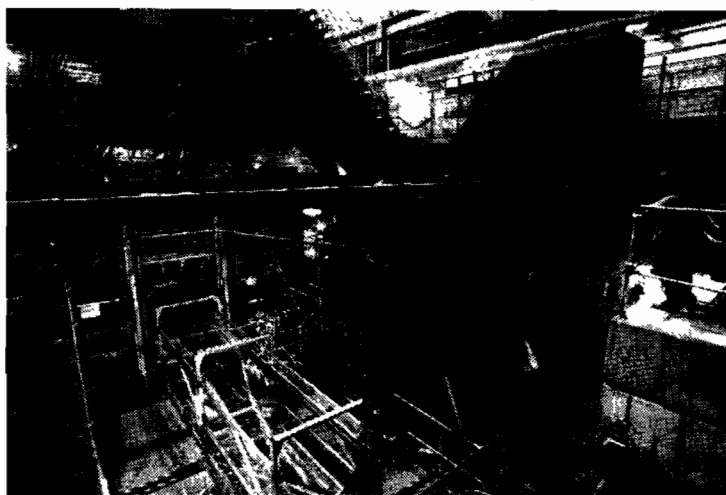


Рис. 20. Монтаж сверхмощного ускорителя элементарных частиц (БАК, ЦЕРН, Швейцария)

Международное научное сообщество вкладывает гигантские средства и силы в строительство новых ускорителей, призванных прояснить квантовые закономерности поведения микрообъектов при сверхвысоких энергиях.

Итак, в процессе становления квантовой теории возникло новое понимание реальности микромира, где закон причинности сводился к изменениям волновой функции согласно уравнению Шредингера. Обыденное понятие причинности, сводящееся к поиску истоков любого события, вполне понятно без всяких объяснений, но малопригодно в науке. Применение принципа причинности в науке требует наличия достаточно строгих закономерностей, определяющих последовательность событий во времени. К примеру, в классической физике логика поведения механических тел определяется уравнениями движения Ньютона, предсказывающими траекторию перемещения объекта. Именно подобная методология объяснения и предсказания хода физических процес-

сов составляет основу причинного описания в классической науке. Однозначность и полная определенность причинности классической физики носит название *детерминизма*.

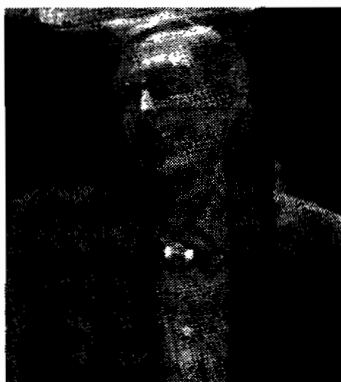
Классический детерминизм отсутствует в квантовой физике и его место занимает квантово-механическая причинность, определяемая решениями уравнения Шредингера. Применяемые в квантовой механике понятия статистической причинности и вероятностной закономерности несовместимы в классическом смысле, однако в физике микромира они наиболее полно объясняют специфику квантовых процессов. Если вспомнить смысл универсального принципа дополнительности Бора, то окажется, что логического парадокса совместного использования понятий «случайность» и «закономерность» нет, поскольку они взаимодополняемы. По принципу дополнительности оба понятия равно необходимы для определения новой «квантово-механической причинности», причем ее смысл более обширен, чем простая сумма исходных понятий.

Естественно, привыкнуть к дикой красоте квантовой логики непросто, ведь обыденный смысл таких понятий, как «вероятность», «достоверность», «закономерность», «случайность», так или иначе связанных с причинностью событий, несколько иной, чем в квантовом мире. Смысл классического детерминизма состоит в том, что одинаковые опыты, проводимые в одинаковых условиях, всегда дают один и тот же результат. Квантово-механическая причинность даже в идеально подобранных условиях определяет лишь вероятность исхода любого явления в микромире, однако она же вполне достоверно предсказывает общую картину течения процесса при статистически достаточном (просто большом) количестве опытов.

С помощью понятия квантово-механической вероятности и принципа дополнительности можно непротиворечиво строить парные понятия: причинность — случайность, волна — частица, непрерывность — дискретность, явление — наблюдение. Тем самым можно считать, что понятие квантовой вероятности завершило построение логической основы кван-

товой теории. Естественно, что по мере формирования квантового образа мироздания все чаще стал возникать принципиальный вопрос: насколько полно описывают объективную реальность парадоксальные законы микромира?

В роли своеобразного «адвоката дьявола» по отношению к идеологии квантовой теории в свое время выступил сам создатель релятивистской физики Альберт Эйнштейн. Он долгие годы вел полемику с другим великим физиком двадцатого столетия Нильсом Бором. В то время опытная база квантовой механики только складывалась и в своих спорах два великих теоретика активно использовали мысленные эксперименты. Один из них показался Эйнштейну настолько удачным, что в дальнейшем он вместе с учениками Подольским и Розеном посвятил ему отдельную статью «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?». Так возник знаменитый парадокс Эйнштейна — Подольского — Розена (ЭПР-парадокс), породивший дискуссию о законченности квантовой теории и полноте описания микросистем в ней. Эта полемика продолжается вплоть до настоящего времени. Так, сейчас в ней участвуют два известных теоретика: Роджер Пенроуз в роли Эйнштейна и Стивен Хокинг в роли Бора.



Стивен Уильям Хокинг, родился 8 января 1942 года в Оксфорде, Великобритания. Благодаря своим необычным теориям и научно-популярным книгам он является одним из самых известных физиков-теоретиков современности. В 1962 году Хокинг окончил Оксфордский университет и начал занятия теоретической физикой. Тогда же у Хокинга стали проявляться признаки бокового

амиотрофического склероза, которые привели к параличу, но, несмотря на это, он женился и сейчас у него дочь и два сына. В 1974 году Хокинг стал членом Лондонского Королевского обще-

ства (Академии наук Великобритании). После операции на горле в 1985 году он потерял способность говорить. Друзья подарили ему синтезатор речи, который был установлен на его кресле-коляске и с помощью которого Хокинг может общаться с людьми. Сейчас он занимает должность профессора математики в Кембриджском университете — должность, которую три столетия назад занимал Исаак Ньютон. Несмотря на тяжелую болезнь, он ведет активную жизнь. В январе 2007 года он совершил полет в невесомости на специальном самолете и настойчиво планирует побывать в космосе.

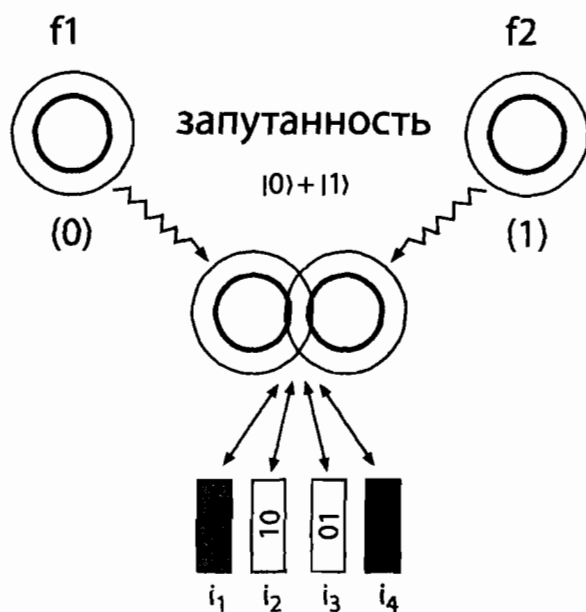


Рис. 21. Квантовая запутанность

Возьмем две микрочастицы и назовем их для образности А — «Алиса» и Б — «Боб». Пусть данные квантовые объекты рождаются в одной точке, а затем разлетаются в разные стороны. В момент рождения ни у одной из частиц не определены координата и импульс, но в силу закона сохранения импульса сумма их импульсов в любой последу-

ющий момент времени равна нулю (как до рождения частиц). Теперь любое измерение координатного местоположения Алисы приведет к коллапсу ее волновой функции и в тот же момент «схлопнется» и волновая функция Боба, поскольку его координаты автоматически уточняются через данные Алисы! Если волновая функция полностью характеризует частицу, то значит, с Бобом действительно что-то произойдет, а ведь измерение проводилось над Алисой, которая могла быть в этот момент очень далеко от Боба, даже на другом краю Метагалактики! Это напоминает мистическую магию: Алиса дергает за невидимую ниточку и где-то во Вселенной возникает улыбающийся Боб! В этом и заключается суть ЭПР-парадокса.

Так Эйнштейн и его соавторы в результате блестящего умозрительного анализа сделали удивительный вывод:

«...поскольку эти системы уже не взаимодействуют, то в результате каких бы то ни было операций на первой системе во второй системе уже не может получиться никаких реальных изменений...».

При анализе эксперимента Эйнштейн, Подольский и Розен полагали, что два различных измерения одной части квантовой системы не могут привести к различным состояниям второй составляющей в силу отсутствия взаимодействия между ними. Это гипотетическое свойство квантовых систем получило впоследствии название *локальности*. Альтернативную точку зрения, согласно которой «в результате двух различных измерений, произведенных над первой системой, вторая система может оказаться в двух различных состояниях...», исследователи отвергли.

Здесь необходимо вспомнить об еще одном фундаментальном квантовом принципе — *соотношении неопределенностей*. Согласно данному принципу мы не можем проводить парные измерения определенных физических параметров. Например, невозможно одновременно измерить координату и импульс микрообъекта. В научно-популярной литературе это часто объясняется взаимным влиянием дуальных измерений. Существуют свидетельства, что подобной аргументацией

вначале пользовался сам автор принципа неопределенности, один из создателей квантовой механики Вернер Гейзенберг. Однако впоследствии он развил и дополнил теорию, так что влияние координатного измерения на импульс стало несущественным.

Это может быть показано следующим образом: рассмотрим произвольный ансамбль невзаимодействующих частиц, находящихся в одном и том же состоянии; для каждой частицы в ансамбле мы измеряем либо импульс, либо координату, но не обе величины. В результате измерения мы обязательно получим, что все значения параметров распределены с некоторой вероятностью и для них верно отношение неопределенности.

Одним из первых с обширными комментариями к работе Эйнштейна выступил Нильс Бор. Вскоре после выхода знаменитой статьи, содержащей описание ЭПР-парадокса, Бор на страницах печати громко заявил, что мысленный эксперимент ЭПР не только не отменяет соотношения неопределенностей, но и не создает никаких препятствий для применения квантовой механики.

Полемику двух великих физиков можно проиллюстрировать тривиальным мысленным экспериментом с двумя микрочастицами. Пусть опыт происходит на ускорителе элементарных частиц Харьковского физико-технического института (здесь впервые в СССР был расщеплен атом). В ходе эксперимента коллектив украинских физиков измеряет импульсы двух частиц и проводит их столкновение на встречных пучках таким образом, что одна из частиц попадает тут же на детекторы, а вторая летит в подмосковный Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна). Если харьковские ученые получают определенное значение импульса частицы на своих детекторах, то они тут же смогут рассчитать импульс второй частицы, позвонить своим российским коллегам и сделать впечатляющее предсказание о результатах их опытов. Из этого следует парадоксальный вывод, что волновая функция «русской» частицы определилась

в результате «украинских» измерений. Однако если убрать из сложившейся ситуации внешний налет сенсационности, то окажется, что мы имеем дело с обычным случаем изменения вероятности предсказаний по мере получения новых информационных посылок.

Давайте попробуем задаться элементарным вопросом: какова вероятность того, что дубнинские ученые из ОИЯИ определят то или иное значение импульса микрообъекта при условии, что уже известен результат харьковских физиков?

Для ответа на этот вопрос нужно было бы проанализировать результаты всех многократных подмосковных и харьковских измерений импульса. При этом надо отобрать только те случаи, когда украинские физики получали значения, соответствующие результату их российских коллег. Вполне естественно, что после такой селекции данных все дубнинские измерения будут соответствовать вполне определенному значению импульса частицы. Получается, что, по своей сути, наш украинско-российский эксперимент лишь в неисчислимый раз подтвердил закон сохранения импульса! Разумеется, мы могли бы сконструировать и гораздо более сложную схему мысленного опыта с участием еще и американских ядерщиков из лаборатории им. Ферми (Беркли, США). Однако в любом случае мы пришли бы к конечному выводу, что все влияния измерений в одной из частей квантовой системы (такой, как рассмотренная пара микрочастиц) на результаты измерений в другой ее части необходимо рассматривать именно как отбор результатов, соответствующих определенному условию. Все это хорошо известно из математической статистики, где вероятность событий при выполнении некоторого условия так и называется «условная вероятность». Там введение набора дополнительных условий каждый раз определяет иную последовательность математических событий. У физиков при этом изменяются вероятности измерений и, естественно, изменяется волновая функция квантовой системы.

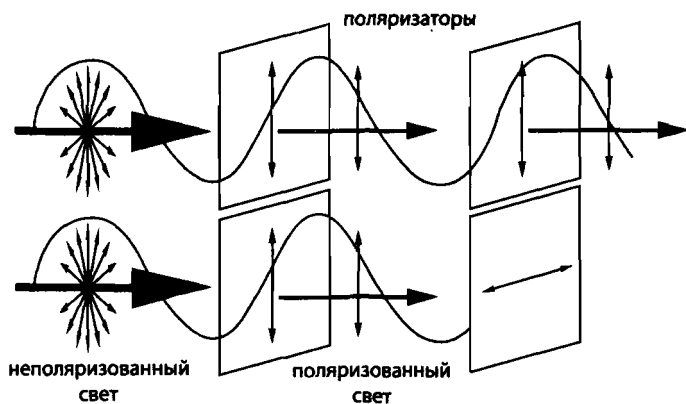


Рис. 22. Поляризация электромагнитного излучения

Электромагнитную волну можно упростить до колеблющихся перпендикулярно магнитных и электрических компонентов. Это хорошо демонстрирует пример квантов электромагнитного излучения — фотонов. Поляризующая пленка или специальный объектив фотоаппарата, поляриод, пропускает весь свет, если он поляризован вдоль штриховки на пленке, и задерживает весь свет, если его поляризация перпендикулярна штриховке.

Все закономерности условной вероятности проявления того или иного явления постоянно обнаруживаются и в повседневной действительности. К примеру, какова вероятность поступления абитуриента на физический факультет университета? Она одна для среднего школьника, уступившего с неохотой настояниям родителей, и совершенно иная для медалиста, видящего себя в будущем исследователем ЭПР-парадокса...

Крупнейший советский физик-теоретик, академик А. Б. Мигдал писал:

«Какова вероятность высказать неверное суждение в квантовой механике? Она резко увеличится, если добавить: не подумав. Вот довольно распространенное утверждение:

как бы далеко ни разошлись две подсистемы, они остаются жестко связанными. Эта и есть та физическая бессмыслица, против которой правильно возражали Эйнштейн, Подольский и Розен. А разгадка такова: подсистемы на большом расстоянии, разумеется, физически никак не связаны, они независимы. Но условная вероятность для одной из них, разумеется, зависит от того, какое состояние второй подсистемы мы отбираем. И явление это, как мы видим, не специально квантовое, а есть и в классической физике, и даже в повседневной жизни. Предсказание скачком изменяется при изменении условий отбора событий».

В свое время, проанализировав многие мысленные эксперименты, Бор высказал соображение, что ЭПР-парадокс есть результат предположения о локальности квантовых систем. По мысли Бора, именно отказ от локальности и признание существования связи между разделившимися частями целостной квантовой системы устраняет парадокс ЭПР.

Результаты измерения квантовой системы зависят от ее состояния и устройства измерительных приборов. Так, в полном соответствии с принципами волновой квантовой механики ЭПР-коррелированные частицы могут характеризоваться одной общей волновой функцией.

Следуя Бору, можно предположить, что в момент измерения одной частицы происходит изменение общей волновой функции двухчастичной системы как квантового объекта из коррелированных подсистем.

В заключение полемики Бор подытожил, что Эйнштейн вправе считать квантовую теорию неполной, но ее практическая эффективность от этого не уменьшается. С Бором согласились многие теоретики, однако противоположной точки зрения придерживались научные школы во главе со Шредингером и видным советским физиком, академиком В. А. Фоком. Не в полной мере были согласны с выводами, следующими из копенгагенской интерпретации, и выдающиеся авторитеты в области атомной физики, советские академики А. С. Компанеев и Б. Б. Кадомцев.

Парадокс ЭПР имел большое значение для развития квантовой теории. Прежде всего он стимулировал интерес к коррелированным состояниям квантовых частиц. Когда такие состояния были обнаружены экспериментально для фотонов, началось бурное развитие новой области в физике — квантовой оптики. Кроме того, эксперименты с коррелированными парами квантовых частиц (их также называют ЭПР-парами) позволили проверить, действительно ли вероятностное поведение характерно для отдельной квантовой частицы или это свойство совокупности частиц.

Что же получили физики в результате многочисленных экспериментальных исследований различных сторон ЭПР-парадокса и кто же оказался прав в историческом споре Эйнштейна и Бора?

Увы, однозначного ответа, который можно было бы записать в анналы общепризнанной «официальной» науки, еще не получено. Вообще-то говоря, чаша весов давно уже явно склоняется в пользу школы Бора...

Лучше всего тут было бы предоставить слово видному российскому специалисту профессору МФТИ А. И. Липкину:

«Принципиальная разница в месте, занимаемом измерением в квантовой механике — миф, созданный «копенгагенцами» в ходе попыток ответить на критику Эйнштейна. Отцами этого мифа являются Бор и фон Нейман (один из создателей математического аппарата квантовой физики — О. Ф.). Бор рассматривает измерение не как особую процедуру (процедуру сравнения с эталоном), а как физическое явление, как взаимодействие «между предметом и средством наблюдения»: «Каждое наблюдение этих явлений связано со взаимодействием, которым нельзя пренебречь...» К этому Бор добавляет неадекватное прочтение «соотношения неопределенностей» Гейзенберга. Применяя его к измерению, он утверждает существование «неизбежного влияния на атомные явления при их наблюдении...» (то есть, измеряя одну величину, мы возмущаем другую). Однако о чем было сказано выше, «соотношение неопределенностей» Гейзенберга, выте-

кающее из постулатов Шредингера и Бора, описывает свой-ства состояния квантовой системы, а не измерение».

Тут нам надо познакомиться еще с несколькими ключевыми словами из очень странного и необычного языка квантовой физики. Вспомним, что вероятностный характер квантовых микросистем не сводится только к классической неопределенности неполного знания параметров объекта. Поэтому для описания квантовых систем используется специальное понятие — *состояние*. Иначе говоря, можно считать, что если квантовый объект находится в определенном состоянии, то ему можно сопоставить некоторый каталог Шредингера, включающий уже известную нам волновую функцию и новые понятия — вектор состояния и матрицу плотности. Что же такое вектор состояния и матрица плотности?

Вектор состояния является одним из основных понятий квантовой физики, представляя собой математический вектор, задание которого в определенный момент времени полностью определяет состояние квантовой системы, а если известно, как она взаимодействует со своим окружением, то и ее эволюцию в дальнейшем. Понятие вектора, или амплитуды состояния, было предложено Дираком. То, что амплитуда состояния представляет собой вектор, следует из еще одного важнейшего положения принципа квантовой теории — принципа суперпозиции состояний. Состояние квантовой системы, которое можно описать вектором состояния, называется *чистым состоянием* в отличие от более широкого класса *смешанных состояний*, описываемых *матрицами плотности*. В свою очередь, *матрица плотности* (или *оператор*, то есть математический элемент, переводящий одну величину в другую) представляет собой один из способов описания состояния квантовой системы. В отличие от волновой функции, пригодной лишь для описания чистых состояний, оператор плотности в равной мере может задавать как чистые, так и смешанные состояния.

Каталог Шредингера является своеобразным «паспортом» квантовой системы, содержащим статистическую информацию о функциях распределения тех или иных параметров, полученных в результате ансамбля измерений.

В наше время редкий учебник по квантовой механике обходится без более или менее глубокого разбора ЭПР-парадокса. Встретился он на университетском экзамене у выдающегося советского физика А. И. Ахиезера и автору этих строк. Александр Ильич, несомненно, был крупнейшим педагогом, оставившим после себя не только фундаментальные курсы физики, по которым учился и современное поколение будущих ученых, но и блестящую школу физиков-теоретиков. На экзаменах же он иногда любил возиться с нерадивыми студиязусами, задавая им каверзные вопросы. Так, после честного пересказа соответствующего параграфа учебника он остановил мое торопливое словоизвержение и задал один-единственный вопрос: «А если разнести частицы на максимально возможное в нашей реальной Вселенной расстояние?» И, слегка усмехнувшись, жестом остановил готовящийся сорваться у меня с языка ответ: «Не торопитесь...» Да, как впоследствии оказалось, торопиться с ответом не следовало: у данного «элементарного» вопроса имелся многоуровневый подтекст. Тогда же я ничего толком так и не смог ответить, заслужив еще одну усмешку Александра Ильича и твердую четверку по квантам.

1.4. Квантовые коты и кошки

«Ящик представляет собой гладкостенный эллипсоид шесть на три метра в поперечнике, который я при всем желании не покину до самой смерти... В корпусе спрятана капсула с отравляющим газом. Она вмонтирована в воздушный фильтр, и всякая попытка добраться до нее или проделать дыру в корпусе приведет к тому, что внутрь начнет поступать цианид. Кроме того, в окружающем статико-динамическом поле находятся счетчик радиации, изотопный элемент и таймер. Мне не суждено узнать, когда именно таймер включит счетчик, когда крохотный изотоп лишится свинцовой оболочки, когда в камеру устремится поток частиц... Но в ту секунду, когда это случится, я пойму, что счетчик заработал, и успею еще ощутить перед смертью запах горького миндаля.»

Дэн Симмонс «Песни Эндимиона»

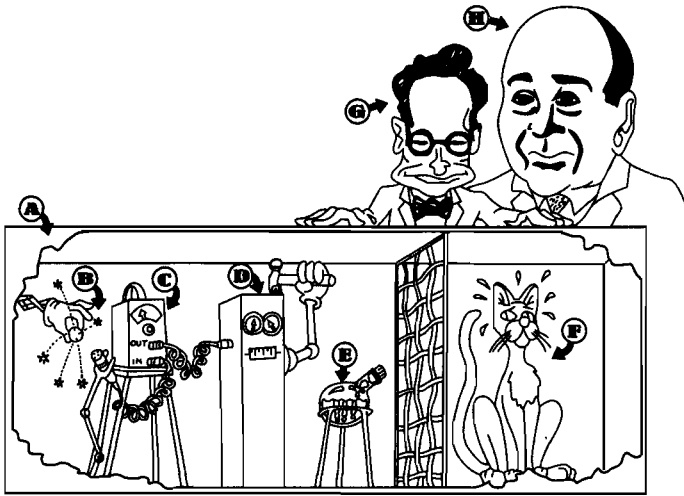


Рис. 23. Мысленный эксперимент с котом Шредингера.
Иллюстрация из книги Д. Боба «Квантовая физика»

Герметичный ящик (А) содержит радиоактивный источник (В), который равновероятно вызывает срабатывание счетчика радиации Гейгера (С), запускающего механизм (D), разбивающий колбу с ядом (Е), убивающим кота (F). Наблюдатель (G) (напоминающий Гейзенберга) должен открыть ящик для того, чтобы вызвать «схлопывание» вектора квантового состояния системы в одно из двух возможных состояний. Второму наблюдателю (H) (напоминающему Шредингера), возможно, требуется сколлапсировать вектор состояния большей системы, содержащей первого наблюдателя и установку (А–F). Жизнь кота зависит от того, как поведет себя частица — как корпускула или как волна: в первом случае счетчик включается, во втором — нет. По законам квантовой механики частица может находиться в суперпозиции, то есть одновременно в двух когерентных состояниях, и, соответственно, подопытный кот в закрытом ящике одновременно и жив, и мертв. Однако стоит наблюдателю открыть «черный кошачий ящик», и он увидит либо мертвого, либо живого кота, что вполне соответствует нашим логическим представлениям о природе наблюдаемых явлений.

Чтобы обратить внимание на необычный характер квантовых суперпозиционных состояний, Шредингер сконструировал парадоксальный мысленный эксперимент, противоречащий нашему обыденному восприятию окружающей реальности. Так, он предположил, что в замкнутом пространстве (ящике) находится сосуд с ядом, который может быть разбит механизмом, управляемым радиоактивным распадом. Внутри ящика-клетки находится кот (в оригинале статьи Шредингера это была кошка, но традиция превратила ее в кота), который является либо живым, либо мертвым в зависимости от радиоактивного распада. Отметим, что процесс измерения как взаимодействия с макроскопическими измерительными приборами является принципиально необратимым, в результате состояние измеряемого объекта претерпевает *редукцию*.

Явление редукции (схлопывания, коллапса) волновой функции, несмотря на внешнюю простоту (к примеру, на некую поверхность экрана падала волна и в момент соприкосновения превратилась в частицу), является одним из наиболее «болевых узлов» современной физики. Многие видные физики вообще отказывают в праве на существование этому явлению, возражая против использования бесструктурных понятий. Действительно, если подходить к явлению редукции волновой функции как к обычному физическому явлению, то имеет смысл разбить его на этапы с характеристическими временами, присущими квантовым измерениям. Однако приверженцы «редукционного подхода», как правило, всячески избегают вопроса о внутренней структурной динамике процесса, мотивируя это его краткосрочностью. Много копий было сломлено и вокруг вопроса о скорости распространения процесса редукции. До сих пор в околону научных комментариях, давно уже перекочевавших из-за своей экстравагантности на страницы научно-популярных журналов, можно встретить описания различных квантовых явлений, имеющих «бесконечную скорость распространения». Тут надо сразу же подчеркнуть, что за все время существования новой физики, недавно отметившей свой столетний юбилей, никогда

и ни в одном добросовестно поставленном эксперименте или наблюдении какого-то явления ни в сверхмалых, ни в сверхбольших масштабах не наблюдались сверхсветовые передачи материальных носителей — тел или информации. Сейчас очень модно «преобразовывать» теорию относительности, однако в этом ее пункте критики всегда терпят полное фиаско. Поэтому чаще всего, когда рассказывается, что по самым «инновационным» представлениям процесс редукции происходит практически мгновенно, что, несомненно, противоречит теории относительности, запрещающей распространение сигналов, превышающих скорость света, тут же проговаривается, что рассматривается не реальный физический процесс, а математическая схема — прием его описания.

За прошедшие годы к образу многострадального квантового кота обращалось множество физиков, журналистов и писателей. Одна из последних вспышек интереса к этому квантово-механическому парадоксу связана с именем видного английского теоретика из Оксфордского университета Роджера Пенроуза, который заявил, что намерен воспроизвести на практике мысленный эксперимент Шредингера с котом. Выступление Пенроуза связано с недавней серией экспериментов по проверке парадоксальных выводов принципа квантовой неопределенности, гласящего, что частица может находиться в нескольких местах одновременно. В частности, это ярко продемонстрировал не только для атомов, но и для сложных молекул физик-экспериментатор из Венского университета Антон Зайлингер. В поставленных им опытах сложные молекулы, состоящие из десятков атомов, проходили одновременно через два отверстия в экране. В общении с журналистами Зайлингер уверял, что усовершенствовав технику эксперимента, он сможет регистрировать суперпозиции еще более крупных объектов, вплоть до бактерий и даже котов.

Пенроуз придерживается противоположной точки зрения: он считает, что суперпозиции разрушаются не только под воздействием внешней среды, но и сами по себе, естественным путем. О возможности такого процесса говорил

еще выдающийся физик-теоретик Ричард Фейнман, который назвал это гипотетическое явление «объективной редукцией состояния». Исходя из идей Фейнмана, Пенроуз намеревается воссоздать эксперимент Шредингера именно с тем, чтобы опровергнуть его выводы. Образно говоря, он пытается доказать, что в пятидесяти процентах случаев кот в ящике будет жив независимо от поведения наблюдателя, что можно было бы оценить, например, по мурлыканью.

Если Пенроуз экспериментально докажет свою идею, ему удастся осуществить то, чего безуспешно добивались физики на протяжении прошлого века, — посмертно примирить позицию Эйнштейна и Шредингера с позицией Бора и Гейзенберга. При этом, может быть, даже удастся соединить теорию относительности с квантовой механикой в сверхобщую научную теорию под названием «квантовая гравитация».

Однако практическое воссоздание эксперимента Шредингера с котом, несмотря на его кажущуюся простоту, наталкивается на очень серьезные инженерные трудности.

На общем проектном плане все технические детали выглядят не сложнее знаменитого ящика для квантового кота. Правда, вместо несчастного живого детектора предполагается использовать микроскопический кристалл — молекулу размером в несколько десятков атомов, который облучается расщепленными лазерными лучами. В теории лазерный фотон в состоянии суперпозиции сталкиваясь с кристаллом и незначительно сдвигая его, также переводит его в суперпозицию. Остается только с помощью системы зеркал и датчиков замерить время, в течение которого кристалл будет находиться в этой суперпозиции. Согласно стандартной квантовой модели, в основе которой лежит копенгагенская интерпретация Бора, суперпозиция будет продолжаться до тех пор, пока на нее не подействует внешняя среда. В классическом кошачьем эксперименте Шредингера роль внешней среды играл лаборант — наблюдатель, открывающий крышку ящика с котом.

По предварительным теоретическим оценкам Пенроуза, суперпозиция довольно большого по квантовым масштабам

кристалла из полутора десятков атомов должна разрушиться естественным путем за десятые доли секунды.

Практическое осуществление эксперимента по «объективному редуцированию» волновой функции осложняется тем, что сдвинуть подобный кристалл с места может лишь фотон рентгеновского спектра излучения, но такие фотоны обладают повышенной проникающей способностью и для них чрезвычайно сложно добиться зеркального отражения, что совершенно необходимо для проведения ряда замеров. Кроме того, по условиям эксперимента фотон должен находиться в состоянии полета не менее десятой доли секунды, а это значит, что он должен пройти расстояние, примерно равное диаметру Земли. Наиболее реально было бы провести эксперимент в космосе на двух достаточно удаленных платформах, причем тут складывается уникальная ситуация для объединения с уже реально запланированной на близкое будущее космической миссией по обнаружению гравитационных волн.

Мировое научное сообщество глубоко разделилось во мнениях по поводу перспективности экспериментов Пенроуза. Причем большинство специалистов в области квантовой физики все же считают, что Пенроуз не совсем прав в своих далеко идущих теоретических предположениях. Тем не менее и сторонники, и критики одинаково поддерживают проведение нового «квантово-кошачьего» эксперимента хотя бы для того, чтобы убедиться в правомерности существования идеи «объективной редукции».

Здесь я не могу не заметить, что сам в полной мере разделяю мнение профессора Пенроуза, когда он подчеркивает, что его озадачивает не сама загадка пресловутого полуживого квантового кота в коробке, а то, с какой готовностью часть физиков принимают на веру подобный логический абсурд и с каким упорством они его защищают.

Когда-то, еще в период становления квантовой физики, Шредингер придумал свой мысленный кошачий эксперимент как иллюстрацию логической несуразности основ квантовой механики, однако вскоре оказалось, что его кот зажил

собственной жизнью, проник в иные миры и измерения, приобрел имя в литературе и неожиданно большой вес в научных кругах. В квантовой теории Шредингеровский кот часто стал использоваться таким образом, о котором его хозяин, похоже, и не помышлял, иллюстрируя разрушительную декогеренцию суперпозиционных квантовых состояний под воздействием окружающей среды или вмешательства наблюдателя.

На лекциях по квантовой механике в этом месте обязательно кто-то из студентов интересуется: так жив или нет замученный физиками представитель кошачьего племени? И в который раз следует ответ, что по сложившейся традиции можно предположить, что, когда квантовая система вступает во взаимодействие со средой, в которой она находится, ее суперпозиция распадается и она переходит в одно из альтернативных состояний. Правда, остается еще любопытный вопрос: а в какой именно момент бедный кот растворяется (или полурастворяется?) в окружающем мире при вступлении квантовой системы во взаимодействие с окружением? Вообще-то, тут можно «навскидку» назвать десяток видных и не очень физиков, которые тут же отправят путешествовать измученное неопределенностью животное по совершенно невообразимым мирам, пространствам и реальностям. Более того, некоторые даже предположат, что ваше сознание вступит в «квантовую связь» с сознанием кота, а то и с реальностью, а ваше взаимодействие с реальностью, отраженной в сознании кота... Впрочем, здесь мы немного забегаем вперед, вторгаясь в теоретическую вотчину знаменитого конструктора Многомирья Хьюго Эверетта.

Как хорошо тут начинаешь понимать несравненного Стивена Хокинга, заметившего, что когда он слышит о коте Шредингера, его рука тянется к ружью! Ну а ответ на вопрос, вызвавший столь бурные эмоции у физика, которого все чаще называют современным Эйнштейном, довольно прост — все связи квантового мира с макроскопической реальностью начинаются и заканчиваются в момент редукции, коллапса, «схлопывания» одного из самых загадочных образов физического мира — волновой ψ -функции. Впрочем, читатель,

наверное, уже догадался, что у физиков ответы на подобные вопросы — всего лишь дело вкуса. Вот поэтому в окружающей нас физической реальности не встречается полуживых квантовых котов.

К феномену шредингеровского кота можно подойти и с совершенно иных позиций, наиболее четко и остроумно отстаиваемых профессором МГУ Д. Н. Клышко и профессором МФТИ А. И. Липкиным, не говоря уже о лидере российской науки, академике В. Л. Гинзбурге. В двух словах это звучит так: существуют фундаментальные квантовые эффекты вероятностной природы на микроуровне в строго ограниченных масштабах молекул, атомов и элементарных частиц. Существуют также очень редкие макроквантовые эффекты, лежащие в основе действия лазеров, туннельных диодов и сверхпроводящих устройств. Есть даже намеки на мегаквантовые эффекты, управляющие эволюцией нейтронных звезд. Однако эффекты усиления квантовых явлений в макроквантовую суперпозицию котов, пусть даже ведущих свой род от кошки великого Шредингера, науке не известны!

Тут читатель вправе задать решающий вопрос: означает ли это, что квантовая механика, в принципе, неприменима для макрообъектов? И где тут видимая граница?

У замечательного советского фантаста Георгия Гуревича есть весьма занимательное произведение «Темпоград». В нем рассказывается о многих удивительных, но вполне «близконаучных» вещах, в том числе о путешествии экипажа отважных «темповантов» в сверхглубины микрокосмоса. В чудесном «темпоскафе» исследователи микромира проходят последовательно молекулярный — атомарный — частично-элементарный уровни и где-то за маревом волн электронов исчезают навсегда в пучинах микробесконечности. Печальные итоги столь удивительной экспедиции не должны нас останавливать, и мы также воспользуемся «темпоскафом» Гуревича для изучения границы между микро- и макромиром.

Давайте совершим прыжок сразу на атомарный уровень — как сегодняшнюю границу наблюдаемого микрокосмоса.

Здесь мы должны решить очень важный и непростой вопрос — где предел реальной наблюдаемости трансатомарных объектов? Представим, что в отдаленном будущем будет создан некий прообраз «кваркового микроскопа» (разумеется, это совершенно условный образ), «рабочим веществом» которого будут волны-частицы с длиной, сравнимой (а лучше меньшей) с диаметром атомного ядра. Тогда, вполне возможно, в школьных учебниках рядом с уникальными фотографиями атомов свое место займут и фотографии ядер. Ну а что содержится дальше в глубинах материи? Скорее всего, именно где-то здесь и пролегает граница принципиально *прямо-наблюдаемого*, которую условно можно принять за «рабочий» критерий микро- и макроскопического.

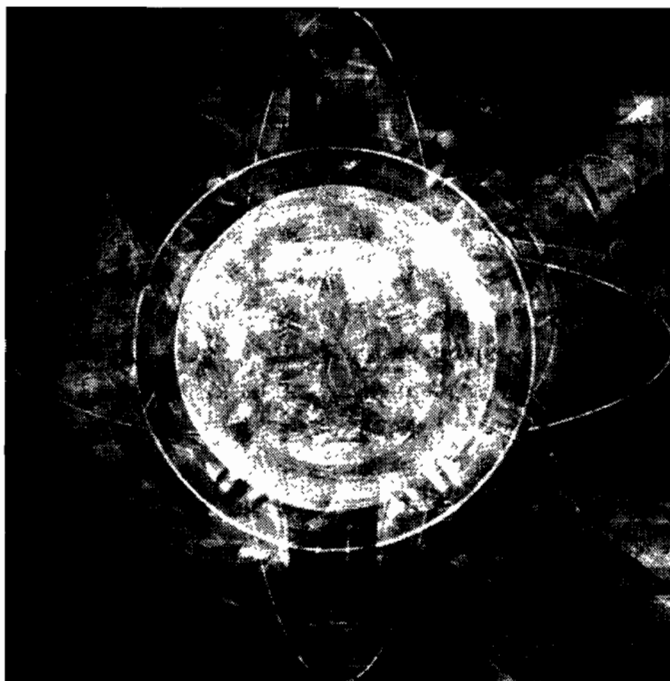


Рис. 24. Атомное ядро в кварковом микроскопе

Приблизительно такая точка зрения если и не излагается прямо, то принимается «по умолчанию» в большинстве

обычных школьных учебников. Если учебник хороший, в нем обязательно оговаривается, что существует ряд «макроквантовых» явлений, таких как сверхпроводимость, сверхтекучесть, излучение лазеров — мазеров и работа туннельных микроэлектронных приборов. В этих явлениях закономерности квантового мира проявляются на макроскопическом уровне. Если же учебник не просто хороший, а умный (это сейчас большая редкость), в нем будет указано, что границу между микро- и макромиром надо «делимитировать» каждый раз в конкретном процессе, опыте или явлении, в прямой зависимости от условий их протекания, постановки и наблюдения. Правда, тут возникает отнюдь не риторический вопрос: если макроскопические явления далеко не всегда четко сопоставимы классическим объектам, то, может быть, границы между классической и квантовой реальностью вообще не существует? Разумеется, школьные учебники; даже очень хорошие, ответа на подобные вопросы не дают.

Исторически вопрос о границе квантовой реальности возник сразу же после рождения квантовой теории, и одним из первых на нем заострил внимание Бор, считавший (а вместе с ним и вся его копенгагенская школа), что классический мир начинается с наблюдательного прибора, необходимого для выявления результата квантового микроскопического измерения. В процессе развития копенгагенской интерпретации Бор остановился на точке зрения, что разделительная линия между квантовой и классической теориями должна быть подвижной, так что даже «конечный прибор» — нервная система наблюдателя — в принципе, может быть измерен и проанализирован в качестве квантового объекта. Очевидно, здесь Бор имел в виду, что практически для любой задачи квантовых измерений всегда может быть подобран подходящий классический детектор. В отсутствие жесткого критерия для выявления различия между квантовыми и классическими объектами часто использовалось отождествление классического объекта с макроскопическим.



Рис. 25. Фрактальное «древо реальности»

Ветвящиеся исторические последовательности Эверетта — Уилера хорошо иллюстрируют особые самоподобные геометрические фигуры — фракталы.

Следующий шаг в поисках границ квантовой реальности сделал в пятидесятых годах прошлого века молодой аспирант патриарха физической космологии Джона Арчибальда Уилера — Хьюго Эверетт. Его «многомировая интерпретация», или «интерпретация со многими вселенными», квантовой теории описывала Вселенную в целом. В концепции Эверетта каждый раз, когда происходит взаимодействие между двумя квантовыми системами, волновая функция Вселенной расщепляется, порождая «ветвистый куст» разнообразных исторических последовательностей. Что такое волновая функция Вселенной? Мне кажется, что и сам Эверетт не имел ясного представления о столь глубокой абстракции. Конечно, он оперировал с соответствующим математическим образом и использовал довольно развитый математический аппарат, но

реальная сущность его построений до сих пор вызывает головокружительное впечатление. Многомировая интерпретация действует в космологии, которая описывает вектор состояния для Вселенной в целом. Нет ничего более макроскопического, чем сама Вселенная, и в этом случае граница классичности исчезает полностью. Однако некоторые теоретики считают, что многомировая интерпретация в своем исходном варианте реально не упраздняет границы микро-макромира, а смещает ее в направлении между физической Вселенной и сознанием наблюдателя. Комментировать подобные спекуляции невозможно, скорее, их можно просто рассматривать как построения калейдоскопической пестроты, весьма мало соотносящиеся с окружающей объективной реальностью...

Так где же пролегает граница между классикой и квантами?

Есть очень простой критерий — если в вашей формуле присутствует постоянная Планка h , смело можете утверждать, что вы имеете дело с квантовым микромиром!



Рис. 26. Граница между квантовым и классическим мирами

Чтобы понять, где пролегает граница между квантовым микромиром и классическим макромиром нашей повседневной реальности, надо просто заглянуть в коробку с котом Шредингера. Так вы окажетесь в нашей обыденности, где не бывает «полудохлых» квантовых котов. Но стоит вам закрыть коробку — и все физики во главе со Шредингером будут вас уверять, что внутри действуют парадоксальные законы отрицательного здравого смысла квантового мира.

Замечательно обрисовывает ситуацию в целом профессор Липкин: *«Вследствие этого возникло несколько конкурирующих “интерпретаций” квантовой механики. Во-первых, это наиболее популярная “боровская”, или “копенгагенская”, интерпретация. Во-вторых, “эйнштейновская” позиция, вокруг которой объединился ряд отцов квантовой механики, недовольных своим детищем. Главными претензиями Эйнштейна к “копенгагенцам” были, во-первых, копенгагенское решение вопроса о соотношении между состоянием физической системы и измерением: “Состояние системы в момент времени t , когда не предельвается никаких наблюдений, не может служить предметом рассмотрения”, — говорит “копенгагенец” М. Борн (то есть до измерения нет состояния). Во-вторых, вероятностный тип описания. Свою позицию они выразили в виде ряда “парадоксов”, якобы возникающих в формулировке квантовой механики и говорящих о ее неполноте и незаконченности (классический набор состоит из парадоксов “кота Шредингера”, “редукции (коллапса) волновой функции” и мысленного эксперимента Эйнштейна, Подольского, Розена (ЭПР)). В попытках решения этих парадоксов сегодня доходят до “шизометрии” (от греч. schizo — расщепляю) “многомировой интерпретации” или введения сознания в основания квантовой механики».*

1.5. Запутанная путаница

«Но изменения в представлении о реальности, ясно выступающие в квантовой теории, не являются простым продол-

жением предшествующего развития. По-видимому, здесь речь идет о настоящей ломке в структуре естествознания».

Вернер Гейзенберг

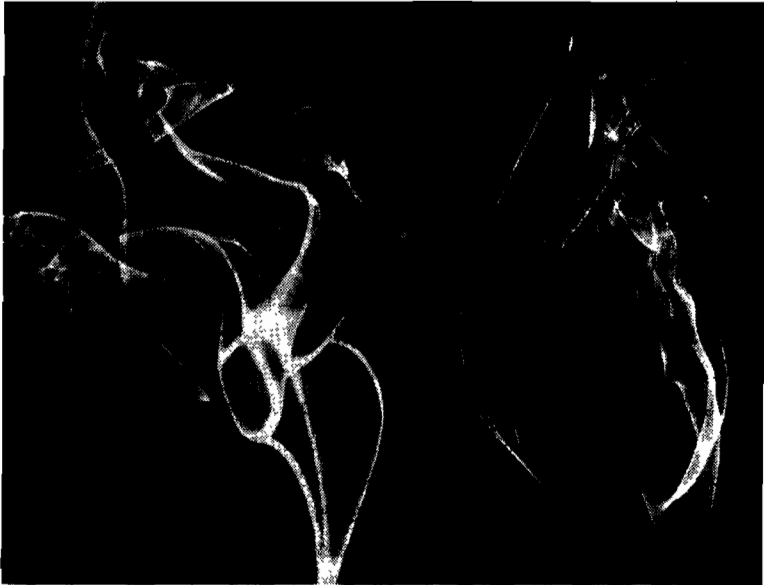


Рис. 27. Художественный образ запутанных квантовых объектов (см. вклейку)

Некоторые ученые даже полагают, что квантовая запутанность — это не просто наложение друг на друга различных состояний и такое их переплетение, когда нет возможности отделить содержимое физической системы одно от другого. Они вполне серьезно обсуждают наличие «мистических» связей между подсистемами, которые необъяснимы с точки зрения известных физических полей и взаимодействий. Иногда даже можно слышать, что квантовые корреляции — это не просто взаимодействия, а скорее «квантовая телепатия», когда один объект непосредственно «ощущает» свое единство с другими телами, когда все внешние изменения мгновенно отзываются в нем самом, и наоборот, изменяя что-то в себе, эти действия тут же сказываются на окружении.

Допустим, две одинаковые частицы образовались в результате распада третьей частицы. В этом случае, по закону сохранения энергии, их суммарный импульс должен быть

равен исходному импульсу третьей частицы, то есть импульсы двух частиц должны быть связаны. Это дает нам возможность измерить импульс одной частицы и по закону сохранения импульса рассчитать импульс второй, не внося в ее движение никаких возмущений. Поэтому, измерив координату второй частицы, мы сумеем получить для этой частицы значения двух неизмеримых одновременно величин, что по законам квантовой механики невозможно. Таким образом получается, что соотношение неопределенностей не является абсолютным, а законы квантовой механики являются неполными и могут быть в будущем уточнены.

Однако теоретически существует возможность, при которой законы квантовой механики останутся абсолютными. Для этого нужно предположить, что две взаимодействовавшие частицы остаются каким-то образом связанными между собой. Тогда возмущение, вносимое измерением в состояние первой частицы, мгновенно перенесется на состояние второй. Связанные таким образом частицы называются в квантовой механике *запутанными* и описываются единой волновой функцией, на каком бы расстоянии они ни находились. Передаваемое возмущение соответствует коллапсионной редукции волновой функции. Подобное мгновенное изменение описания квантового состояния микрообъекта, происходящее в процессе физических измерений, было детально описано в 20-х годах прошлого века одним из создателей математического аппарата квантовой теории Джоном фон Нейманом.



