

М. САПОЖНИКОВ

АНТИМИР — РЕАЛЬНОСТЬ?



НАУКА
И ПРОГРЕСС

- ПОПЬ ДИРАК — ЧЕЛОВЕК, ОТКРЫВШИЙ АНТИМИР
- АНТИВЕЩЕСТВО И ЕГО СВОЙСТВА.
- ИЩЕМ АНТИМИР.
- БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ И ПРОБЛЕМА АНТИВЕЩЕСТВА
- ПОЧЕМУ НАШ МИР — ЭТО МИР?



М. САПОЖНИКОВ

• АНТИМИР- РЕАЛЬНОСТЬ?

Издательство "Знание"

Москва 1983

ББК 22.314
С19

САПОЖНИКОВ Михаил Григорьевич родился в 1952 году, закончил физический факультет Московского государственного университета. В настоящее время работает в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. Основная область научных интересов — исследования взаимодействий элементарных частиц с ядрами и приложение этих исследований в астрофизике. Автор ряда научных публикаций. Рукопись «Антимир—реальность?» отобрана издательством для публикации из числа присланных на конкурс по серии «Наука и прогресс».

Рецензенты: М. Ю. Хлопов (Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша АН СССР) и А. Н. Мелешко (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова), кандидаты физико-математических наук. Научную редакцию осуществил кандидат физико-математических наук В. М. Четчин, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша АН СССР.

Сапожников М. Г.
С19 Антимир — реальность? — М.: Знание, 1983.—
176 с., с ил.
30 к. 100000 экз.

Один из создателей квантовой механики П. Дирак предсказал существование позитрона, двойника электрона, только с обратным знаком заряда. Вскоре позитрон был обнаружен экспериментально. Более того, выяснилось, что все частицы, кроме абсолютно нейтральных, имеют своих двойников. С физической точки зрения не видно никаких причин, которые запрещали бы античастицам и антиядрам соединяться в антиатомы и антимолекулы — образовывать антивещество и даже целые антимирры. Но почему-то антимирры существуют пока только в фантастических романах, поиски же их во Вселенной не дали никаких результатов. Почему? Почему наш мир — это только Мир? Обсуждению данной проблемы, а также рассказу о том, как были открыты античастицы и какими свойствами они обладают, посвящена эта книга, предназначенная для широкого круга читателей.

С 1705070000—099
073(02)—83 19—83

ББК 22.314
530.1

© Издательство «Знание», 1983 г.

Давно известно, что на самые простые вопросы бывает труднее всего найти ответ. История науки дает нам много примеров того, как наиболее нетривиальные, революционные представления возникали именно при решении на первый взгляд совершенно «детских» вопросов. Таких, как, например, почему светит солнце или что увидит гном, летящий со скоростью света.

Проблема антивещества, рассмотрению которой посвящена эта книга, также может быть сформулирована в виде «детского» вопроса: почему наш Мир состоит из вещества, тогда как все его фундаментальные составляющие — элементарные частицы — имеют своих двойников — античастицы? Мы смогли найти некоторый ответ на этот вопрос лишь совсем недавно, причем нам пришлось отказаться (или, по крайней мере, поставить под сомнение) от ряда положений, считавшихся ранее общепризнанными и, казалось, с большой точностью проверенных в экспериментах.

В книге хорошо изложена сложная, порою просто драматическая, история возникновения и развития наших взглядов на природу антиматерии. Гениальное предвидение П. Дирака о возможности существования античастиц было подтверждено в опытах К. Андерсона, П. Блэккетта и Дж. Оккиалини, открывших первую античастицу — позитрон. В то время я был студентом, и мне как раз поручили сделать обзор работ, посвященных изучению свойств позитрона. Поэтому я хорошо помню те сомнения и трудности, с которыми столкнулись физики, пытаясь осознать, что же такое позитрон и зачем он вообще необходим.