Джон фон Нейман (1903–1957) — выдающийся американский физик-теоретик и кибернетик австро-венгерского происхождения. Родился в Будапеште в семье состоятельного венгерского банкира, учился в Австрии, Швейцарии и Германии. В 1930 году эмигрировал в США. В 1933 году в Принстоне (США) начал работу Институт перспективных исследований. Сотрудники института, исключитель-

но профессора, ни перед кем не отчитывались и разрабатывали интересующие их проблемы, а институт финансировал их исследования. Фон Нейман был принят в институт в 1933 году, вслед за Альбертом Эйнштейном.

Во время Второй мировой войны американские ученые стали выполнять военные заказы. Фон Неймана привлекли к участию в наиболее секретном и крупном проекте «Манхэттен» — по созданию атомной бомбы. Одновременно он познакомился с другим военным проектом — электронно-вычислительной машиной «ЭНИАК». Проанализировав конструкцию «ЭНИАК», фон Нейман пришел к идее нового типа логической организации ЭВМ. Одна из ЭВМ — «ДЖОНИАК» (1954), в проектировании которой фон Нейман принимал непосредственное участие (она и названа так в его честь), — сыграла решающую роль в обработке информации при создании водородной бомбы.

Крупнейшим научным достижением фон Неймана в послевоенный период стало построение теории автоматов. В 1952 году в работе «Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных элементов» он показал путь создания надежных ЭВМ и других автоматов.

В 1954 году фон Неймана назначили членом Комиссии по атомной энергии США, и весной 1955 года он переехал из Принстона в Вашингтон. Через несколько месяцев врачи обнаружили у него костную форму рака. 8 февраля 1957 г. Джон фон Нейман безвременно завершил свой жизненный путь. Последняя книга, над которой работал фон Нейман, — «Вычислительная машина и мозг» — осталась незаконченной.

Квантовая запутанность возникает в системе, состоящей из двух и более взаимодействующих подсистем (например, нескольких элементарных частиц), и представляет собой суперпозицию макроскопически различимых состояний. Для таких систем флуктуации отдельных частей взаимосвязаны, но не посредством обычных классических взаимодействий, ограниченных, например, скоростью света, а посредством особых квантовых корреляций. В этом случае изменение одной части системы в тот же момент времени сказывается

ся на остальных ее частях (даже если они разделены в пространстве, вплоть до бесконечно больших расстояний). И это не просто теория. «Магические» свойства запутанных состояний подтверждены многочисленными физическими экспериментами, о которых мы скажем ниже, и именно эти «сверхъестественные» возможности лежат в основе работы принципиально новых электронно-вычислительных устройств — *квантовых компьютеров*.

В зависимости от величины квантовой запутанности (она изменяется от нуля до единицы) система может состоять из отделимых локальных частей, которые слабо связаны друг с другом. В этом случае мера запутанности близка к нулю. Если же система составляет единое неразделимое целое, то мера запутанности равна единице. Разделить на строго независимые части можно систему, части которой находятся в сепарабельном (незапутанном) состоянии (мера запутанности равна нулю). Это можно сделать только в случае системы, части которой никогда не взаимодействовали друг с другом.

Легко предположить, что величина запутанности зависит от интенсивности взаимодействия квантовых систем с окружением.

Так, управляя взаимодействием с окружением, можно манипулировать мерой квантовой запутанности между составными частями системы. Например, замкнутая система может находиться в максимально запутанном состоянии и не будет иметь внутри себя локальных (классических) составных частей (подсистем). Но если она начинает взаимодействовать с окружением, то мера запутанности между ее подсистемами постепенно уменьшается и они «проявляются» в виде локальных объектов. При наличии взаимодействия с окружением суперпозиция разрушается и проявляется то или иное классическое состояние в зависимости от типа взаимодействий. Именно этот физический процесс и называется *декогеренцией*. Это явление тесно связано с понятием *квантовой запутанности* и в своей основе подобно потере слаженности волновых колебаний отдельных микрообъектов в результате взаимодействия системы с окружающей средой.



Рис. 28. Фотографический негатив

Квантовая запутанная система чем-то напоминает фотопластинку с непроявленным изображением. Это своеобразное физическое состояние объекта, когда видимая информация может появиться только после проявления фотопластинки (взаимодействия с окружением). Конечно, ситуация с запутанностью выглядит несколько сложнее и там нет заранее отображенной «негативной» информации. Скорее это напоминает ситуацию, когда великое множество изображений равномерно распределено по фотонегативу и поэтому невидимо.

Известный теоретик Войцех Зурек подчеркивает:

«Роль измерения состоит в преобразовании квантовых состояний и квантовых корреляций (с их характерной неопределенностью и расплывчатостью) в классические, определенные исходы. Декогеренция ведет к суперотбору (отбору собственных состояний), индуцированному окружением, что оправдывает существование выделенного набора состояний. Это позволяет определить эффективную границу между квантовой и классической областями в ясных формулировках, которые

не апеллируют к «коллапсу волнового пакета» или к чему-либо типа «бога из машины — *dues ex machine*».

Присутствие частицы приводит к возбуждению поля и ее рассеянию. Результирующая «рябь» создает своего рода «запись» ее положения, формы, ориентации и т. п. и, что наиболее важно, приводит к ее мгновенной локализации и, следовательно, появлению траектории. Возникает своего рода такой же «след», как на водной поверхности вслед за кораблем, плывущим по озеру, или за камнем, брошенным в воду. Мы переносим этот образ на возмущение некоторыми объектами существующего электромагнитного поля. При этом крайне неожиданным оказывается то, что отпечаток оставлен двумя взаимодействующими системами, даже если «никто не наблюдает» и даже когда на озере штормит и оно покрыто независимыми от частицы существующими волнами, а поле заполнено возбуждениями — то есть когда начальное положение среды является равновесным при некоторой конечной температуре. «Беспорядочные» начальные состояния среды затрудняют расшифровку записей, но не предотвращают их появления».

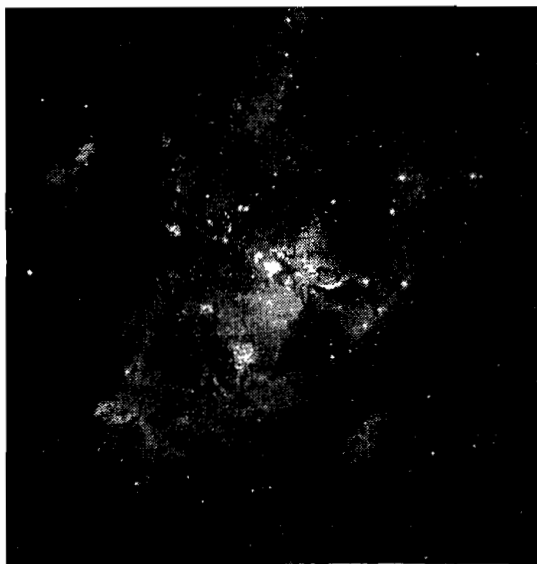


Рис. 29. Проекция Универсума на нашу реальность

Кажется парадоксальным, но к настоящему времени квантовая теория наиболее полно и точно описывает весь наш Мир — Универсум в целом. Дело в том, что космологи принимают окружающую Вселенную замкнутой системой, а в квантовой механике принято считать, что описание замкнутой системы в терминах ее вектора состояния является полным. Зная вектор состояния системы, мы можем определить любые характеристики системы. Но проблема в том, что нас сплошь и рядом окружают именно открытые системы, активно контактирующие с соседними физическими объектами, так что мы постоянно должны решать задачу задания вектора состояния эволюционирующей системы.

Микрочастицы являются лишь наиболее удобными объектами для изучения и манипулирования квантовой запутанностью в физических исследованиях. Для них квантовая запутанность проявляется особенно сильно и ее уже невозможно игнорировать, как в случае макрообъектов. Ситуация здесь напоминает применение понятия «*волновая функция*» в микро- и макромире.

Мера квантовой запутанности непосредственно связана с количеством информации, содержащейся в физической системе. Связь между квантовой информацией и запутанностью позволяет описывать физические процессы изменения степени квантовой запутанности между компонентами системы, как обмен информацией с ее окружением.

В целом наличие квантовой запутанности в макроскопических системах до сих пор является предметом бурных дискуссий. При этом наиболее интенсивно обсуждается вопрос квантового принципа *несепарабельности* — если системы взаимодействуют друг с другом, то они квантово-запутаны между собой, будучи связанными нелокальными квантовыми корреляциями. При этом некоторые теоретики даже склоняются к мысли, что все акты взаимодействия в окружающем Мире вне зависимости от их масштабности являются предпосылками для квантовой запутанности взаимодействующих объектов. Однако большинство специалистов считает подобное теоретизирование проявлением своеобразного «кванто-

вого ультраэкстремизма», ведь пока еще физикам не удалось построить непротиворечивую модель нашей реальности, состоящей из несепарабельных материальных систем и объектов. В еще большей степени сказанное касается количественного описания макроквантовой запутанности окружающих нас тел на «бытовом уровне».

Декогеренция объясняет, как происходит процесс взаимодействия с окружением и как возникает смесь, эквивалентная распределению квантовых объектов по различным состояниям со своими вероятностями.

Естественно, что у читателя уже давно должен был возникнуть вопрос: как такая «запутанная» квантовая теория согласуется с экспериментальными данными?

Если проводить опыты над полной системой, то отличить суперпозицию от смеси, в принципе, можно: суперпозиция приводит к некоторым интерференционным эффектам, которые отсутствуют в случае смеси. Это напоминает отбраковку посуды, когда контролер легкой металлической палочкой ударяет по бокалам и тарелкам. Если посуда цела (полная суперпозиция), возникает чистый тон, а если в стакане есть трещина, то слышен дребезжащий звук (смесь состояний).

Первые эксперименты по проверке теории квантовой запутанности связаны с именем профессора Венского университета Антона Зайлингера, о котором мы уже упоминали. Для своих опытов Зайлингер выбрал обыкновенные фотоны — кванты электромагнитного излучения, попытавшись «телепортировать» эти элементарные частицы в иную точку пространства. Важным элементом экспериментов Зайлингера была подготовительная фаза, ведь необходимо, чтобы в некоторой точке пространства оказался фотон, изменяющий свои характеристики в ходе телепортации и точь-в-точь как исходная частица. Итак, оказывается, что в экспериментах по квантовой телепортации происходит не перемещение материальных объектов, а своеобразная череда мгновенных превращений их состояний.

Мы можем прибегнуть к следующему сравнению: представим себе, что в точке выхода квантового «телепортационного портала» находится зеркало. Что бы ни происходило с исходным фотоном, зеркало отражает его образ, чуть переиначив его, поменяв местами «левое» и «правое». Правда, аналогия здесь неполная, поскольку изображение в зеркалах отражается со скоростью света, а скорость квантовой телепортации пока еще считается практически неограниченной. Тут надо подчеркнуть, что это не противоречит теории относительности, поскольку подобная квантовая телепортация никак не связана с переносом материи.

Основным объектом опыта профессора Зайлингера, поставленного в Инсбруке, были незримо связанные друг с другом фотоны. Чтобы их получить, ученые направляли на нелинейный оптический кристалл световые импульсы лазера, длившиеся всего 150 миллионных долей одной миллиардной доли секунды. Видимые световые сигналы преобразовывались в ультрафиолетовые. Зайлингер помещал на их пути еще один нелинейный кристалл, и тогда возникала пара фотонов красного света. Хитрость заключалась в том, что плоскости колебаний обеих частиц были теперь всегда перпендикулярны друг другу. С этого момента, если одна из них была поляризована в горизонтальной плоскости, другая совершала колебания лишь в вертикальной плоскости, и наоборот. Так были получены пары завязанных в «квантовый узел» микрочастиц. Основным конструктивным элементом установки Зайлингера является полупроницаемое зеркало, связывающее друг с другом фотоны из разных пар. Эти частицы либо отражались от поверхности зеркала, либо проникали сквозь нее. Возможных вариантов событий было четыре. В любом случае оба фотона были теперь связаны друг с другом. Значит, свойства фотонов автоматически передавались друг другу и они становились точь-в-точь такими же, как их прототипы, находившиеся на расстоянии в несколько метров. В конечном итоге по показаниям детектора определяли, что телепортация состоялась.



Рис. 30. Эксперименты по проверке ЭПР-парадокса (см. вклейку)

Лазеры возбуждают в вакуумной камере отдельные атомы, испускающие при этом фотоны (фотон — элементарная частица, квант электромагнитного излучения.) Фотоны разлетаются в противоположных направлениях по длинным световодам (специальным проводникам света с внутренней зеркальной поверхностью). После поляризаторов, пропускающих только частицы с определенным направлением волновых колебаний, они попадают на фотодетекторы. Согласно квантовой механике должна существовать тонкая корреляция между поляризациями разлетающихся фотонов. И эксперименты это подтвердили.

Повторимся: в этом опыте не происходит никакого переноса элементарной частицы из одной точки пространства в другую. Ведь в приемном устройстве уже имеется свой фотон и передается лишь информация о поляризационной характеристике этого фотона. В следующем разделе мы более подробно рассмотрим, что такое квантовая информация и как микрочастицы ее копируют, мгновенно «телепатически чувствуя» происходящие друг у друга изменения состояний.

Сейчас же заметим, что после нескольких лет проб и ошибок Зайлингер и его коллеги научились телепортировать до сотни частиц в час. Тем временем французские физики уже начали проводить опыты по телепортации на атомарном уровне.

Однако проблем вокруг квантовой телепортации еще слишком много. Ведь одним из главных требований «правильного» запутывания является создание «дистиллированно»-сверхчистой квантовой среды, а чем сложнее квантовый объект, тем труднее изолировать его от внешнего мира. Если же объект неконтролируемо контактирует с внешним миром, то его неопределенное состояние тотчас преобразуется в «классическую локализацию» и весь процесс квантового запутывания с последующей телепортацией теряет свой смысл.

1.6. Квантовая информатика

«Сделан первый шаг к созданию квантового ретранслятора, который сможет телепортировать информацию через континенты и океаны. Принцип его действия основан на квантовой запутанности».

Антон Зайлингер

28

«...Современное понимание квантовой механики похоже на представления начинающего шахматиста. Правила известны более 70 лет, и у нас есть несколько остроумных приемов, пригодных в некоторых ситуациях, но мы пока не можем похвастаться мастерством».

Цель квантовой теории информации — изучение высших принципов игры в квантовом мире...»

Майкл Нильсен

Многие современные философы считают, что информация является первоосновой нашего мира, что порождает много новых интересных вопросов. Например, как много

информации требуется для того, чтобы описать всю Вселенную целиком? И можно ли уместить это описание в память компьютера? И какова, вообще говоря, предельная информационная емкость устройства размера стандартной интегральной микросхемы?

В предыдущем разделе мы вплотную подошли к ответам на эти вопросы, ведь квантовая телепортация осуществляется за счет разделения информации на «квантовую часть» и «классическую часть» и независимой передачи этих двух компонентов. Для передачи «квантовой части» используется вышеописанное квантовое запутывание частиц, а для передачи классической информации годится любой обычный канал связи.

Например, если бы игральные кости были запутаны как квантовые частицы, то каждая пара показывала бы одинаковый результат, даже если бы их бросали на разных концах нашей галактики или даже в разное время.

Классический регистр

101



Квантовый регистр

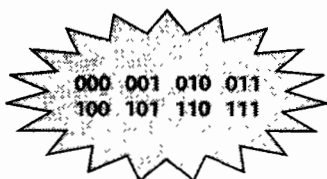


Рис. 31. Квантовая единица информации: преимущество кубитов над битами. В квантовом регистре каждое возможное значение находится в суперпозиции, тогда как классический регистр может иметь только одно значение из 8 возможных

В микромире информация может измеряться с помощью особых единиц — квантовых бит (е-бит, или кубит), которые имеют большое количество возможных состояний. Эти состояния можно представить стрелкой, указывающей на точку сферы. Северный полюс сферы эквивалентен 1, а южный — 0. Другие положения соответствуют квантовым суперпозициям 0 и 1. В общем, это стандартная процедура для бита информации, имеющего единичное или нулевое значение,

но с учетом вероятностного характера взаимодействующих квантовых подсистем.

Мы уже говорили, что запутанные состояния характеризуются степенью запутанности, например существует максимально запутанное состояние данной системы. Для количественной характеристики степени запутанности вводят понятие меры запутанности. Исходные объекты, находящиеся в минимально запутанных состояниях, можно с сохранением общего количества запутанности преобразовывать в меньшее число объектов, которые находятся в максимально запутанных состояниях. Принято различать чистые запутанные состояния, которые содержат только квантовые корреляции, и смешанные запутанные состояния, которые могут включать в себя наряду с квантовыми и классические корреляции.

Базовый ресурс квантовой теории информации составляют квантовые биты, или кубиты. Подобно биту кубит — абстрактный квантовый объект, не связанный с принципами квантовой механики. Биты можно представлять как намагниченные участки на дисках ЭВМ, напряжения в схемах или графитовые метки, сделанные карандашом на бумаге. Как и в случае бита, свойства кубита не зависят от его физической реализации, скажем, в виде спина атомного ядра или в виде поляризации фотона.

Как и классический бит, кубит олицетворяет 1 или 0. Однако в квантовой механике любому объекту непременно свойственен диапазон суперпозиций, содержащих в разной степени оба исходных состояния. Поэтому значения кубита как бы соответствуют точкам на поверхности сферы, а наличие набора состояний между 0 и 1 составляют особенность многих необычных свойств квантовой информации.

Сколько классической информации мы можем сохранить в кубите? Казалось бы, бесконечное количество. Чтобы задать квантовое состояние, мы должны указать широту и долготу соответствующей точки на сфере с произвольно большой точностью. Эти числа можно записать в виде длинной

строчки битов. Хотя в одном кубите можно закодировать бесконечное количество классической информации, извлечь ее обратно нельзя. Определение состояния кубита с помощью обычного прямого измерения даст в результате либо 0, либо 1 с вероятностью, зависящей от широты исходного состояния. Таким образом, при любом способе измерения прочесть можно один-единственный бит.

Совершенно по-иному ведет себя квантовая информация: ведь когда два кубита сцеплены между собой, они лишены индивидуальных квантовых состояний. Вместо этого появляется зависимость между ними. Например, для одного типа максимально сцепленной пары кубиты при измерении дают противоположные результаты. Если один дает 0, то другой — 1, и наоборот. Так максимально запутанная пара микрочастиц несет один кубит сцепленности. Используя увеличение и уменьшение степени запутанности, можно создать воображаемую систему весов для измерения количества запутанности в стандартных кубитах. Представим, что у отправителя есть частица, находящаяся в произвольном квантовом состоянии, и он хочет передать это квантовое состояние получателю, то есть сделать так, чтобы у получателя оказалась в распоряжении частица в том же самом состоянии.

Иными словами, необходимо передать информацию с максимальной точностью. Для этого отправитель и получатель договариваются заранее о создании пары квантово-запутанных частиц, одна из которых попадет отправителю, а другая — получателю. Поскольку эти частицы запутаны, то каждая из них не обладает своей волновой функцией, но вся пара целиком описывается единой волновой функцией. Когда отправитель совершает какие-либо действия над имеющейся у него частицей, то волновая функция всей системы частиц коллапсирует в некое новое состояние, и мгновенно запутанная частица у получателя также коллапсирует в некое определенное состояние. Именно в этот момент происходит передача «квантовой части» информации. Отметим, что объем передаваемой при этом информации равен объему

информации, запасенной в исходном состоянии, и может быть бесконечно большим. Однако восстановить передаваемую информацию пока невозможно: получатель знает, что состояние его частицы как-то связано с состоянием частицы отправителя, но не знает, как именно.

Для выяснения этого необходимо, чтобы отправитель сообщил получателю по обычному каналу связи результат своего измерения. Имея данную информацию, получатель сможет совершить необходимое преобразование над состоянием своей частицы и восстановить исходное состояние частицы отправителя. Итак, полная передача информации осуществится только после того, как получатель будет обладать данными, полученными по обоим каналам.

На основе теории квантовой информации возникла принципиально новая технологическая наука — квантовая информатика, включающая специальные знания из математики, физики и инженерной кибернетики. Ее задачи состоят в исследовании и техническом применении фундаментальных квантовых закономерностей запутанных состояний, декогеренции и редукции волновой функции.

Кроме квантовых линий связи и квантовой криптографии возникла еще одна удивительная отрасль квантовой информатики — разработка квантовых компьютеров. Так, в интенсивно разрабатываемых сейчас квантовых компьютерах запутанность также является основным рабочим ресурсом.

В отличие от обычного компьютера, регистры памяти которого могут принимать лишь два возможных значения (например, ноль и единица) и содержат классический бит информации, квантовый компьютер использует кубиты. За счет суперпозиции состояний кубитов возможности квантовых компьютеров намного превышают возможности обычных электронно-вычислительных машин. Автором идеи квантового компьютера является выдающийся физик прошлого века Ричард Фейнман. В 1958 году, моделируя на компьютере квантовые процессы, он понял, что для решения многочастичных квантовых задач объема памяти классического компьютера совершенно недостаточно. Все квантовые задачи,

которые сейчас рассчитываются на классических компьютерах, — очень грубые приближения.

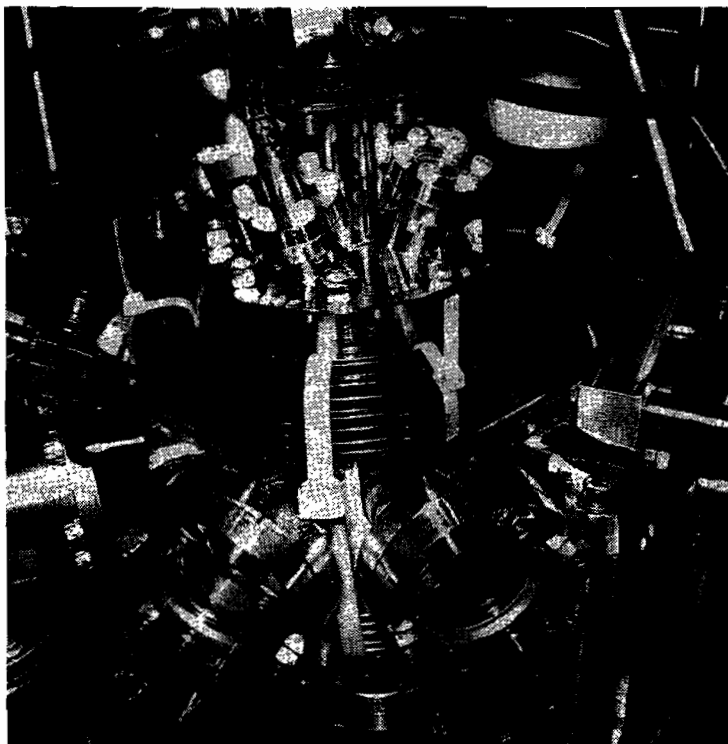


Рис. 32. Квантовый компьютер (см. вклейку)

Квантовый компьютер — это физическое устройство, предназначенное для выполнения логических операций с помощью специально преобразованных квантовых состояний. Схематично работу квантового компьютера можно представить в виде следующего последовательного алгоритма:

- «ЗАПИСЬ» — подготовка начального состояния;
- «ВЫЧИСЛЕНИЕ» — преобразование начального состояния по специальной процедуре;
- «ВЫВОД» — детектирование результата измерения проецированного конечного состояния.

Фейнман высказал мысль о том, что квантовые задачи должен решать квантовый компьютер: природе задачи должен соответствовать способ ее решения. И предложил один

из вариантов квантового компьютера. В своей знаменитой статье «Моделирование физики на компьютерах», опубликованной в *Международном журнале теоретической физики*, он убедительно доказал, что для решения задач, предметом рассмотрения которых являются квантовые объекты и их взаимодействия, обычные компьютеры совершенно не годятся. По мнению Фейнмана, с задачами такого класса, требующими огромного объема вычислений, могут справиться принципиально иные вычислительные устройства, использующие квантовую логику и квантовые способы вычисления. Но настоящий бум начался в середине 90-х годов прошлого века, когда американский математик Шор переложил для квантового компьютера алгоритм вычисления простых множителей больших чисел.

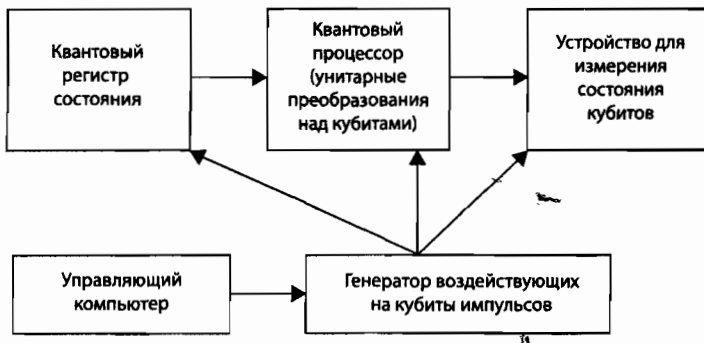


Рис. 33. Схематическая структура квантового компьютера

Первые прообразы квантовых вычислительных систем обычно связывают с приборами, использующими принцип ядерного магнитного резонанса, — ЯМР-спектрометрами. Это явление, связанное с переориентацией магнитных моментов атомных ядер во внешнем магнитном поле, сегодня активно используется физиками, химиками, биологами и врачами в разного рода анализаторах и томографах, позволяющих заглянуть внутрь самых разнообразных устройств, материалов и живых объектов.

Другой подход основан на использовании ионных ловушек в виде «подвешенных» в вакууме ионов. У каждого иона берутся два уровня энергии, составляющих один кубит квантовой информации; между собой эти ионы связаны через колебания внутри одномерного кристалла, который имеет набор резонансных частот. Однако создание таких ионных цепочек — квазикристаллов — сталкивается с большими практическими трудностями, и количество звеньев пока еще ограничено десятками ионов.

Существует и третий подход — квантовый компьютер на твердом теле. Это могут быть сверхпроводники или квантовый компьютер точно на таком же кремнии, на котором сегодня работает традиционная микроэлектроника. Роль кубитов здесь выполняют ядерные спины атомов обычной примеси, помещенной в кристалл кремния. Их электронные облака перекрываются между собой, и атомы могут обмениваться состояниями: один атом «управляет» электронами другого и тем самым осуществляется взаимодействие ядер удаленных атомов примеси. Над атомами примеси устанавливают крошечные электроды и, регулируя величину текущего по ним тока, изменяют магнитное поле и как следствие — частоту вращения спина атомного ядра.

Еще одно направление — сверхпроводниковый квантовый компьютер. Несмотря на имеющиеся достижения в реализации отдельного кубита, в таком квантовом компьютере также имеется ряд недостатков. Они связаны с необходимостью жесткого контроля за изготовлением так называемых сквидов — сверхпроводящих квантовых интерференционных детекторов. Технология сквидов позволяет достаточно легко построить квантовый кубит. Основные трудности возникают при попытке соединить несколько таких кубитов, ведь лучшим достижением в этой области пока считается управление взаимодействием всего десятка кубитов.

Квантовые вычислительные алгоритмы уже сейчас позволяют в полной мере моделировать работу обычных логических элементов, из которых сделаны стандартные электронные компьютеры. Поэтому любую задачу, которая решена

сейчас, квантовый компьютер решит и почти за такое же время. Следовательно, новая схема вычислений будет, по крайней мере, не слабее нынешней.

В чем же состоит перспектива развития квантовых компьютеров?

Большая часть перспективных квантовых компьютеров действует так же, как и современные электронные вычислительные комплексы: n бит памяти хранят состояние и каждый такт времени изменяются процессором. В квантовом случае система из n кубитов находится в состоянии, являющемся суперпозицией всех базовых состояний, поэтому изменение системы касается всех 2^n базовых состояний одновременно. Теоретически новая схема может работать намного (в экспоненциальное число раз) быстрее классической.

Вообще говоря, считается, что квантовый компьютер создается, чтобы решать задачи, которые на классических компьютерах решить, в принципе, невозможно. Примером является задача о разложении на множители: задавшись некоторым составным числом, необходимо определить один из его сомножителей. Если простые сомножители заданного числа являются большими, то простой метод решения задачи неизвестен. При использовании существующих на сегодня вычислительных мощностей удастся решать лишь достаточно ограниченные задачи. Например, определение множителей числа, состоящего из 130 десятичных знаков, требует 10^{18} шагов и при скорости 10^{12} операций в секунду потребуются свыше сорока дней.

Каждое элементарное действие классического компьютера затрагивает небольшое число ячеек памяти, так что для заполнения двух в тысячной степени бит памяти необходимо совершить порядка столько же элементарных операций. Но подобное количество больше суммы всех процессов, включая соударения атомов, произошедших с момента возникновения Вселенной.

В случае квантового компьютера запутанное состояние принадлежит не отдельным составным частям устройства — кубитам, а всему устройству в целом, и каждая операция

с любым кубитом будет охватывать сразу всю оперативную память квантового компьютера. Подробное исследование показало, что достаточно уметь выполнять операции над каждым кубитом по отдельности и над каждой парой кубитов, чтобы выполнять полномасштабные квантовые вычисления, решающие такие задачи, которые практически неосуществимы средствами обычной электронной вычислительной техники. Американский математик Умеш Вазирани привел такой пример: представьте себе, что каждая элементарная частица нашей Вселенной является современным классическим компьютером. Тогда, чтобы разложить на множители двести-чизначное число с помощью всех таких компьютеров, одновременно работающих на полную мощность, не хватит всего времени жизни Вселенной! А на одном квантовом компьютере потребуется всего около часа машинного времени...

Совершенно неожиданное применение нашла квантовая информатика в древней науке — криптографии — искусстве создания и расшифровки разнообразных кодов.

Криптография — это искусство скрытия информации в последовательности битов от любого несанкционированного доступа. Для достижения этой цели используют шифрование: сообщение с помощью некоторого алгоритма комбинируется с дополнительной секретной информацией (ключом), в результате чего получается криптограмма. Долгое время способы разработки алгоритмов шифрования определялись исключительно хитростью и изобретательностью их авторов. В начале прошлого века этой областью всерьез заинтересовались математики, а в самое последнее время — и физики-теоретики.

Для любой системы передачи информации характерны следующие действующие лица: корреспондент — отправитель А (Алиса), респондент — получатель Б (Боб) и дешифратор Е (Ева). Классический подход предполагает, что ключ для шифровки-расшифровки известен только Алисе и Бобу. Эта ситуация для «криптосистем с закрытым ключом». В этом случае надежен только метод шифрования «одноразовых блокнотов», состоящий в том, что Алиса и Боб об-

мениваются набором общих секретных ключей, каждый из которых используется лишь для шифрования единственного сообщения. При этом ключи генерируются случайно и никакой информации не несут. Процесс шифровки состоит в том, что каждый символ исходного сообщения «складывается» с соответствующим символом ключа. Вначале такие ключи хранили в отрывных блокнотах и каждый лист-ключ после использования уничтожался, что и послужило названием этому способу шифрования.

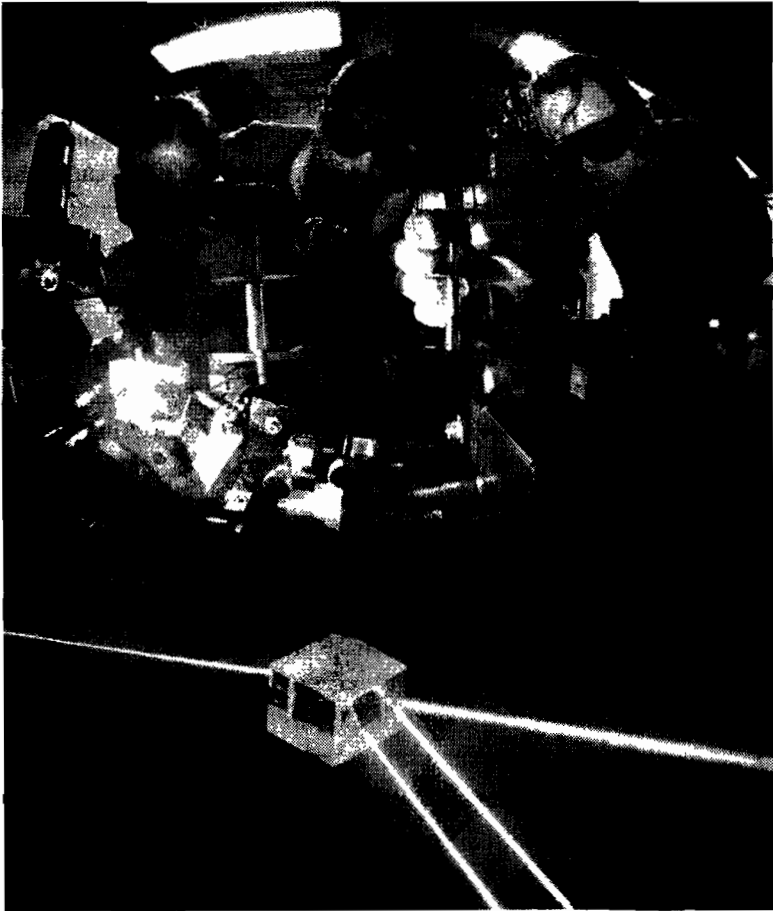


Рис. 34. Алиса и Боб пытаются сохранить тайну шифровального ключа, передавая его в виде поляризованных фотонов (см. вклейку)

После передачи Боб связывается с Алисой по обычному несекретному каналу, чтобы сообщить ей, каким из двух способов он пользовался при приеме каждого фотона, но не указывает, какое значение — 0 или 1 — он получил в результате измерения. Затем Алиса сообщает Бобу, какие из фотонов были считаны правильно. Неверно измеренными фотонами пренебрегают. Правильно принятые фотоны образуют шифровальный ключ. Ева, как шпион-дешифратор, не может произвести измерения каждого фотона обоими способами. Если Ева проведет измерение неправильным способом, то неизбежно внесет ошибки, и Алиса с Бобом смогут обнаружить присутствие нарушителя, сверяя отобранные биты.

В современных проводных и беспроводных системах передачи информации главная проблема состоит в предварительной секретной передаче самих ключей, без чего дальнейший процесс шифрования теряет всякий смысл. Если же использовать постоянный закрытый ключ, то его расшифровка является лишь вопросом вычислительной мощности системы и времени. Здесь я не могу не порекомендовать увлекательный роман Дэна Брауна «Цифровая крепость», где всесторонне анализируется подобная ситуация и даже предлагаются достаточно оригинальные (но, к сожалению, фантастические) методы ее решения. Таким образом, действующие в настоящее время стандарты защиты банковской, военной и коммерческой информации не являются абсолютно надежными, поскольку используют длины ключей меньше, чем длины шифруемых посылок. Подобные криптографические системы вполне можно взломать, определив секретный ключ простым методом проб и ошибок. А перспектива построения тех же квантовых компьютеров делает данную проблему по-настоящему актуальной.

Недостатки «закрытой криптографии» породили инновационный способ шифрования с использованием «открытого ключа». При этом вводятся общедоступный код для шифрования и закрытый код для расшифровки сообщений.

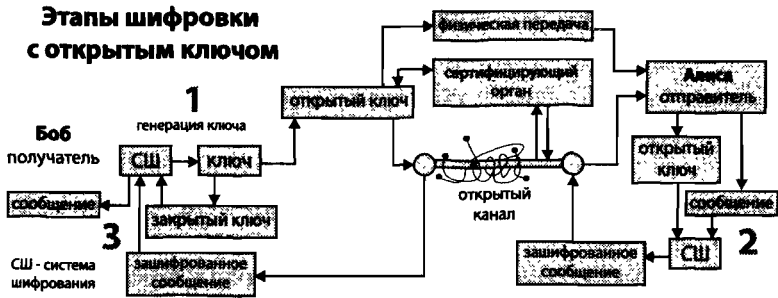


Рис. 35. Схема шифрования с открытым ключом

Получатель генерирует два ключа. Один из них открытый, другой – закрытый (секретный). Открытый ключ не должен передаваться по открытому каналу либо его подлинность должна быть гарантирована некоторым сертифицирующим органом. Отправитель с помощью открытого ключа шифрует сообщение, а получатель с помощью закрытого ключа дешифрует сообщение.

Первые алгоритмы открытых ключей содержали разложение простых чисел на множители. Известно, что вычислить произведение двух простых чисел легко. В то же время обратная задача – разложение числа на простые множители – достаточно трудоемкая, поскольку время вычислений экспоненциально возрастает при увеличении количества битов в исходном числе. Следовательно, и метод открытых криптографических ключей не дает гарантии тайны информации, ведь все опять связывается с непрерывно растущей вычислительной мощностью компьютерных систем взломщиков кодов.

Таким образом, в настоящий момент единственно надежным методом шифрования является метод «одноразового блокнота», поскольку доказана его безусловная надежность для дешифратора с неограниченными временными и вычислительными ресурсами. Здесь мы снова возвращаемся к задаче передачи одноразового ключа от отправителя к получателю. Одним из совершенно неожиданных ее решений

и является разработанный физиками-теоретиками «*протокол квантового распространения*».

Обычно носителями информации по квантовым протоколам являются фотоны, поляризованные под разными углами. С помощью поляризационных измерений можно различать попарно ортогональные состояния. Если известно, что фотон поляризован или вертикально, или горизонтально, то путем измерения можно установить, как именно; то же самое можно утверждать относительно поляризации под углами, скажем, в 45 и в 135 градусов. Однако с достоверностью отличить вертикально поляризованный фотон от фотона, поляризованного под углом в 45 градусов, практически невозможно.

Именно эти особенности поведения квантовых объектов были положены в основу протокола квантового распространения ключа. Чтобы обменяться ключом, уже известные нам персонажи Алиса и Боб выполняют следующие процедуры.

— Алиса посылает Бобу фотон в одном из поляризованных состояний (0, 45, 90, 135 градусов) и записывает угол поляризации. Отсчет углов ведется от направления «вертикально вверх» по часовой стрелке. В реальных системах перед передачей ключа оборудование специально юстируется, чтобы способ отсчета на приемнике и передатчике был одинаков (причем такую юстировку приходится периодически повторять при передаче), где начало отсчета угла, значения не имеет.

— У Боба есть два анализатора: один распознает вертикально-горизонтальную поляризацию, другой — диагональную. Для каждого фотона Боб случайно выбирает один из анализаторов и записывает его тип и результат измерений.

— По общедоступному каналу связи Боб сообщает Алисе, какие анализаторы использовались, но не сообщает, какие результаты были получены.

— Алиса по общедоступному каналу связи сообщает Бобу, какие анализаторы он выбрал правильно. Те фотоны, для которых Боб неправильно выбрал анализатор, отбрасываются.

Значения результатов ключа получаются следующим образом: при вертикально-горизонтальной («прямоугольной») поляризации вертикально поляризованный фотон означает 0, горизонтально поляризованный — 1; при диагональной поляризации фотон, поляризованный под углом в 45 градусов, — 0, в 135 градусов — 1. Эти правила легко меняются на противоположные. Если шпионка Ева пытается перехватить информацию при помощи оборудования, подобного применяемому Бобом, то примерно в половине случаев она неверно выберет анализатор, не сможет определить состояние полученного им фотона и отправит фотон Боба в состоянии, выбранном наугад. При этом в половине случаев Ева выберет неправильную поляризацию, и, таким образом, примерно в 25 % случаев результаты измерений Боба могут отличаться от результатов Алисы. Чтобы обнаружить перехват, Алиса и Боб выбирают случайный участок ключа и сравнивают его по общедоступному каналу связи. Если процент ошибок велик, можно предположить, что не обошлось без вмешательства Евы, и процедура начинается сначала.

Одной из главных трудностей работы с открытыми ключами является эффективная защита их от копирования. Вот тут и оказалось, что абсолютно секретную связь вполне реально создать, используя квантовые способы передачи информации. К примеру, чтобы «подслушать» шифровку, передающуюся отдельными фотонами через оптоволоконную линию связи, необходимо определить состояние каждого кванта сообщения, воздействуя на него детектором и затем вновь пересылая получателю шифровки. Однако мы уже знаем, что любое детектирующее воздействие на квантовую систему необратимо изменяет ее состояние. В этом случае незадачливый шпион полностью разрушит структуру ключа и респондент получит лишь бессмысленный набор символов. Подобные линии связи позволяют создать абсолютную защиту передачи криптографических ключей на практически неограниченные дистанции. Они уже выпускаются и используются для нужд спецслужб при наземной передаче инфор-

мации, вскоре планируется их вывод в космос для создания системы глобальной секретности.

В отличие от современных методов шифрования квантовая криптография остается надежным способом передачи секретной информации даже после появления квантовых компьютеров. В одном из способов пересылки квантового зашифрованного сообщения лазер пересылает одиночные фотоны, поляризованные специальным образом. Согласно принципам квантовых измерений злоумышленник, пытающийся перехватить поток фотонов, не сможет произвести «съем» фотонной информации без необратимого искажения последней. Таким образом, получатель квантовой «посылки» всегда сможет обнаружить присутствие нарушителя, сверяя отобранные биты.

В настоящее время квантовая криптография находит применение в сетях, характеризующихся небольшим географическим охватом. Сильная сторона квантового шифрования заключается в том, что любой, кто шпионит за передачей ключей, неизбежно изменяет их. Поэтому сигналы, несущие квантовые ключи, невозможно усиливать стандартным сетевым оборудованием, которое восстанавливает ослабленный сигнал и передает его к следующему ретранслятору. Оптический усилитель разрушает информацию, заключенную в кубитах.

Чтобы увеличить максимальную длину линий связи, исследователи рассматривают не только оптические волокна, но и другие среды для распространения квантовых ключей. Ученые уже добрались до горных вершин, где высота сводит к минимуму турбулентность атмосферы, чтобы испытать пересылку квантовых ключей в атмосфере.

Сейчас еще трудно предвидеть, во что выльются поисковые научные работы по дальнейшему развитию квантовой информатики и как будут выглядеть серийные квантовые компьютеры. Можно лишь с уверенностью утверждать, что здесь нас ждут удивительные свершения в физике и технике эксперимента, которые могут неузнаваемо изменить облик

мира будущего, как изменила (и продолжает менять!) его Всемирная паутина. Однако вне зависимости от того, будет построен квантовый компьютер или нет, квантовые вычисления уже заняли свое место в информатике и математике, а опыт работы с отдельными атомами существенно обогатил возможности экспериментальной физики, химии и инженерии. Не вызывает никаких сомнений тот факт, что будущее компьютерной техники тесно связано с квантовой физикой. И наиболее перспективным направлением ее развития на данный момент считается создание квантовых компьютеров. Квантовые компьютеры будут использовать в качестве базовых элементов отдельные молекулы, поэтому, очевидно, их развитие невозможно без применения аппарата квантовой механики. На примере истории квантовой информатики мы можем понять, как тесно развитие высоких технологий связано с развитием фундаментальных наук, насколько сильно первое зависит от второго. Поэтому чтобы добиться успеха в сфере новых технологий, надо помнить о том, что их основой служит именно теоретическая квантовая физика. Только дальнейшие успехи фундаментальной науки могут привести к открытию новых горизонтов в прикладных работах, к новым удивительным достижениям цивилизации.

Глава 2

МНОГООБРАЗИЕ РЕАЛЬНОСТИ

«Я не требую, чтобы теория соответствовала реальности, поскольку не знаю, что такое реальность. Реальность — это не качество, которое вы можете проверить лакмусовой бумагой. Все, о чем я беспокоюсь, — это то, чтобы теория предсказывала результаты измерений...»

Я соглашаюсь, что мы можем использовать асимметрию времени, когда задаем вопросы относительно наблюдений. Но я полностью отклоняю идею, что это имеет какое-либо отношение к квантовой гравитации или сознанию. Это все имеет отношение к волшебству и магии, но не к науке».

Стивен Хокинг



Рис. 36. Фантастический образ квантовой Мультивселенной (см. вклейку)

«Многочисленны и удивительны миры, плывущие подобно пузырькам пены по Реке Времени. Иные, их очень мало, движутся против или поперек течения; еще меньше таких, что находятся вне его пределов и не ведают ни будущего, ни прошлого».

Артур Кларк. «Стена Мрака»

Несмотря на бушующую бурю мнений вокруг основополагающих принципов квантовой механики, большинство прикладных специалистов чувствует себя совершенно уверенно за непробиваемой стеной математических формул, подобных тому же уравнению Шредингера, считая, что особых причин для беспокойства у них просто нет. Квантовая физика хотя иногда и воспринимается как крылатое выражение Эйнштейна — «настоящее колдовское исчисление», отлично работает в самых различных подразделах инженерных наук. Например, она позволяет с очень высокой точностью предсказывать и рассчитывать самые разнообразные эффекты в электронной оптике, атомной и ядерной физике, микроэлектронике. Квантовая физика не только полностью определила облик прошедшего столетия и нашего времени, но и подняла множество философских вопросов. Одними из центральных среди них являются отношения между наблюдателем-экспериментатором и материальным объектом исследований. Если в классической физике считалось, что состояние Вселенной никак не зависит от наблюдателя, то законы квантовой физики указывают на то, что сам факт наблюдения какого-либо параметра микромира неминуемо приводит к его изменению.

А можно ли распространить этот фундаментальный принцип на весь окружающий нас макромир? Так, совсем недавно страницы многих газет и журналов, не говоря уже об Интернете, облетело краткое сообщение, приписываемое исследовательской группе американских ученых, о приближении даты «Квантового апокалипсиса» из-за постоянных наблюдений астрономами таинственной темной энергии, в кото-

рую, по самым последним представлениям, погружена наша Метагалактика. Оставим на совести околонуучных журналистов полное искажение смысла этой несостоявшейся сенсации. Тут удивителен сам факт возникновения «под квантовым соусом» давних метафизических вопросов о том, какова наша Вселенная в тот момент, когда мы ее не наблюдаем, и вообще — существует ли Вселенная без нашего наблюдения.

Один из теоретических подходов заключается в том, что надо рассматривать большой коллектив или ансамбль находящихся в одинаковых условиях частиц, над которыми производят измерения. При этом подразумевается, что каждый экземпляр микросистемы пребывает в одном из возможных состояний. В статистике измерения дадут определенные частоты появления каждого из них в соответствии с их вероятностями.

По другой, «копенгагенской», версии, индивидуальные микрообъекты находятся сразу во всех состояниях, и вероятности описывают потенциальные возможности каждой из частиц. Иными словами, сосуществуют многие альтернативы, и конкретное состояние физической системы возникает лишь в момент измерения. Не все ученые удовлетворились такой не слишком наглядной схемой квантовых явлений и подняли вопрос: какая же реальность стоит за ней, откуда возникают вероятности? Признавая работоспособность квантовой механики, Эйнштейн был убежден, что она неполно охватывает явления и нужно пытаться ее усовершенствовать. В самом деле, это не первая теория, где проявляет себя случай. Есть образец — статистическая физика, которая, отталкиваясь от процессов на уровне атомов и молекул (на микроуровне), объяснила законы термодинамики (макроскопический уровень). Изучая, скажем, поведение газа, мы не можем измерить значения всех параметров каждого атома или молекулы, и потому возникает случайность.

Эйнштейн в своих воспоминаниях признавал, что его интуиция всегда подсказывала ему, что и на квантовом уровне должно быть нечто подобное. А значит, нужно ввести в рас-

смотрение более низкий — субквантовый уровень. Возможно, именно там найдутся параметры, значения которых влияют на исход того или иного эксперимента. Но тут сразу возникают каверзные вопросы: если субквантовый уровень остается принципиально недоступным, то, может быть, разговоры о нем — просто пустые фантазии? Такого мнения, в частности, придерживался Вернер Гейзенберг. Противоположный подход пытались реализовать Давид Бом, Луи де Бройль и другие физики. Их оппоненты-копенгагенцы повторяли: каждый микрообъект — черный ящик, и обсуждать его внутреннее устройство бесполезно. Но энтузиасты скрытых параметров выдвинули контрдовод: всякое доказательство строится на базе принятых постулатов и может потерять свое значение при их изменении.

Когда-то великий Эйнштейн в письме своему однокурснику по Цюрихскому политехникуму Мишелю Бессо так охарактеризовал рождающуюся квантовую теорию: «Настоящее колдовское исчисление». Заканчивалась первая четверть прошлого века и завершалась научная революция, породившая новую физику, но один из ее создателей даже не предполагал, насколько крылатой станет оброненная им в письме фраза. Прошло без малого столетие, и литературные штампы «колдовское исчисление» и «квантовая магия» встречаются даже в названиях фирм, пытающихся создавать квантовые компьютеры.

Диалектика спирали исторического материализма вернула на круги своя и знаменитую полемику между Эйнштейном и Бором, касающуюся смысла вероятностной интерпретации квантовой теории. Бурные научные споры на эту тему в свое время разделили физиков и философов на два идеологически непримиримых лагеря. Сейчас дискуссию продолжают два известнейших теоретика нашей современности: Роджер Пенроуз, играющий роль Эйнштейна, и Стивен Хокинг, играющий роль Бора. Конечно, за прошедшее столетие обсуждаемые вопросы стали сложнее и изощреннее, но их глубинная суть практически не изменилась. Все также одни физики счи-

тают, что вероятностный характер квантово-механических представлений является фундаментальной особенностью окружающей природы и не может быть выведен из каких-то иных, более глубоких «первых» принципов. Другие же продолжают доказывать, что неоправданное расширение понятия неопределенности физических процессов микромира на окружающую реальность неизбежно приводит к целому ряду логических противоречий (кот Шредингера), так что далеко не все закономерности квантовой теории выявлены, особенно на уровне ее связи с макромиром.

Обсуждение фундамента «квантовой парадигмы» в наше время захватывает и такие интереснейшие темы, как «квантовая гравитация», «квантовая космология», «квантовая стрела времени», «квантовая нелокальность» и «квантовая физика коллапсаров». С другой стороны, в орбиту этой давней дискуссии со второй половины прошедшего столетия все чаще начинают попадать весьма необычные и даже фантастические предметы, такие как «ветвящиеся Вселенные» и «сознание наблюдателя». Несомненно, что в научных спорах большую роль играет личный фактор. Поэтому после того как выяснилось, что Вселенная расширяется ускоренно и гениальная физическая интуиция Эйнштейна не подвела его в этом вопросе, не умолкавшие долгое время критики, всячески смаковавшие этот «интеллектуальный промах» создателя релятивистского мира, стали очень осторожно относиться и ко второй главной «ошибке» великого физика в вопросе о «недоопределенности квантовой теории».

Все это еще раз подчеркивает, насколько до сих пор не устоялись многие современные концепции теоретической физики. К тому же у многих околonaучных философов, журналистов, писателей-популяризаторов и даже профессионалов-теоретиков существует огромный соблазн распространить глубоко парадоксальные закономерности микромира на окружающую реальность. Яркими примерами здесь могут служить книга Фреда Адамса «Наш живой Мультиверс. Книга Бытия в 0+7 главах» и труд одного из главных апологетов

«квантовой нелокальности» известного физика-теоретика Дэвида Дойча «Структура реальности».

2.1. Реальность многомирья

«Я до сих пор помню потрясение, которое испытал, впервые ознакомившись с теорией множественности миров. Идея о том, что каждое мгновение из меня появляется $10^{\text{ в } 100\text{-й}}$ степени слегка отличающихся друг от друга двойников и каждый из них продолжает беспрестанно делиться, пока не изменится до неузнаваемости, не укладывается в рамки здравого смысла. Вот уж поистине картина бесконечно прогрессирующей шизофрении».

Лауреат премии М. Планка В. Вит

«Космос состоит из множества раздувающихся шаров, которые дают начало таким же шарам, а те, в свою очередь, рождают подобные шары в еще больших количествах, и так до бесконечности».

*Андрей Дмитриевич Линде,
один из создателей инфляционной космологии*

«Нет ничего удивительного в том, чтобы в большом магазине готового платья подобрать костюм себе по плечу. Аналогично в великом множестве Вселенных, в каждой из которых реализуется какой-то определенный набор космологических параметров, вполне может найтись хоть одна, где существуют предпосылки для возникновения жизни. В такой Вселенной мы и находимся».

*Мартин Рис,
Президент Королевского общества Великобритании*

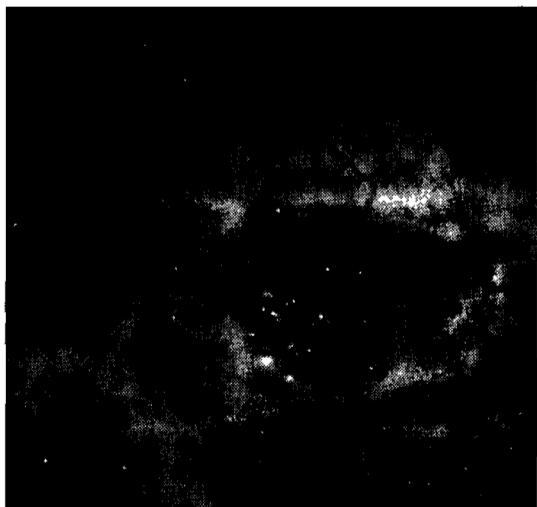


Рис. 37. Многообразие Вселенной (см. вклейку)

Во второй половине прошлого века спор о реальности квантового мира перешел в совершенно необычную плоскость обсуждения реальности существования множества одновременных вариаций Вселенной. Несмотря на кажущуюся фантастичность, эта идея прижилась и получила дальнейшее развитие. В последующие годы термин «Мультимир» и такие его аналоги, как «Мультиверс», «Мультиуниверсум», «Мегамир» и «Метавселенная» замелькали в трудах серьезных ученых. Сейчас уже многие теоретики уверены, что впоследствии эта концепция имеет все шансы стать одним из краеугольных камней новой парадигмы науки о структуре мироздания.

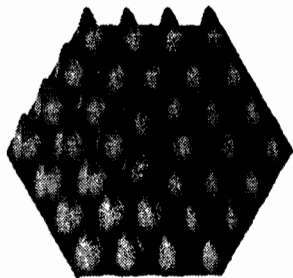


Рис. 38. Модель редукции волнового пакета

Если разместить в пространстве детекторы для определения параметров пучка квантовых микрообъектов, например электронов, то в определенный момент один из данных детекторов пошлет сигнал о поимке электрона. Это означает, что вероятность нахождения отслеживаемой частицы в этот момент в месте расположения детектора тут же превращается в единицу, тогда как вероятность ее появления в любом другом месте и в иное время сразу падает до нуля. Но если бы мы решили уравнение Шредингера до срабатывания детектора, то оказалось бы, что волновая функция непрерывно распределена во времени и пространстве.

Особенно часто концепция Мультивселенной рассматривается в космологическом аспекте как неотъемлемая часть окружающей реальности. Однако в физику идея многомирья впервые вошла в совершенно ином контексте парадоксальной интерпретации квантовой теории измерений, которую в 1957 году предложил аспирант Принстонского университета Хью Эверетт.

Модель Эверетта была не первой и не последней попыткой упразднить или хотя бы обойти серьезную внутреннюю логическую несогласованность квантовой механики. Из предыдущей главы мы уже знаем, что вся информация о квантово-механическом объекте заложена в его волновой функции. Таким образом, вероятность обнаружить электрон в определенной точке пространства в данный момент времени определяется квадратом модуля того значения, которое принимает в этой точке и в этот момент его волновая функция. Чтобы вычислить это значение, надо решить знаменитое уравнение Шредингера, описывающее поведение волновой функции во времени и пространстве.

Выходит, что воздействие любого измерительного прибора мгновенно «схлопывает» волновой вектор. Это явление называют коллапсом волновой функции, или редукцией волнового пакета. Однако все дело в том, что уравнение Шредингера просто не имеет подобных «катастрофических» решений. Так что же происходит с волновой функцией в процессе измерения и как правильно описать это на языке квантовой механики?

Этот вопрос до сих пор не имеет однозначного ответа. Так, с точки зрения стандартной копенгагенской интерпретации, измерение представляет собой взаимодействие квантового объекта с классической системой, в результате которого она переходит от одного состояния макроскопического детектора к другому. Поэтому измерение и не должно описываться уравнением Шредингера, которое действует лишь для квантовых систем. Копенгагенская интерпретация принимает редукцию как объективную реальность квантового мира и строит на этом хорошо разработанный формальный аппарат расчетов поведения квантово-механических объектов, дающий результаты, стопроцентно совпадающие с данными эксперимента.

Однако этот подход с самого начала не удовлетворял многих физиков, которые периодически предпринимали попытки так представить теорию квантовых измерений, чтобы она не нуждалась в редукционном постулате. В области многомировой интерпретации поиски ведутся с большой энергией и подчас дают весьма остроумные решения, далекие от первоначальной концепции Эверетта. Общим для всех этих теорий является то, что коллапсионная редукция волновой функции просто не имеет места!

Согласно многомировой интерпретации существует бесконечное множество параллельных и равноправных «копий» нашего Мира, воплощающих окружающую физическую реальность. Тогда волновая функция будет описывать единый квантовый Универсум, который представляет собой наложение бесконечного числа всех возможных состояний. В вышеприведенных экспериментах Универсум разбивается на классические «срезы», в которых и оперируют независимые наблюдатели. Любой возможный результат каждого конкретного измерения с разной степенью вероятности реализуется в той или другой альтернативной мировой проекции.

В определенном смысле интерпретация Эверетта проще копенгагенской, поскольку обходится без постулирования коллапса волновой функции. Но за эту простоту приходится платить, допуская постоянное расслоение квантового Уни-

версума на классические миры. Интерпретация Эверетта парадоксальна, однако при всей своей эlegantности она не вводит новых физических объектов, существование которых можно было хотя бы косвенно подтвердить или опровергнуть на опыте. Более того, все физические расчеты, выполненные на основе копенгагенской и эвереттовской интерпретаций, дают идентичные результаты.

Профессиональное сообщество поначалу проигнорировало эвереттовскую идею, сочтя ее беспочвенной фантазией. Ситуация изменилась после того, как к ней проявили интерес такие крупные физики, как Брюс де Витт и Джон Уилер. Собственно говоря, именно после их работ идея Эверетта и получила термин «многомировая интерпретация». Вообще-то такое название не точно и уже ввело в заблуждение множество журналистов, литераторов и философов, правильнее было бы говорить «многопроекционная интерпретация».



Рис. 39. Отражение Миров на карте Интернета

Согласно изначальной интерпретации Эверетта, каждая из компонентов суперпозиции описывает целый мир и ни одна из них не имеет преимущества перед другой. Имеется столько миров, сколько альтернативных результатов имеет рассматриваемое измерение. В каждом из этих миров имеются и измеряемая система, и прибор, и наблюдатель. И состояние системы, и состояние прибора, и сознание наблюдателя в каждом из этих миров соответствуют лишь одному результату измерения, но в разных мирах результаты измерения различны. Несколько неожиданную аналогию Мультиверсу Эверетта можно найти, рассматривая карту Интернета. Ветвление и развитие информационных потоков во многом напоминают эволюцию реальностей, возникающих и исчезающих самым причудливым образом.

Таким образом, в интерпретации Эверетта одинаково реальны все результаты измерения, но реализуются они в разных мирах. Заметим, что в интерпретации Эверетта проблема селективного выбора результата измерения все же существует, она лишь иначе формулируется. Вместо основного вопроса квантовой физики: «Какой из возможных результатов реализуется в ходе процедуры измерения?» возникает новая задача: «В каком из эвереттовских миров локализовалась лаборатория наблюдателя?».

В свое время Уилер предложил довольно наглядную формулировку многомировой парадигмы. Он представил, что в момент квантового измерения перед наблюдателем как бы оказывается железнодорожная стрелка и его поезд может пойти в одном из нескольких направлений. В зависимости от того, в каком направлении пойдет поезд, наблюдатель увидит тот или иной результат измерения. Возможные направления движения поезда соответствуют альтернативным результатам измерения или различным эвереттовским мирам.

Тем не менее самым узким местом многомировой интерпретации является отсутствие реальных физических механизмов воплощения того или иного Мира, составляющего нашу Реальность.



Рис. 40. Парадоксальное многомирье (см. вклейку)

В попытках решить парадоксы многомировой интерпретации квантовой механики иногда предлагаются весьма необычные и спорные гипотезы об активной роли человеческого сознания. В данном случае выбор одного из параллельных эвереттовских миров является функцией сознания ученого-экспериментатора и в результате естественным образом возникает совершенно иная схема взаимоотношений квантовой и классической реальностей. В этой схеме квантовый мир объективен, потому что он не зависит от сознания. Он существует в форме параллельных миров, каждый из которых не менее реален, чем все остальные. Что же касается классического мира, то он возникает лишь после того, как сознание выбирает один из параллельных миров, при этом остальные миры продолжают свое независимое существование.

Сама по себе гипотеза Мультивселенной оказалась довольно продуктивной как в теорфизическом, так и в философском плане, вызвав еще один поток работ в области *квантовой космологии*. В их основе лежит удивительная модель

инфляционного Большого Взрыва, согласно которой наш Мир при рождении испытал кратковременное сверхбыстрое (инфляционное) расширение, в ходе которого его размеры выросли по экспоненте от времени.

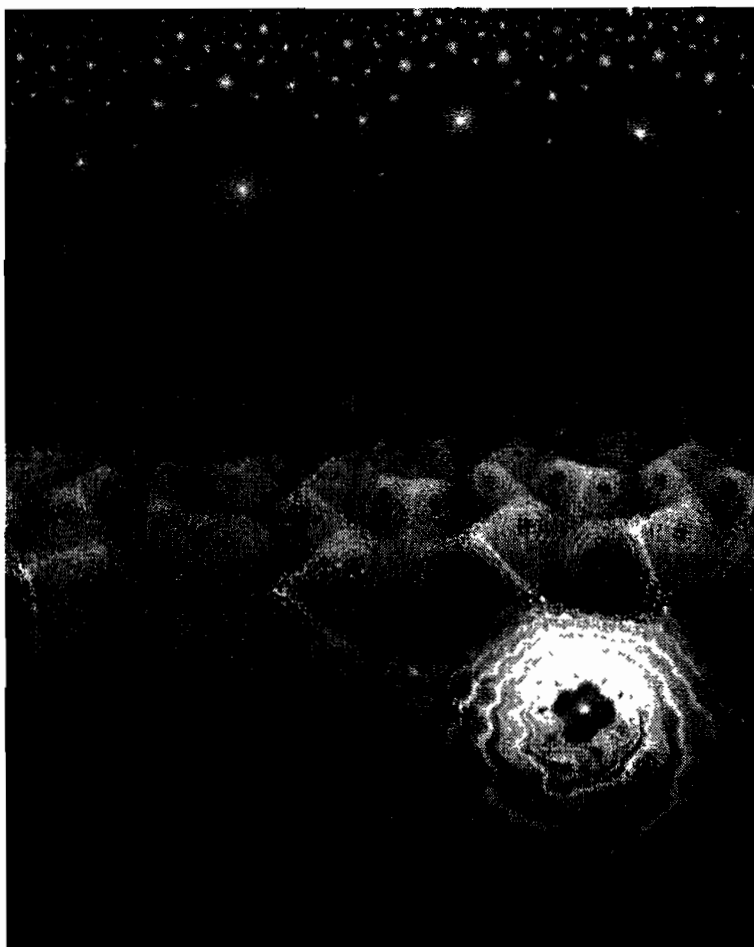


Рис. 41. Рождение Миров из пены квантовых флуктуаций (см. вклейку)

Спонтанные квантовые флуктуации первичного скалярного поля приводят к возникновению исполинских регионов, которые в совокупности и составляют Мультивселенную. Флуктуация, которая рождает данный регион, выступает в качестве «комплектующего» Большого Взрыва.

Отдельные Вселенные могут находиться в едином пространстве-времени, но совершенно непонятно, как они могут наблюдаться относительно друг друга.

Эта стадия эволюции Космоса началась через 10^{-43} секунды после возникновения *космологической сингулярности*, формально являющейся точкой отсчета истории нашей реальности. На этом этапе существовал только физический вакуум, пронизанный неким первичным полем, параметры которого сильно менялись из-за квантовых флуктуаций, «вспенивающих» изначальное пространство-время.

В конце концов, одна из флуктуаций достигла критического размера, что привело к острому локальному экстремуму интенсивности поля, после чего она стала быстро спадать. Этот подскок как раз и создал условия для выхода на инфляционный режим. В итоге возник молниеносно расширяющийся пузырек — зародыш нашей Вселенной, за невообразимо малый «квантовый» срок заполнивший как минимум объем Метагалактики.

Так пространство нашей Вселенной приобрело современные размеры, в которых и начал развиваться собственно процесс Большого Взрыва. Именно на этапе инфляции и сформировалось «физическое лицо» нашего Мира, включающее тот набор фундаментальных физических законов, которые до сих пор управляют поведением вещества и излучения. После всплеска, вызвавшего распространение пространства-времени, скалярное поле устремилось к минимуму, при этом в нем возникли очень быстрые колебания — осцилляции, рождающие элементарные частицы. В результате к концу инфляционной фазы Вселенная уже была наполнена горячей плазмой, состоящей из свободных кварков, глюонов, лептонов и высокоэнергетичных квантов электромагнитного излучения. Через тридцать микросекунд после Большого Взрыва кварки и глюоны сконденсировались в протоны и нейтроны, а где-то на десятой секунде наступила эра первичного нуклеосинтеза ядер гелия, дейтерия и лития.



Рис. 42. Новорожденный Мир

Судьба нашей Вселенной решалась в первые секунды после Большого Взрыва равенством плотности вещества и энергии. Преобладание энергии на ничтожные доли процента привело бы к быстрому раздуванию и охлаждению, а вещества — к скорой смене расширения на сжатие в точку и, возможно, к новому Взрыву. Вид нашей Вселенной также определила величина ядерных сил, связывающих протоны и нейтроны. Если бы она была меньше существующей, атомные ядра просто бы не возникли, а если больше, то еще на стадии первичного нуклеосинтеза практически весь наличный водород превратился бы в гелий. Не совсем понятную, но, несомненно, очень важную роль играет в эволюции нашего Мира скрытая «темная энергия» физического вакуума. По неизвестным причинам около семи миллиардов лет назад она сдвинулась от нуля к положительному значению, из-за чего Метагалактика начала ускоренно расширяться. Существуют предположения, что энергия вакуума определяет структуру космической материи. Будь она немного ближе к нулю, Вселенная так бы и осталась безжизненной и бесформенной смесью газа и пыли, равномерно распределенной по космическому пространству. В противном случае, чем больше была бы величина темной энергии, тем быстрее первичное вещество сконденсировалось бы в массивные галактики, которые давным-давно сколлапсировались бы в черные дыры.

Хотя в квантовой инфляционной космологии еще очень много белых пятен, да и сам по себе механизм инфляции малопонятен, теоретики уже разработали инновационный



Рис. 2. Спектры далеких звезд



Рис. 8. Интерференция света внутри стеклянного шара

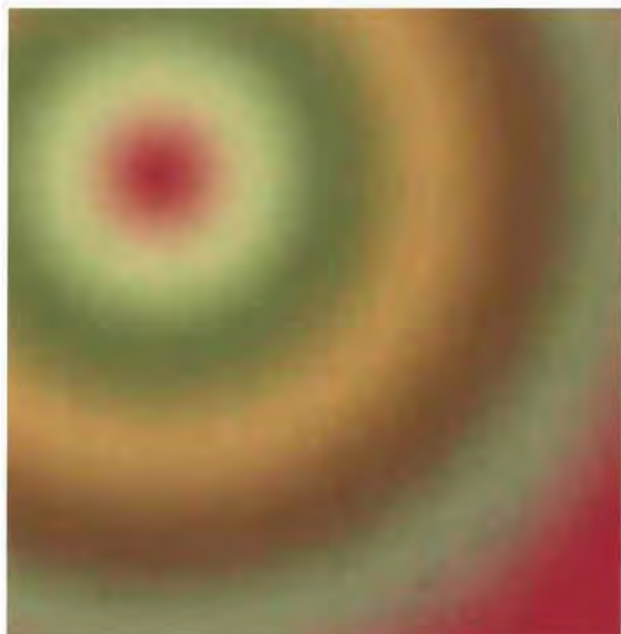


Рис. 9. Интерференционная картина рассеивания электронов на атомах кристалла

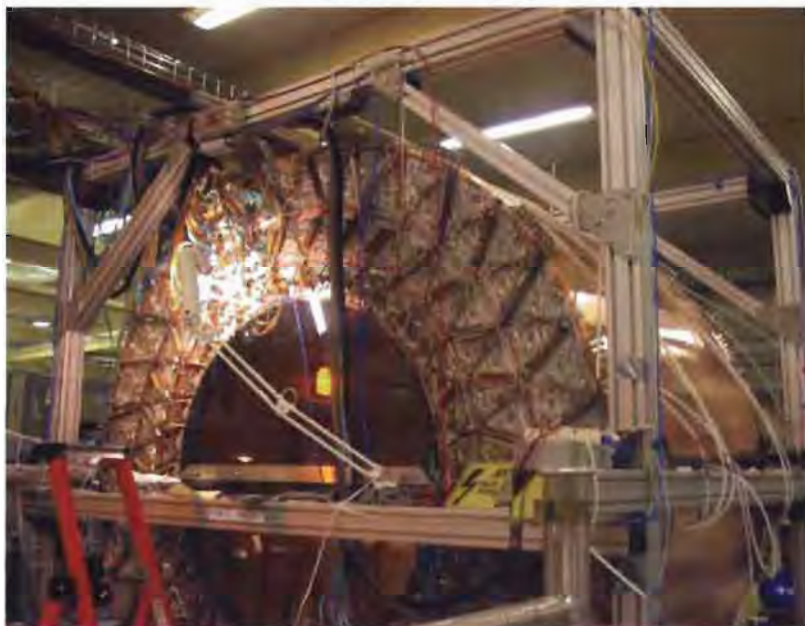


Рис. 10. Детектор элементарных частиц Большого адронного коллайдера «АТЛАС». С помощью новых уникальных детекторов элементарных частиц ученые надеются наконец-то обнаружить частицы «темной материи», наполняющей Вселенную

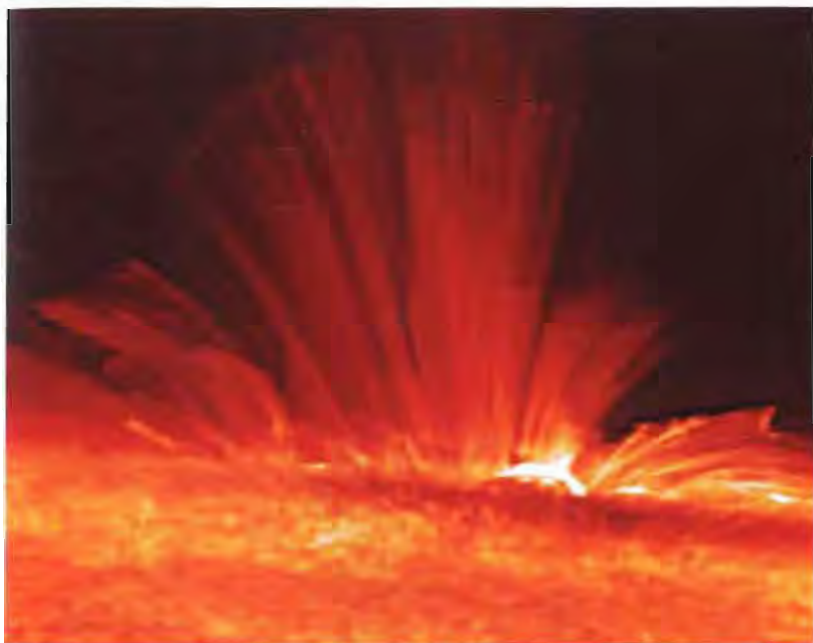


Рис. 13. Модель излучения абсолютно черного тела



Рис. 27. Художественный образ запутанных квантовых объектов



Рис. 30. Эксперименты по проверке ЭПР-парадокса

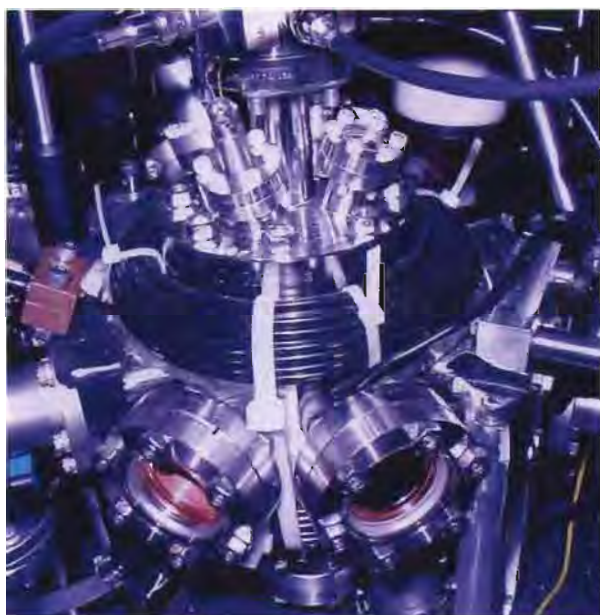


Рис. 32. Квантовый компьютер

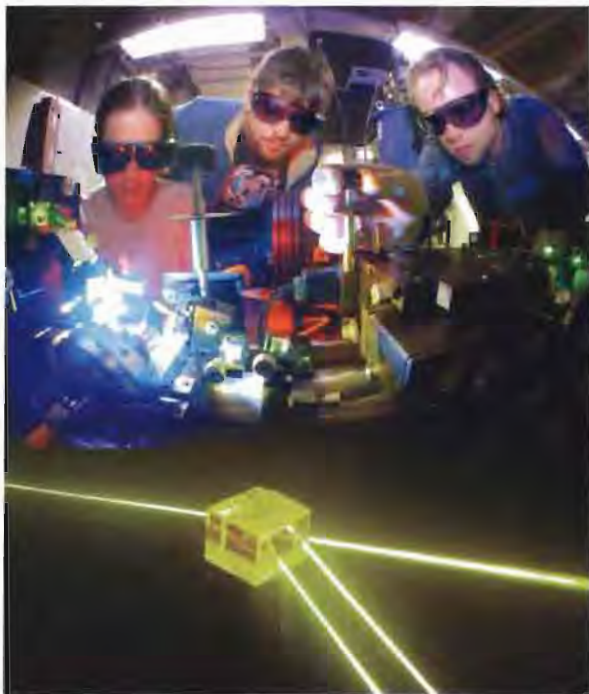


Рис. 34. Алиса и Боб пытаются сохранить тайну цифровального ключа, передавая его в виде поляризованных фотонов

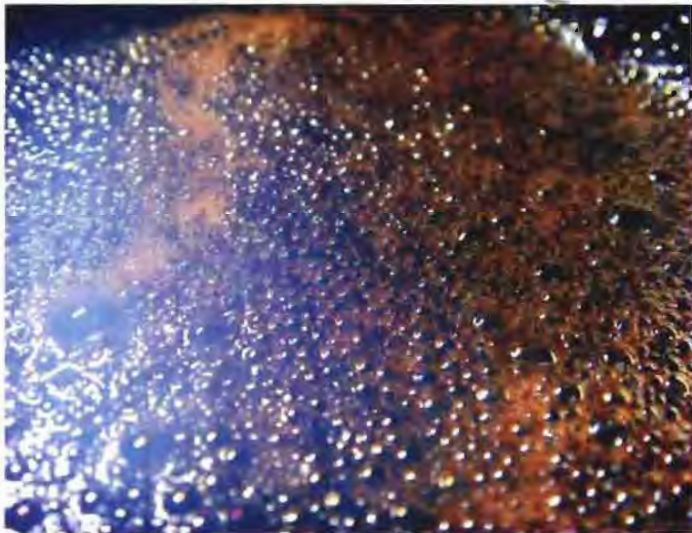


Рис. 36. Фантастический образ квантовой Мультивселенной



Рис. 37. Многообразие Вселенной

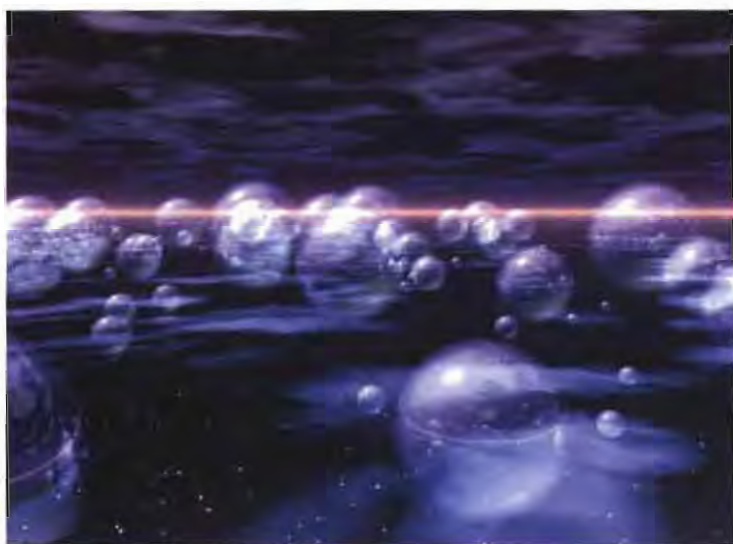


Рис. 40. Парадоксальное многомирье

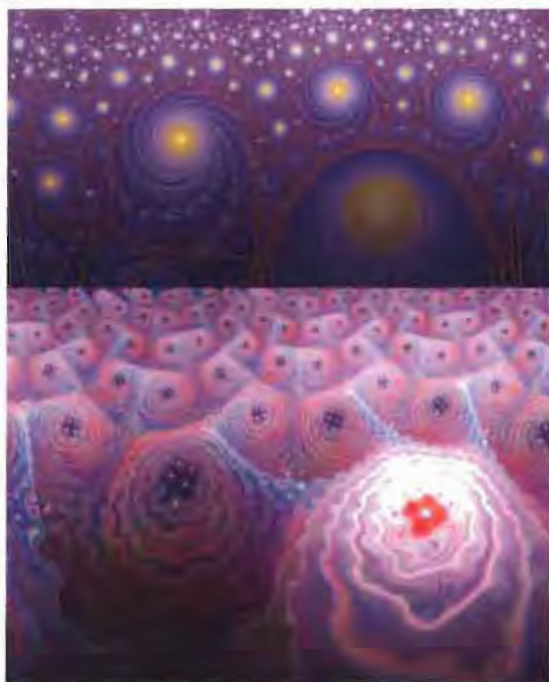


Рис. 41. Рождение Миров из пены квантовых флуктуаций

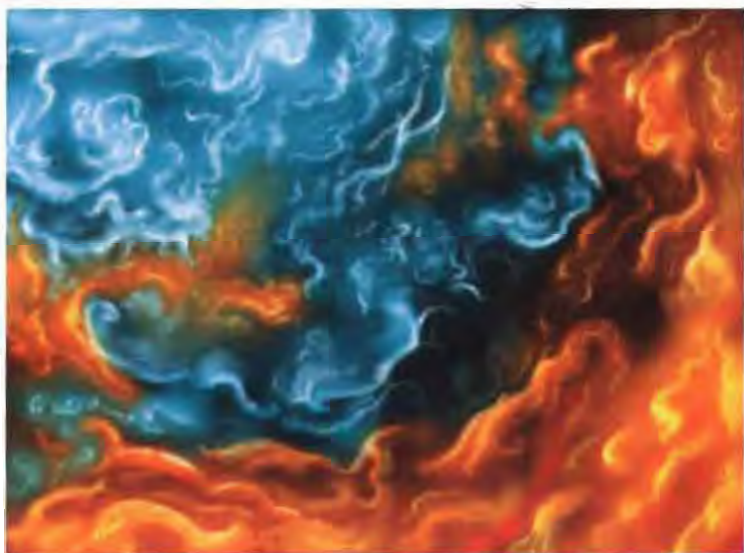


Рис. 43. Интерпретация Мира по Бому

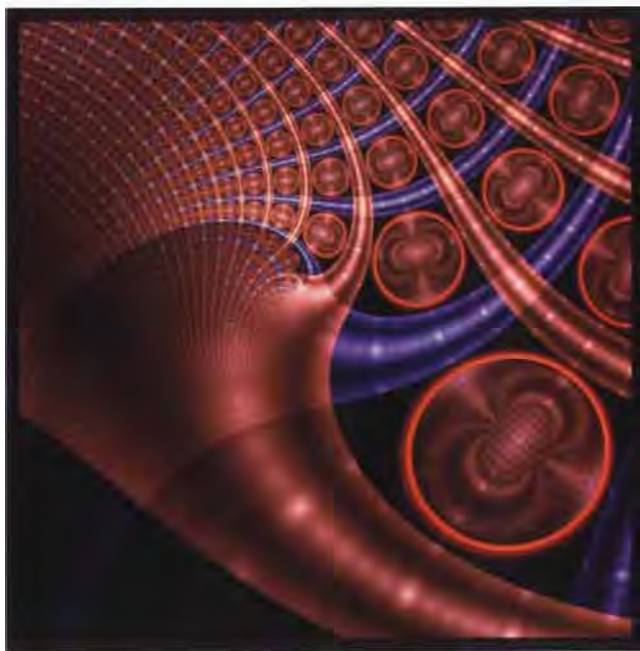


Рис. 45. Вселенная Бома



Рис. 48. Кипящая пена моря виртуальных частиц



Рис. 49. Пространственно-временная пена в начале Большого Взрыва



Рис. 51. Суперструнный гравитон

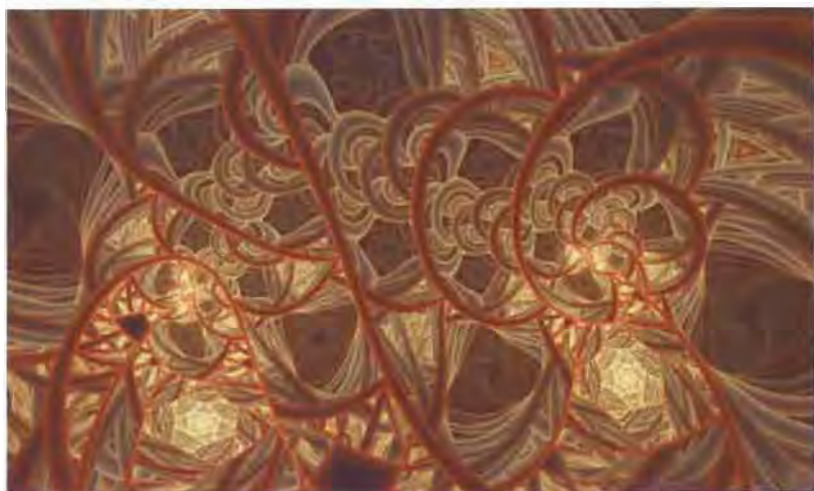


Рис. 52. Макет метагалактических струн

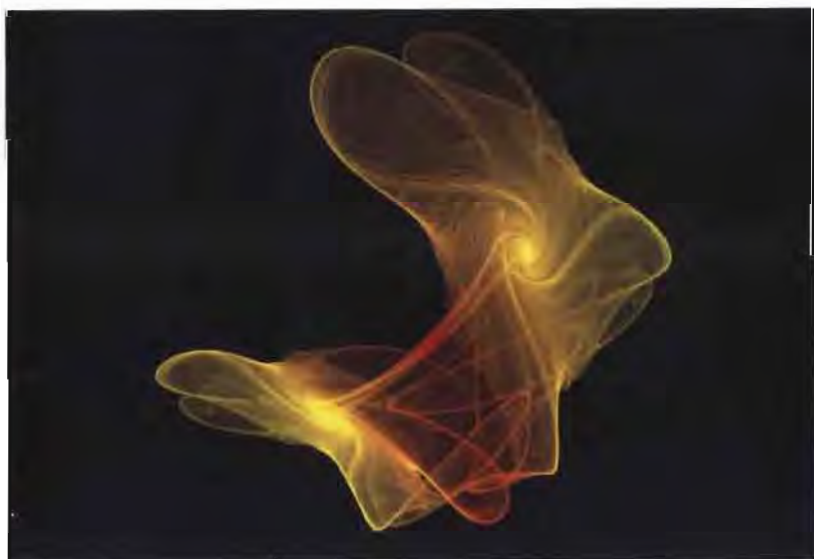


Рис. 55. Стринги и браны



Рис. 57. Ландшафты теории бран



Рис. 60. Большой Взрыв

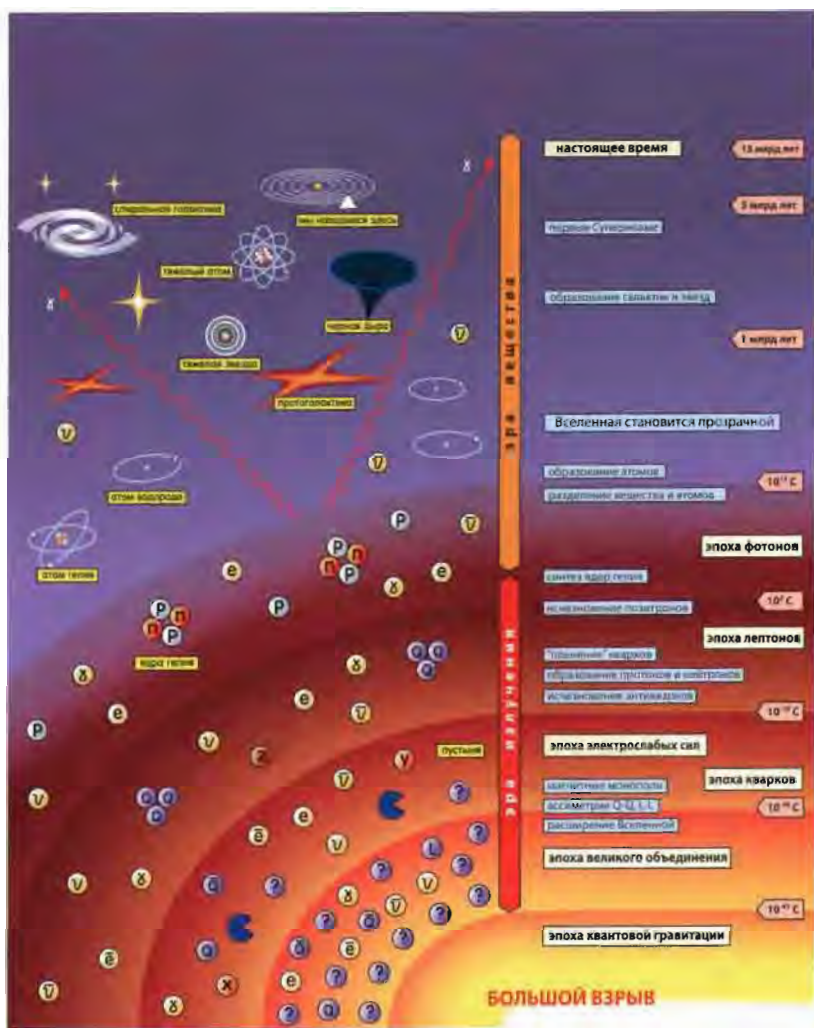


Рис. 62. Эволюция Вселенной



Рис. 74. Вращение галактики



Рис. 75. Макеты физического вакуума
на разных уровнях глубины



Рис. 79. Провал пространства-времени

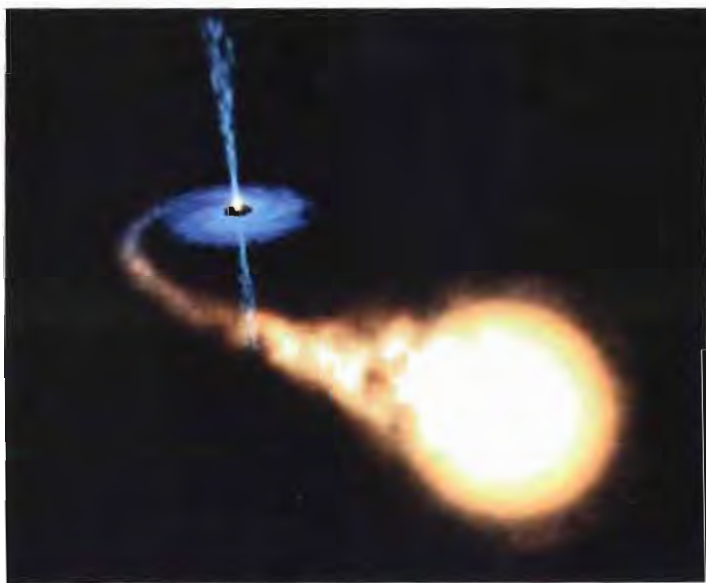


Рис. 82. Черная дыра в двойной системе

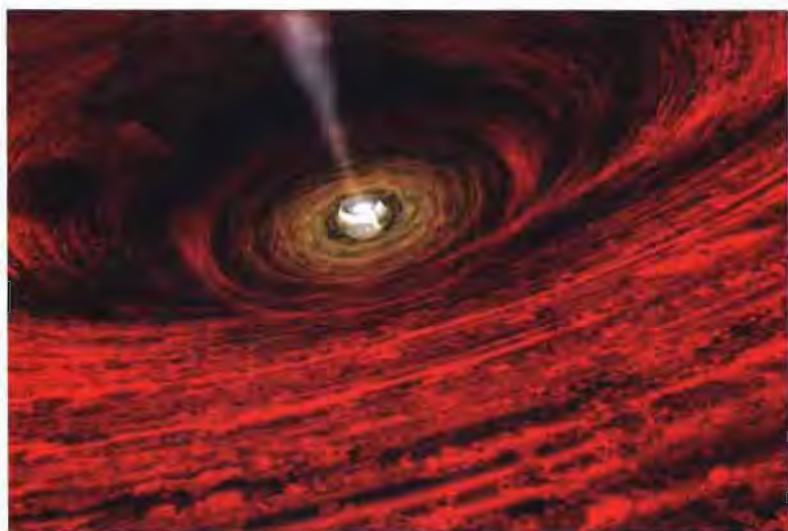


Рис. 84. Квантовий мікроколапсар



Рис. 85. М. Эшер «Бабочки»

сценарий *вечной инфляции*. Эта парадоксальная концепция предполагает, что квантовые флуктуации, подобные той, которая, возможно, положила начало нашей Вселенной, не исчезли в первые мгновения Большого Взрыва, а продолжают самопроизвольно возникать, порождая все новые и новые миры. Не исключено, что и наша Вселенная сформировалась подобным образом в мире-предшественнике. Точно так же можно допустить, что и в нашем Мире возникнет флуктуация, которая разовьется в новую Вселенную, может быть, даже с иными физическими законами и структурой пространства-времени, тоже впоследствии способную к космологической «редубликации».

Любопытно, что сценарий непрерывно рождающегося инфляционного Мира, которому космологи дали название «Мультиверс» («Мультиуниверсум», «Мультивселенная»), позволяет совершенно по-иному взглянуть на вероятность зарождения жизни. Эта величина по мере продвижения вперед исследований в области молекулярной биологии и генетики все более приобретает поистине отрицательное астрономическое значение. Сложность до сих пор не найденного «механизма запуска» жизненных процессов позволяет считать, что даже действия всех возможных факторов на протяжении эволюции нашей Вселенной (после образования первых звезд) может не хватить для его реализации. Однако наличие возможно практически бесконечного количества разнообразных миров коренным образом меняет ситуацию. Естественно, что многие миры Мультиуниверсума могут быть абсолютно безжизненными, например, если в них будут иные фундаментальные физические константы, не способствующие развитию жизненных процессов. Среди таких постоянных важнейшими могут быть гравитационная константа и размерность пространства. Если бы гравитация была слабее, первичные газопылевые туманности не могли бы конденсироваться в плотные скопления вещества, дающие начало звездам; в противном случае звезды сгорали бы так быстро, что жизнь не успевала бы возникнуть. Для размерности пространства вряд ли надо доказывать, что ни двухмерное, ни

тем более одномерное пространство не могут вмещать биомолекулы. С другой стороны, в четырехмерном пространстве и пространствах более высоких размерностей были бы невозможны стабильные планетные орбиты, определяющие космические «зоны жизни».