С тех пор прошло уже полвека, и наши знания об антивеществе несоизмеримо возросли. Однако вряд ли мы и сегодня хорошо понимаем природу элементарных частиц. Возможно, многие из наших трудностей связаны с излишней привязанностью к традиционным представлениям. Поэтому история открытия позитрона кажется нам особенно актуальной.

Надеюсь, что читателю будет интересно прочитать эту книгу и получить впечатление о тех сложных проблемах современной физики, которые принесло нам открытие античастиц.

Академик Б. М. ПОНТЕКОРВО

Дубна, 1983 г.

ОТ АВТОРА

У нашей замечательной детской поэтессы Агнии Барто есть стихотворение под названием «Горькая шутка». Речь в нем идет об антидетях — антивнуках, которые не помогают бабушкам, антипионерах, которые курят и топчут клумбы во дворах и т. д. Кончается это стихотворение так:

Антимир? Кому он нужен?
К счастью, он не обнаружен.

Поэтесса права. Мы действительно не видим нигде во Вселенной больших количеств антивещества. Антимир не обнаружен, и это крайне удивительно.

В самом деле, известно, что в микромире между антивеществом и веществом имеется определенное равноправие — практически у каждой элементарной частицы найдена соответствующая античастица, обнаружены также антиядра легких элементов. С физической точки зрения не видно никаких причин, которые запрещали бы античастицам и антиядрам образовывать антиатомы, антимолекулы и все дальнейшие формы антиматерии, включая антивнуков. Более того, современные космологические модели предсказывают, что в ранней Вселенной неизбежно должно существовать колоссальное количество антивещества. Тем не менее в настоящее время мы, по всей видимости, нигде не находим следов присутствия Антимира. Но почему? Почему наш мир — это только Мир? Какова судьба тех громадных количеств антивещества, которые были в ранней Вселенной? А может быть, еще рано говорить о том, что Антимир в нашей Вселенной не реализовался?

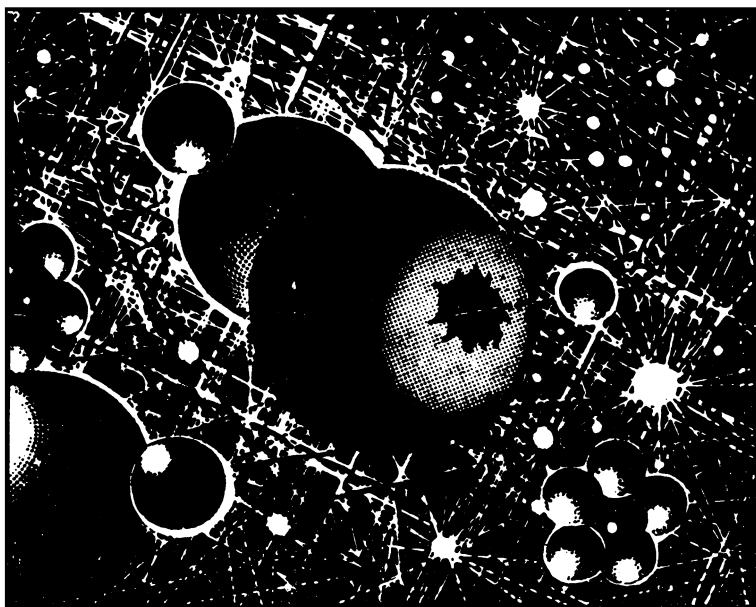
Именно обсуждению этих вопросов и посвящена наша книга. В ней рассматривается также, как возникли представления об антивеществе, и история открытия первых античастиц и антиядер. Мне хотелось бы познакомить читателя не только с чисто информативной стороной развития идеи Антимира, но и рассказать о тех замечательных людях, которые разрабатывали эту идею.

Наконец необходимо отметить, что нетривиальное решение проблемы Антимира мы смогли получить лишь

совсем недавно в связи с развитием современной космологии и теорий, описывающих поведение элементарных частиц при сверхвысоких энергиях. Сам по себе подобный синтез наук о макро- и микромире довольно привлекателен, так как является отражением удивительной гармонии природы. Поэтому проблема существования Антимира есть не просто интересная научная задача, на которую надо однозначно ответить: «Да!» или «Нет!» Знакомство с исследованиями в этой области доставляет чисто эстетическое наслаждение — настолько красивую и целесообразную картину нашего Мира рисует нам современное естествознание.

Работая над книгой, я пользовался советами и помощью многих моих коллег. Я особенно благодарен академику Б. М. Понтекорво за чтение рукописи и ценные замечания. Я очень признателен рецензенту книги М. Ю. Хлопову и научному редактору В. М. Четкинину за советы и предложения по исправлению и улучшению текста.

Дубна, январь 1983



ГЛАВА 1

Поль Дирак — человек, открывший Антимир

Я предвижу скептическую улыбку на лице у искушенного читателя, но прошу мне поверить, что я действительно пишу эти строки 8 августа 1982 года — в день, когда исполняется 80 лет выдающемуся физику современности Полю Адриену Морису Дираку.

Точно так же, как рассказ о русской поэзии немыслим без имени Пушкина, так и любая книга или статья об антивеществе и Антимире невозможна без упоминания о Дираке. Именно он создал первую теорию антивещества, именно он первым обратил внимание на возможность существования во Вселенной антимиров, наконец, само слово «античастица» ввел в наш лексикон именно Дирак.

Однако я решил начать книгу с рассказа о Дираке не только поэтому. Его научные работы уже давно стали

классическими, и любой физик еще с университетской скамьи знает об уравнении Дирака, о дельта-функции Дирака, о статистике Ферми—Дирака, о монополе Дирака. Но Дирак велик и интересен не только как ученый, но и как личность. Есть прекрасное высказывание Эйнштейна о том, что «моральные качества замечательного человека имеют большее значение для его поколения, чем чисто интеллектуальные достижения. Эти последние сами зависят от величия духа, величия, которое обычно остается неизвестным». Действительно, мы гораздо хуже знаем, каким был Дирак, так сказать, вне письменного стола. К сожалению, на русском языке пока нет полной биографии Дирака и обзора его научного творчества, как, например, замечательные жизнеописания Эрнеста Резерфорда и Нильса Бора, написанные Д. Даниным, или книга о Максвелле В. Карцева. Поэтому, я думаю, будет уместно сначала сообщить читателю несколько биографических фактов из жизни Дирака, а затем уже перейти непосредственно к рассказу о его исследованиях, которые привели к открытию Антиматера.

ПОЛЬ ДИРАК — МОЛОДЫЕ ГОДЫ

Поль Адриен Морис Дирак, второй из трех детей Чарльза Адриена Ладисласа Дирака и Флоренс Ханны Холтен, родился 8 августа 1902 года в Бристоле. Его отец, швейцарец по происхождению, приехал в Англию еще совсем молодым и там женился. Он преподавал французский язык, причем в той же самой школе, где учился Поль. Это обстоятельство создавало дополнительные трудности. Естественно, отец Дирака хотел, чтобы его дети знали французский язык лучше других учеников. Поэтому он установил дома жесткое правило — все разговоры с ним дети должны были вести только на французском. Однако благие педагогические намерения зачастую приводят к совершенно неожиданным результатам. Так и в этом случае. В ответ на требования отца Поль стал дома преимущественно молчать. Биографы Дирака считают, что именно таким образом уже в детстве у него выработалась привычка к сдержанности и немногословию. Остается только поблагодарить судьбу за то, что отец Дирака преподавал французский, а не физику или математику. Вполне возможно, что, насаждая у себя дома культ этих наук, он смог бы так же успешно отбить всякий интерес Поля и к естествознанию.

Школа, в которой учился Дирак, считалась в Бристоле одной из самых лучших. Она отличалась высоким общим уровнем обучения. Многие учителя были высококвалифицированными специалистами и даже читали лекции для студентов инженерного факультета Бристольского университета, который занимал вместе со школой одно и то же здание. Факультет располагал хорошо оборудованными лабораториями, которые частично предоставлялись ученикам школы. Не удивительно, что большая часть выпускников продолжала свое образование именно на этом факультете Бристольского университета. Сюда же поступил учиться старший брат Дирака, а затем и сам Дирак.