Конечно, все эти соображения основаны на предположении, что жизнь возникает лишь в привычных нам формах, но ведь других мы не знаем. Можно, конечно, вспомнить знаменитые «Солярис» Станислава Лема и «Облако» Фреда Хойла и порассуждать о мыслящем поле или разумной плазме, но вряд ли стоит прибегать к таким аргументам без достаточных оснований. Иначе говоря, наш мир таков, каков есть, не потому, что его так спроектировали неведомые высшие силы, а просто в силу действия закона больших чисел. Перебор такого стремящегося к бесконечности количества вариантов обязательно приведет к возникновению жизни и разума. Ну а когда-нибудь сверхцивилизации будущего смогут найти и способ связи через барьеры пространства-времени иных измерений. Существует и еще более фантастическая гипотеза, согласно которой нить жизни может теряться в глубине прошлого Мультиуниверсума, возникнув на протяжении сотен миллиардов лет из случайных факторов, а вот ее споры могли бы уже передаваться каким-то чудесным образом из одного мира в другой, достигнув, в конце концов, и нашей Вселенной. Однако здесь мы уже давно покинули зону научных спекуляций, прошли этап беспочвенного теоретизирования и вступили в область научной фантастики...

2.2. Голограмма Вселенной

«Истинная действительность находится вне любых человеческих представлений о ней; уровень восприятия ее в нашем мире зависит от наших представлений. Таким образом, мы можем полностью игнорировать истинную действительность из-за того, что наши сформировавшиеся представления о мире не допускают ее существования...»

Мы непрерывно сталкиваемся с явлениями, которые мы не способны воспринять на нашем нынешнем уровне развития, однако проявления этой пока не доступной действительности находятся в процессе постоянного подспудного осознания».

Давид Бом

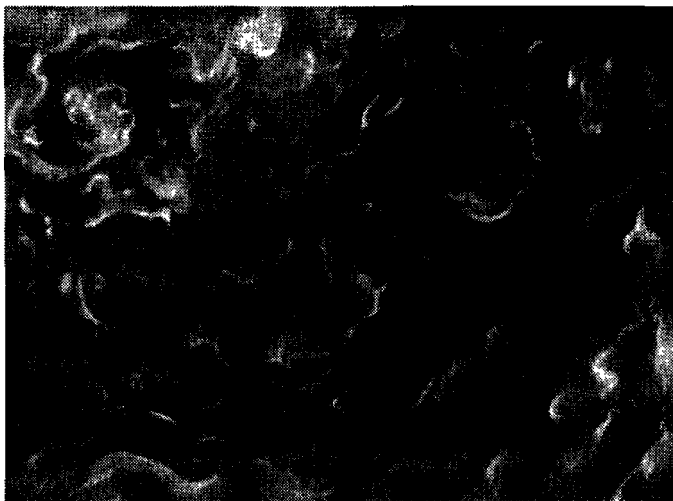


Рис. 43. Интерпретация Мира по Бому (см. вклейку)

«Эта интерпретация позволяет рассматривать каждую индивидуальную систему как находящуюся в некотором точно определенном состоянии, изменение которого со временем задается точными законами, похожими на классические уравнения движения (но не идентичными с ними). Представление о квантово-механических вероятностях рассматривается как вызванное практической необходимостью... Физические результаты, к которым приводит предлагаемая нами интерпретация, точно совпадают с обычными, коль скоро сохраняется уравнение Шредингера в его современной общей форме».

Давид Бом

В школьные времена мне попала удивительная книга, буквально перевернувшая представление об окружающем мире и во многом определившая все последующее мировоз-

зрение. Это замечательная работа одного из самых оригинальных физиков прошлого века Дэвида Боме «Специальная теория относительности». Будучи уже студентом, я на спецкурсе по теоретической физике с некоторым удивлением узнал, что профессор Бом наиболее известен своими парадоксальными исследованиями в области квантовой механики. Последовательный анализ структуры окружающей реальности привел его к заключению, что физические объекты, кажущиеся нам разделенными в пространстве и времени, на самом деле связаны глубокими неявными скрытыми связями на субквантовом уровне.

Теория Боме основывается на тезисе, что все внешне случайные явления и процессы в окружающей реальности определяются глубоко скрытой субквантовой природой нашего Мира. Бом категорически отвергал принципиальную непознаваемость параметров микросистем и вероятностную копенгагенскую интерпретацию стандартной квантовой теории, считая, что частицы движутся по вполне однозначным траекториям, определяемым особыми «квантовыми потенциалами». Скрытые параметры квантовых потенциалов, по Бому, не зависят от расстояния, обеспечивая совершенно мистическую сверхмгновенную связь между квантовыми системами.

По мнению Боме, квантовый мир неразрывно един в своей основе, что и проявляется в том же ЭПР-парадоксе, когда спутанные на квантовом уровне частицы ведут себя строго согласованно, мгновенно взаимозменяя свои состояния на любой дистанции.

В середине прошлого века Бом выпустил главный труд своей жизни — классическую монографию «Квантовая теория», и сейчас считающуюся одним из лучших изложений копенгагенской интерпретации квантовой механики. Великий Эйнштейн, который был знаком с Бомом, получив экземпляр книги, отметил, что редко встречал столь ясное представление о сущности квантовой теории. Сам Эйнштейн, критикуя ортодоксальную версию квантовой теории Бора — Гейзенберга, одним из первых сформулировал гипотезу *скрытой не-*

ременной в уравнениях квантовой механики. Ее краткая суть состоит в том, что микрочастицы имеют классически фиксированные координаты и скорости, а вероятностный подход к их определению в рамках стандартной квантовой механики является результатом недоопределенности самой теории.

Для иллюстрации своей теории Бом придумал пример с квантовым аквариумом. Проекция одних и тех же рыб в аквариуме через перпендикулярные плоскости стенок кажутся, на первый взгляд, совершенно разными. Лишь после долгих наблюдений можно установить коррекцию поведения двух проекций одной рыбки. Эта отчетливая взаимосвязь выражается в том, что если одна рыбка меняет положение, то одновременно приходит в движение и другая, причем если одну видно в анфас, то другую — непременно в профиль. Поэтому, не зная, что действие происходит в одном аквариуме, можно заключить, что рыбки неведомым образом мгновенно общаются друг с другом.

Впоследствии теория скрытых переменных дополнялась и переписывалась в трудах многих физиков. В конечном итоге она стала выглядеть примерно так: физическим обоснованием принципа неопределенности служит то, что измерить характеристики микросистемы можно лишь путем взаимодействия с детектором и при этом ее состояние обязательно изменится. Но, возможно, существует некий «субквантовый» способ измерения, обходящий принцип неопределенности и не изменяющий параметров микрообъектов. Самой главной проблемой развития принципа скрытых параметров было отсутствие какой-либо экспериментальной базы.

Сам Бом после продолжительных обсуждений этой темы с Эйнштейном выдвинул свою версию квантовой теории со скрытыми параметрами, получившую название «*причинная интерпретация квантовой теории*». Здесь надо вспомнить оригинальную гипотезу Шредингера о том, что квантовые «подпороговые» связи могут в ряде случаев превышать классические. Первые попытки экспериментальной проверки тезиса Шредингера относятся ко второй половине прошлого века, когда ирландский физик Джон Стюарт Белл, рабо-

тавший тогда в Европейском центре ядерных исследований в Женеве, сформулировал условия проверки реальности квантовой запутанности. В ходе своих теоретических исследований Белл получил неожиданный результат, доказывающий принципиальную возможность экспериментальной проверки правомерности вероятностного описания состояния квантовых микросистем. В противном случае следовало бы то, что имеется набор неких скрытых параметров, позволяющих точно описать положение и импульс квантовых систем. Теорема Белла содержала ряд неравенств, показывающих, как при реальности или отсутствии скрытых переменных будут выглядеть результаты серий контрольных экспериментов.

Экспериментальная проверка неравенств Белла оказалась очень даже непростым делом. Схема опытов включала синхронную генерацию квантов излучения при воздействии на атомы вещества мишени. После этого нужно было уловить излученные фотоны и определить направление их спинов. Такая экспериментальная серия должна была бы включать тысячи наблюдений, чтобы накопить необходимые массивы данных для статистической обработки. Все это напоминает эксперименты с запутанными квантовыми частицами, описанные в предыдущей главе. В конечном итоге для проверки неравенств Белла потребовались десятилетия самоотверженного труда физиков-экспериментаторов и проведение множества серий опытов для получения статистически достоверной картины. Результаты этой кропотливой экспериментальной работы были проанализированы и обобщены уже в последней четверти прошлого века. Итоги исследований позволили сделать вывод, что волновая функция распределения вероятностей совершенно безошибочно описывает движение частиц от источника к датчику. Следовательно, в такой постановке задачи уравнения волновой квантовой механики не содержат скрытых переменных.

Замечательный ученый и популяризатор науки Джеймс Трефил в своей книге «200 законов мироздания» пишет:

«Это единственный известный случай в истории науки, когда блестящий теоретик доказал возможность эксперимен-



тальной проверки гипотезы и дал обоснование метода такой проверки, блестящие экспериментаторы титаническими усилиями провели сложный, дорогостоящий и затяжной эксперимент, который в итоге лишь подтвердил и без того господствующую теорию и даже не внес в нее ничего нового, в результате чего все почувствовали себя жестоко обманутыми в ожиданиях!».

Сейчас справедливость традиционной трактовки квантовой физики еще и доказывают вышеописанные эксперименты по практическому приложению квантовой информатики в виде квантовой криптографии и квантовых компьютеров.

Тем не менее научные школы, развивающие гипотезу скрытых параметров, продолжают существовать. Они всячески развивают изначальную концепцию Бома, исходившего из того, что микрочастицы объективно существуют и имеют классическое координатно-импульсное представление в любой момент времени вне зависимости от того, наблюдает ли их кто-нибудь. В квантовой механике Бома наряду с волновой функцией элементарной частицы вводится также ее траектория. Предполагается, что движение частицы можно описывать ее классической траекторией, но сама статистика траекторий выводится из уравнения Шредингера. Таким образом, предсказания теории Бома совпадают с предсказаниями обычной квантовой механики.

Современные последователи Бома считают, что на субквантовом уровне организации материи существует некая сверхглубокая физическая реальность, еще не понятая современной наукой. На этом фундаментальном уровне строения природы Бом ввел понятие квантового потенциала как неизвестной полевой структуры. Квантовый потенциал, по идее Бома, должен равномерно заполнять все пространство нашего Мира, не ослабевая на расстоянии. Самым же привлекательным в концепции Бома было и остается то, что при помощи квантового потенциала можно «классически» объяснить все квантовые эффекты. При этом физика Бома выглядит куда более целостной и органично переплетается с классической механикой, чем многие современные построения «ин-

флантонных полей» и «многомерных бран», не говоря уже о «квантовом сознании».

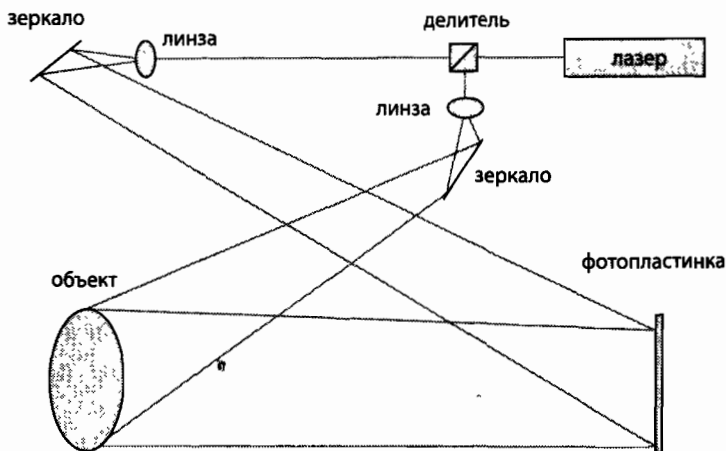


Рис. 44. Схема получения голограмм

Главная особенность голограммы состоит в том, что каждая из ее частей в некотором смысле содержит целое. Если на любую часть голограммы направить луч лазера, то будет восстановлено полное объемное изображение объекта. Сейчас некоторые физики-теоретики пытаются применить голографический принцип описания действительности к многомерному пространству-времени.

Развивая теорию Бома, его сторонники получили целый ряд необычных модельных представлений. Например, если в классической квантовой теории любая система просто представляет собой сумму поведения отдельных ее частей, связанных принципом суперпозиции, то из теории квантового потенциала следует, что поведение отдельных частей является производным от целого. Отчасти это соответствует позиции Бора о необходимости совместного анализа ансамблей частиц, но само по себе существование целостной сверхглубокой единой реальности Бома категорически отвергается копенгагенской интерпретацией квантовой механики. При-

стальное внимание современных физиков-теоретиков (Дитер Зе, Войцех Зурек, Дэвид Дойч) привлекает одно из интересных свойств квантового потенциала Боба, связанное с понятием *квантовой локальности*.

Это понятие, означающее, что квантовой системе можно сопоставить определенный пространственный объем, вызывает в последнее время ожесточенные споры, в которых смешалось все — давняя полемика сторонников Бора и Эйнштейна, инновации «необомовской доктрины», квантовая телепортация и целый букет мистических суеверий... В нашем повседневном окружении все предметы занимают вполне определенное место в пространстве, имея вполне определенную координатную дислокацию, а между предметами, соответственно, расположены промежутки пространства с определенной протяженностью, то есть расстоянием. Но из свойств квантового потенциала вытекает, что на фундаментальном уровне понятия локальности и протяженности отсутствуют.



Рис. 45. Вселенная Боба (см вклейку)

Теория Бомы предполагает, что наш уровень окружающей реальности составляет лишь проекцию фундаментального единого нелокального порядка материи. Что же лежит спрятанным в изначальной основе нашей реальности? Каждый участок космоса пронизывается различными видами полей, состоящих из волн различной длины, и каждая волна обладает некоторой энергией. Если подсчитать минимальное количество энергии, которое может нести волна, то окажется, что каждый кубический сантиметр вакуума содержит больше энергии, чем вся энергия всей материи во всей наблюдаемой Вселенной.

Все точки пространства едины для стороннего наблюдателя, и для них невозможно провести пространственное разделение. Данное свойство пространства в физике получило название «нелокальность».

Бом пришел к понятию нелокальности, размышляя над загадкой запутанных квантовых состояний, противоречащей не только здравому смыслу, но и эйнштейновской теории относительности, налагающей жесткие ограничения на скорость распространения взаимодействий. Именно тогда он и пришел к выводу, что микрообъекты взаимодействуют на любом расстоянии не потому, что они обмениваются таинственными сигналами между собой, а потому, что их локальность пространственной разделенности есть всего лишь иллюзия нашего Мира. На сверхглубоком уровне квантового потенциала Бомы запутанные частицы представляют собой вовсе не отдельные локальные объекты, а продолжение нового, более фундаментального и цельного уровня реальности. И именно нелокальный аспект квантового потенциала позволил Бому объяснить эффект связи между двумя парными частицами без нарушения постулатов специальной теории относительности, которые гласят, что ничто во Вселенной не может двигаться быстрее скорости света. Точно так же и все частицы во Вселенной, по Бому, имеют между собой нелокальную связь, так как на более глубоком уровне реальности они являются одним целым.

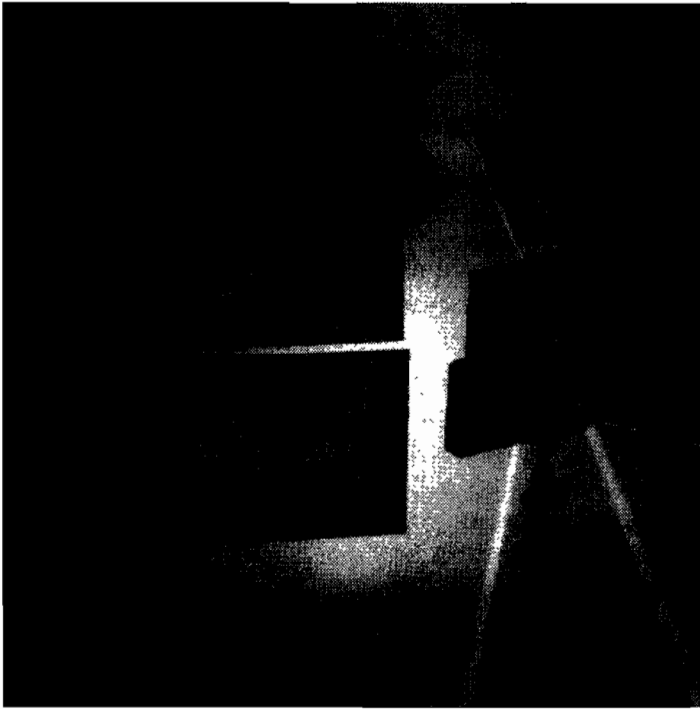


Рис. 46. Голограмма

Из концепции Бома следует очень необычная мировоззренческая платформа, по которой наша окружающая физическая реальность является всего лишь иллюзией, своеобразной голограммой Вселенной. Под ней находится более фундаментальный уровень реальности, на котором и рождаются все наблюдаемые объекты, подобно тому, как из фотоголограммы под лучом лазера рождается объемное изображение.

Теория Бома довольно долго рассматривалась лишь как очередной теорфизический казус, затем в ходе проверки неравенств Белла ее статус еще более упал, но дальнейшие исследования квантовой запутанности опять возродили интерес к уже историческим построениям Бома. Открытая примерно в те же годы Бенуа Мандельбротом фрактальная геометрия, описывающая упорядоченный хаос природы, также демон-

стрировала «голографический» принцип бесконечного вложения самоподобных структур друг в друга на основе весьма простых математических соотношений. Разумеется, построения Боме нельзя понимать так буквально, что наша Вселенная представляет собой неразличимую гигантскую массу. Вещи могут быть частью неделимого целого и в то же время обладать уникальными качествами подобно водоворотам в потоке воды. На первый взгляд такие водовороты предстают вполне самостоятельными отдельными физическими объектами со своими параметрами. Однако при детальном анализе оказывается, что точно определить, где заканчивается данный водоворот и начинается общий водный массив, просто невозможно. Именно в таком ракурсе и обсуждают теорию Боме ее приверженцы, считая, что говорить о различии между окружающими предметами только на фундаментальном уровне объективной реальности бессмысленно.

Развивая взгляды Боме на строение материи за границей планковской длины, теоретики получили очень интересные выводы о целом океане энергии, скрытой в глубинах пространства-времени. Сам Бом в свое время предлагал следующую аналогию: если кристалл охладить до абсолютного нуля, поток электронов будет беспрепятственно проходить сквозь него без рассеивания. Если повысить температуру, в кристалле возникнут дефекты, он потеряет свою прозрачность и электроны начнут рассеиваться. С точки зрения электрона такие дефекты будут проявляться как частички материи, плавающие в море пустоты абсолютного вакуума, но на самом деле это не так. Пустота и частички материи не существуют независимо друг от друга. Они — части одной и той же «ткани» пространства, более глубокого порядка кристалла.

Несмотря на многочисленную критику своей теории, Бом до самой смерти верил в то, что более глубокая реальность (существование которой современная наука подтвердить пока не в силах) все-таки существует, и продолжал дорабатывать свою теорию. Бом также был убежден в том, что природа бесконечна, а значит, утверждения о том, что какая-либо теория может быть полностью законченной, далеки от истины.

2.3. На пути к теории «всего»

«Мы не можем довольствоваться лишь Стандартной моделью, поскольку она оставляет открытыми значительную часть вопросов, многие из которых хотя и вытекают из самой Стандартной модели, не могут, по нашему мнению, быть разрешены в рамках квантовой теории поля».

Дэвид Гросс. «Теория Всего»

«Так что до сих пор у нас нет иной модели для теории гравитации, кроме математической. ...Каждый новый наш закон — чисто математическое утверждение, притом довольно сложное и малопонятное. Ньютонова формулировка закона тяготения — это сравнительно простая математика. Но она становится все менее понятной и все более сложной по мере того, как мы продвигаемся вперед. Почему? Не имею ни малейшего понятия. Моя цель в том и состоит, чтобы лишь сообщить об этом факте. В нем и заключается смысл всей лекции: нельзя честно объяснить все красоты законов природы так, чтобы люди восприняли их одними чувствами, без глубокого понимания математики. Как ни прискорбно, но, по-видимому, это факт».

Ричард Фейнман

Один из крупнейших физиков прошлого века, нобелевский лауреат Ричард Фейнман, раскрывая связь математики с физикой и анализируя всеобщность физико-математических представлений, часто обращался к всемирному закону тяготения Ньютона. Он считал, что со времен Ньютона и до наших дней никто так и не смог описать механизм, скрытый за законом тяготения, не повторив того, что уже сказал Ньютон, не усложнив математики или не предсказав несуществующих явлений.

Первым шагом на пути к теории «всего» является теория квантового поля. Эта теория пытается описать поведение электронов, объединяя квантовую механику и частную

теорию относительности Эйнштейна. Такое объединение идей оказалось довольно успешным, но в то же время английский физик, лауреат Нобелевской премии Пауль Дирак, автор теории квантового поля, признавался: «Похоже, что поставить эту теорию на солидную математическую основу практически невозможно». Вторым и гораздо более важным и сложным шагом должна быть интеграция общей теории относительности и квантовой механики, но пока нет никаких общепризнанных представлений о том, как это сделать. Каждая научная школа, творческий коллектив и отдельные теоретики предлагают свои, часто взаимоисключающие пути, а нобелевский лауреат Стивен Вайнберг вообще считает, что только для создания математического аппарата подобной теории понадобится не менее столетия.

Однако именно на этом пути Альберт Эйнштейн открыл свою общую теорию относительности, создав новую теорию гравитации и наметив путь объединения всех известных взаимодействий с силами всемирного тяготения. Прежде всего это касается объединения теории относительности и квантовой механики, и хотя наука «квантовая космология» хорошо известна, она содержит ряд противоречий и неточностей. В идеале будущая объединенная теория должна связать между собой все силы, действующие во Вселенной, с помощью одного математического уравнения. При этом всегда следует учитывать, что теория относительности необходима для описания общей структуры пространства-времени, а квантовая механика направлена на объяснение поведения субатомных частиц. К сожалению, пока еще эти теории во многом противоречат друг другу.

В конце прошлого столетия был заложен фундамент двух наиболее популярных конкурирующих направлений в теории квантовой гравитации — петлевой квантовой гравитации (ПКГ) и теории струн. Для построения ПКГ важную роль сыграли новые оригинальные формы теории относительности. Эти релятивистские формализации привели к тому, что математический язык, которым описывается пространство-время, стал ближе к языку, используемому в физике частиц и квантовой теории.

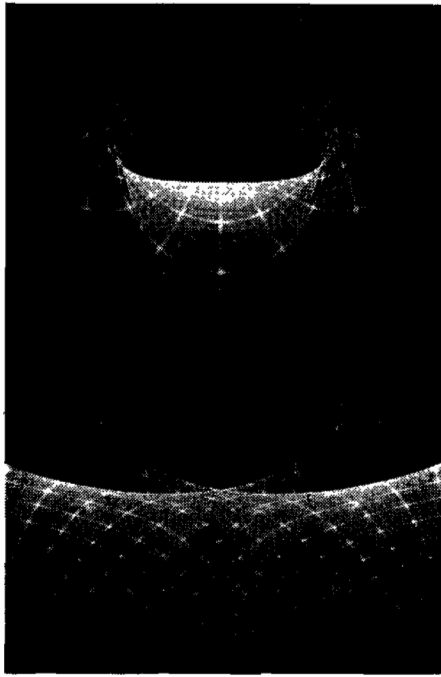


Рис. 47. Квантовая геометрия пространства

В конце XX века физики обнаружили, что новые подходы в теории ПКГ пригодны для получения реальных результатов относительно квантового пространства-времени. Эти соотношения в теории квантовой гравитации открыли исследователям микроскопическую структуру в геометрии пространства и показали, что в квантовом масштабе наш мир выглядит как сеть ячеек причудливо изогнутой сетки.

В начале нашего века на базе новых моделей квантовой гравитации была создана обширная теория, дающая парадоксальную картину природы пространства и времени на сверхмикроскопическом уровне. Удивительно, но концепция ПКГ, исходя из тех же предпосылок, оказывается полностью противоположной по смыслу квантовому потенциалу Бома. В теории ПКГ на субэлементарном уровне пространство оказывается не непрерывным, а состоящим из дискретных элементов, мельчайших единиц пространства, подобных от-

крытым столетие назад квантам энергии. Объем такой минимальной единицы грубо задается кубом планковской длины ($\sim 10^{-35}$ м). Площадь поверхности, отделяющей одну область пространства от другой, измеряется в дискретных единицах, мельчайшая из которых в грубом приближении равна квадрату планковской длины.



Рис. 48. Кипящая пена моря виртуальных частиц (см. вклейку)

Проблема создания квантовой версии общей теории относительности не только в том, что в масштабе атомов и электронов у частиц нет определенных положений и скоростей. В еще более малых масштабах, сопоставимых с длиной Планка ($\sim 10^{-35}$ м), квантовое пространство-время должно представлять собой кипящую пену, море виртуальных частиц, заполняющее все пустое пространство. В условиях, когда вещество и пространство-время столь изменчивы, уравнения общей теории относительности теряют смысл. Если мы предположим, что вещество повинуется законам квантовой механики, а гравитация подчиняется общей теории относительности, то столкнемся с математическими противоречиями. Поэтому и необходима квантовая теория гравитации.

Таким образом, если взять некий произвольный объем пространства и измерить его с очень высокой точностью, мы обнаружим, что значение объема будет укладываться

в дискретный ряд чисел подобно тому, как это происходит с энергией электрона в атоме. А равно как и в случае энергетических уровней атома здесь тоже можно вычислять дискретные площади и объемы на основе теоретических выкладок.

В квантовых теориях у объектов нет определенных положений и скоростей и все описывается вероятностями и волнами, занимающими определенные области пространства. В квантовом мире все пребывает в постоянном движении: даже «пустое» пространство заполнено так называемыми виртуальными частицами, которые непрерывно возникают и исчезают. Вместе с тем общая теория относительности как и теория гравитации является принципиально классической и неквантовой. Великое творение Эйнштейна гласит, что вблизи любого сгустка вещества или энергии искривляется пространство-время, а вместе с ним — и траектории частиц, которые словно оказываются в гравитационном поле. Общая теория относительности чрезвычайно стройна и красива, а многие ее предсказания проверены с величайшей точностью.



Рис. 49. Пространственно-временная пена в начале Большого Взрыва (см. вклейку)

Хотя в настоящее время квантовые эффекты ничтожно малы, они играли важнейшую роль на начальных стадиях Большого Взрыва. Ими же определяются процессы, про-

текающие в черных дырах. Поскольку гравитация связана с искривлением пространства-времени, квантовая теория гравитации будет теорией квантового пространства-времени. Она поможет физикам понять, из чего состоит пространственно-временная пена.

Зная координаты, скорости и массы, можно с помощью уравнений общей теории относительности вычислить искривления пространства-времени и определить влияние тяготения на траектории рассматриваемых тел. Кроме того, пустое релятивистское пространство-время является идеально гладким независимо от того, насколько детально его исследуют. Оно представляет собой абсолютно ровную арену, на которой выступают вещество и энергия.

В большинстве⁸ ситуаций противоречивые требования квантовой механики и общей теории относительности не представляют проблемы, поскольку или квантовые, или гравитационные эффекты оказываются настолько малыми, что ими можно пренебречь. Однако при сильном искривлении пространства-времени становятся существенными квантовые аспекты гравитации. Чтобы создать большое искривление пространства-времени, требуется очень большая масса или большая ее концентрация. Даже Солнце не способно настолько искривить пространство-время, чтобы проявления квантовых эффектов гравитации стали очевидными.

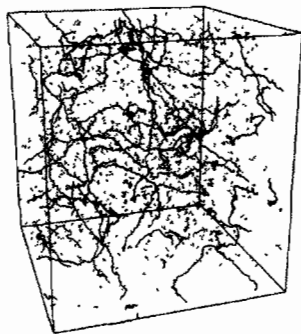


Рис. 50. Модель космических струн

Как выглядят одномерные квантовые струны с добавленными измерениями, не рискнет себе представить ни один фантаст. Еще более далеки от нашей реальности «струнные построения» в виде очень странных двухмерных объектов, называемых мембранами. Теоретический «конструктор» из струн дает теорию бран произвольной размерности — от 1 до 9. Однако «кубиками» этого «вселенского конструктора» всегда остаются одномерные струны, ведь считается, что именно их вибрации и проявляют себя в виде элементарных частиц. А вот не так давно появилась вообще парадоксальная теория, которая предполагает, что зародыши струн в далекие времена Большого Взрыва могли дорасти вместе со всей Вселенной до гигантских сверхтонких нитей со свободными концами. Такие же, но замкнутые в кольца космоструны могут опутывать целиком всю Метагалактику, заключая ее в кокон невидимой, но ощущаемой по движению скоплений галактик темной энергии.

Много надежд физики-теоретики связывают с оригинальной *теорией струн*, появившейся в семидесятих годах прошлого столетия. С ее помощью вроде бы удалось если и не устранить, то хотя бы обойти множество препятствий на пути к построению логически не противоречивой теории квантовой гравитации. Однако теория струн, несмотря на солидные усилия, прилагаемые со стороны интернационального коллектива теоретиков, не вышла еще из стадии разработки. Ученым пока еще не известны ни ее точные уравнения, ни фундаментальные принципы, определяющие их форму. Современная версия такой «струнной физики» носит название «суперсимметричной теории струн» («теории суперструн», или «суперстрингов»).

Изначально в ней видели очень весомого кандидата на долгожданную общую теорию всех частиц и сил. Однако после появления в начале семидесятих годов прошлого века концепции кварков, быстро выросшей в целый раздел физики элементарных частиц, модель стрингов явно стала проигрывать объединяющей модели кварков. Кварковая микрофизика носит название «квантовая хромодинамика», поскольку связана с динамикой *цветовых зарядов* кварков. Квантовая

хромодинамика — чрезвычайно эффективный способ описания сильных взаимодействий, основанный на кварковой модели. Она прекрасно согласовывалась с экспериментами и к тому же не выходила за рамки квантовой теории поля, которые считались универсальной основой фундаментальных объяснений микромира. Теория струн на этом фоне выглядела чистой экзотикой, которая к тому же не могла похвастаться ни внутренней стройностью, ни экспериментальными подтверждениями. Поэтому почти все специалисты ее просто проигнорировали.



Рис. 51. Суперструнный гравитон (см. вклейку)

Гравитоны — это закольцованные струны, и потому бранные границы им не помеха. Они могут покинуть нашу 3-брану и уходить в другие измерения. Но если переносчики гравитации способны на это, то сила тяготения должна убывать с увеличением расстояния не по ньютоновскому закону обратных квадратов, а гораздо быстрее. То, что мы этого не замечаем, может свидетельствовать о компактификации дополнительных измерений. В этом случае отклонения от ньютоновской формулы должны проявляться лишь на очень малых дистан-

циях. Однако есть и другие предположения о том, что наша 3-брана в состоянии удерживать гравитоны своим собственным притяжением. Если это так, то внешние измерения могут быть бесконечно большими, а закон Ньютона все равно будет выполняться на любых дистанциях.

Иновационная теория сразу же столкнулась и с трудными требованиями для размерности пространства, ведь ее модель математически корректна только в случае, если пространственно-временной континуум является многомерным. Это еще можно было пережить, но вскоре выяснилось, что ввод в теорию струн спина приводит к ее реализации только в десятимерном пространстве-времени, вмещающем девять пространственных измерений и одно временное. Это было очень необычно, поскольку теоретикам еще не приходилось сталкиваться с теорией, автоматически диктующей требуемую размерность. Ведь все известные уравнения механики, электродинамики и теории относительности, в принципе, справедливы для любого числа измерений. А теория суперструн непременно требовала для себя пространства-времени одной определенной размерности, причем непривычное четырех-мерное пространство-время, так что шесть измерений оказались лишними.

В данной ситуации казалось, что модели суперструн суждено остаться чисто умозрительной теорией. Теоретики много лет пытались найти квантовую версию общей теории относительности, ведь соответствующие уравнения теории Эйнштейна предсказывают существование гравитационных волн, которые при квантовании превращаются в гравитоны — переносчики силы тяготения. При этом теория предсказывала, что гравитоны должны обладать нулевой массой и двойным спином. И вот в семидесятых годах прошлого века появились научные работы, в которых таинственная безмассовая частица струнной модели и сопоставлялась с гравитоном! Отсюда следовало, что теория струн — это математический каркас для конструирования квантовой теории тяготения и ее основная задача — объединить все фундаментальные взаимодействия в теории «всего».

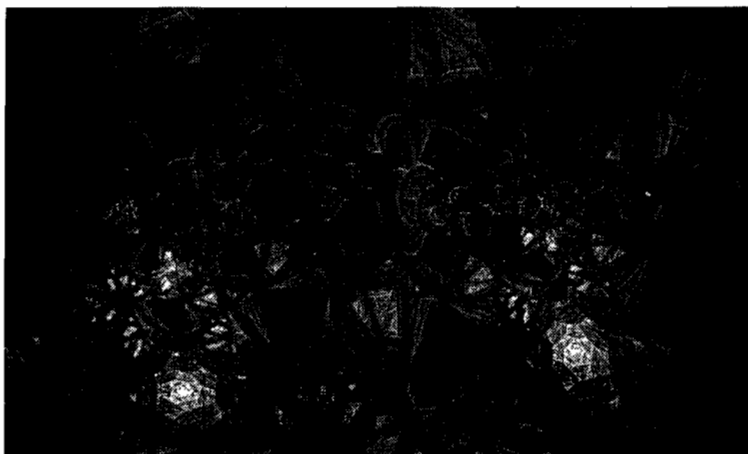


Рис. 52. Макет метагалактических струн (см. вклейку)

Космические струны могут флуктуировать, колебаться, пересекаться и взаимодействовать между собой. Наблюдать их можно либо благодаря производимому ими эффекту гравитационных линз, отклоняющих световые лучи, идущие от далеких галактик, либо по всплескам гравитационного излучения в результате их продольных колебаний. По некоторым сценариям гравитационное излучение космических струн можно будет открыть на новых сверхчувствительных детекторах гравитационных волн.

Здесь важно понимать, почему мы не ощущаем присутствия шести или семи дополнительных пространственных измерений. Считается, что они свернуты в ультрамикроскопические клубки (компактифицированы), которые все наши измерительные инструменты, от микроскопов до сверхмощных ускорителей, не отличают от геометрических точек. Такая интерпретация стандартна, но не обязательна: электроны, кварки и прочие частицы материи представлены струнами со свободными концами.

Что обещает дальнейшее развитие теории струн?

Самым грандиозным успехом здесь была бы долгожданная единая концепция всех частиц и сил — теория «всего». На пути к этому, конечно же, возникнут многочисленные новые

модели пространства и времени (впрочем, их и сейчас более чем достаточно), что позволит разрешить важные загадки квантовой гравитации и космологии. Это грандиозная цель, и вполне возможно, что для ее осуществления потребуется еще одна революция в наших представлениях о структуре физической реальности. Уже сейчас «струнные» работы привели ко многим интересным побочным результатам в математике, включая создание новых математических структур, а также инновационных идей и методов их решения. На последних конференциях, посвященных различным аспектам струнной теории, часто можно встретить физиков-теоретиков и математиков, совместно докладывающих о результатах своих исследований во многих областях математики, например в алгебраической геометрии.

Теория струн началась со сверхмалых — «планковских» — масштабов, лежащих за труднообразимой гранью в 10^{-33} см, однако совершенно неожиданно появились умозрачные идеи, связанные со сверхбольшими пространственными измерениями. Первоначально мы считали дополнительные пространственные измерения теории струн закольцованными в малые разнообразия с размерами не более планковских. Но в последние годы пришло осознание, что некоторые из этих дополнительных измерений могут, напротив, быть очень масштабными и даже бесконечными, а не воспринимаем мы их лишь по той простой причине, что сами прикованы к трехмерной бране — гиперповерхности в мире с большим числом измерений.

Такая возможность весьма естественным образом следует из теории струн. Вполне возможно, что мы привязаны к бране, в то время как есть и другие измерения, возможно, даже бесконечные. Единственный для нас способ увидеть или почувствовать другие пространственные измерения — это детектировать гравитационные флуктуации «подпространства». Примечательно, что подобные умозаключения не противоречат современным экспериментам. Многие не исключают возможности того, что новые эксперименты на строящихся сверхмощных ускорителях элементарных частиц могут при-

вести к открытию этих макроскопических дополнительных измерений. Существование сверхкрупных дополнительных измерений привело бы к очень интересным эффектам. По некоторым сценариям шкала Планка и шкала теории струн находятся при значительно более низких энергиях, и тогда можно представить себе, например образование черной дыры в результате столкновения протонов и наблюдение возбужденных мод струн в обычных частицах.

Теория струн предлагает и оригинальные космологические сценарии эволюции нашего Мира. Они предполагают, что Вселенная на современном этапе развития может быть заполнена космическими струнами галактических или даже метагалактических масштабов. В основе лежит идея о том, что поскольку расширение нашей Вселенной началось с планковского масштаба Большого Взрыва, то на этой стадии пространство-время было плотно заполнено «обычными» микроскопическими суперструнами с планковской длиной. Для того чтобы растянуть их до макроскопических размеров, потребовалась бы колоссальная энергия, и она нашлась естественным образом в ходе «разлета» нашего Мира. Конечно, тут за скобками остается очень интересный вопрос о том, что предшествовало появлению суперструн в сверхмикроскопическом пузырьке — зародыше нашей Вселенной. Следующий вопрос состоит в характере непосредственного влияния микро мезо макро мега суперструн на эволюцию Вселенной, а также изменение их физических характеристик при этом. Гипотезу мегаскопических суперструн можно привлечь и для объяснения перехода этапа равномерного расширения в ускоренное около восьми миллиардов лет назад. Наверное, суперструны на всех этапах своего «растяжения» каким-то образом должны были взаимодействовать и с таинственными темной материей и энергией хотя бы по той простой причине, что они составляют основное содержание Метагалактики. А поскольку исследование этих загадочных субстанций идет полным ходом во многих направлениях, это дает некоторые надежды и на экспериментальное подтверждение столь экзотичной теории. Во всяком случае и для объяснения новых

эффектов на сверхмощных ускорителях, и для наблюдений галактических аномалий появляются новые, очень необычные аргументы одной природы.

2.4. Загадки субквантового сфинкса

«...Я предполагаю, что с привлечением общей теории относительности использование суперпозиций альтернативных геометрий пространства-времени сталкивается с серьезными трудностями. Возможно, что суперпозиция двух различных геометрий нестабильна и распадается в одну из этих двух альтернатив... Какое отношение к этому имеет планковская длина 10^{-33} сантиметра? Такая длина является естественным критерием для определения того, являются ли геометрии действительно различными мирами. Планковский масштаб определяет также и временной масштаб, при котором происходит редукция в различные альтернативы...»

Роджер Пенроуз. «Природа пространства и времени»

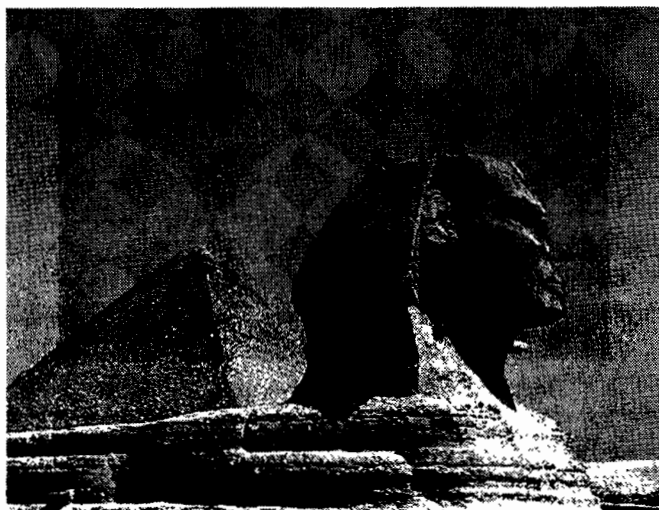


Рис. 53. Древнеегипетский сфинкс — символ непостижимой загадочности

Отмечая двойственность и таинственность теории квантов, пристекающие из корпускулярно-волнового дуализма и связанных с ним принципов неопределенности и дополненности, известный немецкий физик Теодор Калуца называл ее «сфинксом современной физики».

За недолгое свое существование (скоро она отпразднует пятидесятилетний юбилей) суперструнная физическая доктрина уже успела испытать много взлетов и падений. В начале нашего века от нее отделилось новое мощное направление, которое скоро стало доминирующим — теория многомерных мембран (М-теория). Можно сказать, что эта модная теория, по сути, исследует те же струны, но плоские или, по меткому выражению одного из ее создателей профессора Хуана Молдасены, мембраны отличаются от струн примерно так же, как макароны от лепешек.

Согласно М-теории, пространство изначально имеет одиннадцать размерностей и внутри него скрываются многомерные мембраны — так называемые р-браны, обладающие р-размерностью. Так, 0-брана — это некая точка в пространстве, 1-брана — это знакомая нам струна, а 2-брана — некая плоскость, называемая обычно мембраной.



Рис. 54. Эволюция суперструнговых бран

Как же происходит переход от струн к мембранам? В теории это выглядит как настоящее квантовое волшебство: многомерная суперструна, сворачиваясь в замкнутый контур, превращается... струнг превращается... превращается... в многомерный тор.



Рис. 55. Стринги и браны (см. вклейку)

Образ вибрирующей струны, или мембраны, как фундаментального базиса всех элементарных частиц, в общем-то, довольно ясен, если, конечно, опустить сверхсложный математический аппарат. Вообще же говоря, на момент написания книги физики-теоретики еще далеко не полностью построили из стрингов и бран здание М-теории.



Рис. 56. Квантовая матрица многомерного пространства

Возможно, что природа на фундаментальном субквантовом уровне выглядит совершенно фантастично. Там, на самом «доньшке Мироздания» она скачкообразно непредсказуема и переменчива, к тому же граница между непрерывным и дискретным размыта. Там, в невообразимой внутренней глубине, капли материи непрерывно переливаются в океан энергии и обратно...

Подобным образом можно представить и браны более высоких размерностей, причем колебания стрингов здесь заменяются вибрациями мембран. Таким образом, рассматривая разные версии струнной теории, можно прийти к выводу, что в основе всего этого лежит единая теория многомерных квантовых мембран. Эта единственность очень привлекательна, так что работа над построением полной квантовой М-теории продолжается.

Вскоре после всесторонней разработки концепции многомерных квантовых мембран научные и популярные журналы заполнили прогнозы о близости окончательной победы в борьбе с тайнами окружающей нас Вселенной. Однако вместо этого при очередных попытках получить всеобщие закономерности нашего Мира разразился очередной грандиозный кризис теории струн — мембран. Суть кризиса в теории суперструн состоит вкратце в следующем. М-теория описывает «жизнь» протяженных объектов в 11-мерном пространстве-времени при очень высокой температуре. 11-мерное пространство — это не прихоть, а единственный способ удовлетворить сразу всем поставленным условиям. Если мы хотим получить из этой теории свойства нашего Мира, то мы должны постепенно понижать температуру и смотреть, что происходит с этим 11-мерным пространством и летающими в нем объектами.



Рис. 57. Ландшафты теории бран (см. вклейку)

Так получается, что семь из одиннадцати измерений становятся неустойчивыми и спонтанно сворачиваются в сверхмикроскопические замкнутые структуры, оставляя макроскопическими только три пространственных измерения плюс время — четырехмерное пространственно-временное многообразие нашей реальности. Детали этого механизма еще не изучены, и на сегодняшний день кажется, что в теории суперструн возможно огромное число разных конфигураций свернутого пространства. Каждая такая конфигурация приведет к «конечной Вселенной» со своими характеристиками: силой взаимодействий, массами частиц и т. д. Всю эту совокупность конечных Вселенных, которую можно получить из одной-единственной теории путем разных «сверток», физики назвали «ландшафтом теории».

Некоторые аспекты этих новых теорий можно попытаться проверить с помощью классического описания гравитации — общей теории относительности. Для этого обратим внимание на не сходящие со страниц газет и журналов таинственные сколлапсировавшие *«замерзшие звезды»* — *«черные дыры»*.

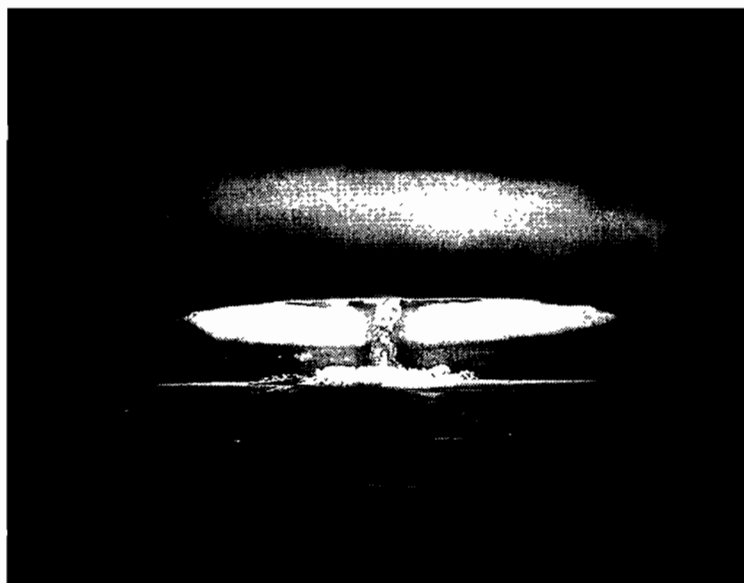


Рис. 58. Космология Большого Взрыва

Притягиваясь, мембраны сжимаются в направлении, перпендикулярном движению. Их соударение порождает начало Большого Взрыва, преобразуя кинетическую энергию в материю и излучение. После удара мембраны расходятся и начинают расширяться, а материя проходит все стадии формирования от элементарных частиц до скопления галактик. В циклической модели силы притяжения замедляют движение расходящихся мембран, затем мембраны останавливаются и снова начинают сближаться, порождая новый Большой Взрыв, и так — до бесконечности...