Во время обучения в университете он специализировался в электротехнике. Но главным любимым занятием его и в школе, и в колледже была математика. Математические способности обнаружились у него довольно рано, и уже школьные учителя были удивлены его решением стать инженером. Однако, как признается Дирак, этот выбор был обусловлен просто тем, что он не представлял себе, как можно заработать на жизнь, занимаясь чистой математикой.

Вообще говоря, судьба будущего нобелевского лауреата складывалась в молодости довольно сложно. После окончания в 1921 году Бристольского университета он хотел продолжить свое образование в одном из крупнейших научных центров Англии — Кембридже. Однако стипендии, которую он получил по результатам экзамена, 70 фунтов стерлингов в год, явно не хватало для безбедного существования. Дираку пришлось вернуться в Бристоль. Он стал усиленно искать работу по своей специальности — инженера-электротехника. Но все его попытки не увенчались успехом — в Англии в то время царила жестокая экономическая депрессия. Дирака сильно выручило предложение математического факультета Бристольского университета, который предоставил ему право изучать математику, освободив от платы за обучение.

Интересно, что вместе с Дираком училась еще только одна студентка. Она решила изучать прикладную математику, и Дирак, чтобы не затруднять преподавателей чтением разных курсов лекций, присоединился к ней.

Через два года материальное положение Дирака улучшилось. Он смог получить сразу две стипендии: дотацию от министерства научных и промышленных исследо-

ваний и так называемую стипендию выставки 1851 года. Последняя была самой большой стипендией, которую может получить в Англии молодой ученый. Она обеспечивала возможность заниматься наукой в течение двух-трех лет. Так что у Дирака теперь были условия, чтобы осуществить свою давнюю мечту — продолжить образование в Кембридже.

В Кембридже 20—30-х годов работала целая плеяда выдающихся физиков. Дирак еще застал легендарного Дж. Дж. Томсона — первооткрывателя электрона. Преемником Томсона на посту директора Кавендишской лаборатории был знаменитый Эрнест Резерфорд. Под руководством Резерфорда работали такие замечательные физики-экспериментаторы, как П. Л. Капица, П. Блэкетт, Дж. Чедвик, Г. Гейгер, Э. Марсден, Дж. Кокрофт, М. Олифант — что ни имя, то целая страница в истории физики. Не менее представителен список теоретиков, работавших в то время в Кембридже. Среди них были такие известные ученые, как Дж. Лармор, Р. Фаулер, Э. Каннингэм, Дж. Леннард-Джонс. В Кембридже работали также выдающиеся астрофизики и космологи А. Эддингтон и Э. Милн.

Так что Дирак сразу попал в благоприятную атмосферу переднего края науки и получил возможность изучать физику под руководством первоклассных ученых. Например, курс по магнетизму Дираку читал П. Л. Капица. Научным руководителем Дирака был один из основных кембриджских теоретиков Р. Фаулер, а когда Фаулер уехал в Копенгаген поработать в институте Нильса Бора, то научными исследованиями Дирака руководил Э. Милн.

Надо сказать, что Дирак был довольно своеобразным студентом. На лекциях он старался понять лишь основные идеи. Весь остальной материал Дирак разбирал самостоятельно, по книгам и оригинальным статьям. Зачастую в ходе такой работы Дирак находил более корректные доказательства или новые пути для решения некоторых хорошо известных и широко обсуждавшихся проблем. Так родились его первые научные работы. Отметим, что только тема для самой первой статьи была предложена Дираку его научным руководителем. В дальнейшем он всегда выбирал предмет исследования самостоятельно.