Несомненно, что замерзшие звезды коллапсаров являются вполне подходящими космическими лабораториями по изучению струнных теорий, поскольку эффекты квантовой гравитации важны даже для достаточно больших черных дыр. Вообще говоря, сколлапсировавшие объекты теоретически должны быть вполне наблюдаемы в межзвездной среде при испускании теплового излучения со своего горизонта. Так как струнная теория, помимо всего прочего, еще и тесно связана с теорией *квантовой гравитации*, она, по идее, должна корректно описывать состояние черных дыр.

Кроме космических далей, экспериментаторы ищут новые силы, предсказанные теорией суперструн, и в земных условиях. Например, исследователи постоянно совершенствуют проведение очень чувствительных экспериментов по оценке гравитационного взаимодействия между массами, разделенными микроскопическими расстояниями, но пока еще они не наблюдали при этом никаких предсказанных новых сил. Несмотря на скудность опытных данных, полученные результаты уже позволяют исключить некоторые варианты теории суперструн. В частности, подверглись пересмотру концепции, в которых соответствующие параметры воздействия новых сил из «свернутых» измерений находятся в диапазоне микроскопических величин.

Если наша Вселенная — многомерная мембрана, плавающая в еще более многомерном пространстве, то Большой Взрыв, возможно, был результатом ее соударения с параллельной мембраной. Такие столкновения могут повторяться

циклически. Каждая галактика перемещается в пространстве-времени по пути в форме песочных часов.

Временная шкала, непосредственно примыкающая к некой условной точке «0» начала отсчета времени существования нашей реальности, полна загадочных событий. Стремящиеся в бесконечность плотности материи и энергии пока еще не могут быть описаны современной физикой. Тем поразительнее, что теория суперструн берет на себя немислимую смелость моделировать не только сам момент Большого Взрыва, но и предшествующее развитие событий. Существует даже две модели, описывающие досингулярное состояние нашего Мира. Одна из них основывается на известной симметрии обращения времени, в силу которой физические уравнения работают одинаково хорошо независимо от направления времени. По такому космологическому сценарию Вселенная за определенный промежуток времени до Большого Взрыва расширялась с такой же скоростью, как и через такой же интервал после него. Однако изменение скорости расширения в эти моменты происходило в противоположных направлениях: если после Большого Взрыва расширение замедлялось, то перед ним оно ускорялось. В таком варианте Большой Взрыв предстает не моментом возникновения Мироздания, а просто внезапным переходом от ускорения к замедлению.

В таком сценарии точка космологической сингулярности Большого Взрыва предстает подобием центра симметрии, относительно которого Вселенная перед Большим Взрывом была почти идеальным зеркальным изображением самой себя после него. Если правы космологи, считающие, что расширение пространства-времени будет продолжаться неопределенно долго, до тех пор пока вся материя не превратится в разреженный атомарный газ, то она также бескрайне простирается и в прошлое. Бесконечно давно она была почти пуста: ее заполнял лишь невероятно разреженный, хаотический газ из излучения и вещества. Силы взаимодействия между частицами этого газа практически не существовали, однако с течением времени силы возрастали и стягивали материю воедино. Случайные неоднородности первичного вещества

приводили к эффекту гравитационного «снежного кома», вызывая скопление протоматерии с последующим ростом плотности до критического значения начала гравитационного коллапса. Так начали образовываться первичные черные дыры.

Внутри черной дыры пространство и время меняются ролями: ее центр — не точка пространства, а момент времени. Падающая в черную дыру материя, приближаясь к центру, становится все более плотной. Но, достигнув максимальных значений, допускаемых теорией струн, плотность, температура и кривизна пространства-времени внезапно начинают уменьшаться. В момент такого поворота и возникает сингулярность космического катаклизма Большого Взрыва. Получается, что если следовать такому суперструнному космологическому сценарию, то наш Мир — это бывшая внутренность одной из описанных черных дыр.

Неудивительно, что столь необычный сценарий вызвал множество споров. Так, некоторые теоретики обоснованно замечают, что, для того чтобы такая модель согласовывалась с наблюдениями, Вселенная должна была возникнуть из черной дыры гигантских размеров, значительно больших, чем масштаб длины в теории квантовых мембран. Но их оппоненты возражают, что поскольку уравнения М-теории не накладывают никаких ограничений на размер черных дыр, то формирование Вселенной внутри достаточно большого коллапсара является случайным событием. Если же считать, что характер поведения материи и самого пространства-времени вблизи сингулярности Большого Взрыва был хаотическим, то в таком хаосе вполне мог возникнуть достаточно плотный газ «мембранных протомикроколлапсаров» в виде сверхмикроскопических массивных мембран, находящихся на грани превращения в черные дыры. Возможно, в этом содержится ключ к решению проблем загадочной сингулярности и не менее таинственной первичной экспансии пространства-времени в стандартной космологии Большого Взрыва.

Другой популярный в научных кругах физиков-теоретиков космологический суперструнный сценарий носит

название «*экпиротического*» (от греч. *ekpyrotic* – пришедший из огня). В нем предлагается модель досингулярной Вселенной как одной из мембран, дрейфующих в многомерном пространстве. При столкновении таких мембран происходит множество прообразов нашего Большого Взрыва, рождающих новые Миры.

Экпиротический сценарий имеет и циклический вариант, когда мембраны, сталкиваясь, отскакивают друг от друга и расходятся, затем снова притягиваются и соударяются, снова расходятся и так – практически до бесконечности. Расходясь после удара, они немного растягиваются, а при очередном сближении снова сжимаются. Когда направление движения мембраны сменяется на противоположное, она расширяется с ускорением, поэтому наблюдаемое сейчас ускоренное расширение Вселенной может свидетельствовать о грядущем грандиозном катаклизме мембранного столкновения.

У обоих струнных космологических сценариев есть ряд общих черт. Так, оба они начинаются с практически безграничного, холодного и заполненного сверхразреженным веществом Мира. Затем по обоим моделям происходит труднообъяснимый «*транссингулярный*» переход через катаклизм Большого Взрыва к стадии расширения. Естественно, оба сценария имеют и существенные отличия: к примеру, в предвзрывном сценарии все силы природы изначально очень слабы и постепенно усиливаются, достигая максимума в момент Большого Взрыва. Для экпиротической модели справедливо обратное: столкновение происходит тогда, когда значения сил минимальны.

Разработчики экпиротической схемы вначале надеялись, что слабость сил облегчит процедуру анализа столкновения, однако им приходится иметь дело с высокой кривизной пространства-времени, поэтому пока нельзя однозначно решить, удастся ли избежать сингулярности. Кроме того, этот сценарий должен протекать при весьма специфичных обстоятельствах. Например, перед самым столкновением мембраны должны быть почти идеально параллельны друг другу, иначе вызванный им Большой Взрыв будет недостаточно однород-

ным. В циклической версии эта проблема стоит не так остро: последовательные соударения позволили бы мембранам выровняться.

Сейчас уже можно сказать, что одной из главных проблем космологической теории квантовых суперструн является то, что она не может предсказать, какая именно Вселенная реализуется в реальности после тех же множественных столкновений мембран. Некоторые физики-теоретики справедливо указывают, что теория космических суперструн настолько неопределенна, что из ее различных вариантов можно получить любое конечное состояние нашего Мира. Космологи формулируют этот парадокс так: ландшафт теории суперструн практически бесконечен. Вообще говоря, это означает, что теория имеет очень высокий уровень *научной спекулятивности* и ее вообще нельзя опровергнуть: любой результат любого эксперимента можно объяснить какой-нибудь модификацией суперструнной парадигмы.

Однако теоретики надеются, что при внимательном изучении вопроса все же вскрыется механизм сворачивания многомерных бран в наше привычное четырехмерное многообразие. Разумеется, поиск такого механизма представляет собой чрезвычайно сложную проблему теорфизики, поэтому большинство исследователей надеются разрубить данный гордиев узел суперструнной проблематики новыми экспериментальными фактами и с нетерпением ожидают сенсационных новостей с Большого адронного коллайдера.

Глава 3

КОСМОЛОГИЯ КВАНТА

«Космическая перспектива может внушать благоговение и вызывать озарение, но это — не человеческая перспектива. Личность разглядывает Вселенную, воспринимая ее, толкуя, строя различные умозаключения. В отличие от «бога», который вне пространства, человек — часть его. В этом смысле теории Вселенной... не связаны с действительным опытом людей. Это несоответствие объясняется тем, что человек видит Вселенную не как единое явление, а лишь клочок ее, обозримый в маленькое окошко — окошко его разума».

П. Девис.

«Пространство и время в современной картине Вселенной»

«Через миллиарды лет развитые формы разума смогут создавать новые Вселенные. Возможно, они даже смогут выбирать, какие физические законы должны действовать в созданных ими мирах. Или им будет дано моделировать Вселенную такой же, или даже сложнее, чем та, в которой сегодня мы полагаем свое существование».

Мартин Рис. *«Наш последний час»*

Термины «Мультивселенная» и «Мультиуниверсум» попали в науку из фантастических произведений замечательного английского писателя Майкла Муркока. В теоретической физике и квантовой космологии под Мультиуниверсумом обычно понимается довольно старая идея множественности Вселенных, которую можно найти еще у античных и средневековых мыслителей. Однако в последние годы принцип мультипликативного устройства нашей реальности все чаще обсуждается в серьезных научных журналах, вызывая бурную полемику между физиками-теоретиками, космологами и квантовыми механиками. При этом многие из них искренне уверены, что эта идея может стать одним из краеугольных камней нового квантового образа Мироздания.



Рис. 59. Сверхдальние горизонты Метагалактики

Считается, что наша Вселенная возникла примерно 14 миллиардов лет назад в результате события, которое принято называть Большим Взрывом (БВ). Большинство космологов придерживаются мнения, что зародышем Вселенной стала *квантовая сингулярность*, которая дала начало и пространству, и времени, и материи. Физические детали этого процесса, как надежно установленные, так и гипотетические, излагаются во множестве популярных книг и статей. Где-то в глубинах чего-то, что могло быть или не быть прообразом нашего пространства-времени, возник невообразимо чудовищный катаклизм, развившийся в реальность окружающего Мира. В настоящий период в научной среде преобладает мнение, что начальные возмущения таинственного протопространства привели к фантастической концентрации энергии с переходом в вещество с колоссальными относительными скоростями за несколько десятков секунд. Этот процесс чаще всего и называют «активным периодом БВ».

Вообще говоря, в науку двадцатого столетия идея многомирья впервые вошла сравнительно давно и в несколько ином контексте. Современные применения данной идеи обычно

связывают с парадоксальной многомировой интерпретацией (ММИ) квантовой теории измерений, которую в 1957 году предложил аспирант Принстонского университета Хью Эверетт.

Большинство авторов новейших гипотез Мультивселенной строят свои рассуждения на базе красивого модельного варианта развития сингулярности БВ, предложенного в 1980 году Аланом Гутом и вскоре серьезно модифицированного А. Д. Линде, Полом Стейнхардтом и Андреасом Альбрехтом. Согласно этому сценарию в самом начале своего существования наша Вселенная испытала кратковременное, но чрезвычайно быстрое расширение, в ходе которого ее размеры росли пропорционально экспоненциальной функции времени. Эта стадия эволюции Космоса называется «инфляционной» (*inflation* — раздувание), поэтому и все направление именуют «инфляционной космологией».

Далее мы остановимся на обсуждении одной из наиболее привлекательных рабочих гипотез современной космологии, в рамках которой проблема генезиса сингулярности БВ и последующего расширения Вселенной приобретает вполне законченные контуры. В основе данного космологического сценария лежат оригинальные идеи, сформулированные в работах видных физиков — Д. Уилера, С. Хокинга, Я. Б. Зельдовича, А. Д. Сахарова, А. Д. Линде, А. А. Старобинского и сводящиеся к тому, что наша Вселенная — это гигантская флуктуация топологии общего суперпространства, связанного с вакуумным состоянием физических полей.

Свойства этого состояния должны радикально отличаться от свойств обычного пространства-времени. Во-первых, его размерность не обязательно должна равняться трем пространственным и одной временной координатам. Более того, вакуум, как основное состояние материи, характеризуется нулевыми физическими зарядами — следовательно, не существует и классического прибора, способного зафиксировать какую-то упорядоченность событий, а значит, не существует и самих понятий пространства и времени, как, впрочем, и причинности. И, наконец, будучи сугубо квантовым объектом, вакуум физических полей флуктуирует, порождая то-

пологические аномалии, которые рождаются и гибнут. Внутри каждой оболочки такой аномалии можно ввести понятие собственного времени, направление которого фиксирует эволюцию материи внутри от момента рождения и до момента коллапса. Подавляющая доля таких аномалий имеет время жизни, сравнимое с планковским временем, и внешне проявляют себя как замкнутые миниатюрные Вселенные. Такое своего рода «кипение» вакуума — рождение и гибель виртуальных Вселенных — является обобщением на гравитацию хорошо известного в квантовой физике эффекта поляризации вакуума, то есть рождения и гибели виртуальных пар частиц — античастиц.

Одна из главных трудностей умозрительного моделирования БВ связана со вполне обоснованной критикой тезиса о том, что физические законы, открытые в земных условиях, неоспоримо действуют во всей Вселенной и на всех этапах ее эволюции. Так, С. Хокинг и Г. Эллис в своей замечательной книге «Крупномасштабная структура пространства-времени» мудро предостерегают: *«Предположение о том, что законы физики, открытые и изученные в лаборатории, будут справедливы в других точках пространственно-временного континуума, безусловно, очень смелая экстраполяция»*. Однако без подобных допущений не может обойтись ни одна попытка реконструирования генезиса нашей Метагалактики. Ведь единственными источниками информации о событиях, сопутствующих рождению нашего Мира, в настоящее время являются реликтовое микроволновое излучение, значения концентраций легких элементов (водорода и гелия), распределение неоднородностей во Вселенной (например, галактик) и астрономические наблюдения сверхдальних объектов, в частности, квазаров.

Впрочем, категоричность подобных рассуждений вряд ли уместна, ведь многообещающие исследования таких таинственных основ Вселенной, как черная материя и черная энергия вполне могут привести к открытию новых артефактов новорожденной Метагалактики, подобных гипотетическим, замороженным в пространство микроскопическим черным дырам или вырожденным зародышам космических струн.

3.1. Начало всего Сущего

«Перед нами стоит теперь грандиозная задача — построить теоретическую схему, в которую укладывались бы данные наблюдений расширяющейся Вселенной. Имея дело с такой массой сложного материала, можно ожидать значительных технических трудностей, однако что привлекает к теоретической космологии и одновременно разочаровывает в ней — это трудности умозрительного характера».

Деннис В. Шама. «Современная космология»

«Нет ничего удивительного в том, чтобы в большом магазине готового платья подобрать костюм себе по плечу. Аналогично в великом множестве Вселенных, в каждой из которых реализуется какой-то определенный набор космологических параметров, вполне может найтись хоть одна, где существуют предпосылки для возникновения жизни. В такой Вселенной мы и находимся».

Мартин Рис

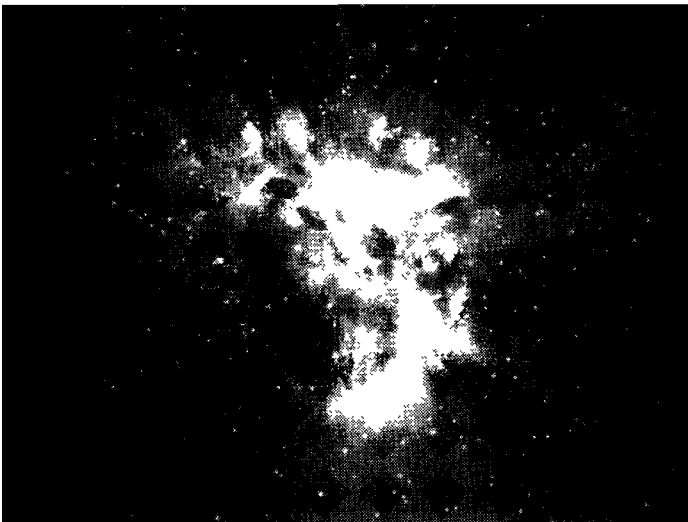


Рис. 60. Большой Взрыв (см. вклейку)

Леметр предложил в качестве зародыша Вселенной объект конечных размеров в виде сверхмассивного первичного атома. Его взрыв смог бы породить сверхтяжелые и нестабильные осколки, фрагменты которых продолжали бы процесс деления. Если принять, что Вселенная, как сейчас считается, содержит порядка 10^{80} частиц, то получится, что фрагменты первичного атома должны были претерпеть примерно 260 делений.

Первую версию теории БВ в 1927 году сформулировал бельгиец Жорж-Анри Леметр. Несколько ранее петербургский профессор Александр Александрович Фридман нашел нестатичные решения уравнений общей теории относительности, которые описывали пульсирующие миры, возникающие из первичной точечной сингулярности. А в 1924 году он получил решения другого типа, отвечающие постоянному расширению Вселенной. Однако Фридман как математик не довел своих вычислений до конкретной модели, предлагающей физическую картину рождения Вселенной. Так что его можно считать предтечей космологии БВ, а титул отца-основателя без сомнения принадлежит Леметру.

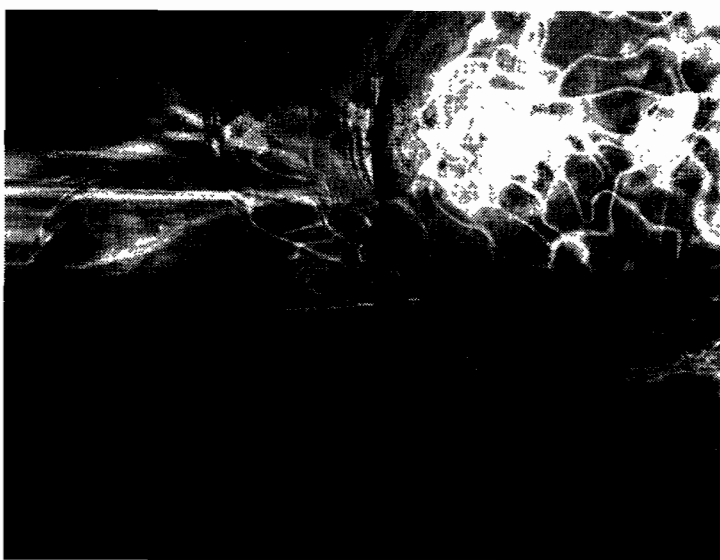


Рис. 61. Взрыв Мира по Леметру

Рождение Вселенной из сверхмассивного первичного атома во многом противоречило данным наблюдений. Ведь в процессе множественных делений должны были возникать наиболее устойчивые ядра железа, заполняя собой всю Вселенную. Но уже в тридцатые годы прошлого века астрономы знали, что Вселенная почти полностью состоит из водорода и гелия. Тем не менее несомненным достоинством модели Леметра было то, что она качественно объясняла и в чем-то даже предсказала закон, связывающий расстояние до астрономических объектов с их линейной скоростью.

Однако данные об элементном составе Вселенной не согласовывались с теорией первичного атома Леметра. Возникшее противоречие было очевидным и было естественным оставить в силе концепцию взрывного рождения Вселенной, но радикально пересмотреть модель физической субстанции БВ на базе последних достижений физики ядра и элементарных частиц. В 1932 году были открыты нейтрон и позитрон, а чуть позже построены теория бета-распада и мезонная теория ядерных сил. С их помощью астрофизики объяснили, каким образом в недрах звезд происходит термоядерный синтез гелия из водорода. Окончательно теория космического нуклеосинтеза сформировалась в трудах эмигрировавшего в Америку русского физика Г. А. Гамова. Гамов познакомился с моделью нестационарной Вселенной еще на студенческой скамье, когда учился у Фридмана. Хорошо зная работы Леметра, Гамов решил применить его модель для возникновения химических элементов, развив теорию БВ с самого исходного момента.

Поскольку расширение Вселенной приводит к ее постепенному охлаждению, сжатие должно вызывать обратный эффект. Поэтому Гамов заключил, что сразу после рождения Мира все имевшееся вещество было чрезвычайно нагрето.

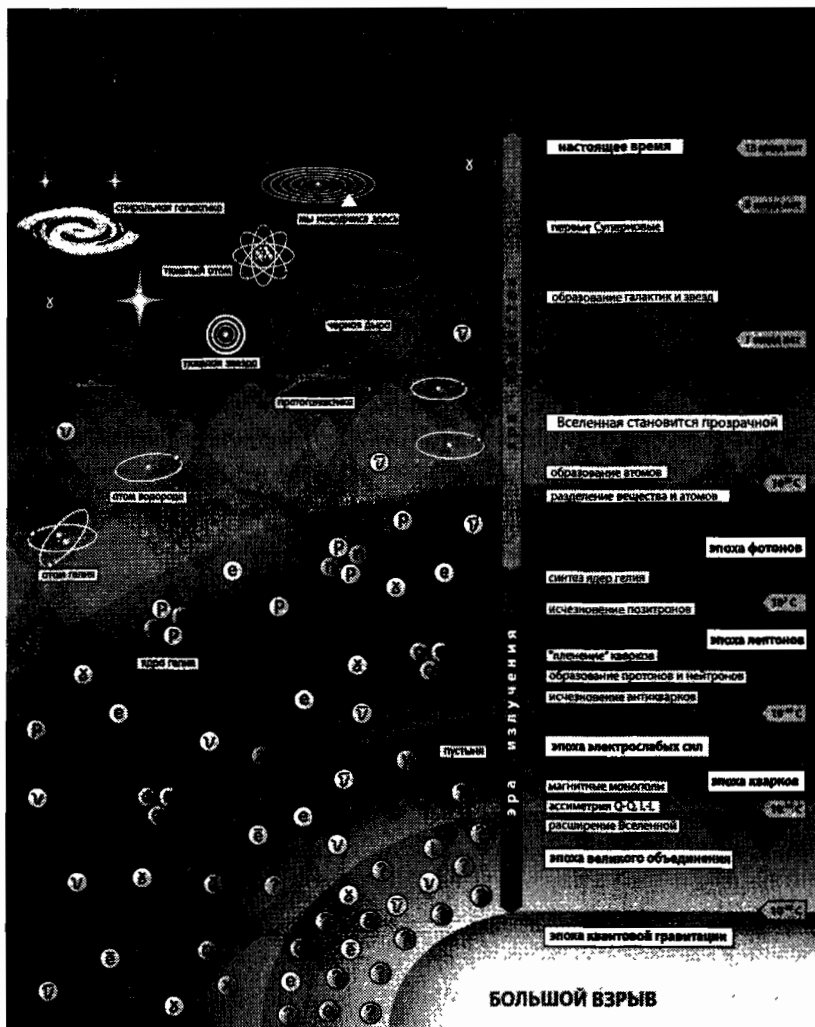


Рис. 62. Эволюция Вселенной (см. вклейку)

Начало Вселенной определялось интенсивностью ядерных сил в постинфляционную эпоху. Будь она меньше, атомные ядра просто бы не возникли, будь больше — весь водород пошел бы на образование гелия. Затем ход событий определяла гравитация. Если бы она была слабее, первичные газопылевые туманности не могли бы конденсироваться в плотные скопления вещества, дающие начало звездам, в противном случае звезды сгорали бы так быстро, что жизнь не успела бы возникнуть. Сейчас будущее Мира зависит от отношения средней плотности вещества и энергии к тому значению, которое разделяет открытые и закрытые космологические модели. Для нашей Вселенной это значение с очень высокой степенью точности равно единице, причем таким оно было уже через секунду после БВ. Окажись оно тогда меньше — Метагалактика слишком быстро бы раздулась и охладилась, больше — она перестала бы расширяться и испытала гравитационный коллапс.

Это был огромный шаг вперед по сравнению с изначальным атомом Леметра, для которого понятие температуры вообще не имело смысла. Затем Гамов заполнил раннюю Вселенную протонами, нейтронами и электронами. На первом этапе необходимо было описать синтез самых легких составных ядер гелия. Эта задача оказалась трудноразрешимой, так как скорости реакций термоядерного синтеза полностью зависят от температуры, падающей вместе с расширением Метагалактики. Спустя некоторое время он пришел к выводу, что Вселенная должна быть заполнена микроволновым излучением, возникшим примерно через триста тысяч лет после ее начала. Это было блестящее предсказание нового научного явления, и регистрация микроволнового излучения в 60-х годах прошлого века до сих пор является главным аргументом в пользу теории горячего рождения Вселенной в катаклизме БВ.

Поскольку в первые мгновения после БВ определяющей силой была гравитация, считается достаточно продуктивным развитие гипотетичной квантовой теории гравитации. Особо перспективными здесь выглядят подходы к описанию квантово-гравитационных явлений в рамках петлевой

квантовой гравитации. Именно концепция петлевой квантовой гравитации предсказывает довольно впечатляющий результат исчезновения изначальной космологической сингулярности из-за квантовых флуктуационных эффектов. При этом БВ перестает быть особой точкой и удастся не только проследить его протекание, но и заглянуть в то, что было в субсингулярном состоянии. Петлевая квантовая гравитация принципиально отличается от обычных физических теорий и даже от теории суперструн. Объектами теории суперструн, к примеру, являются разнообразные струны и многомерные мембраны, которые, однако, летают в заранее подготовленном для них пространстве и времени. На вопрос о том, как именно возникло это многомерное пространство-время, с помощью такой теории не ответишь.

В петлевой теории гравитации главными объектами являются субмикроскопические квантовые ячейки пространства, соединенные друг с другом в некие «соты» внутренним полем. Величина этого поля является для этих сот определенным «внутренним временем», и форма полевого потенциала выглядит совершенно так, как стрела времени от «прошлого» в «будущее». Теория петлевой гравитации предсказывает, что для достаточно большой Метагалактики с малой концентрацией энергии (то есть данное состояние далеко от сингулярности) ячейки квантовых сот как бы «сплавляются» друг с другом, трансформируясь в пространственно-временной континуум Минковского.

Вполне возможно, что в отдаленной перспективе такие построения помогут решить задачу о генезисе Вселенной в окрестностях сингулярности БВ. Первичные выводы из анализа полученных в теории петлевой гравитации уравнений показали, что при экстремальном «сжатии» Вселенной пространство как бы «рассыпается» и квантовая геометрия не позволяет уменьшить его объем до нуля, так что неизбежно происходит остановка и вновь начинается расширение. Эту последовательность состояний можно отследить как вперед, так и назад во «времени», а значит, в этом космологическом сценарии Большого Взрыва с неизбежностью присутствует

«Большой Коллапс», или «Большой Хруст», предыдущей Вселенной.

Развитие современных космологических квантовых теорий испытывает и трудности методологического порядка гносеологического плана. Ведь в квантовой механике наряду с объектом исследования и инструментами для его проведения элементом анализируемой картины становится сам наблюдатель. Однако, по определению, все наблюдатели являются частью Вселенной и мы лишены возможности представить себе постороннего «сверхобъективного» наблюдателя, способного зафиксировать истинное положение вещей.

Применительно к нашей Вселенной планковское время, типичное для виртуальных мини-Вселенных, оказывается почти на 60 порядков меньше современного возраста галактик. Что же задержало наш Мир от практически мгновенного коллапса? Очевидно, что Вселенные типа нашей являются ярко выраженными аномалиями. Первично устойчивое состояние вакуума в результате флуктуации топологии стало неустойчивым по отношению к нашей Вселенной. Эта неустойчивость приводит к тому, что внутри оболочки аномалии вакуум начинает изменять свои свойства, стремясь к новому устойчивому пределу. Этот процесс перестройки вакуума сопровождается гигантским выделением энергии, в результате чего новообразованная Вселенная начинает расширяться с колоссальной скоростью. Этот процесс можно интерпретировать как своеобразный взрыв вакуума.

По концепции инфляционной Вселенной внутри быстро расширяющейся, перегретой протометагалактики небольшой участок пространства охлаждается и начинает расширяться сильнее, подобно тому, как переохлажденная вода стремительно замерзает, расширяясь при этом. Эта фаза быстрого расширения позволяет устранить некоторые проблемы, присущие стандартным теориям большого взрыва.

Однако эта модель тоже не лишена недостатков. Чтобы ее уравнения правильно описывали инфляционную Вселенную, необходимо очень точно задавать исходные параметры, а для этого приходится вводить собственную труднообъяс-

нимую параметризацию. С другой стороны, теория единого поля, на которой основывается модель инфляционной Вселенной, полностью гипотетична и плохо поддается экспериментальной проверке, так как большую часть ее предсказаний невозможно количественно проверить в лабораторных условиях.

Как уже отмечалось, современная модель физического вакуума представляет собой море виртуальных субатомных частиц, стохастически (случайным образом) переходящих из вакуума в мир материальной реальности. Это явление получило название вакуумных флуктуаций. Вакуумные флуктуации невозможно наблюдать непосредственно, однако теории, постулирующие их существование, были подтверждены экспериментально. Согласно этим теориям частицы и античастицы безо всякой причины возникают из вакуума и практически сразу исчезают, аннигилируя друг друга. Теоретики предполагают, что в какой-то момент вместо элементарной частицы из вакуума появилась целая Вселенная и, вместо того чтобы сразу исчезнуть, эта Вселенная каким-то образом просуществовала миллиарды лет.

Однако и у этого космологического сценария есть существенные недостатки. Во-первых, трудно распространить достаточно ограниченный опыт с субатомными частицами на целую Вселенную. Во-вторых, строго говоря, квантовый физический вакуум представляет собой довольно сложную субструктуру, происхождение которой само по себе достаточно загадочно.

По современным представлениям инфляция началась через 10^{-43} секунды после образования сингулярности Большого Взрыва. На этом этапе существовал только физический вакуум, первичное скалярное поле, параметры которого сильно менялись из-за квантовых флуктуаций (этот загадочный субстрат образно называют пространственно-временной пеной). Для определенности будем говорить только об единственном поле, хотя в более реалистичных моделях это ограничение отброшено. Какая-то из флуктуаций привела

к тому, что интенсивность поля достигла острого локального пика, после чего стала спадать. Этот подскок как раз и создал условия для выхода на инфляционный режим. В итоге возник молниеносно расширяющийся объем с первоначальным диаметром 10^{-33} см, который и стал зародышем нашей Вселенной.

Инфляция прообраза нашего Мира была чрезвычайно кратковременной, менее 10^{-34} с. За это ничтожно малое время его поперечник неизмеримо вырос и Вселенная приобрела макроскопические размеры. Далее она эволюционировала в соответствии с моделью Фридмана, в которой скорость расширения приблизительно пропорциональна квадратному корню из средней плотности материи и потому постепенно падает. Когда возраст Вселенной достиг 6,5 млрд лет, на смену фридмановскому сценарию пришла эволюция иного рода, первую модель которой в 1917 году построил голландский астроном Виллем де Ситтер. Темп расширения не только перестал падать, но, напротив, начал возрастать, что мы сегодня и наблюдаем.

Основные этапы жизни Метагалактики

Название эпохи и соответствующие ей физические процессы	Время от БВ, секунды	Температура, градусы К
Рождение классического пространства-времени	10^{-43}	10^{32}
Стадия инфляции	$\sim 10^{-42} - 10^{-36}$	Меняется в очень широких пределах
Рождение вещества	10^{-36}	$\sim 10^{29}$
Рождение барионного избытка	10^{-35}	$\sim 10^{29}$
Электрослабый фазовый переход	10^{-10}	$\sim 10^{16} - 10^{17}$
Конфайнмент кварков	10^{-4}	$\sim 10^{12} - 10^{13}$
Первичный нуклеосинтез	1–200	$\sim 10^9 - 10^{10}$

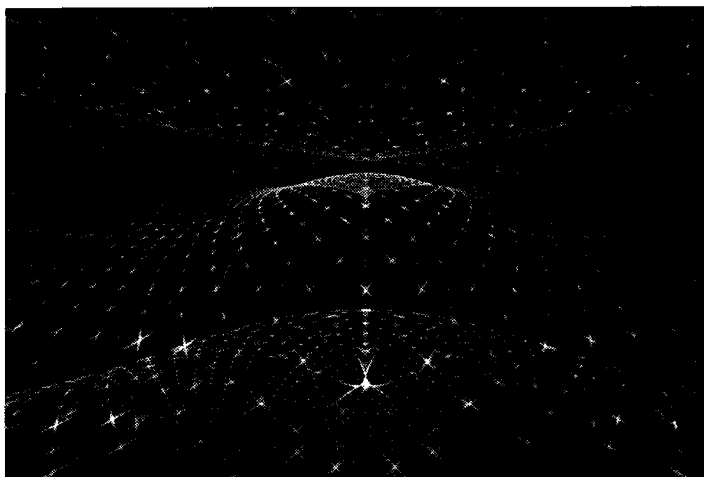


Рис. 63. Квантовая флуктуация

Компьютерная модель первичной квантовой флуктуации, приводящей к рождению метрики пространства-времени. Спонтанные квантовые флуктуации первичного скалярного поля приводят к возникновению областей космологического масштаба, которые в совокупности и составляют Мультивселенную. Флуктуация, которая рождает данный регион, и выступает в качестве его затравочного БВ.

На этапе инфляции, когда интенсивность скалярного поля дошла до минимума и стабилизировалась, окончательно сформировался тот набор фундаментальных физических законов, которые управляют поведением вещества и излучения в нашем Мире. При подходе к минимуму скалярное поле быстро осциллировало, рождая элементарные частицы. В результате к концу инфляционной фазы Вселенная уже была наполнена горячей плазмой, состоящей из свободных кварков, глюонов, лептонов и высокоэнергетичных квантов электромагнитного излучения. Очень важно, что обычных (естественно, с нашей точки зрения) частиц было чуть больше, нежели античастиц. Эта разница была микроскопической — порядка сотысячных долей процента, но все же не нулевой.

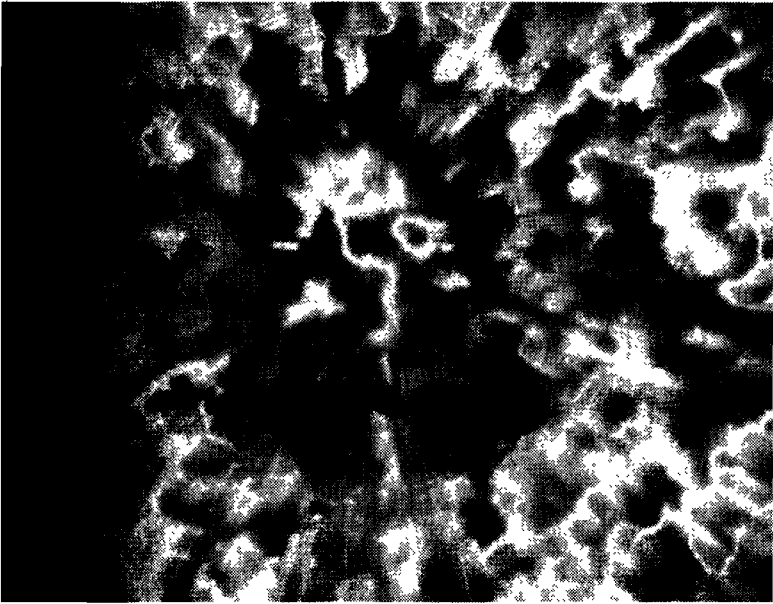


Рис. 64. Рождение нового Мира

Согласно инфляционному сценарию космос состоит из множества раздувающихся шаров, которые дают начало таким же шарам, а те, в свою очередь, рождают подобные шары в еще больших количествах, и так продолжается до бесконечности. Спонтанные флуктуации скалярного поля, запускающие инфляционный процесс, могут иметь разную форму, а это означает, что и рождающиеся Вселенные не будут копировать друг друга. Вполне возможно, что в них установятся собственные физические законы, фундаментальные константы и даже свое число пространственных измерений.

В результате, когда Вселенная охладилась настолько, что излучение перестало рождать новые частицы, вся антиматерия исчезла в процессе аннигиляции. Через тридцать микросекунд после Большого Взрыва кварки и глюоны сконденсировались в протоны и нейтроны, а где-то на десятой секунде

наступила эра первичного нуклеосинтеза, то есть возникновения композитных ядер гелия, дейтерия и лития.

В конце прошлого века среди космологов получила популярность теория вечной инфляции, предполагающая, что квантовые флуктуации, подобные тем, которым мы обязаны существованием нашего Мира, могут возникать самопроизвольно и в любом количестве, если для этого есть подходящие условия. Они способны давать начало инфляционным процессам, в ходе которых рождаются все новые и новые Вселенные. Не исключено, что и наше Мироздание вышло из флуктуационной зоны, сформировавшейся в мирепредшественнике. Точно так же можно допустить, что когда-нибудь и где-нибудь в нашей собственной Вселенной возникнет флуктуация, которая «выдует» юную Вселенную совсем другого рода, тоже способную к космологической редубликации. Можно развить модель и получить процесс, в котором инфляционная генерация дочерних Вселенных происходит имманентно с локальной последующей стабилизацией в подпространстве.



Рис. 65. Вариант реальности Мироздания

«...Теперь мы можем сделать шаг назад, посмотреть на все эти Вселенные: как мы смотрим на забитую автостоянку, разыскивая свою машину, и спросить: а в самом деле, которая из этих Вселенных — наша? Уверены ли мы в том, что именно она — первая?»

А. Д. Линде. «Инфляция, квантовая космология и Антропный принцип»

3.2. Большие проблемы Большого Взрыва

«В попытке физически описать исходное состояние Вселенной мы натываемся на препятствие. Вопрос в том, является ли это препятствие преодолимым. Может быть, все наши попытки научно описать исходное состояние Вселенной заранее обречены на неудачу? Этот вопрос, а также концептуальные трудности, связанные с описанием сингулярной точки в исходный момент времени, являются одной из основных проблем современной научной мысли».

Профессор Манчестерского университета Б. Лоувел

«На наш взгляд, вполне оправданно считать физическую теорию, которая предсказывает сингулярность, несостоявшейся... результаты наших наблюдений подтверждают предположение о том, что Вселенная возникла в определенный момент времени. Однако сам момент начала творения, сингулярность, не подчиняется ни одному из известных законов физики».

С. Хокинг. «Крупномасштабная структура пространства-времени»

«Эта космологическая теория представляет собой верх абсурда — она утверждает, что вся Вселенная возникла в некий определенный момент подобно взорвавшейся атомной

бомбе, имеющей размеры (более или менее) с булавочную головку. Похоже на то, что в интеллектуальной теперешней атмосфере огромным преимуществом космологии «Большого Взрыва» служит то, что она является оскорблением здравого смысла: stedo, quia absurdum («верую, ибо это абсурдно»)! Когда ученые сражаются против астрологических бессмыслиц вне стен «храмов науки», неплохо было бы припомнить, что в самих этих стенах подчас культивируется еще худшая бессмыслица».

*Известный шведский астрофизик,
лауреат Нобелевской премии Х. Альвен*

Открытие микроволнового фонового излучения ознаменовало собой блестящий триумф теории происхождения Вселенной на основе модели БВ, однако с течением времени астрофизики столкнулись с серьезной проблемой описания изначальной сингулярности. Ведь поскольку исходное состояние Вселенной возникло из точки сингулярности с нулевым объемом и бесконечно высокими плотностью и температурой, то такое начальное состояние, в принципе, не может быть описано математически. И хотя теория БВ является в настоящий момент общепризнанной, ее космологический сценарий является лишь наиболее удачной попыткой объяснить зарождение Вселенной с диалектических позиций материалистического мировоззрения в строгом соответствии с законами физики.

Попытки ученых обобщить физическую модель происхождения Вселенной основываются на трех постулатах: 1) все явления природы могут быть исчерпывающе объяснены физическими законами, выраженными в математической форме; 2) эти физические законы универсальны и не зависят от времени и места; 3) все основные законы природы просты. Обычно эти постулаты принимаются как нечто само собой разумеющееся, но на самом деле они являются лишь составными частями описания реальности человеческим разумом.

Исходя из подобного общепринятого физического подхода к описанию окружающей реальности, теоретики разработали несколько вариантов теории БВ, в которых рас-

смаатривают сингулярность при зарождении Вселенной как неполную и несовершенную. В такой «незрелой» сингулярности удастся избежать абсурдных бесконечных величин плотности энергии. С другой стороны, наступление на сингулярность ведется в направлении модельной асимметрии вещества и антиматерии, аналогичной той, которую можно видеть в наблюдаемой Вселенной. Таким образом, физики надеются внести в исходное состояние Вселенной достаточную неупорядоченность, необходимую для того, чтобы оно не сводилось к математической точке.

Проблема сингулярности является лишь частью более общей проблемы возникновения и развития Вселенной из точечного объема. Конечно, если какая-либо модель Вселенной содержит сингулярность, это, несомненно, создает очень большие теоретические трудности. Но даже если сингулярности можно избежать, то основной вопрос по-прежнему остается без ответа: откуда, собственно, появилась Вселенная? Надеясь уклониться от ответа на этот вопрос, некоторые ученые предложили теорию так называемой бесконечно пульсирующей Вселенной. В соответствии с этой теорией Вселенная расширяется, а затем сжимается до сингулярности, затем вновь расширяется и снова сжимается. У нее нет ни начала, ни конца. Это снимает вопрос о происхождении Вселенной — она ниоткуда не возникает, а существует вечно. Но и эта модель не лишена серьезных недостатков. Прежде всего, до сих пор никто не смог удовлетворительно объяснить механизм пульсирования. Так, нобелевский лауреат Стивен Вайнберг утверждает, что каждый цикл расширения и сжатия должен приводить к определенным прогрессирующим изменениям во Вселенной, а это значит, что у Вселенной должно быть начало, иначе вся ее история будет регрессом, растянувшимся на вечность. Таким образом, перед нами вновь встает вопрос о происхождении Вселенной.

Другой попыткой уйти от вопроса о происхождении Вселенной является модель пульсирующей Вселенной с обращением хода времени. Согласно этой теории Вселенная сначала расширяется, а затем сжимается до сингулярности, причем в начале каждого следующего цикла расширения-

сжатия время поворачивает вспять, приводя, в конце концов, к сингулярности, с которой начинался предыдущий цикл. Согласно этой модели, прошлое становится будущим, а будущее — прошлым, так что понятие «начало Вселенной» лишается смысла.

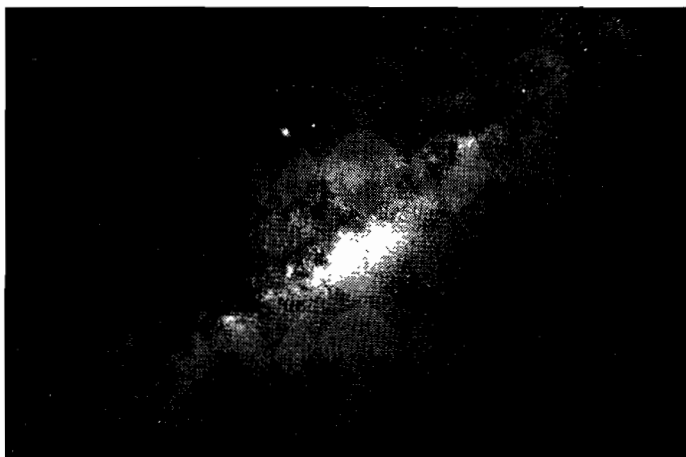


Рис. 66. Загадка «недостающей массы» Млечного Пути

Измеряя световую энергию, излучаемую Млечным Путем, можно приблизительно определить массу нашей Галактики. Она равняется массе ста миллиардов Солнц. Однако, изучая закономерности взаимодействия того же Млечного Пути с близлежащей галактикой Андромеды, мы обнаружим, что наша Галактика притягивается к ней так, как будто весит в десять раз больше. Чтобы объяснить это, астрофизики предлагают списать недостаток массы на призрачные субатомные частицы, называемые «нейтрино». Первоначально нейтрино считались невесомыми, и специалисты по физике элементарных частиц относятся к подобным гипотезам весьма настороженно.

Даже если отложить вопрос о происхождении Вселенной и обратиться к ее строению, мы увидим, что и тут далеко не все обстоит благополучно. Ученые уверенно заявляют, что Вселенная простирается на X световых лет и что ее возраст — Y миллиардов лет. Они утверждают, что знают природу всех основных космических объектов: звезд, галактик, туманно-

стей, квазаров и т. д. В то же время мы не имеем ясного представления даже о галактике Млечного Пути, к которой мы принадлежим.

Рассмотрим еще несколько оригинальных идей, которые обсуждаются учеными-космологами. Одна из таких теорий — теория «белой дыры», то есть квазара, фонтаном извергающего галактики. Дж. Гриббин, автор книги «Белые дыры», спрашивает: «Возможно ли, чтобы белые дыры делились так, чтобы галактики воспроизводили себя, подобно амебам, путем партеногенеза?» С точки зрения привычных представлений о поведении материи, это предположение кажется таким неправдоподобным, что по-настоящему оценить его можно; только взглянув на стандартные теории возникновения галактик и убедившись, насколько безнадежны их попытки объяснить развитие реальной Вселенной.

В рамках теории БВ отрицается вечность и бесконечность Вселенной, так как Вселенная имела начало во времени и по прошествии даже максимального срока в 20 миллиардов лет успела расшириться (раздуться) на ограниченное расстояние. Что находится за пределами радиуса расширяющейся Вселенной — тоже запретная тема для обсуждения. Обычно отделяются ничего не объясняющими утверждениями, смысл которых примерно следующий: Вселенная такова, потому что это вытекает из математических формул. В частности, сингулярность получается путем чисто математических преобразований и затем проецируется на космическую реальность.

Вообще, объектом релятивистской космологии являются предельно абстрактные модели, опирающиеся на самый сложный математический аппарат. При этом сначала решаются уравнения или доказываются теоремы, а затем уже решается вопрос о том, каким образом следует скорректировать прежнее, не менее абстрактное математическое описание Космоса или, быть может, заменить старую космологическую модель на новую. С полной очевидностью это обнаруживается и в истории с космологической сингулярностью.

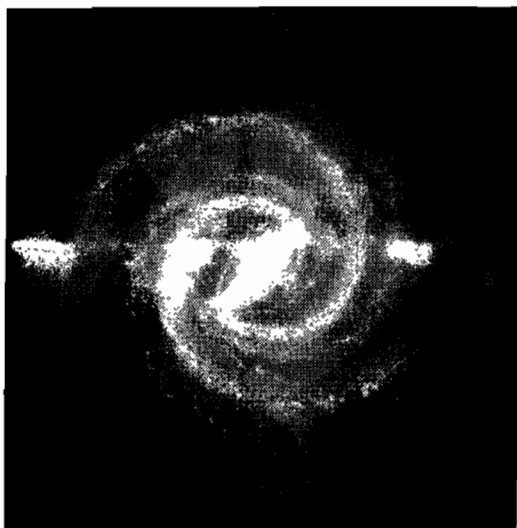


Рис. 67. Реконструкция внешнего вида нашей Галактики

«Я вспоминаю середину семидесятых годов, когда я и мои коллеги, исследователи Млечного Пути, были абсолютно уверены в себе... В то время никому не могло прийти в голову, что очень скоро нам придется пересмотреть свои представления о размерах Млечного Пути, увеличив его диаметр втрое, а массу вдесятеро. Если даже такие параметры были столь кардинально изменены после десятков лет наблюдений и исследований, то что можно ожидать от будущего?! Не придется ли нам еще более кардинально менять свои взгляды?»

Известный астроном Б. Дж. Бок

На современном этапе развития квантовой космологии особую известность получила вышеупомянутая инфляционная модель Вселенной. Ее популярность и быстрое признание были обусловлены тем, что с помощью новых математических допущений удалось преодолеть возникшие противоречия между теоретической космологией и физикой элементарных частиц. Специалисты по теории элементарных частиц давно обращали внимание на неясные моменты космологии и задавали вопросы, которые казались почти метафизическими. Что было до начала расширения Вселенной? Почему Вселен-

ная однородна и изотропна? Почему разные ее части, далеко удаленные друг от друга, так похожи, хотя формировались независимо? Поначалу казалось, что ответы на эти вопросы выходят за рамки целей и возможностей науки, однако сценарий инфляционно раздувающегося Мира позволяет ответить на большую часть приведенных вопросов.



Рис. 68. Прыжок через гиперпространство

Другая теория, которая серьезно обсуждается космологами, — это пространственно-временные туннели или, как их еще называют, «космические норы». Впервые серьезно рассмотренная физиком Дж. Уилером в работе «Геометродинамика» (1962), эта теория получила широкую известность благодаря научно-фантастическому сериалу «Звездные войны». В этих фильмах космические корабли путешествуют через гиперпространство, осуществляя межгалактические перелеты, которые в нормальных условиях потребовали бы миллионы лет при движении со скоростью света. В некоторых версиях этой теории космические туннели рассматриваются как переходы, связывающие прошлое и будущее или даже различные Вселенные.

Мы уже знаем, что общей чертой различных вариантов инфляционного сценария является наличие особой стадии сверхбыстрого (экспоненциального) расширения Вселенной

в вакуумоподобном состоянии с огромной плотностью энергии. На следующем этапе подобное экстремальное состояние зародыша нашего Мира распадается с образованием разнообразных элементарных частиц, взаимодействующих друг с другом, и вслед за этим начинается «обычная» эволюция согласно стандартной модели «горячей Вселенной». В конце прошлого века физики-теоретики продолжили «инфляционный сценарий рождения Мироздания» до логического конца, рассмотрев вопрос о конце Вселенной. Математическая модель дает здесь однозначный и, в общем-то, ожидаемый ответ: наш Мир на закате своего существования опять должен скатиться в пропасть сингулярности, то есть в точку с нулевым радиусом.

Бурные научные споры вокруг гипотезы БВ приводят к появлению совершенно парадоксальных и отчасти даже невероятных теорий. Подтверждением тому может служить удивительная концепция Вселенной-квазичастицы, названной «фридмоном» в честь А. А. Фридмана, выдвинутая известным математиком и космологом академиком М. А. Марковым. Согласно этой гипотезе Вселенная в целом может оказаться микроскопической частицей, а микроскопическая частица может содержать в себе целую Вселенную.

Выдвигаемые положения наглядно иллюстрируются с помощью знаменитого «демона Максвелла» — гипотетического существа, способного оказаться в любой невероятной ситуации и описать ее. Вот что увидел бы такой «демон» при полете через Вселенную, представляющую собой «фридмон». Двигаясь с возрастающим ускорением, «демон», в конце концов, смог бы преодолеть световой барьер и оказаться бы в некоторой области, где наш Мир с помощью микроскопической горловины сферы связан с другим, «внешним» по отношению к нашему, пространством. Но если бы любознательный «демон» протиснулся сквозь горловину за пределы «фридмона» и взглянул со стороны на нашу Вселенную, то с удивлением обнаружил бы, что извне она представляется микроскопическим объектом.

Теория космологической Вселенной-квазичастицы базируется на строгом и оригинальном математическом расчете. В модели «фридмона» учитывается соотношение полузамкнутой неевклидовой сферы с различными величинами ее радиуса, а также с гравитационной и световой константами, полными электрическим зарядом системы и массой вещества, содержащегося в границах описываемой Вселенной. При определенных значениях заданных величин и, в частности, радиуса сферы, ее поверхность может увеличиваться от нуля до некоторого максимума, а затем уменьшаться, стягиваясь в одну точку.

На первый взгляд, если считать, что расширение Вселенной началось из одной точки 15 миллиардов лет назад (примерно таким сейчас считается возраст Вселенной), то все объекты Вселенной в начале расширения будут находиться в непосредственной близости друг от друга. Следовательно, позже, после образования первых звезд, свет от этих объектов быстро достигал любой точки Вселенной, из которой могло бы происходить наблюдение (если бы в то время во Вселенной нашлись наблюдатели). Согласно стандартной теории БВ объекты Вселенной после того, как «сингулярность» «взорвалась», начали удаляться друг от друга. Световым волнам требовалось все больше времени, чтобы преодолеть расстояние между ними, но наблюдатели, если бы таковые нашлись в пылевых облаках и зарождающихся галактиках, увидели бы все объекты Вселенной задолго до того, как появились наша планета, астрономы и космологи. Что все это значит? Если бы расширение происходило из одной точки, мы в настоящий момент не могли бы увидеть нигде во Вселенной объекты старше некоторого критического возраста, существенно меньшего предполагаемого возраста Вселенной.

На самом деле БВ является совершенно особым физическим процессом и к «бытовому» понятию взрывного явления имеет довольно отдаленное отношение. Здесь важно то, что, поскольку существуют принципиальная однородность и изотропия пространства, нельзя указать в пространстве точку, в которой начался процесс БВ. Следовательно, правильно

считать, что БВ был «повсюду», и нет ничего удивительного в том, что в этом «повсюду» мы обнаруживаем космические объекты, «как бы приклеенные» к пространству, которое растягивается во все стороны. Эти объекты постепенно попадают в горизонт нашего наблюдения.

После ряда недавних открытий вопрос о темпе расширения Вселенной опять стал одним из главных противоречий в стандартной модели БВ. Дело в том, что наша Вселенная расширяется равноускоренно. Этот факт говорит о том, что расширение Вселенной нельзя объяснить как разлет галактик «по инерции» вследствие БВ (такой разлет, очевидно, был бы не равноускоренным, а равнозамедленным). Вселенная, очевидно, расширяется по какой-то другой причине. Сейчас выдвигается несколько гипотез равноускоренного расширения Вселенной. Так, в одной из них предполагается, что причина расширения в том, что растягивается само пространство. Это звучит не очень убедительно, но космологи считают это объяснение более разумным, нежели предположение, что современные галактики разлетаются, словно «осколки» «Большого Взрыва». Еще чаще говорят об антигравитации вакуума (темной материи и темной энергии). При этом считается, что вначале, после БВ, Вселенная расширялась равнозамедленно, поскольку этому процессу препятствовало гравитационное взаимодействие космических объектов. Затем, когда космические объекты удалились друг от друга на достаточное расстояние, силы антигравитации темной материи превысили гравитационное взаимодействие между космическими телами и Вселенная начала расширяться равноускоренно. Однако эта теория также вызывает сомнения, поскольку переход от равнозамедленного к равноускоренному расширению неизбежно создал бы вокруг наблюдателя границу, характеризующуюся разреженной плотностью вещества. Так происходит в автомобильной пробке, когда сразу за автомобилями, которые уже могут увеличить скорость движения, находятся плотно стоящие автомобили, до этой границы уменьшавшие свою скорость.

Теория БВ сейчас считается столь же несомненной, как и система Коперника. Однако вплоть до второй половины 1960-х она отнюдь не пользовалась всеобщим признанием и не только потому, что многие ученые с порога отрицали саму идею расширения Вселенной. Великий Эйнштейн также не верил в начало и конец Мироздания и поэтому придумал вечно существующую статичную Вселенную. Для этого ему понадобилось ввести в свои уравнения особую компоненту, которая создавала «антитяготение» и тем самым формально обеспечивала стабильность мироустройства. Это дополнение (так называемый космологический член) Эйнштейн считал незелантным, уродливым, но все же необходимым.

У модели Эйнштейна быстро появились конкуренты — модель мира без материи Виллема де Ситтера (1917), замкнутые и открытые нестационарные модели Александра Фридмана (1922 и 1924). Но эти красивые конструкции до поры оставались чисто математическими упражнениями. Чтобы рассуждать о Вселенной в целом не умозрительно, надо хотя бы знать, что существуют миры, расположенные за пределами звездного скопления, в котором находится Солнечная система и мы вместе с нею. А космология получила возможность искать опору в астрономических наблюдениях лишь после того, как в двадцатых годах прошлого века Эдвин Хаббл опубликовал работу «Внегалактические туманности», где впервые было дано описание галактик как самостоятельных звездных систем, не входящих в состав млечного пути. Позже Хаббл открыл свою знаменитую зависимость «расстояние — скорость галактики» экспериментально, обработав данные по удаленности двадцати четырех галактик и величине красного смещения приходящего от них света.

Мы уже рассказывали про базовую модель Леметра, которая позволяла оценить продолжительность существования Вселенной — для этого нужно было лишь выяснить численную величину константы, входящей в уравнение Хаббла. Попытки определить эту константу приводили к заключению, что наш мир возник всего лишь около двух

миллиардов лет назад. Однако геологи утверждали, что Земля много старше, да и астрономы не сомневались, что в космосе полным-полно звезд более почтенного возраста. У астрофизиков тоже были собственные основания для недоверия: процентный состав распределения химических элементов во Вселенной на основе Леметровской модели явно противоречил реальности.

Еще худшая судьба постигла модель вечно осциллирующей Вселенной, предложенную в 30-х годах прошлого века Ричардом Толманом. Она вообще не получила серьезного признания, а в конце ушедшего столетия была отвергнута как математически некорректная.

После Второй мировой войны центр космологических исследований переместился в Кембридж, где обосновались трое замечательных ученых — Фред Хойл, Герман Бонди и Томас Голд. Перед этим они работали в радиолокационной лаборатории британских ВМФ, где и подружились. Все трое невзлюбили модель Леметра, но закон Хаббла приняли всерьез, а потому отвергли и концепцию статичной Вселенной. После войны они собирались у Бонди и обсуждали те же проблемы. Озарение снизошло, когда Голд сообразил, что Вселенная может оказаться одновременно изменяющейся и неизменной.

Друзья сочли идею безумной, но потом решили, что в ней что-то есть. Объединенными усилиями они превратили гипотезу в связную теорию. Бонди с Голдом дали ее общее изложение, а Хойл в отдельной публикации «Новая модель расширяющейся Вселенной» — математические расчеты. За основу он взял уравнения ОТО, но дополнил их гипотетическим «полем творения», обладающим отрицательным давлением. Нечто в этом роде через 30 лет появилось в инфляционных космологических теориях, что Хойл подчеркивал с немалым удовольствием.

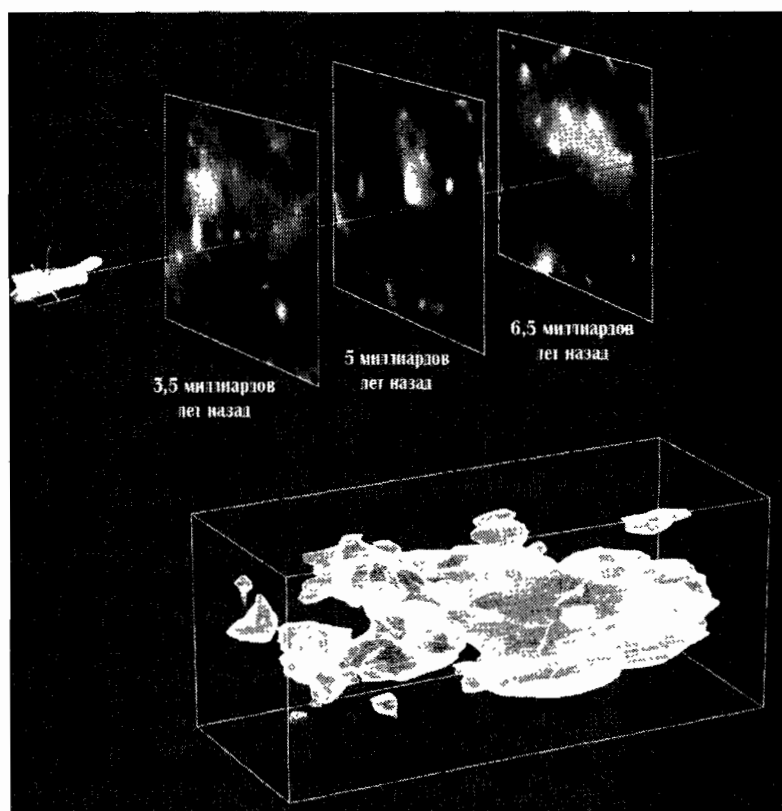


Рис. 69. Распределение галактик по данным космического телескопа «Хаббл»

Для подтверждения своей модели Хойл предложил воспользоваться данными о пространственном распределении молодых галактик. Если С-поле равномерно творит материю повсюду, то средняя плотность таких галактик должна быть примерно одинаковой. Напротив, модель катаклизмического рождения Вселенной предсказывает, что на дальней границе наблюдаемого космоса эта плотность максимальна — оттуда к нам приходит свет еще не успевших сосгаться звездных скоплений. Хойловский критерий был совершенно разумным, однако в то время проверить его не представлялось возможным из-за отсутствия достаточно мощных телескопов.

Новая модель вошла в историю науки как Космология стабильного состояния. Она провозгласила полное равноправие не только всех точек пространства, но и всех моментов времени: Вселенная расширяется, но начала не имеет, поскольку всегда остается подобной себе самой. Голд назвал это утверждение «совершенным космологическим принципом». Геометрия пространства в этой модели остается плоской, как и у Ньютона. Галактики разбегаются, однако в космосе из «поля творения» появляется новое вещество, причем с такой интенсивностью, что средняя плотность материи остается неизменной. В соответствии с известным тогда значением постоянной Хаббла Хойл вычислил, что в каждом кубометре пространства в течение 300 тысяч лет рождается всего одна частица. Сразу снимался вопрос, почему приборы не регистрируют эти процессы, — они слишком медленны по человеческим меркам. Новая космология не испытывала никаких трудностей, связанных с возрастом Вселенной, этой проблемы для нее просто не существовало.

Любопытно, что само словосочетание «Большой Взрыв», как ни странно, ввел в оборот не автор этой теории и даже не ее сторонник. В 1949 году продюсер научных программ BBC Питер Ласлетт предложил Фреду Хойлу подготовить серию из пяти лекций. Хойл блистал перед микрофоном и мгновенно приобрел множество поклонников среди радиослушателей. В последнем выступлении он заговорил о космологии, рассказал о своей модели и под конец решил свести счеты с конкурентами. Их теория, сказал Хойл, «основана на предположении, что Вселенная возникла в процессе одногоединственного мощного взрыва и потому существует лишь конечное время... Эта идея Большого Взрыва кажется мне совершенно неудовлетворительной». Вот так впервые и появилось это выражение. Наверное, надо было бы перевести его как «Большой хлопок», что, вероятно, точнее соответствует уничижительному смыслу, который вложил в него Хойл. Через год его радиолекции были опубликованы и новый термин пошел гулять по свету.

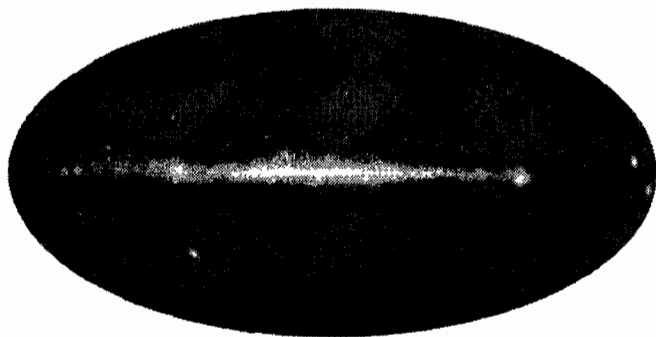


Рис. 70. Микроволновое излучение

К концу прошлого века хойловская космология стала быстро уступать позиции другим теоретическим сценариям происхождения и эволюции Вселенной. К этому времени астрофизики доказали, что постоянная Хаббла на порядок меньше прежних оценок и возраст Вселенной составляет 13,7 млрд лет \pm 200 млн. А в 1965 году Арно Пензиас и Роберт Вильсон зарегистрировали предсказанное микроволновое фоновое излучение и тем самым сразу привлекли к теории БВ великое множество сторонников.

Вот уже сорок лет эта теория считается стандартной и общепризнанной космологической моделью. У нее есть и конкуренты разных возрастов, но вот теорию Хойла всерьез никто больше не принимает. Ей не помогло недавнее открытие ускорения разлета галактик, о возможности которого писали и Хойл, и Бонди с Голдом.

3.3. Демоны и демиурги Хроноса

«Открытие объединенной теории, описывающей природу в условиях любых энергий, позволит нам ответить на самые глубокие вопросы космологии: имеет ли расширяющееся облако галактик, которое мы называем Большим Взрывом, начало во времени? Является ли Большой Взрыв только одним эпизо-

дом истории Вселенной, в которой большие и маленькие взрывы происходят вечно? Изменяются ли физические константы или даже законы природы от одного взрыва к другому?»

Стивен Вайнберг. «Единая физика к 2050?»

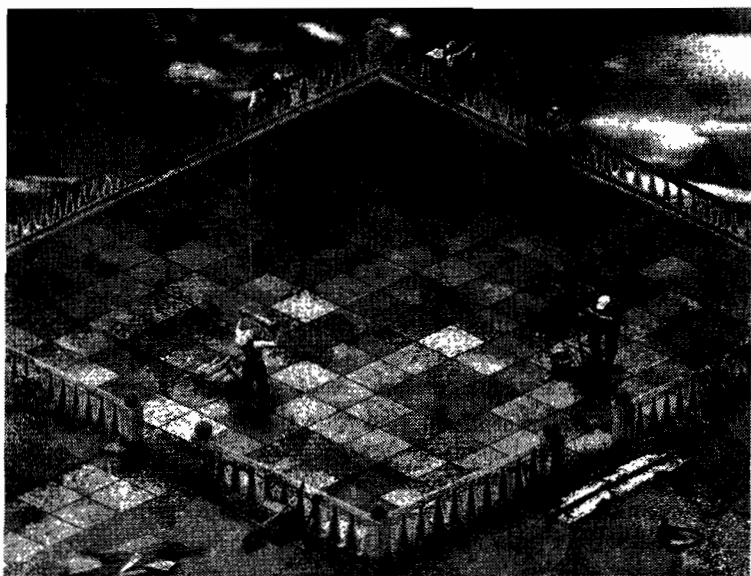


Рис. 71. Парадоксальная реальность

Современная концепция развития Мультиуниверсума тесно связана с рядом мировоззренческих представлений квантовой теории и допускает, что если поток энергии квантуем, то существует некая фундаментальная ячейка пространства-времени как фундаментальная основа всей нашей Вселенной.

Давайте более внимательно присмотримся к загадочному полю инфлатона из инфляционной космологии. Напряженность инфлатона характеризуется *потенциалом скалярного (ненаправленного) поля*. Современная модель инфлатона включает квинтэссенцию темной энергией и как безмассовое поле испытывает *стохастические (случайные) квантовые скачки*. Так Мультивселенная оказывается разделенной на экспоненциально большие области, и в этих параллельных

Мирах плотность энергии поля инфлатона в минимуме эффективного потенциала флуктуирует.

Итак, можно ли прояснить жгучую тайну происхождения инфлатона и, в конечном итоге, всей нашей реальности? Сейчас физики-теоретики пытаются связать появления инфлатонных параметров с эффектами квантовой гравитации, физики элементарных частиц (хромодинамики) и спонтанного нарушения суперсимметрии. Если следовать их построениям, конкретное значение космологической постоянной связано с изменением плотности энергии инфлатона, в свою очередь, определяющим плотность энергии в современной Вселенной. Мы уже рассказывали, что иногда физики даже пытаются обобщить теоретические посыпки и рассмотреть Мультимир, состоящий из параллельных инфляционных Вселенных с различными космологическими постоянными. Подобный подход вполне соответствует общим положениям релятивистской квантовой космологии и концептуально близок как многомировой интерпретации квантовой механики эвереттовского толка, так и теории дочерних Вселенных по инфляционным сценариям.

Давайте теперь попытаемся обратить свой внутренний взор на космологическую стрелу времени, о которой упоминалось в предыдущей главе. Представим себе некоторого сверхъестественного внешнего наблюдателя в виде «старшего» демона — *демиурга*, разглядывающего строение Мультимира из бесконечной глубины вселенского «ничто». Структура Мультиуниверсума предстанет для всепроникающего взора демиурга наподобие «луковицы миров», где каждая из Вселенных представляет собой замкнутую оболочку изолированного мира. В центре «луковицы» Мультиуниверсума демиург зафиксировывает призрачные сполохи главной космологической сингулярности БВ. Ну а взглядевшись попристальнее, наш сверхъестественный наблюдатель сможет обнаружить и новорожденные миры, с немислимой хроноквантовой частотой рождающиеся в катаклизме квантовых флуктуаций инфлатона.

Устав от непрерывного мелькания последовательности хроноквантовых кадров развития многомирья, наш демиург решает передать эстафету наблюдения своим младшим собратьям-демонам, дислоцированным в конкретных отдельных Вселенных. Каждый из таких внутренних наблюдателей при желании может вообразить себя кондуктором монорельсового вагончика Мироздания, стремительно летящего по стреле времени в неизвестность. Внутри своего мира демон чувствует себя вполне комфортно, здесь течет свое время, рождаются и гибнут галактики, в общем, идет нормальная эволюция Вселенной. Однако демону совершенно не импонируют внешние условия и он садится писать длинную жалобу демиургу, сетуя на очень досаждающие толчки стыков вселенского монорельса, следующие через каждый хроноквант потока времени. Скучающий в «небытие» демиург незамедлительно присылает ответ, от которого шерсть демона становится торчком, а хвост закручивается в спираль Мебиуса. Демон стремительно летит в тамбур своего вагончика Мироздания и распахивает дверь. Вот тут его изумленному взору и предстает весь состав Мультиверса с клацающими буферами запутанных квантовых состояний и практически бесконечным количеством стрелок на каждом хроноквантовом стыке монорельса стрелы времени. С трудом придя в себя и отдышавшись, демон начинает осознавать, что его личная судьба и история его мира решается каждый хроноквант времени, локализуясь в полном соответствии с квантовой теорией в новую историческую последовательность хроноквантовых Вселенных.

Постепенно демон успокаивается, размышляя над фатальным роком судьбы. И тут к его копытам падает толстый конверт сверхпространственной почты от демиурга. Пораженный столь непривычным вниманием начальства, демон дрожащими лапами вскрывает пакет и обнаруживает целую кипу научных статей Эверетта, Уилера, Новикова, Линде, Старобинского, Киржница и пр., и пр., и пр. Вселенский ма-

ятник отсчитывает еще одно мгновение вечности... Демон прерывает чтение на какой-то статейке малоизвестного украинского физика «Космологические хронофазовые метрические переходы» и, задумчиво почесывая заметно подростшую бородку, начинает усиленно размышлять над параллелизмом удивительных миров Эверетта — Уилера, о последовательных Универсумах Вилинкина, над возникновением космологической сингулярности Большого Взрыва и о многих, многих иных очень странных вещах...

Итак, мы рассмотрели несколько вариантов сценариев развития Вселенной, остановившись на построении группы моделей в виде последовательности независимых темпоральных отображений нашего Мультиуниверсума. Следует сразу уточнить, что на современном уровне знания количественных оценок темпоральных параметров миров Мультиуниверсума можно рассматривать как дело вкуса каждого исследователя, например, их можно считать принципиально ограниченными, но практически бесконечными. Так, в одном из анализируемых сценариев оценка числа Вселенных, реализованных после Большого Взрыва до наших дней, составляет $N = T/t(pl) \sim 10^{60}$, где T — время существования нашего Мира, $t(pl)$ — планковское время.

Строгая последовательность подобных Миров, являющихся абсолютными дубликатами нашей физической реальности, и будет в целом определять привычный образ реляционного (относительного) физического времени. Определенные логические предпосылки для дальнейшего развития данных представлений, как уже неоднократно упоминалось, можно найти в интерпретациях теории Эверетта — Уилера и особенно — в моделях Вилинкина и Линде. С разработкой новой теоретической модели физического времени возникла возможность анализа существования практически бесконечного множества последовательных и вложенных Вселенных как изолированных, абсолютно адекватных частей единого Мультимира.

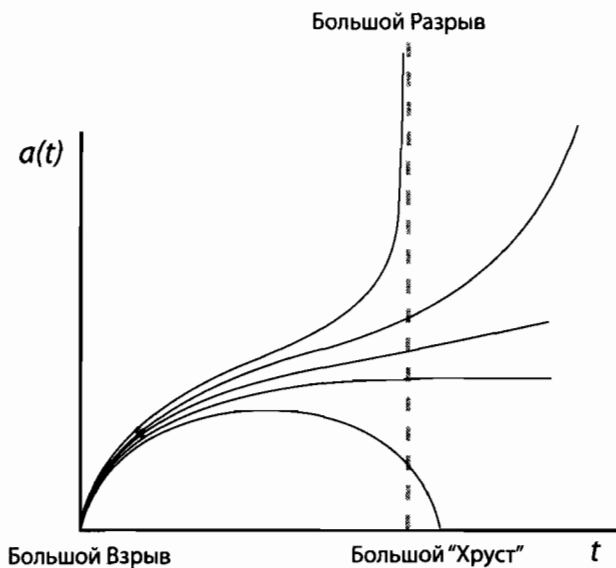


Рис. 72. Зависимость космологических сценариев от величины плотности материи Метагалактики

Здесь следует заметить, что, хотя многие черты образа квантового Мультиуниверса кажутся довольно запутанными, они допускают вполне прозаическое толкование, например, как векторная числовая ось натурального ряда, где каждая точка соответствует независимому образу нашей Вселенной в определенный момент ее эволюции, а начало связано с сингулярностью Большого Взрыва.

Следует отметить, что современная проблематика физической космологии при любых физических сценариях так или иначе возвращается к ряду актуальных вопросов, связанных с исследованием сингулярного развития Вселенной. В качестве примера можно привести замечательные теоретические построения академика Андрея Дмитриевича Сахарова, касающиеся определения физических величин для значения времени $t < 0$ относительно точки Большого Взрыва ($t = 0$). Академик А. Д. Сахаров предложил оригинальную

космологическую модель, отличающуюся от модели Фридмана тем, что в ней можно определить все физические величины для досингулярных значений времени.

Эту гипотетическую модель Андрей Дмитриевич назвал космологической моделью с поворотом стрелы времени. В подобной модели удастся так сформулировать все законы физики, что они инвариантны при темпоральной инверсии. Для этого надо одновременно с изменением направления времени по Т-преобразованию произвести зеркальное отражение пространства по Р-преобразованию и заменить все частицы на античастицы по С-преобразованию. В результате закон ТРС-инвариантности формулируется как всеобщий и неизменный закон природы.

Каждая такая *пространственно-временная локализация* содержит все возможные типы внутренних состояний и развивается в экспоненциально большую область. Здесь возникает вопрос о системах отсчета, в которых происходят события на главной мировой линии. С точки зрения стороннего сверхъестественного наблюдателя — «демиурга», совокупность Миров составляет единую материальную историческую последовательность, по оси времени которой они, расширяясь, движутся. В системе отсчета отдельной Вселенной *ординарный наблюдатель* — «гуманоид» — отметит прошедшие и наступающие события как абсолютное отражение собственной истории данной реальности. Ну а третья сущность наблюдателей — «демоны» — способны идентифицировать изнутри локальную систему Миров Мультиуниверсума.

Возникновение Мультимира из начального хаотического состояния имеет большое значение для каждого сценария квантовой космологии. В соответствии со стандартной теорией электрослабого взаимодействия, массы всех элементарных частиц зависят от величины хиггсовского скалярного поля в нашей Вселенной. Эта величина определяется положением минимума эффективного потенциала. В общем случае этот потенциал может иметь множество различных минимумов.

В определенных сценариях за основу можно принять и теорию генерации дочерних Вселенных как процесс самовоспроизводства Вселенных в квантовой космологии. К сожалению, все эти подходы основаны на различных начальных предположениях и результаты их могут существенно различаться, хотя вполне возможно, что это является лишь временными трудностями. Вот что говорит о современной картине развития Метагалактики видный современный космолог Александр Виленкин из Института космологии Университета Тафтса (США, штат Массачусетс):

«...Существует множество причин, позволяющих уверовать в бесконечность Вселенной.

А раз так, значит, она состоит из бесконечного количества регионов, соизмеримых по масштабу с тем, который доступен для нашего наблюдения (80 млрд световых лет в поперечнике). Исходя из положений квантовой механики, можно сделать вывод, что число историй, которые могут произойти за конечный отрезок времени (начиная с Большого взрыва), — конечно. Под историями я понимаю не только историю цивилизаций, а любые события, которые могут произойти, вплоть до атомного уровня. Возможных историй невероятно много (грубо их количество можно оценить как $(10^{10})^{50}$), но важно то, что мы имеем дело с конечным множеством.

Таким образом, есть бесконечное количество регионов, подобных нашему, и только конечное количество историй, которые могут в них произойти. Следовательно, каждая возможная история произойдет в бесконечном множестве регионов. В частности, будет бесконечное количество регионов, чьи истории идентичны нашим. Так что, если вы не удовлетворены результатами президентских выборов, не отчаивайтесь: ваш кандидат пришел к власти в бесчисленном количестве Земель.

Такая картинка Вселенной лишает нашу цивилизацию возможности претендовать на уникальность: таким, как мы, рассеянным по всему космосу, нет числа. Это, конечно, грустно, но, возможно, что все обстоит именно так».

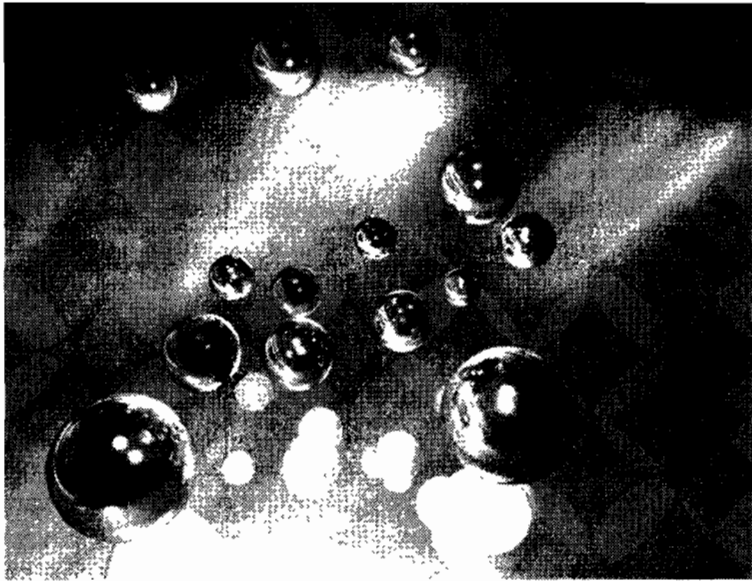


Рис. 73. Образ фридмона

Концепцию эволюции Вселенной в образе мегагиганской квазичастицы — фридмона — можно попытаться понять, представив внешнее протопространство со стрелой времени и демоном-наблюдателем с часами, не принадлежащими Вселенной. Таким образом, весь Мир формально можно разделить на две главные части, включающие демона-наблюдателя с его измерительными приборами и остальную Мультивселенную. Тогда волновые функции Мультивселенной будут определяться показаниями хронометра другого наблюдателя — демиурга, то есть собственным временем внешнего наблюдателя, отсчитываемым на хроноквантовой стреле. Эта зависимость от времени в некотором смысле объективна: результаты, полученные различными внутренними обитателями Мультимиров, живущими в одном и том же хроноквантовом состоянии Вселенной, будут абсолютно совпадать.

Вполне естественно, что могут существовать сценарии метастабильного равновесия, по которым радиус Вселенной стабилизируется вблизи некоторого значения, а также сценарии неограниченного расширения. Последние гипотетические построения наиболее проблематичны с точки зрения

современной физики, так как допускают неограниченное увеличение инфлатона с катастрофическим падением плотности псевдоевклидова пространства.

Общая теория относительности описывает искривленное пространство-время и является неотъемлемой частью любой современной теории происхождения Вселенной. Поэтому если общая теория относительности нуждается в пересмотре, то любая космологическая теория, основанная на ней, тоже нуждается в поправках.

Применение общей теории относительности, так же как и более ранней теории Эйнштейна, частной теории относительности, сопряжено с одной трудностью: в них понятие времени переосмыслено. В ньютоновской физике время рассматривается как переменная, независимая от пространства. Благодаря этому мы можем описать траекторию движения объекта в пространстве и времени: в данный момент времени объект находится в определенной точке пространства, а со временем его положение меняется. Но теория относительности Эйнштейна объединяет пространство и время в четырехмерный континуум, так что про объект уже нельзя сказать, что в определенный момент времени он занимает определенное положение в пространстве. Релятивистское описание объекта показывает его положение в пространстве и времени как единое целое, от начала и до конца существования объекта. Например, человек, с точки зрения теории относительности, представляет собой пространственно-временное единство, от зародыша во чреве матери до трупа (так называемый пространственно-временной червь). Этот «червь» не может сказать: «Сейчас я взрослый, а раньше был ребенком». Течения времени не существует. Вся жизнь человека представляет собой единое целое. Такой взгляд на человека обесценивает наше личное восприятие прошлого, настоящего и будущего, вынуждая нас поставить под сомнение саму реальность этого восприятия.

В своем письме к М. Бессо Эйнштейн писал: «Ты должен согласиться с тем, что субъективное время с его акцентом на настоящем не имеет объективного смысла». После смерти Бессо Эйнштейн выразил свое соболезнование его вдове сле-

дующим образом: «Майкл немного опередил меня, покинув этот странный мир. Однако это не имеет значения. Для нас, убежденных физиков, различие между прошлым, настоящим и будущим — хоть и навязчивая, но всего лишь иллюзия». По сути дела, эти представления отрицают сознание, которое подчеркивает реальность переживаемого момента. Наше нынешнее тело мы ощущаем как реальное, тогда как наше детское тело сохранилось только в памяти. Для нас нет никаких сомнений в том, что мы занимаем определенное место в пространстве в данный момент времени. Теория относительности превращает серии событий в единые пространственно-временные структуры, но мы ощущаем их как последовательность определенных этапов во времени. Следовательно, любая модель происхождения Вселенной, построенная на основе теории относительности, не способна объяснить наше восприятие времени, и потому все эти модели в их современном виде несовершенны и неприемлемы.

Изложенные космологические сценарии построения квантового Мультиуниверсума, несомненно, нуждаются в дальнейшем всестороннем развитии. Тем не менее даже краткий анализ хронодинамической дискретизации реального пространства-времени показывает, что существует определенная перспектива непротиворечивого построения новой космологической доктрины.

3.4. Темные стороны Метагалактики

«Космология наших дней начиналась с Эйнштейна, Фридмана и Хаббла. Их идеи и открытия не ушли в прошлое, они до сих пор остаются предметом острых дискуссий. При этом неожиданно оказывается, что простые и, казалось бы, давно решенные вопросы требуют чуть ли не полного пересмотра и коренного переосмысления. Действительно, что на самом деле предсказал Фридман? И что открыл Хаббл?»

А. Д. Чернин. «Темная энергия вблизи нас»

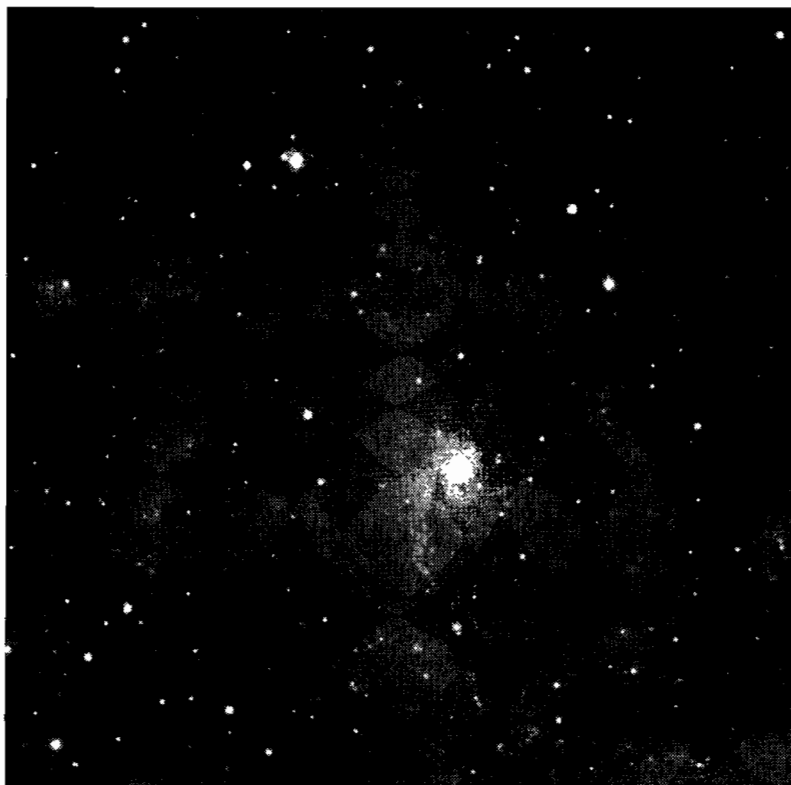


Рис. 74. Вращение галактики (см. вклейку)

Астрономы давно заметили странную закономерность вращения галактик. Получается, что если бы все вещество спиральной галактики было сконцентрировано в ее рукавах, где мы наблюдаем видимые звезды, то и атомы распыленного водорода, подчиняясь третьему закону Кеплера, двигались бы все медленнее по мере удаления от центра галактической массы. Однако наблюдения показывают, что на любом удалении от центра галактики водород движется с неизменной скоростью. Можно подумать, будто он «приклеен» к гигантской вращающейся сфере, состоящей из некоей невидимой «темной» материи.

В семидесятые годы прошлого века американский астроном Вера Рубин, научный сотрудник Института Карнеги

в Вашингтоне, изучала динамику галактик, характеризующихся высокой скоростью вращения вокруг их центра, — прежде всего — поведение вещества на их периферии. По всем параметрам на периферию быстро вращающихся галактик должны были — по принципу центрифуги — выбрасываться значительные массы самого легкого межзвездного газа, а именно — водорода, атомы которого теоретически должны были бы окутывать галактику паутиной микроскопических спутников. Рассмотрим в качестве примера нашу Солнечную систему. Ее основная масса сосредоточена в центре (на Солнце); чем дальше планета удалена от центра, тем дольше период ее обращения вокруг него. Юпитеру, например, требуется одиннадцать земных лет, чтобы совершить полный годичный оборот вокруг Солнца, поскольку он находится на значительно более удаленной от Солнца орбите и за один годичный цикл проделывает не только более долгий путь, но и движется по нему медленнее — по законам Кеплера.

Массивные частицы слабого взаимодействия представляют собой пример того, что принято называть холодной темной материей, поскольку они тяжелые и медленные. Предполагается, что они играли важную роль на стадии формирования галактик в ранней Вселенной. Некоторые ученые считают также, что, по крайней мере, часть темной материи пребывает в состоянии быстрых слабовзаимодействующих частиц, таких как нейтрино, представляющих собой пример горячей темной материи.

Данный феномен получил объяснение в рамках гипотезы о темной материи, незримо присутствующей не только в пределах галактик, но и во всей Вселенной, включая межгалактическое пространство. Природа и структура темной материи остаются малопонятными: так, ее часть может оказаться обычными небесными телами, не испускающими собственного излучения, например массивными планетами типа Юпитера. Их существование подтверждается результатами наблюдения за светимостью звезд ближайших галактик,

где иногда отмечаются «провалы», которые можно отнести на счет их частичного затмения при прохождении крупных планет на пути лучей по дороге к нам. Практически можно считать подтвержденным и существование межзвездных затмевающих тел, не обладающих собственной энергией излучения в наблюдаемом диапазоне, — они получили название «массивных компактных гало-объектов».

Если в начале процесса БВ обычная материя была перемешана со скрытыми частицами слабого взаимодействия, то после взрыва такая смесь темной материи могла послужить эффективным сдерживающим элементом. По причине наличия огромного числа скрытых тяжелых частиц она первой стянулась под воздействием сил гравитационного притяжения в будущие ядра галактик, оказавшиеся стабильными по причине отсутствия взаимодействия между частицами слабого взаимодействия и мощным центростремительным энергетическим излучением взрыва. Таким образом, к моменту формирования ядер атомов темная материя успела оформиться в галактики и скопления галактик, а уже на них начали собираться под воздействием гравитационного поля высвобождающиеся элементы обычной материи. В рамках такой модели обычная материя стянулась к сгусткам скрытых частиц подобно пене, затагиваемой в водовороты на темной поверхности странной вселенской реки.

Сегодня большинство астрофизиков сходится на том, что масса невидимой материи Вселенной далеко не ограничивается скрытой от нас массой обычных небесных тел и расплывленного вещества, а склонны добавлять к ней и совокупную массу все еще не открытых видов элементарных частиц. Они даже получили специальное название — «массивные частицы слабого взаимодействия». Теоретически они не должны проявлять себя во взаимодействии со световым и прочими электромагнитными излучениями, а наша Галактика может быть со всех сторон облачена сферической оболочкой из таких частиц. Земля в силу своего движения должна постоян-

но находиться под воздействием «ветра скрытых частиц», и вполне возможно, что с течением времени одна из частиц такого «темного ветра» вступит во взаимодействие с одним из земных атомов и возбудит колебания, необходимые для ее регистрации. Лаборатории, проводящие подобные эксперименты, уже сообщают о том, что получены первые намеки на подтверждение реального существования шестимесячного полупериода колебания частоты регистрации сигналов об аномальных событиях подобного ряда. Именно этого и следовало ожидать, поскольку полгода Земля движется по околосолнечной орбите навстречу «ветру скрытых частиц», а в следующие полгода ветер дует «вдогонку» и частицы залетают на Землю реже.

Главная проблема тут в том, что до формирования атомов, то есть на протяжении примерно первых 300 000 лет после БВ, Вселенная пребывала в протоплазменном состоянии. Любое ядро привычной нам материи распадалось, не успев сформироваться, под мощнейшими энергиями бомбардировки со стороны перегретых частиц раскаленной, сверхплотной, непрозрачной плазмы. После того как Вселенная расширилась до некоторой степени прозрачности разделяющего вещество пространства, начали, наконец, формироваться легкие атомные ядра. Но к этому моменту Вселенная расширилась уже настолько, что силы гравитационного притяжения не могли противодействовать кинетической энергии разлета осколков Большого Взрыва, и все вещество, по идее, должно было бы разлететься, не дав сформироваться устойчивым галактикам, которые мы наблюдаем. В этом и состоит так называемый «галактический парадокс», ставивший под сомнение саму теорию БВ.

Сам вопрос существования темной материи до последнего времени вызывал ожесточенные споры среди ученых. Одни говорили, что это призрачный миф, другие, напротив, считали ее существование закономерным. Необходимы были доказательные наблюдения этой невидимой субстанции,

и одна из первых попыток была сделана при помощи рентгеновской космической обсерватории «Чандра» при исследовании гравитационного взаимодействия скоплений галактик. Эти грандиозные космические структуры образовались около 100 миллионов лет назад после того, как скопления галактик стали пронизывать друг друга со скоростью около 5000 километров в секунду, чтобы, в конце концов, локализоваться в нынешнем виде. При проникновении таких больших масс друг в друга неизбежны гравитационные флуктуации, изменяющие направление и скорость движения отдельных членов скопления и газовых облаков.

Но какие частицы составляют темную материю, пока неизвестно. Можно лишь утверждать, что это не обычные частицы, из которых состоят окружающие нас предметы, а также планеты, звезды (и мы сами) то есть это не протоны, не нейтроны и не электроны. Фундаментальная физика может предложить на роль частиц темной материи только гипотетические частицы, которые никогда еще не наблюдались в лаборатории. Они должны быть, скорее всего, массивными — в 100–1000 раз массивнее протона. Они не должны обладать электрическим зарядом и вообще участвовать в электромагнитном взаимодействии. Они не должны также участвовать и в сильном ядерном взаимодействии, им разрешено только слабое ядерное взаимодействие (ответственное, например, за бета-распад атомных ядер) и, конечно, гравитационное. На обычное вещество из протонов, нейтронов и электронов приходится 4 процента полной энергии/массы Вселенной, а вклад реликтового излучения меньше одного процента.

Еще более странной субстанцией, чем темная материя, является *темная энергия*. В отличие от сгустков массивных частиц слабого взаимодействия темная энергия равномерно «разлита» по всей нашей Вселенной. В галактиках и скоплениях галактик ее столько же, сколько в пустых провалах физического вакуума.

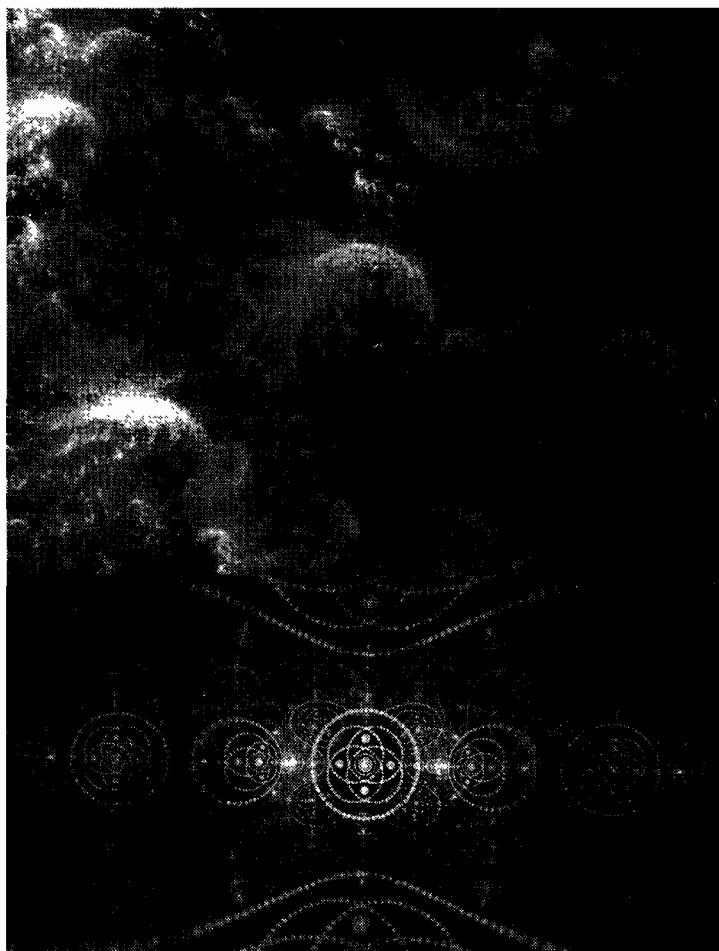


Рис. 75. Макеты физического вакуума на разных уровнях глубины (см. вклейку)

Самое необычное то, что темная энергия в определенном смысле связана с антигравитацией. Современными астрономическими методами можно не только измерить нынешний темп расширения Вселенной, но и определить, как он изменялся со временем. Так вот, астрономические наблюдения свидетельствуют о том, что, начиная с недалекого прошлого, Вселенная начала расширяться с возрастающим ускорением, как если бы включился некий гипотетический генератор

антигравитации. Обычная гравитация с течением времени должна была бы приводить к обратному эффекту замедления разбегания галактик.

Такая картина, вообще говоря, не противоречит общей теории относительности, однако для этого темная энергия должна обладать специальным свойством — отрицательным давлением. Это резко отличает ее от обычных форм материи и делает ее природу главной проблемой современной фундаментальной физики.

В настоящее время главным кандидатом на роль темной энергии является физический вакуум с его виртуальными частицами и полями. Плотность энергии вакуума не изменяется при расширении Вселенной, а это и означает отрицательное давление вакуума. Другой кандидат — новое сверхслабое поле, пронизывающее всю Вселенную, для него употребляют термин «квинтэссенция». Есть и другие кандидаты, но, в любом случае, темная энергия представляет собой что-то совершенно необычное.

Правда, существуют и иные объяснения ускоренного расширения нашего Мира, исходящие из предположения, что сами законы гравитации видоизменяются на космологических расстояниях и в космологических временах. Такие гипотезы ведут к далеко лежащим выводам об определенной ограниченности самой общей теории относительности. Повидимому, если ее обобщение вообще возможно, то оно будет связано с представлением о существовании дополнительных размерностей пространства, помимо тех трех измерений, которые мы воспринимаем в повседневном опыте.

К сожалению, сейчас не видно путей прямого экспериментального исследования темной энергии в земных условиях. Это, конечно, не означает, что в будущем не могут появиться новые блестящие идеи в этом направлении, но сегодня надежды на прояснение природы темной энергии (или, более широко, причины ускоренного расширения Вселенной) связаны исключительно с астрономическими наблюдениями и с получением новых, более точных космологических данных.

Прежде считалось, что разбегание галактик может только замедляться под действием их собственного тяготения. Но ускорение означает, что в природе имеется не только всемирное тяготение, но и всемирное антитяготение, которое преобладает над тяготением в наблюдаемой Вселенной. Антитяготение создается не галактиками (с их обычным светящимся барионным веществом и темной материей), а некоей особой космической энергией, в которую погружены все галактики мира. Это темная энергия, как ее сейчас чаще всего называют, и создает антитяготение. Темная энергия темна, по крайней мере, в двух смыслах. Во-первых, она невидима — не излучает света, не поглощает и не отражает его. Во-вторых, ее физическая природа и микроскопическая структура полностью неизвестны.

И тем не менее с темной энергией вполне можно работать, изучать ее роль в реальном мире. Для этого, правда, нужно принять те или иные исходные предположения, хотя бы минимальные, о ее свойствах. Простейший (и, как кажется, самый правдоподобный) из обсуждающихся сейчас вариантов связывает темную энергию с космологической постоянной. Эта универсальная константа была введена в космологию Эйнштейном в 1917 году, когда он применил только что созданную им общую теорию относительности к изучению мира, рассматриваемого как некое единое целое. Эйнштейн решил эту задачу и представил результат в виде физико-математической модели Вселенной. Модель описывала Вселенную в виде статической, вечной и неизменной, как целое физической системы. Во Вселенной Эйнштейна притяжение всех тел природы друг к другу... отсутствовало. Ньютоновское всемирное тяготение при этом, однако, не отменялось, но, помимо него, в эйнштейновской модели действовал еще один силовой фактор — всемирное антитяготение, которое полностью компенсировало взаимное тяготение космических тел в масштабе всей Вселенной.

Ничего подобного прежняя, доэйнштейновская, физика не знала. Но антитяготение не вытекало в действительности и из общей теории относительности. Это была совершенно

новая идея. Тем не менее она органично и в исключительно экономной форме была введена в структуру общей теории относительности, в ее математические уравнения. Антитяготение было представлено в этих уравнениях всего одной и притом постоянной физической величиной, которая и получила позднее название космологической константы. Она обеспечивала в модели Эйнштейна компенсацию всемирного тяготения — без нее теория не допускала бы статичности мира.

В начале двадцатых годов прошлого века Фридман доказал, что уравнения общей теории относительности — даже при наличии в них космологической константы — допускают не только статические модели, но и модели с эволюцией, в которых Вселенная, как целое, могла расширяться или сжиматься. Фридман явно предпочитал модель расширяющейся Вселенной. Если эйнштейновская константа положительна по величине, то теория Фридмана (в ней эта константа с самого начала предсудитительно учитывалась) может описывать не только космологическое расширение с замедлением, но и космологическое расширение с ускорением. Основанная на таком подходе глобальная космологическая модель очень хорошо согласуется с наблюдаемым сейчас феноменом ускоряющегося космологического расширения.

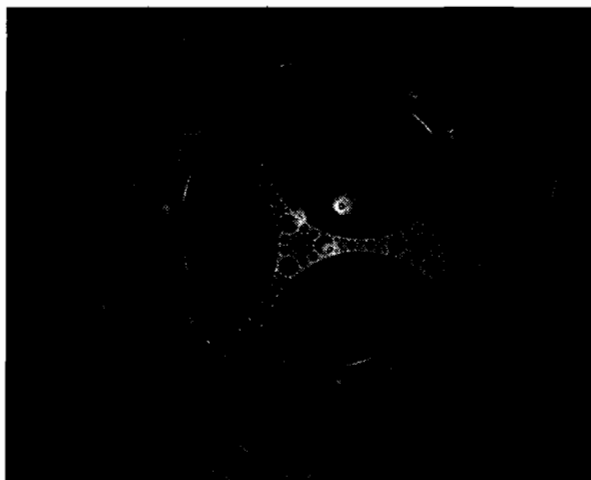


Рис. 76. Темная энергия антигравитации

Давление вакуума, «раздувающего» Вселенную не только отрицательно, к тому же равно — по абсолютной величине — его плотности энергии. Ничего подобного нет ни в одной другой среде. Это абсолютное и исключительное свойство одного вакуума и только его.

Большинство современных космологов однозначно связывает физический смысл космологической константы с параметрами вакуума, считая, что открытая астрономами темная энергия и есть энергия вакуума. Похоже, что астрономические данные постепенно начинают подтверждать эту несколько необычную гипотезу теоретиков. Разумеется, отрицательное давление вакуума, со всех точек зрения, является совершенно необычным явлением, ведь давление в жидкости или газе, как правило, положительно. Но и в жидкости (например, в потоках воды у винта парохода), и в твердых телах (например, во всесторонне растянутой стальной болванке) отрицательное давление тоже может возникать. Это требует особых, специальных условий, но само по себе не является чем-то исключительным. О вакууме в физике говорят со времен возникновения квантовой механики. Из этой науки вытекало, в частности, что у всех полей и частиц природы имеется состояние минимальной энергии, которое и называется «вакуумом». Вакуум — не пустота, и минимальная энергия полей и частиц, вообще говоря, не равна нулю. Физический вакуум обладает определенной энергией, и эта энергия действительно может характеризоваться (на макроскопическом уровне описания) значениями плотности и давления.

Темную энергию открыли в наблюдениях далеких вспышек сверхновых звезд. Из-за их исключительной яркости сверхновые можно наблюдать на очень больших, по-настоящему космологических расстояниях. Опуская другие детали, скажем, что использовались данные о сверхновых определенного типа, которые принято считать «стандартными свечами»; их собственная светимость в максимуме блеска действительно лежит в довольно узких пределах (эксперты по сверхновым продолжают между тем спорить, в каких именно). Это позволяет проследить, как видимая, регистрируемая

яркость источников зависит от расстояния до них. Конечно, на небольших расстояниях это классический закон обратных квадратов; но на очень большом удалении источников становятся существенными космологические эффекты, и, значит, характер этой зависимости позволяет, в принципе, узнать нечто новое обо всей Вселенной.

Оказалось, что убывание яркости происходит несколько быстрее, в среднем, чем этого следовало бы ожидать по космологической теории, которая до того считалась стандартной. Но это возможно тогда (и, как все сейчас думают, только тогда), когда космологическое расширение происходит с ускорением, то есть когда скорость удаления от нас источника света не убывает, а возрастает со временем. Именно благодаря этому эффекту ускорения и удалось распознать темную энергию и даже весьма точно измерить ее плотность.

Оказалось, что плотность вакуума заметно больше плотности других видов космического вещества и энергии. Темная энергия составляет приблизительно 70 процентов от полной энергии (или массы) Вселенной. Второй по величине вклад в энергию/массу Вселенной вносит темное вещество, или темная материя, — на нее приходится 25 процентов. Темную материю не нужно путать с темной энергией. Это совершенно разные вещи, и определенно известно, что темная материя состоит из нерелятивистских частиц, то есть частиц, движущихся со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света.

Почему вакуум создает не тяготение, а антитяготение? Все дело в том, что физический вакуум обладает не только определенной плотностью, но также и давлением. Уравнение состояния вакуума таково, что если его плотность положительна, то его давление отрицательно. Причем по абсолютной величине плотность и давление равны. Согласно общей теории относительности тяготение создается не только плотностью среды, но и ее давлением. Так что эффективная плотность, создающая тяготение, складывается как бы из двух слагаемых. Отсюда и антитяготение вакуума: отрицательная эффективная плотность создает эффект антигравитации.

Если поместить в вакуум две частицы, то он заставит их двигаться прочь друг от друга. В отличие от всемирного тяготения всемирное антитяготение стремится не сблизить тела, а, напротив, удалить их друг от друга.

Так как, по наблюдательным данным о сверхновых, плотность вакуума превышает суммарную плотность всех остальных видов космической энергии, в наблюдаемой Вселенной антитяготение сильнее тяготения, и космологическое расширение обязано происходить с ускорением. Раз наблюдаемое расширение Вселенной происходит с ускорением, оно будет продолжаться неограниченно долго — ничто уже не способно этому помешать. При этом средняя плотность невакуумных компонентов — вещества и излучения — будет при расширении только убывать. Но это означает, что создаваемое ими тяготение никогда уже не будет преобладать во Вселенной. Доминирование вакуума будет только усиливаться, а разбегание галактик будет происходить все быстрее и быстрее.

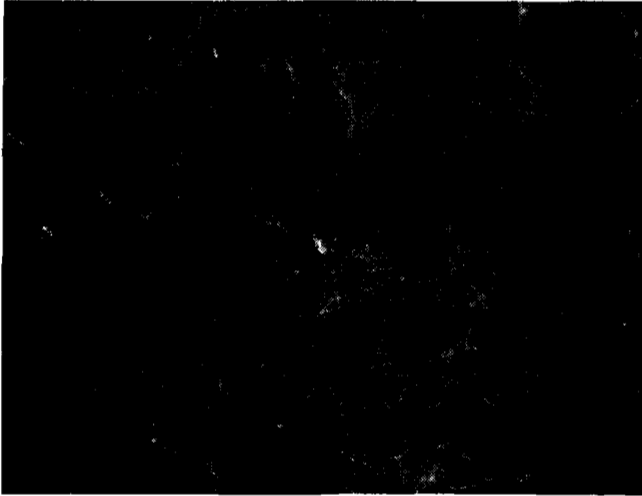


Рис. 77. Далекое прошлое Вселенной — ранняя эпоха расширения

Обратимся от будущего Вселенной к ее прошлому. Если смотреть назад по времени, то мы увидим, что плотность вещества в прошлом была больше, чем сейчас. В раннюю эпоху расширения она превосходила плотность вакуума. Был

и такой момент в истории Вселенной, когда плотность вещества равнялась эффективной плотности вакуума. В этот миг тяготение вещества точно компенсировалось антитяготением вакуума: это был момент нулевого ускорения в динамической истории мира. Зная красное смещение, можно — с помощью теории Фридмана — оценить возраст мира в тот момент, когда был испущен принимаемый сейчас свет. Красному смещению около единицы отвечает возраст мира в 7–8 млрд лет. Так как современный возраст мира составляет 14–15 млрд лет, можно сказать, что в первую половину истории Вселенной космологическое расширение замедлялось под действием тяготения, а во вторую оно ускорялось под действием антитяготения. Наблюдая сверхновые, какими они были 7–8 млрд лет назад, астрономы проникают вглубь Вселенной на расстояния 7–8 млрд световых лет. Самые большие расстояния, принципиально доступные наблюдению, соответствуют горизонту мира — до него 14–15 млрд световых лет: это путь, который может пройти свет за все время существования Вселенной. Так что темная энергия обнаружила себя на полпути к горизонту мира.

Так что же происходит с пространством-временем мира, когда в нем доминирует вакуум? Если пренебречь влиянием всего невакуумного вещества, то только вакуум и будет определять тогда свойства пространства-времени. Поскольку плотность и давление вакуума не меняются со временем, то с вакуумом вообще ничего не происходит он всюду и всегда один и тот же. Но раз неизменный вакуум и только он определяет свойства пространства-времени, то и само пространство-время всюду и всегда должно быть тогда одним и тем же. Это означает, что мир, в котором безраздельно господствует вакуум, должен быть неизменным во времени, статичным. В полном соответствии с этим рассуждением космологическая теория Фридмана (а в ней с самого начала учитывалась возможность существования вакуума, представляемого космологической константой) описывает мир вакуума как мир статичный и неизменный. Но каким образом происходит это превращение мира подвижного и расширяющегося в мир не-

подвижный? Как из мира исчезает эволюция? Ведь разбегание галактик в нем продолжается...

Да, галактики удаляются друг от друга в мире вакуума и притом со все возрастающими скоростями. Из теории Фридмана вытекает, что их скорости возрастают в этом случае по экспоненциальному закону. Но чем быстрее разбегаются галактики, тем меньше плотность их общего распределения, и, значит, тем слабее их влияние — через их собственное тяготение — на свойства пространства-времени. А влияние вакуума — через его антитяготение — становится тем временем все более и более сильным. В итоге галактики, да и вообще все невакуумное вещество, оказываются в мире, свойства которого, как целого определяются не ими, а вакуумом. Так эволюция мира в целом затухает, его пространственно-временной каркас застывает и остается таким навсегда.

Можно сказать, что, чем сильнее разгоняется космологическое расширение под воздействием антигравитации вакуума, тем ближе становится наш Мир, как целое, к абсолютной неизменности и полному покою. В таком мире все события неразличимы, а это означает, что в нем нигде ничего не происходит и потому этот мир вечен и неизменен как целое. Такой мир напоминает статический мир модели Эйнштейна. Но в модели Эйнштейна покой достигался равновесием тяготения вещества и антитяготения вакуума. В мире вакуума такого равновесия нет, ведь антигравитация вакуума ничем не уравновешена и тем не менее этот мир тоже находится в покое. Оказывается, что покой не обязательно предполагает равновесие сил — если речь идет о вакууме, это необязательно. Будучи сам неизменным, он делает и мир неизменным — в отсутствие других сил.

Хотя темная энергия была открыта на очень больших, глобальных расстояниях, она в действительности должна присутствовать везде в мире и притом ее плотность должна быть всюду одинакова и не меняться со временем. Наверное, темная энергия присутствует и в ближней Вселенной, равномерно заполняя ее пространство. Однако никаких непосредственных экспериментальных указаний на это до сих пор не

обнаруживалось. Но если принять интерпретацию темной энергии в духе природы физического вакуума, такое допущение выглядит вполне естественно. Если это так, то близкие галактики, которые наблюдал в свое время Хаббл, движутся не в пустоте, а на однородном фоне космического вакуума. Вакуум с его темной энергией создает здесь — как и в глобальных масштабах — антитяготение, а оно стремится заставить галактики двигаться друг от друга и притом с ускорением.

Далее нужно понять, какие еще силы, кроме антитяготения вакуума, действуют на ближние галактики. Особенно интересны для нас самые близкие расстояния — те, где располагаются две гигантские галактики — наша галактика Млечный Путь и галактика Андромеды. Они образуют связанную пару и движутся навстречу друг другу. Вместе с сотней мелких галактик-карликов эти две галактики образуют Местную группу галактик, причем вклад карликов в ее полную массу пренебрежимо мал по сравнению с массой двух гигантов. Вокруг Местной группы наблюдаются десятки галактик-карликов, движущихся в разные стороны от центра. Эти мелкие галактики практически не взаимодействуют между собой, к тому же их полная масса ничтожно мала по сравнению с массой Местной группы, так что карлики локального потока вполне можно рассматривать как пробные тела, которые движутся в поле тяготения Местной группы и поле антитяготения темной энергии.

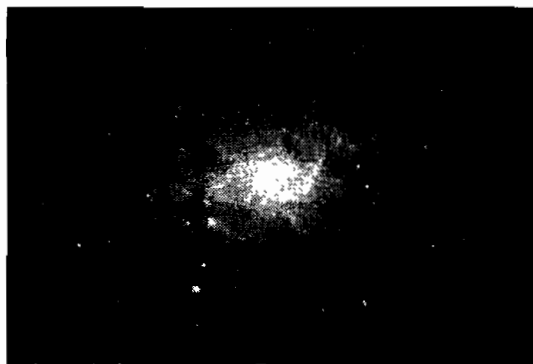


Рис. 78. Ближний объем Метагалактики — фрагмент Местной группы галактик

Из всех этих данных и соображений вытекает простая картина ближнего объема Вселенной. Главные черты ее таковы: имеется центральная масса Местной группы и разбегающиеся от нее ближайшие галактики, а все это погружено в однородную темную энергию космического вакуума. Это сравнение лучше всего иллюстрирует основное различие между глобальной космологией и нашей теорией ближней Вселенной. Центральный пункт состоит в том, что теория Фридмана — это теория эволюционирующего, изменяющегося во времени мира. А локальная космология имеет дело со статическим полем тяготения/антитяготения, которое не меняется со временем и всегда одно и то же. Если говорить не на ньютоновском языке сил, а на языке общей теории относительности, то нужно сказать, что глобальное пространство-время нестатично, а пространство-время ближней Вселенной статично. Заметим, что статичность локального пространства-времени — принципиальный факт общей теории относительности, а не просто результат того, что в малых масштабах применима ньютоновская физика абсолютного пространства и абсолютного времени. На достаточно больших расстояниях от Местной группы ее тяготением можно полностью пренебречь по сравнению с антитяготением темной энергии вакуума. На таких расстояниях галактики движутся на идеально регулярном фоне вакуума, который их разгоняет (вернее, подгоняет). Так глобальное расширение всей Вселенной и локальное разбегание галактик в ближнем объеме оказываются динамически сходными и связанными — благодаря темной энергии вакуума.

Итак, что же предсказал Фридман и что открыл Хаббл? Как мы теперь понимаем, теория Фридмана предсказала глобальный феномен расширения Вселенной как целого. Она была подтверждена не наблюдениями Хаббла 1929 года, а наблюдениями Сэндиджа и его коллег в конце 1950-х — начале 1960-х годов. Открытие Хаббла долго оставалось в действительности загадкой и ждало своего объяснения 70 лет; его настоящий физический смысл удалось понять

и оценить лишь сейчас благодаря обнаружению темной энергии, которая, как оказалось, управляет и наблюдаемым глобальным расширением мира, и разбеганием галактик со всем близко от нас.

И все же заканчивая настоящую главу о самых грандиозных процессах и явлениях в нашей Вселенной, которые может представить человеческое воображение, вспомним слова известного английского астронома, координатора программ Ассоциации наблюдателей Луны и планет Дэвида Дарлинга:

«Не позволяйте толкователям космологии одурачить вас. У них тоже нет ответов на вопросы — хотя они хорошенько поработали над тем, чтобы убедить всех, и себя в том числе, в том, что им все ясно... На самом же деле объяснение того, как и откуда все началось, — до сих пор серьезная проблема. Не помогает даже обращение к квантовой механике. Либо не существовало ничего, с чего все могло бы начаться, — ни квантового вакуума, ни прегеометрической пыли, ни времени, в котором могло происходить что-либо, ни каких бы то ни было физических законов, в соответствии с которыми ничто могло превратиться в нечто. Либо же существовало нечто, и в этом случае оно требует объяснения».

3.5. Квантовые провалы пространства-времени

«Свойства черных дыр столь фантастичны, что в существование этих экзотических объектов в реальном мире верится с трудом, и об этом уже несколько десятилетий идут споры. Даже сам Эйнштейн сомневался в возможности их существования».

А. М. Черепашук. «Демография черных дыр»



Рис. 79. Провал пространства-времени (см. вклейку)

«Основы нашего понимания пространства-времени проверяются черными дырами. Эти объекты, появляющиеся как естественное следствие уравнений общей теории относительности, — мощное аналитическое средство исследования микроскопических и крупномасштабных свойств Вселенной».

Жан-Пьер Люмине. «Черные дыры: Популярное введение»

Трудно найти в нашем Мире образованного человека, который бы не слышал о *черных дырах*. При этом не менее трудно отыскать того, кто мог бы правильно и внятно рассказать об этих таинственных объектах Вселенной. Разумеется, для астрофизиков черные дыры уже давно являются привычными объектами исследования и астрономы могут предложить вам обширный выбор небесных кандидатов на это звание. Среди них можно встретить и карликовые экземпляры массой порядка солнечной, которые образовались в результате гравитационного сжатия звезд, и сверхмассивные объекты в сотни солнечных масс, которые родились в результате сжатия целых звездных скоплений в центрах галактик.

Однако нас будет интересовать совершенно особое семейство квантовых микроскопических черных дыр, которые настойчиво предсказывают физики-теоретики. Эти, если вдуматься, совершенно фантастические микроскопические объекты, которые трудно и назвать материальными частицами в обычном смысле, уже давно ищут астрофизики в потоках космических лучей, омывающих нашу планету. Значение факта существования черных дыр для науки трудно переоценить, их «космологический» смысл наличия во Вселенной выходит далеко за рамки астрономии и физики элементарных частиц. При изучении этих таинственнейших небесных тел исследователи надеются глубоко продвинуться в понимании фундаментальных вопросов о сущности пространства и времени, структуры окружающей физической реальности, и, наконец, множественности нашего Мира в иных измерениях.

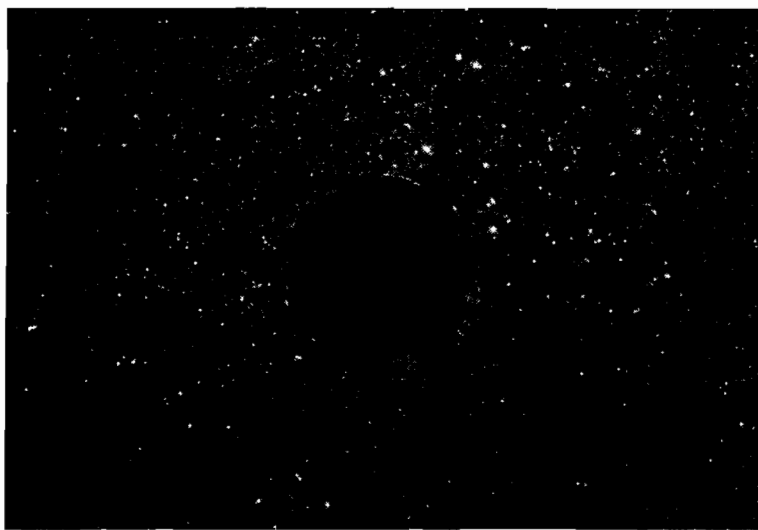


Рис. 80. Застывшая звезда коллапсара

Астрофизики считают, что черные дыры чаще всего могут образовываться в результате коллапса *нейтронных звезд*, когда при сжатии их гравитационное поле уплотняется все сильнее и сильнее. Наконец, звезда сжимается до такой степени, что свет уже не может преодолеть ее притяжения. Радиус, до ко-

того должна сжаться звезда, чтобы превратиться в черную дыру, называется «гравитационным радиусом». Для массивных звезд он составляет несколько десятков километров. Есть ли реальные подтверждения существования черных дыр? Пока еще астрономы осторожно говорят о «кандидатах в застывшие звезды». Под черными дырами понимают столь массивные и компактные сгустки вещества, что для преодоления их притяжения скорости света уже не хватает. Поэтому коллапсары и не могут светить ни своим, ни отраженным светом.

Сам по себе термин «*черная дыра*» появился в конце 60-х годов прошлого века. Его появление связывают с научно-популярными статьями того самого физика Дж. Уилера, аспирантом которого был в свое время Эверетт. Термин прижился, хотя против него одно время яростно возражали французы, поскольку в их языке этот термин имеет не совсем приличный оттенок, вытеснив ранее использовавшиеся выражения «*темные звезды*», «*замерзшие звезды*», «*коллапсары*» и «*застывшие звезды*».

Черные дыры ряд ученых предсказали еще несколько столетий назад, сразу же после опубликования теории мирового тяготения Ньютоном. Наиболее развернутую картину этих удивительных небесных тел, назвав их темными звездами, дал выдающийся французский физик, астроном и математик Пьер Лаплас. Идея Лапласа была проста, как и строение «темных звезд», — это должны были быть обыкновенные звезды, необязательно даже остывшие, плотность которых настолько велика, что свет «не имеет сил» вырваться с их поверхности. Надо сказать, что эти странные звезды Лапласа, как их иногда называли, совершенно не заинтересовали широкие научные круги естествоиспытателей, посчитавших их «теоретическим капризом» великого ученого.

К звездам Лапласа вернулись только в начале прошлого века. Коллега Эйнштейна по Берлинской академии наук Карл Шварцшильд стал исследовать некоторые уравнения только что созданной теории относительности. Вскоре Шварцшильд получил интересный математический резуль-

тат, доказывающий, что экзотические темные звезды вполне могут оказаться реальными небесными телами. Исследовав движение частицы в гравитационном поле массивного тела, он пришел к выводу: уравнение теряет физический смысл и его решение обращается в бесконечность в особых *сингулярных* точках. Шварцшильд также вычислил радиус сферической поверхности, с которой скорость убегания равна скорости света, который называют «шварцшильдовским радиусом», а соответствующую поверхность — «горизонтом событий», или «шварцшильдовской поверхностью».

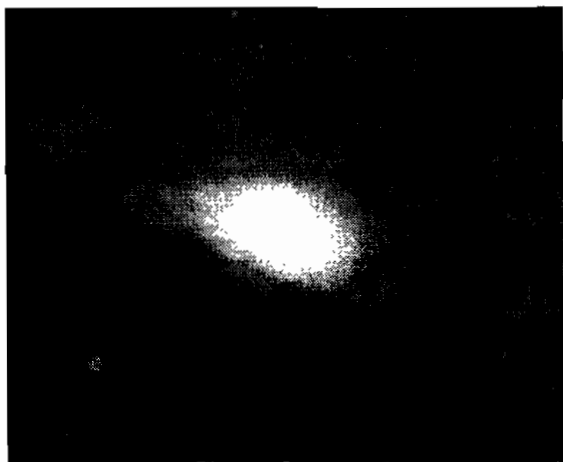


Рис. 81. Черная дыра — не вещество и не излучение

Физики-теоретики описывают коллапсары как самоподдерживающиеся гравитационные поля, сконцентрированные в сильно искривленных областях пространства-времени. Нелегко рассчитать, что Солнце превратится в черную дыру, если сожмется до радиуса примерно в три километра. Плотность его вещества при этом достигнет совершенно невообразимой величины. Радиус Земли, сжатой до состояния черной дыры, уменьшился бы примерно до одного сантиметра.

Дальнейшие теоретические исследования темных звезд показали, что если масса звезды превышает три массы Солнца, то уже ничто не сможет остановить ее катастрофического сжатия под силой собственной массы, когда она выработает

свое ядерное топливо. Но это относится к судьбе звезд, которые имеют массу не более трех солнечных. А что случится со звездой более тяжелой?



Рис. 82. Черная дыра в двойной системе (см. вклейку)

Окончательный ответ был найден во второй половине прошлого века усилиями целой плеяды физиков-теоретиков. Оказалось, что подобный коллапс всегда сжимает звезду, полностью разрушая ее вещество. В результате возникает сингулярность гравитационного поля, замкнутая в бесконечность. Расчеты показывают, что в природе нет силы, которая могла бы противостоять такому катастрофическому сжатию вещества. В этом случае все вещество небесного тела сомкнется в одной точке с радиусом Шварцшильда меньше трех метров.

С другой стороны, если предположить, что микросостояния черной дыры подчиняются законам квантовой механики, то может происходить спонтанное рождение частиц из вакуума. Вспомним удивительные процессы, происходящие с морем виртуальных частиц в кипящем вакууме. При отсутствии внешних полей пара частица-античастица, рожденная вблизи гравитационной поверхности Шварцшильда, аннигилирует обратно в вакуумное состояние не полностью. Ведь если одна из частиц притянется черной

дырой и уйдет за горизонт событий, то, по закону сохранения энергии-импульса, другая частица должна будет улечь прочь от внешней границы черной дыры, унося с собой часть энергии-массы коллапсара.

В конечном итоге, удаленный наблюдатель обнаружит поток всевозможных частиц, излучаемых черной дырой, которая будет расходовать свою массу на рождение пар, пока полностью не испарится, превратившись в поток излучения. Квантовые законы также не позволяют считать центральную сингулярность математической точкой. В квантовом контексте ее поперечник задается особым, невообразимо малым (но не точечным!) параметром — длиной Планка — Уилера, приблизительно равной 10^{-33} сантиметра. В этой области обычное пространство перестает существовать. Принято считать, что центр дыры буквально нафарширован разнообразными очень странными структурами, которые невозможно ни описать, ни представить (как вы представите себе такого сверх сверх сверхмикроскопического монстрика в оболочке, перетекающей из времени в пространство и обратно?!). Эти невероятные квантовые жители коллапсара появляются и погибают в соответствии с квантовыми вероятностными закономерностями. Свойства подобного пузырящегося пространства-времени еще очень мало изучены.

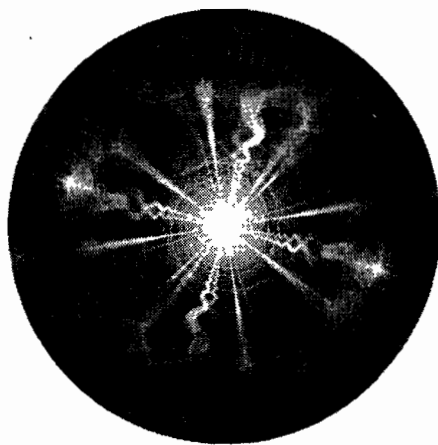


Рис. 83. Внутри квантового ядра коллапсара

Поскольку никакой носитель информации не способен выйти из-под горизонта событий, внутренняя часть черной дыры причинно не связана с остальной Вселенной, происходящие внутри черной дыры физические процессы не могут влиять на процессы вне ее. В то же время вещество и излучение, падающие снаружи на черную дыру, свободно проникают внутрь через горизонт. Можно сказать, что черная дыра все поглощает и ничего не выпускает.

По-видимому, именно такие черные дыры находятся в центрах галактик. Во всяком случае астрономы сегодня насчитывают около сотни галактик, в центре которых, судя по косвенным признакам, имеются черные дыры массой порядка миллиарда солнечной. В нашей Галактике тоже, видимо, есть своя черная дыра; ее массу удалось оценить довольно точно — в два с половиной миллиона масс Солнца.



Рис. 84. Квантовый микроколлапсар (см. вклейку)

Столкновение высокоэнергетичных частиц может создать квантовый микроколлапсар. Такая микроскопическая черная дыра может вращаться, вибрировать, иметь электрический заряд, излучая гравитационные и электромагнитные волны. Этот процесс патриарх квантовой космологии Джон Уилер называет «дыра теряет свои волосы», в котором остается

только заряд, спин и масса. Дальнейшее излучение уносит заряд, энергию вращения (спин), так что коллапсар замедляется и принимает сферическую форму. Испуская излучение и массивные частицы, дыра «испаряется», приближаясь к минимальной массе Планка. Исчезая из нашей реальности, квантовый микроколлапсар испускает поток «наифундаментальнейших» суперстрингов.

Теория предполагает, что наряду с такими сверхгигантами должны были возникать и черные мини-дыры массой порядка десятков миллионов тонн и радиусом порядка биллионных долей сантиметра, близких к размерам атомного ядра. Они могли появляться в первые мгновения существования Вселенной как проявление очень сильной неоднородности пространства-времени при колоссальной плотности энергии. Существует даже совершенно фантастический проект их массовой генерации при взаимодействии очень энергичных встречных пучков элементарных частиц на мощных ускорителях — коллайдерах. Условия, которые были тогда во Вселенной, исследователи сегодня реализуют на коллайдерах. Многочисленные эксперименты, проведенные международным коллективом ученых, уже позволили получить кварк-глюонную плазму — материю, существовавшую до возникновения элементарных частиц. Исследования этого состояния вещества интенсивно продолжаются, однако новые опыты вызывают и определенную тревогу: не возникнет ли при их проведении черная мини-дыра, которая искривит наше пространство и погубит Землю?

Именно подобные соображения и напугали околонуучную общественность в экспериментах на коллайдерах: черная мини-дыра, возникшая в ускорителе, начнет всасывать в себя Землю, причем процесс этот никакими силами остановить было бы нельзя. Это опасение вызвало столь сильный резонанс, что была создана авторитетная комиссия для проверки такой возможности. Комиссия, состоявшая из видных исследователей, дала заключение: энергия существующих ускорителей слишком мала, чтобы черная дыра могла возникнуть.

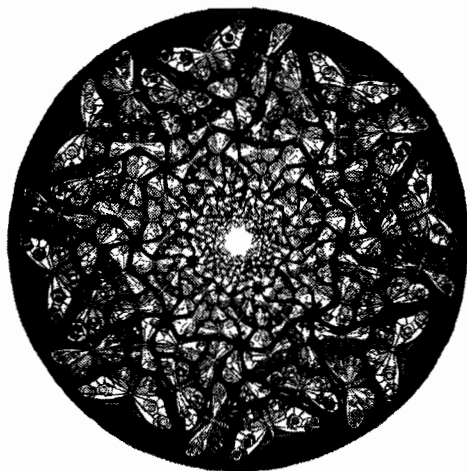


Рис. 85. М. Эшер «Бабочки» (см. вклейку)

Наиболее трудные понятия квантовой физики часто иллюстрируют парадоксальными рисунками и гравюрами М. Эшера. Вот так можно представить окрестности сферы Шварцшильда, покрытые пеной пространства-времени из виртуальных, не наблюдаемых в нашем мире частиц. Здесь квантовые флуктуации непрерывно порождают виртуальные пары частица-античастица. Именно подобные квантовые флуктуации определяют процессы излучения черных дыр. Если пара частиц возникает в окрестности сферы Шварцшильда, и затем под горизонт уйдет только одна частица, наблюдатель зарегистрирует другую, и ему будет казаться, что ее породила черная дыра.

Тем не менее физики-экспериментаторы на новых мощных коллайдерах сумели добиться впечатляющего успеха, вплотную приблизившись к созданию микроскопических черных дыр в лабораторных условиях. Микроколлапсар просуществовал крайне мало времени: миллиардную часть наносекунды и при этом его температура в триста миллионов раз превысила температуру поверхности Солнца. В ходе уникального эксперимента ученые столкнули друг с другом два ядра молекул золота, двигавшихся со субсветовой скоростью. Сила столкновения привела к тому, что ядра распались

на кварки и глюоны — мельчайшие частицы, из которых состоит материя. Частицы затем сформировали шар кварк-глюонной плазмы, которая стала поглощать частицы, образовавшиеся в результате столкновения ядер, тем самым образуя черную дыру.

И все-таки, хотя у большинства астрономов нет никаких сомнений в существовании черных дыр, категорически утверждать, что в данной точке пространства находится именно застывшая звезда коллапсара, никто не берется. Научная этика, добросовестность исследователя требуют получить на поставленный вопрос однозначный ответ, не терпящий разночтений. Мало оценить массу невидимого объекта, нужно измерить его радиус и показать, что он не превышает шварцшильдовского. А даже в пределах нашей Галактики эта задача пока не разрешима. Именно поэтому ученые проявляют известную сдержанность в сообщениях об их обнаружении, хотя серьезные научные журналы буквально переполнены теоретическими работами анализирующих физику этих загадочных объектов. Есть, правда, у черных дыр и еще одно свойство, предсказанное теоретически, которое, возможно, позволило бы увидеть их. Но, правда, при одном условии: масса черной дыры должна быть гораздо меньше массы Солнца.



Рис. 86. Коллапсар в центре нашей Галактики

Наблюдения орбит звезд, которые вращаются вокруг мощного радиоисточника Стрелец А в центре Млечного Пути, показывают, что там должен находиться объект в три миллиона шестьсот тысяч масс Солнца. Астрономы предполагают, что это и есть «черное дырявое сердце» нашей Галактики.

Долгое время черные дыры считались воплощением тьмы, объектами, которые в вакууме, в отсутствие поглощения материи, ничего не излучают. Однако в середине 70-х годов прошлого столетия известный английский теоретик Стивен Хокинг показал, что черным дырам можно приписать температуру и, следовательно, они должны излучать. Он открыл возможность очень медленного самопроизвольного квантового «испарения» черных дыр. Хокинг математически доказал, что любые черные дыры могут испускать вещество и излучение, однако заметно это будет лишь в том случае, если масса самой дыры относительно невелика. Мощное гравитационное поле вблизи черной дыры должно рождать пары частица-античастица. Одна из частиц каждой пары поглощается дырой, а вторая испускается наружу. Хокинг подсчитал скорости, с которыми идут все эти процессы, и пришел к выводу: вероятность поглощения частиц с отрицательной энергией выше. Это значит, что черная дыра теряет энергию и массу — испаряется. Кроме того, она излучает как абсолютно черное тело с очень низкой температурой. Так, температура черной дыры с массой, в шесть раз превышающей солнечную, равна одной стомиллионной доле градуса. Идея об «испарении» черных дыр полностью противоречит классическому представлению о них как о телах, не способных излучать.

Все приведенные выше рассуждения остаются в силе и для мини-дыры. Легко увидеть, что при массе в несколько миллиардов тонн они оказываются нагретыми до десятков тысяч градусов и раскалены добела! Следует, однако, сразу отметить, что противоречий со свойствами черных дыр здесь нет: это излучение испускается слоем над сферой Шварцшильда, а не под ней.

Итак, черная дыра, которая казалась навеки застывшим объектом, рано или поздно исчезает, испарившись. Причем,

по мере того как она будет «усыхать», темп испарения увеличится, но все равно данный процесс займет чрезвычайно много времени. Подсчитано, что мини-дыры, возникшие сразу после Большого Взрыва десять — пятнадцать миллиардов лет назад, к нашему времени должны испариться полностью. На последнем этапе жизни их температура достигает колоссальной величины, поэтому продуктами испарения должны быть частицы чрезвычайно высокой энергии. Возможно, именно они порождают в атмосфере Земли космические ливни из высокоэнергетических частиц. Во всяком случае, происхождение частиц аномально высокой энергии — еще одна важная и интересная проблема, которая может быть вплотную связана с не менее захватывающими вопросами физики черных дыр.

С другой стороны, черные дыры являются чрезвычайно простыми. Для их описания необходимо всего три параметра: масса, вращение (момент количества движения), электрический заряд. Знание этих характеристик дает вам полную информацию о черной дыре. Все остальное исчезло в «зеве коллапсара» или излучилось при образовании черной дыры. Такую потерю свойств описывают образным высказываниями: «черные дыры не имеют волос», «дыра теряет свои волосы».

Ну а что произойдет, когда масса дыры станет сравнительно маленькой? Достоверно мы этого не знаем, поскольку не знаем, что происходит внутри дыры. Но можно предположить, что дыра полностью исчезнет в гигантской вспышке излучения. Может быть, такую же природу имел Большой Взрыв, породивший нашу физическую реальность. Но если наша Вселенная будет и дальше расширяться, температура микроволнового излучения, обусловленного Большим Взрывом, в конце концов, упадет ниже температуры черных дыр. Тогда дыры начнут терять массу и вполне возможно, что дыры такого минимального размера испарятся за время, которое несоизмеримо больше времени существования Метагалактики. Получается, что во Вселенной протекают циклические процессы и мы живем в одно из первых мгновений такого грандиозного цикла, когда черные дыры и реликтовое

излучение рассказывают нам об исключительной молодости нашего Мира.

Если в нашу эпоху высокая плотность вещества, необходимая для рождения черной дыры, может возникнуть лишь в сжимающихся ядрах массивных звезд, то в далеком прошлом, сразу после Большого Взрыва, с которого около четырнадцати миллиардов лет назад началось расширение Вселенной, высокая плотность материи была повсюду. Поэтому небольшие флуктуации плотности в ту эпоху могли приводить к рождению черных дыр любой массы, в том числе и малой. Но самые маленькие из них в силу квантовых эффектов должны были испариться в виде излучения и потоков частиц, потеряв свою массу. «Первичные черные дыры» могли сохраниться до наших дней, причем самые мелкие из них должны иметь размер порядка протона или нейтрона.

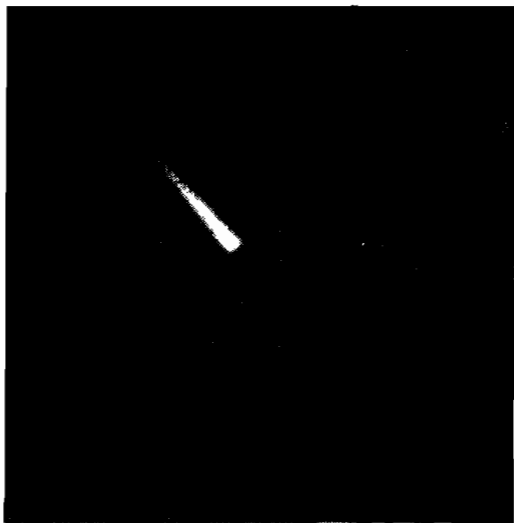


Рис. 87. Вращающаяся черная дыра

«Представим себе, например, космонавта, вылетевшего с Земли и нырнувшего во вращающуюся или заряженную черную дыру. Немного пространствовав там, он обнаружит Вселенную, являющуюся его же собственной, только на 10 минут более ранней во времени. Войдя в эту более раннюю Вселенную,

он обнаружит, что все обстоит так, как было за несколько минут до его отправления. Он может даже встретить самого себя, полностью готового к посадке в космический корабль. Встретив самого себя, он может рассказать себе же, как он славно путешествовал. Затем, вдвоем с самим собой, он может... снова повторить тот же полет!»

Р. Пенроуз

Наконец, существует гипотетическая возможность рождения микроскопических черных дыр при взаимных соударениях быстрых элементарных частиц. Таков один из прогнозов теории струн — одной из конкурирующих сейчас физических теорий строения материи. Теория струн предсказывает, что пространство имеет более трех измерений. Гравитация, в отличие от прочих сил, должна распространяться по всем этим измерениям и поэтому существенно усиливаться на коротких расстояниях. При мощном столкновении двух элементарных частиц они могут сжаться достаточно сильно, чтобы родился микроколлапсар. Правда, он тут же должен мгновенно испариться, но наблюдение за этим уникальным явлением представляет для физики большой интерес, поскольку, испаряясь, дыра будет испускать все существующие в природе виды частиц. Если гипотеза теории струн верна, то рождение таких черных дыр может происходить при столкновениях энергичных частиц космических лучей с атомами земной атмосферы, а также в наиболее мощных ускорителях элементарных частиц.

В научно-фантастической литературе и фильмах черная дыра обычно представляется таким космическим монстром, безжалостно пожирающим пролетающие корабли и даже целые планеты. Увы, если бы фантасты знали о современной физике чуть больше, они бы не были столь несправедливыми к черным дырам. Дело в том, что коллапсары фактически защищают Вселенную от гораздо более грозных чудовищ...

Мы уже знаем, что космической сингулярностью называется точка пространства, в которой его кривизна неограниченно стремится к бесконечности, — пространство-время как бы рвется в этой точке. Современная теория говорит

о существовании сингулярностей как о неизбежном факте, ведь, с математической точки зрения, решения уравнений, описывающие сингулярности, так же равноправны, как и все прочие решения, описывающие более привычные объекты Вселенной, которые мы наблюдаем. Есть тут, однако, очень серьезная проблема. Дело в том, что для описания физических явлений необходимо не только иметь соответствующие уравнения, но нужно также задать граничные и начальные условия. Так вот, в сингулярных точках эти самые условия задать нельзя в принципе, что делает невозможным последующее описание физического явления. А теперь представим, что при рождении нашего Мира в чудовищном сосредоточении массы и энергии образовалось множество сингулярностей. Попав каким-либо фантастическим образом в этот момент, мы увидели бы абсолютный и бесструктурный хаос, без намека на какую-либо причинность. Далее эти области хаоса расширялись бы вместе с пространством и к настоящему времени подавляющая часть Вселенной вела бы себя совершенно случайным образом, не управляемая никакими законами природы. Естественно, что при этом материя не могла бы образовать какие-либо сгущения и неоднородности в виде звезд, планет и галактик, не говоря уже о разумной жизни.

К счастью, ситуацию спасают бездонные провалы застывших звезд. Математическая структура уравнений фундаментальной теории и их решений указывает на то, что в реальных ситуациях пространственные сингулярности должны появляться не сами по себе, а исключительно внутри черных дыр. Таким образом, черные дыры отделяют сингулярности от остальной Вселенной и не позволяют им влиять на ее причинно-следственные связи. Этот принцип запрета существования «голых» сингулярностей, то есть не окруженных горизонтом событий, предложенный Роджером Пенроузом, получил название *«гипотезы космической цензуры»*. Как это часто бывает с фундаментальными принципами, полностью он не доказан, но принципиальных нарушений пока замечено не было. Космический цензор зорко охраняет порядок в нашей реальности.

Вернемся к экспериментам на ускорителях элементарных частиц: непрерывно увеличивая энергию сталкивающихся частиц, можно достигнуть стадии, когда расстояние между какими-нибудь частицами из них в области столкновения станет сравнимо с соответствующим радиусом Шварцшильда, что немедленно повлечет рождение черной дыры. Начиная с этого момента, вся энергия будет ею поглощаться, и, сколько ни увеличивай мощность, новой информации уже не получишь. Сама же черная дыра при этом станет интенсивно испаряться, возвращая энергию в окружающее пространство в виде потоков субатомных частиц. Таким образом, законы черных дыр, вкупе с законами квантовой механики, неизбежно означают существование экспериментального предела дробления материи.

В этом смысле достижение «микротоколлапсионного» порога на коллайдерах будущего неизбежно приведет к революции не только в физике элементарных частиц, но и в квантовой космологии. Ускорители будут служить нам уже как инструмент исследования квантовой гравитации и топологии дополнительных измерений Вселенной (против существования которых на данный момент пока не выдвинуто каких-либо убедительных аргументов).

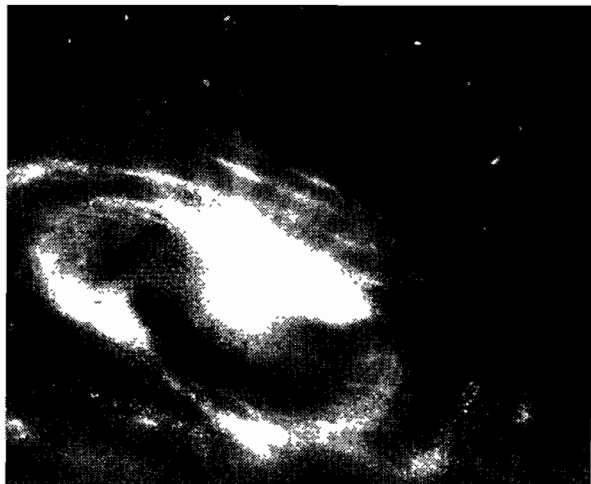


Рис. 88. Черная или белая?

Пришло время, и ученые заговорили о том, что, кроме черных, есть и белые дыры. Они постоянно выбрасывают материю и энергию. И хотя белых дыр никто не видел, то, что они существуют, доказано математически. Астрофизики вычислили их существование, решая с помощью суперкомпьютера уравнения теории относительности Эйнштейна. Вспомним, что и современный образ черных дыр был создан в 1916 году немецким астрономом Карлом Шварцшильдом похожим образом в ходе решений уравнений общей теории относительности. Астрофизики связывают существование белых застывших звезд с точками разрыва между двумя Вселенными, одна из которых связана с черной дырой, а вторая — с белой. При этом может существовать своего рода туннель: черная дыра со стороны нашей Вселенной и белая — со стороны другой. Ученые полагают, что вся материя, которая исчезает в черной дыре, в неизменном виде выталкивается наружу белой. Но происходит это совершенно парадоксальным образом, а не в последовательности «поглощение — выброс». Согласно теории относительности время в подобных межпространственных каналах может течь вспять и поэтому сам по себе момент выброса материи из перехода может произойти до момента ее поглощения.

Представим себе теперь вещество, выбрасываемое из области вблизи сингулярности прошлого, поднимающееся на некоторую высоту над черной дырой, а затем падающее опять на нее. Как показали в своих исследованиях физики-теоретики, геометрия коллапсаров, в принципе, допускает подобные процессы для нового типа космических объектов, получивших название *«серые дыры»*. Если представления о черных коллапсарах появились из исследования эволюции звезд, то идеи о белых и серых дырах возникли чисто математически в связи с решением уравнений Шварцшильда. Но следует ли нам принять на веру возможность реального существования во Вселенной — наряду с пространственными червоточинами между разными точками пространства-времени — еще и белых и серых дыр?

Представление о белых дырах было возрождено в середине шестидесятых годов прошлого века замечательным совет-

ским ученым И. Д. Новиковым. Хотя белые дыры не могут образоваться при смерти звезд, они могут быть, по мысли Новикова, связаны с рождением наблюдаемой нами Вселенной. Большинство астрономов считают, что начало Вселенной определилось чудовищным взрывом первичного бесконечно плотного состояния. Иначе говоря, вся Вселенная, наблюдаемая нами, должна была представлять собой одну гигантскую сингулярность, которая по неизвестной нам причине вдруг взорвалась. Допустим, что какие-то отдельные области не приняли участия в этом всеобщем расширении Вселенной, иными словами, по какой-то причине небольшая часть первичной сингулярности сумела сохраниться, не расширяясь, в течение очень длительного времени. Когда же подобный артефакт Большого Взрыва начал наконец расширяться, он должен был проявлять все свойства белой дыры. Такой удивительный элемент — в буквальном смысле кусочек сингулярности Большого Взрыва, из которой в нашу Вселенную вторглись вещество и излучение. Мысль о том, что маленькие части Большого Взрыва могли сохраниться в течение длительного времени, и привела, в конечном счете, академика Новикова к предположению о возможности существования белых дыр.

Кстати, некоторые космологи полагают, что наша Вселенная все еще... формируется внутри «космологической» белой дыры. Увидим ли мы, вернее, наши самые отдаленные потомки, абсолютно иной мир? Ведь некоторые физики-теоретики предрекают, что по ту сторону белых дыр времени нет вообще, как нет и смерти. В любом случае, вернуться оттуда обратно в наш мир будет, наверное, невозможно.

Впрочем, как показали расчеты, помимо гигантских белых дыр, чреватых новыми мирами, существуют и небольшие белые дыры, возникающие ненадолго. Они появляются на свет всякий раз, когда рождается «дочерняя Вселенная». Под этим термином космологи понимают некую замкнутую Вселенную, «отпочковавшуюся» от одного из регионов нашей Вселенной, но связанную с нашим пространством-временем. Связанную как? Теми самыми таинственными парами из черных и белых дыр. Наблюдая за звездным небом, мы мо-

жем отыскивать лишь черные дыры; их двойники недоступны нашему наблюдению, как недоступна земным звездочетам обратная сторона Луны.

Если Вселенную мы сравнили с живым организмом, то с не меньшим правом мы должны именовать так пару «черная дыра — белая дыра». Все, что в нашей Вселенной — вот мы уже в области черной дыры — распадается до атомов, до электронов, в дочерней Вселенной рождается, разрастается. Из кирпичиков мироздания по мановению физических законов возводится новый мир.

А нельзя ли проникнуть в него и выплыть по ту сторону? Мысль о существовании «внепространственных переходов-туннелей» будоражит умы ученых. Но не повиснет ли мост в пустоте, едва пустишься по нему в путь? По расчетам, многие белые дыры, связывающие нашу Вселенную с дочерними Мирами, возникают очень ненадолго. Это — яркие, но эфемерные вспышки, что освещают изнанку черной дыры и тут же гаснут. И если белая дыра даже в десяток раз больше нашего Солнца, то она «прогорит» всего за тысячную долю секунды. Даже если белая дыра разрослась в миллионы солнц, ей сиять не больше минуты.



Рис. 89. Встреча черной и белой дыр

Белым дырам может быть уготована и совершенно необычная роль спасителей человечества. Так, некоторое время назад в непосредственной близости от Земли с громадной скоростью промчалось очень странное небесное тело, которое астрономы рассматривают как вероятного кандидата в черные дыры. Непосредственное столкновение подобного физического объекта с нашей планетой грозит ужасными бедами, ведь согласно проведенным расчетам Земля должна была бы упасть в черную дыру, проткнуть горизонт событий и сжаться до размеров сантиметрового шарика. Стоит ли говорить о судьбе человеческой цивилизации в этом чудовищном катаклизме. И хотя в данном конкретном случае опасность счастливо миновала Землю, угроза падения за горизонт событий остается реальной: тысячи других кандидатов в черные дыры продолжают нависать над орбитой нашей планеты.

Ученые разных стран разрабатывают методы борьбы с угрожающей возможностью будущей встречи с черными дырами, норовящими поглотить Землю. К настоящему моменту наибольший успех независимые аналитики пророчат методу активного противодействия блуждающим застывшим звездам путем их «торпедирования» не менее загадочными белыми коллапсарами. Как известно, законы физики симметричны, поэтому каждой черной дыре вполне может соответствовать белая. По господствующим представлениям, если в черную дыру сбросить белую, то, поглотив последнюю, черный коллапсар должен «схлопнуться» и исчезнуть. По крайней мере, в этом убеждены многие физики-теоретики, разрабатывающие космические сценарии подобных удивительнейших явлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Мы установили, что индуктивная физика ставит дедуктивной, а дедуктивная физика – индуктивной вопросы, решение которых требует напряжения всех сил. Пусть объединенными усилиями удастся вскоре добиться решающих успехов!»

Альберт Эйнштейн

«Распространенные в последние годы довольно пессимистические прогнозы в отношении развития физики и астрофизики в обозримое время представляются мне плодом недостаточной информированности, некомпетентности или просто недоразумения.»

В. Л. Гинзбург. «Физический минимум на начало XXI века»

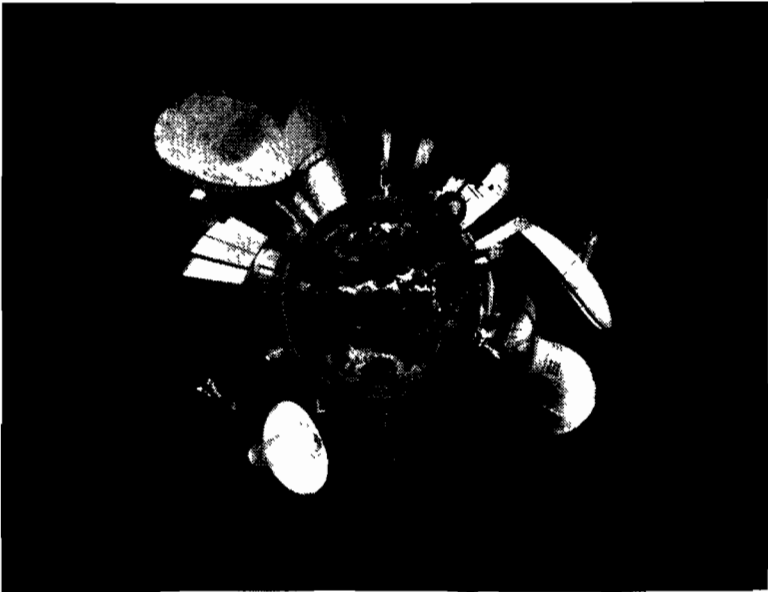


Рис. 90. Вселенная третьего тысячелетия

Сегодня наука исследует саму суть основных физических характеристик материи, смело задавая природе вопросы, о которых ученые во времена Галилея и не могли помыслить. Почему, например, предметы имеют вес и массу? Английский профессор Питер Хиггс в шестидесятых годах прошлого века высказал предположение о существовании некоей элементарной частицы, впоследствии получившей название «бозон Хиггса». Данные бозоны, по теории Хиггса, играют во Вселенной роль волшебной палочки: после прямого контакта с ним кварки и лептоны обретают массу. Но несмотря на многочисленные попытки, эту частицу (размеры ее меньше миллиардной доли миллиметра) до сих пор не удалось обнаружить. В новом тысячелетии ученые Европейской лаборатории ядерной физики в Женеве (CERN) собираются на гигантском адронном синхротроне — коллайдере LHC (ускоритель со встречными пучками элементарных частиц) — расщепить атомное ядро и найти бозон Хиггса в его «осколках».

Хорошо известно, что людей, занимающихся естественными науками, нередко раздражает стремление философов проанализировать их занятия, поскольку особой пользы от этого никто еще не видел, а вред от попыток жесткого очерчивания научных концепций может быть вполне ощутимым. Например, Нобелевский лауреат Стивен Вайнберг одну из глав своей книги «Мечты об окончательной теории» так и назвал — «Против философов». Другой не менее известный физик, Нобелевский лауреат Мюррей Гелл-Манн, высказывается следующим образом: «Философия мутит воду и затуманивает важнейшую задачу теоретической физики — отыскивать согласованную работоспособную структуру». Наличие же у физика четкой философской позиции, по мнению Гелл-Манна, может стать причиной «отвержения какой-нибудь хорошей идеи».

Тем не менее именно с философской точки зрения одной из наиболее интересных и последовательных теорий, описывающих окружающую действительность, является многомировая интерпретация Эверетта — Уилера. Если попытаться дополнить эту интерпретацию гипотезой об атемпоральном

характере последовательности эвереттовских миров, то мы получим оригинальный реляционно-субстанциональный образ явления, воспринимаемого нами как время. Этот небольшой, но принципиальный шаг приводит к достаточно интересной теоретической конструкции и может представлять собой новый аспект развития как для квантовой теории, так и для релятивистской космологии.

Множество всех без исключения дискретных темпоральных локализаций будут образовывать последовательные точки субстанциональной оси времени, на которой локализуется любой материальный объект при движении по своей мировой линии. При этом общее хроноквантовое описание окружающей природы по предложенным модельным представлениям будет также включать реляционное время изменения условного темпорального радиуса Миров Мультиуниверсума. В соответствии с принципом неопределенности интервалы локализации на эквидистанциях между такими соседними Мирами будут взаимно равны и эквивалентны длительности хронокванта.

Синтетические принципы квантовой хронофизики органически включают в себя основные идеи волновой механики о корпускулярно-волновом дуализме материальных объектов. Исходя из этого, математическими методами теории дифференциальных уравнений с частными производными можно показать, что длина волны любой частицы равна отношению постоянной Планка и ее импульса. Соответственно, форму и параметры волн материи будут описывать решения дифференциального уравнения Шредингера с частными производными для пси-функции. Данные решения принято считать собственными, или характеристическими, функциями. При дискретно-темпоральной реинтерпретации подобные функции рассматриваются в контексте вероятностных процессов локализации микроскопического объекта с фиксированным состоянием.

Теоретический анализ таких хроноквантовых моделей позволяет расширить границы логической реинтерпретации фундаментального принципа причинности и детерминиз-

ма окружающего физического мира. Более точно структуру дискретно-темпорального Мультиуниверсума можно было бы описать в различных системах отсчета. Так, в пространстве признаков событий, где происходят генерация и развитие Миров, модель является субстанциально-статической, а в собственных границах нашего Мира — реляционно-динамической.

Подобная концепция пространства-времени может объединить фрагментарные модели, справедливые для определенного уровня организации материи, консолидируя законы развития микро- и мегаструктур в окружающем мире. Отдельный вопрос составляет вид фундаментальных корреляций между последовательными Мирами Мультиуниверсума. Здесь многое еще не ясно и необходимы дополнительные исследования, но уже сейчас можно сказать, что основой для построения структуры Мультиуниверсума может служить его волновая функция, квантовое чистое запутанное состояние, декогерентизация и сепарация.

Блестящий популяризатор науки и видный физик-теоретик, специализирующийся в области суперструн и М-теории, Брайан Грин в своей замечательной книге «Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории» отмечал:

«...при объединении уравнений общей теории относительности и квантовой механики начинаются тряска, грохот и шипение пара, как в перегретом котле. Если выразиться менее образно, несчастливый союз этих двух теорий может приводить к появлению бессмысленных ответов на корректно поставленные физические вопросы. Даже если вы позволите глубинам черных дыр и началу Вселенной и далее скрываться под покровом тайны, вам не удастся избежать ощущения, что враждебность между квантовой механикой и общей теорией относительности вопиет о необходимости выработки более глубокого уровня понимания. Возможно ли, чтобы Вселенная была разделена на наиболее фундаментальном уровне, требуя одного набора законов для больших объектов и другого, несовместимого с первым, для малых?»



Рис. 91. Современные инструменты физика-теоретика

Чтобы осмыслить методологический кризис в современной физике, необходимо вспомнить, что в квантовой теории одну из ее принципиальных особенностей составляет вероятностная интерпретация. Отсюда следуют и неизбежность фундаментального индетерминизма физических явлений, и многомировая парадигма, и геометродинамика Вселенной. В сложившейся ситуации вполне возможно, что ввод новых модельных представлений позволит по-новому взглянуть на столетнюю квантовую науку и, конечно же, ответить на вопрос Грина.

В заключение хочется еще раз обратиться к мыслям этого замечательного ученого:

«...Один из критериев глубины физической теории — это степень, в которой она изменяет наше мировоззрение в отношении тех понятий, которые до этого считались незыблемыми. В соответствии с этим критерием квантовая механика и теория относительности находятся за гранью самых безумных ожиданий. Волновые функции, вероятности, кван-

товое туннелирование, беспорядочные флуктуации вакуумной энергии, перемешивание пространства и времени, относительность одновременности, искривление пространства, черные дыры, Большой Взрыв. Кто мог предположить, что интуитивный, механистический, раз и навсегда заведенный мир Ньютона окажется жалким частным случаем и что существует целый мир, лежащий прямо за порогом мира обычных вещей?

Но даже эти потрясающие основы открытия — лишь элементы всеобъемлющей схемы. С твердой верой, что законы большого и малого должны сливаться вместе в согласованное целое, физики упорно охотятся за ускользающей единой теорией. Поиск не завершен, но благодаря теории суперструн, обобщенной до М-теории, возникла, в конце концов, убедительная схема для объединения квантовой теории, общей теории относительности, а также теорий сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий. Изменения наших взглядов на мир, порожденные этими достижениями, фундаментальны: мы представляем себе струнные петли и вибрирующие капли, которые увлекают все элементы Мироздания в танец колеблющихся мод, педантично исполняемый во Вселенной с многочисленными скрытыми измерениями, способными претерпевать экстремальные изгибы, при которых структура пространства-времени рвется и затем снова себя восстанавливает. Кто мог подумать, что слияние гравитации и квантовой механики в единую теорию материи и взаимодействий приведет к такой революции в нашем понимании устройства Вселенной?

Без сомнения, поиск законченного и удобного вычислительного формализма теории суперструн сулит еще более грандиозные сюрпризы. Уже сейчас в исследованиях по М-теории мы увидели скрывающуюся за планковской длиной новую область Вселенной, в которой, возможно, нет понятия пространства и времени. И вот противоположная крайность: мы видели, что наша Вселенная может оказаться всего лишь одним из неисчислимых пузырей пены на поверхности широкого и турбулентного космического океана Мультивселенной. Эти рас-

суждения сейчас кажутся невероятными, но они могут предвещать следующий скачок в нашем понимании Вселенной».

Ученые вынуждены признать, что мы никогда не сможем поставить последнюю точку в познании мира. И поэтому, несмотря на все пророчества, конец науки никогда не наступит, — напротив: раз у возможностей человеческого мозга, как утверждают нейробиологи, есть предел, а у Вселенной его нет, то мы, в принципе, не сможем достичь абсолютного знания.

Альберт Эйнштейн, по-видимому, предчувствовал, как близко может человеческий интеллект подобраться к основным тайнам Вселенной, он долгих тридцать лет тщетно искал волшебную формулу, которая описывала бы все процессы, происходящие в природе. И нашу краткую экскурсию по квантовым идеям современного естествознания стоит закончить словами этого великого мыслителя XX века:

«Идея осуществится, и она прекрасна. Но над всем этим застыла холодная мраморная улыбка непреклонной природы, которая скорее осеняет нас печалью, чем умножает наши знания...

Человек является частью целого, названного нами «Вселенной», частью, ограниченной в пространстве и времени. Он ощущает себя, свои мысли и чувства как нечто, не зависимое от остального, — своего рода оптический обман человеческого сознания. Это заблуждение является чем-то вроде тюрьмы, ограничивая наши возможности личными желаниями и привязанностью к нескольким близким нам людям. Наша миссия должна состоять в том, чтобы вырваться из этой тюрьмы, расширив наш круг милосердия, включить в него все живые существа и всю природу во всей ее красоте. Никто не может полностью добиться этого, но стремление к достижению такого состояния уже, само по себе, является частью освобождения и основой внутренней гармонии».

Приложение

- Рис. 1. Современный научный инструментарий (<http://cdsweb.cern.ch>).
- Рис. 2. Спектры далеких звезд (www.nasa.gov).
- Рис. 3. Парадоксальный мир «перепутанных измерений» знаменитого голландского графика Мориса Корнелиуса Эшера (www.mcescher.com).
- Рис. 4. Лазер – сверхмощный промышленный оптический квантовый генератор (www.repairfaq.org).
- Рис. 5. Вселенная насыщена темной материей и энергией (www.nasa.gov).
- Рис. 6. Старинная фреска: Гераклит и Демокрит (<http://oce.catholic.com>).
- Рис. 7. Электронно-лучевые лампы и катодно-лучевая трубка (<http://oce.catholic.com>).
- Рис. 8. Интерференция света внутри стеклянного шара (<http://oce.catholic.com>).
- Рис. 9. Интерференционная картина рассеивания электронов на атомах кристалла (<http://oce.catholic.com>).
- Рис. 10. Детектор элементарных частиц Большого адронного коллайдера «АТЛАС» (<http://cdsweb.cern.ch>).
- Рис. 11. Здесь исследуют кварковое строение материи (БАК, ЦЕРН, Швейцария) (<http://cdsweb.cern.ch>).
- Рис. 12. Самый мощный в мире ускоритель элементарных частиц (БАК, ЦЕРН, Швейцария) (<http://cdsweb.cern.ch>).
- Рис. 13. Модель излучения абсолютно черного тела (<http://osnovanija.narod.ru>).
- Рис. 14. Внутри полости абсолютно черного тела (<http://osnovanija.narod.ru>).
- Рис. 15. Схема фотоэффекта (<http://osnovanija.narod.ru>).
- Рис. 16. Схема атома Бора (<http://osnovanija.narod.ru>).
- Рис. 17. Оптико-механическая аналогия (<http://osnovanija.narod.ru>).
- Рис. 19. Нильс Бор и Альберт Эйнштейн – полемика гениев (<http://allpersons.name>).
- Рис. 20. Монтаж сверхмощного ускорителя элементарных частиц (БАК, ЦЕРН, Швейцария) (<http://cdsweb.cern.ch>).
- Рис. 21. Квантовая запутанность (<http://www.nist.gov>).
- Рис. 22. Поляризация электромагнитного излучения (<http://www.nist.gov>).
- Рис. 23. Мысленный эксперимент с котом Шредингера (<http://www.nist.gov>).
- Рис. 25. Фрактальное «древо реальности» (www.electasy.com).
- Рис. 26. Граница между квантовым и классическим мирами (www.nist.gov).

- Рис. 27. Художественный образ запутанных квантовых объектов (www.nist.gov).
- Рис. 28. Фотографический негатив (www.lifeisphoto.ru).
- Рис. 29. Проекция Универсума на нашу реальность (www.nasa.gov).
- Рис. 30. Эксперименты по проверке ЭПР-парадокса (<http://www.nist.gov>).
- Рис. 31. Квантовая единица информации: преимущество кубитов над битами. В квантовом регистре каждое возможное значение находится в суперпозиции, тогда как классический регистр может иметь только одно значение из 8 возможных (www.quantumlah.org).
- Рис. 32. Квантовый компьютер (www.quantumlah.org).
- Рис. 33. Схематическая структура квантового компьютера (www.quantumlah.org).
- Рис. 34. Алиса и Боб пытаются сохранить тайну шифровального ключа, передавая его в виде поляризованных фотонов (www.sciam.ru).
- Рис. 35. Схема шифрования с открытым ключом (www.sciam.ru).
- Рис. 36. Фантастический образ квантовой Мультивселенной (www.computerra.ru).
- Рис. 37. Многообразие Вселенной (www.nasa.gov).
- Рис. 38. Модель редукции волнового пакета (www.computerra.ru).
- Рис. 39. Отражение Миров на карте Интернета (www.computerra.ru).
- Рис. 40. Парадоксальное многомирие (www.everettica.org).
- Рис. 41. Рождение миров из пены квантовых флуктуаций (www.everettica.org).
- Рис. 42. Новорожденный Мир (www.nasa.gov).
- Рис. 43. Интерпретация Мира по Бому (www.everettica.org).
- Рис. 44. Схема получения голограмм (www.holography.ru).
- Рис. 45. Вселенная Бома (www.holography.ru).
- Рис. 46. Голограмма (www.holography.ru).
- Рис. 47. Квантовая геометрия пространства (www.eclectasy.com).
- Рис. 48. Кипящая пена моря виртуальных частиц (www.eclectasy.com).
- Рис. 49. Пространственно-временная пена в начале Большого Взрыва (www.eclectasy.com).
- Рис. 50. Модель космических струн (www.nasa.gov).
- Рис. 51. Суперструнный гравитон (www.eclectasy.com).
- Рис. 52. Макет метагалактических струн (www.eclectasy.com).
- Рис. 53. Древнеегипетский сфинкс — символ непостижимой загадочности (<http://ec-dejavu.ru>).
- Рис. 54. Эволюция суперстринговых бран (www.eclectasy.com).
- Рис. 55. Стринги и браны (www.eclectasy.com).
- Рис. 56. Квантовая матрица многомерного пространства (www.eclectasy.com).
- Рис. 57. Ландшафты теории бран (www.eclectasy.com).
- Рис. 58. Космология Большого Взрыва (www.nasa.gov).

- Рис. 59. Сверхдальние горизонты Метагалактики (www.nasa.gov).
- Рис. 60. Большой Взрыв (www.nasa.gov).
- Рис. 61. Взрыв Мира по Леметру (www.nasa.gov).
- Рис. 62. Эволюция Вселенной (www.nasa.gov).
- Рис. 63. Квантовая флуктуация (www.electasy.com).
- Рис. 64. Рождение нового Мира (www.electasy.com).
- Рис. 65. Вариант реальности Мироздания (www.electasy.com).
- Рис. 66. Загадка «недостающей массы» Млечного Пути (www.nasa.gov).
- Рис. 67. Реконструкция внешнего вида нашей Галактики (www.nasa.gov).
- Рис. 68. Прыжок через гиперпространство (www.nasa.gov).
- Рис. 69. Распределение галактик по данным космического телескопа «Хаббл» (www.nasa.gov).
- Рис. 70. Микроволновое излучение (www.nasa.gov).
- Рис. 71. Парадоксальная реальность (www.mcescher.com).
- Рис. 72. Зависимость космологических сценариев от величины плотности материи Метагалактики (www.nasa.gov).
- Рис. 73. Образ фридмона (www.electasy.com).
- Рис. 74. Вращение галактики (www.nasa.gov).
- Рис. 75. Макет физического вакуума на разных уровнях глубины (www.electasy.com).
- Рис. 76. Темная энергия антигравитации (www.electasy.com).
- Рис. 77. Далекое прошлое Вселенной — ранняя эпоха расширения (www.nasa.gov).
- Рис. 78. Ближний объем Метагалактики — фрагмент Местной группы галактик (www.nasa.gov).
- Рис. 79. Провал пространства-времени (www.nasa.gov).
- Рис. 80. Застывшая звезда коллапсара (www.nasa.gov).
- Рис. 81. Черная дыра — не вещество и не излучение (www.nasa.gov).
- Рис. 82. Черная дыра в двойной системе (www.nasa.gov).
- Рис. 83. Внутри квантового ядра коллапсара (www.nasa.gov).
- Рис. 84. Квантовый микроколлапсар (www.nasa.gov).
- Рис. 85. М. Эшер «Бабочки» (www.mcescher.com).
- Рис. 86. Коллапсар в центре нашей Галактики (www.nasa.gov).
- Рис. 87. Вращающаяся черная дыра (www.nasa.gov).
- Рис. 88. Черная или белая? (www.nasa.gov).
- Рис. 89. Встреча черной и белой дыры (www.electasy.com).
- Рис. 90. Вселенная третьего тысячелетия (www.nasa.gov).
- Рис. 91. Современные инструменты физика-теоретика (<http://cdsweb.cern.ch>).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Азимов А.* О времени, пространстве и других вещах. М.: Центрполиграф, 2004.
2. *Азимов А.* Загадки микрокосмоса. М.: Центрполиграф, 2004.
3. *Аккарди Л.* Диалоги о квантовой механике. М.: УРСС, 2004.
4. *Ансельм А. И.* Очерки развития физической теории в первой трети XX века. М.: Наука, 1986.
5. *Барашенков В. С.* Кварки, протоны, Вселенная. М.: Знание, 1987.
6. *Белокуров В. В., Тимофеевская О. Д., Хрусталева О. А.* Квантовая телепортация — обыкновенное чудо. Ижевск: РХД, 2000.
7. *Бом Д.* Квантовая теория. М.: Наука, 1961.
8. *Борн М.* Атомная физика. М.: Наука, 1970.
9. *Борн М.* Моя жизнь и взгляды. М.: Наука, 1973.
10. *Борн М.* Размышления и воспоминания физика. М.: Наука, 1977.
11. *Боум А.* Квантовая механика: основы и приложения. М.: Наука, 1990.
12. *Бройль де Луи.* Революция в физике (Новая физика и кванты). М.: Атомиздат, 1965.
13. *Бройль де Луи.* Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. М.: Мир, 1986.
14. *Вайнберг С.* Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. М.: Энергоиздат, 1981.
15. *Вайнберг С.* Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. М.: УРСС, 2004.
16. *Вильф Ф. Ж.* Логическая структура квантовой механики. М.: УРСС, 2000.
17. *Гейзенберг В.* Физика и философия. Часть и целое. М.: Наука, 1990.
18. *Гинзбург В. Л.* Какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века / «О науке, о себе и о других». М.: Физматлит, 2003.
19. *Глэшоу Ш. Л.* Очарование физики. Ижевск: НИЦ «РХД», 2002.
20. *Гриб А. А.* Концепции современного естествознания. М.: Бином, 2003.

21. *Грин Б.* Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. М.: УРСС, 2004.
22. *Джеммер М.* Эволюция понятий квантовой механики. М.: Наука, 1985.
23. *Девис П.* Пространство и время в современной картине Вселенной. М.: Мир, 1979.
24. *Дирак П. А. М.* Лекции по квантовой механике. М.: Мир, 1968.
25. *Дирак П. А. М.* Принципы квантовой механики. М.: Наука, 1979.
26. *Дирак П. А. М.* Пути физики. М.: Энергоиздат, 1983.
27. *Дойч Д.* Структура реальности. Ижевск: РХД, 2005.
28. *Зельдович Я. Б., Хлопов М. Ю.* Драма идей в познании природы. М.: Наука, 1988.
29. *Зубайри М. С., Скалли М. О.* Квантовая оптика. М.: Физматлит, 2003.
30. *Кемпфер Ф. А.* Основные положения квантовой механики. М.: КомКнига, 2007.
31. *Компанеец А. С.* Что такое квантовая механика? М.: Наука, 1977.
32. *Компанеец А. С.* Симметрия в микро- и макром мире. М.: Наука, 1978.
33. *Линде А. Д.* Физика элементарных частиц и инфляционная космология. М.: Наука, 1990.
34. *Липкин А. И.* Модели современной физики. М.: Гнозис, 1999.
35. *Мандель Л., Вольф Э.* Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000.
36. *Марков М. А.* О трех интерпретациях квантовой механики. М.: Наука, 1991.
37. *Менский М. Б.* Человек и квантовый мир. Фрязино: Век 2, 2007.
38. *Мигдал А. Б.* Поиски истины. М.: Молодая гвардия, 1983.
39. *Мигдал А. Б.* Квантовая физика и Нильс Бор. М.: Знание, 1987.
40. *Мигдал А. Б.* Квантовая механика для больших и маленьких. М.: Наука, 1989.
41. *Новиков И. Д.* Куда течет река времени? М.: Молодая гвардия, 1990.
42. *Паркер Б.* Мечта Эйнштейна: В поисках единой теории строения Вселенной. М.: Наука, 1991.
43. *Пенроуз Р.* Тени разума. В поисках науки о сознании. Ижевск: ИКИ, 2003.
44. *Пенроуз Р.* Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики. М.: УРСС, 2003.

45. Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум. М.: Мир, 2004.
46. Пономарев Л. И. Под знаком кванта. М.: Наука, 1989.
47. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. М.: УРСС, 2003.
48. Радунская И. Л. Крушение парадоксов. М.: Молодая гвардия, 1971.
49. Розенталь И. Л., Архангельская И. В. Геометрия, динамика, Вселенная. М.: УРСС, 2003.
50. Рубин С. Г. Устройство нашей Вселенной. Фрязино: Век 2, 2005.
51. Трейман С. Этот странный квантовый мир. М.: РХД, 2002.
52. Фейнман Р. Характер физических законов. М.: Мир, 1987.
53. Фейнман Р. КЭД — странная теория света и вещества. М.: Наука, 1988.
54. Фок В. А. Начала квантовой механики. М.: Наука, 1976.
55. Хван М. П. Неистовая Вселенная: от Большого Взрыва до ускоренного расширения, от кварков до суперструн. М.: УРСС, 2006.
56. Хокинг С., Эллис Дж. Крупномасштабная структура пространства-времени. М.: Мир, 1976.
57. Хокинг С. От Большого взрыва до черных дыр. М.: Мир, 1998.
58. Хокинг С., Пенроуз Р. Природа пространства и времени. Ижевск: РХД, 2000.
59. Черепашук А. М., Чернин А. Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: Век 2, 2005.
60. Черепашук А. М. Черные дыры во Вселенной. М.: Фрязино: 2, 2005.
61. Чернин А. Д. Физика времени. М.: Наука, 1987.
62. Чернин А. Д. Космология: Большой Взрыв. Фрязино: Век 2, 2005.
63. Черногорова В. А. Загадки микромира. М.: Молодая гвардия, 1973.
64. Чирков Ю. Г. Охота за кварками. М.: Молодая гвардия, 1985.
65. Штокман Х. Ю. Квантовый хаос. М.: Физматлит, 2004.
66. Эйнштейн А. Физика и реальность. М.: Наука, 1965.
67. Эренфест П. Относительность. Кванты. Статистика. М.: Наука, 1974.
68. Юкава Х. Лекции по физике. М. Энергоиздат, 1981.

Алфавитный указатель

- Абсолютно черное тело, 36
Андерсон, К., 30
Аннигиляция, 28
Античастицы, 28
Атом, 22
Атом Бора, 47
Ахиезер, А. И., 74
Барашенков В. С., 40
Белл, Дж., 133
Больцман Л., 20
Большой Взрыв, 19, 126
Бом, Д., 61, 132
Бор, Н., 45
Борн, М., 53
Бройль, Л., 35
Вайнберг, С., 142
Волновая механика, 35
Волновая функция, 50
Гамильтон, У., 50
Гамов, Г. А., 169
Гейзенберг, В., 52
Герц, Г., 41
Гильберт, Д., 54
Гинзбург, В. Л., 10, 11
Гегузин, Я. Е., 29
Гелл-Ман, М., 12
Гераклит, 22
Данин, Д. С., 10, 15
Декарт, Р., 13
Демокрит, 22
Дирак, П., 28
Дойч, Д., 16
Зайлингер, А., 94
Зельманов, А. Л., 10
Зоммерфельд, А., 48
Зурек, В., 91
Интерференция частиц, 26
Каганов, М. И., 11
Катодные лучи, 23
Квант, 5, 34,
Квантовая гравитация, 158
Квантовая запутанность, 66
Квантовая космология, 125
Квантовая криптография, 106
Квантовая локальность, 67
Квантовая механика, 35
Квантовая система, 73
Квантовая хромодинамика, 147
Квантовый компьютер, 90
Китайгородский, А. И., 10
Конденсационная камера, 30
Конт, Огюст, 7
Континуум, 7
Копенгагенская интерпретация, 60
Корпускулярно-волновой дуализм, 48
Космические лучи, 28
Космические струны, 146
Кот Шредингера, 75
Кубит, 99
Курлбаум, 39

- Лазер, 14
Ландау Л. Д., 36
Левкипп, 23
Леметр, Ж., 168
Линде, А. Д., 10
Липкин, А. И., 72, 81, 86
Марков, М. А., 186
Матричное представление
квантовой механики, 54
Мигдал, А. Б., 10, 17, 70
Милликен, Р., 30
Минковский, Генрих, 7
Молдасена, Х., 12
Мультиверс, 120
М-теория, 154
Нейман, Дж., 88
Нейтрон, 28
Нелокальность (квантовая), 138
Новиков, И. Д., 10
Парадокс ЭПР, 65
Пенроуз, Р., 12, 16, 78
Периодическая система Менделеева, 32
Петлевая квантовая гравитация, 142
Планк, М., 36, 40
Позитрон, 28, 31
Постоянная Планка, 37
Протон, 28
Редукция волновой функции, 58
Рубенс, 39
Саган, К., 16
Сингулярность, 16
Соотношение неопределенности, 59
Столетов, А. Г., 41
Суперструны, 148
Теплород, 13
Томсон, Дж., 24
Уилер, Дж., 84, 124
Ультрафиолетовая катастрофа, 37
Универсум, 92
Фейнман, Р., 78, 101, 141
Флогистон, 12
Фок, В. А., 71
Фотоэффект, 40
Фракталы, 139
Фридман, А. А., 168
Хоккинг, С., 12, 16, 65
Чернин, А. Д., 10
Черные дыры, 157
Шимони А., 16
Шредингер, Э., 49, 51
Эверетт, Х., 61, 84, 123, 165
Эйнштейн, А., 40, 42
Электрон, 25
Эренфест, П., 58
Эфир, 13
ЯМР-спектрометр, 103

Научно-популярное издание

ОТКРЫТИЯ, КОТОРЫЕ ПОТРАСЛИ МИР

Фейгин Олег Орестович

ВЕЛИКАЯ КВАНТОВАЯ РЕВОЛЮЦИЯ

Директор редакции *И. Федосова*
Ответственный редактор *А. Баранов*
Выпускающий редактор *В. Обручев*
Художественный редактор *Н. Биржаков*

В оформлении использована иллюстрация
художника *А. Смирнова*

ООО «Издательство «Эксмо»
127299, Москва, ул. Клары Цеткин, д. 18/5. Тел. 411-68-86, 956-39-21.
Home page: www.eksmo.ru E-mail: info@eksmo.ru

Оптовая торговля книгами «Эксмо»:
ООО «ТД «Эксмо». 142702, Московская обл., Ленинский р-н, г. Видное,
Белокаменный ш., д. 1, многоканальный тел. 411-50-74.
E-mail: reception@eksmo-sale.ru

**По вопросам приобретения книг «Эксмо» зарубежными оптовыми
покупателями обращаться в отдел зарубежных продаж ТД «Эксмо»**
E-mail: International@eksmo-sale.ru

**International Sales: International wholesale customers should contact
Foreign Sales Department of Trading House «Eksmo» for their orders.**
International@eksmo-sale.ru

**По вопросам заказа книг корпоративным клиентам, в том числе в специальном
оформлении, обращаться по тел. 411-68-59 доб. 2115, 2117, 2118.**
E-mail: vrzakaz@eksmo.ru

**Оптовая торговля бумажно-беловыми и канцелярскими товарами для школы
и офиса «Канц-Эксмо»:** Компания «Канц-Эксмо»: 142700, Московская обл., Ленин-
ский р-н, г. Видное-2, Белокаменное ш., д. 1, а/я 5. Тел./факс +7 (495) 745-28-87
(многоканальный). e-mail: kanc@eksmo-sale.ru, сайт: www.kanc-eksmo.ru

Полный ассортимент книг издательства «Эксмо» для оптовых покупателей:

В Санкт-Петербурге: ООО СЗКО, пр-т Обуховской Обороны, д. 84Е.
Тел. (812) 365-48-03/04. **В Нижнем Новгороде:** ООО ТД «Эксмо НН», ул. Маршала
Воронова, д. 3. Тел. (8312) 72-36-70. **В Казани:** Филиал ООО «РДЦ-Самара»,
ул. Фрезерная, д. 5. Тел. (843) 570-40-45/46. **В Самаре:** ООО «РДЦ-Самара»,
пр-т Кирова, д. 75/1, литера «Е». Тел. (846) 269-66-70.

В Ростове-на-Дону: ООО «РДЦ-Ростов», пр. Стачки, 243А. Тел. (863) 220-19-34.
В Екатеринбурге: ООО «РДЦ-Екатеринбург», ул. Прибелтийская, д. 24а.
Тел. (343) 378-49-45. **В Киеве:** ООО «РДЦ Эксмо-Украина», Московский пр-т, д. 9.
Тел./факс: (044) 495-79-80/81. **Во Львове:** ТП ООО «Эксмо-Запад», ул. Бузкова, д. 2.
Тел./факс: (032) 245-00-19. **В Симферополе:** ООО «Эксмо-Крым», ул. Киевская,
д. 153. Тел./факс: (0652) 22-90-03, 54-32-99. **В Казахстане:** ТОО «РДЦ-Алматы»,
ул. Домбровского, д. 3а. Тел./факс (727) 251-59-90/91. rdc-almaty@mail.ru

Подписано в печать 31.07.2009. Формат 60x90¹/₁₆.
Печать офсетная. Бумага писч. Усл. печ. л. 16,0 + вкл.
Тираж 3000 экз. Заказ № 5670

Отпечатано с готовых файлов заказчика в ОАО «ИПК
«Ульяновский Дом печати». 432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

Наступившее третье тысячелетие нашей эры подводит итог целой плеяде величайших научно-технических достижений, определивших гигантский прогресс, который достигнут наукой и техникой за последнее время. Давно ли использование внутриатомной энергии вызывало «Чернобыльский синдром» и иззалося делом далекого будущего? Теперь строительство термоядерных реакторов уже вошло в реальные планы международного научного сообщества. На воде и под водой энергия покоренного атома уже давно служит человеку, теперь ее очередь осваивать космическое пространство.

Быстро развиваются нанотехнологии, обещая произвести переворот в радиоэлектронике, продвинуть далеко вперед гелиоэнергетику, приборостроение, автоматику. Настоящим научным чудом кажутся уверенные шаги человекообразного робота, везде сопровождающего японского премьер-министра, а на очереди уже создание совершенно фантастических квантовых компьютеров. Эти сверхбыстродействующие электронные вычислительные машины смогут производить сложнейшие расчеты за ничтожно малое время.

Удивительны достижения наук, которые изучают вещество и помогают переделывать его, и здесь уже столетие уверенно лидирует одна из самых фундаментальных наук – квантовая физика, открывая все новые элементарные частицы и все глубже проникая в сокровенные тайники материи. В научных проектах завтрашнего дня все чаще мелькают системы квантовой телепортации, машины времени и «антигравитеты», причем все эти чудеса будущего имеют вполне солидную научную основу. Так какие же перспективы откроются, например, в первой четверти двадцать первого века? Что сулит науке грядущее, какие победы ждут человека впереди? Что можно увидеть, если попытаться проникнуть мысленным взором в даль времен?

Об авторе

Фейгин Олег Орестович, доктор физических наук, академик украинской Академии Наук, заведующий сектором теоретической физики Института инновационных технологий УАН. Область научных интересов включает специальные вопросы квантовой радиофизики и физики ионосферы и космоса. Научный редактор ряда журналов и автор свыше 100 печатных работ, в том числе научно-популярных книг.

**САМЫЕ
ЗАХВАТЫВАЮЩИЕ
ТАЙНЫ
МАТЕРИИ**

интернет-магазин
OZON.RU



25442522

ОТКРЫТИЯ, КОТОРЫЕ ПОТЯСАЛИ МИР

ISBN 978-5-699-37891-3



9 785699 378913 >