Сейчас труд научного работника иногда пытаются оценивать по количеству публикуемых им статей. Я ду-

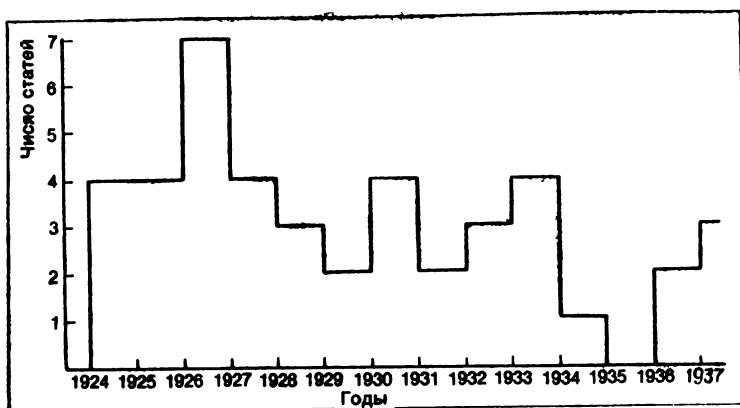


Рис. 1. Число статей, опубликованных П. Дираком в 1924—1937 гг. Резкий пик, приходящийся на 1926 г., возможно, связан с тем, что именно в этом году Дирак защитил диссертацию

маю, читателю будет интересно взглянуть на рис. 1, где показано, сколько работ в год публиковал Дирак.

Два слова о «светской» жизни Дирака. Только два слова — просто потому, что практически никакой «светской» жизни молодой Дирак не вел. В театре не бывал, в гости ходил очень редко, мало читал беллетристику. Единственным его развлечением были воскресные прогулки. Обычно он брал еду с собой и уходил на целый день. На таких прогулках он не старался специально думать о науке, но подчас очень интересные мысли приходили как раз во время воскресных походов.

Вообще говоря, научная карьера Дирака была блестящей и стремительной. В 24 года он защищает диссертацию, а спустя четыре года становится членом Королевского общества (аналог нашей Академии наук). В 30 лет он стал профессором и в течение 36 лет возглавлял знаменитую Лукасианскую кафедру в Кембридже. Этот пост в свое время занимал Исаак Ньютон. В 31 год Дирак получил Нобелевскую премию.

Такие успехи молодого ученого отражают его выдающиеся способности и талант. К сожалению, рассказ обо всех работах Дирака занял бы слишком много места. Я думаю, читатель получит представление о Дираке как об ученом в тех главах книги, где пойдет речь об истории открытия первых античастиц. Здесь же, чтобы не быть

совсем уж голословным, мы просто перечислим основные работы Дирака (табл. 1) и займемся рассмотрением другого вопроса. Посмотрим, что же было особенного в характере Дирака, какие черты его личности, его видения мира способствовали такому замечательному взлету молодого ученого и дальнейшему полному раскрытию его таланта.

Т а б л и ц а 1. Основные работы Дирака

1924 г.	Первая статья Дирака «Диссоциация под действием градиента температуры»
1925 г.	Дирак предлагает свой вариант уравнений квантовой механики, основанный на элегантном математическом формализме, который был разработан еще в прошлом веке английским математиком У. Гамильтоном. Эта работа — существенный шаг в понимании полуфеноменологических предписаний квантовой теории того времени
1926 г.	Рассмотрено поведение газа частиц, подчиняющихся принципу Паули (см. стр. 40). Найден закон распределения таких частиц в различных квантовых состояниях — сейчас его называют статистикой Ферми—Дирака
1927 г.	Разработана теория преобразований (см. стр. 29), которая придала квантовой механике вполне законченный, внутренне согласованный вид. Создана квантовая теория взаимодействия излучения с веществом — основа современной квантовой электродинамики
1928 г.	Один из главных успехов Дирака — он получил релятивистское уравнение для электрона. Неожиданно оказалось, что эта теория, удовлетворяющая как принципам квантовой механики, так и требованиям теории относительности, естественным образом объясняет одну из самых важных характеристик элементарных частиц — спин
1930 г.	Теория дырок — одна из революционных гипотез в физике. Она привела к новому пониманию природы физического вакуума. Первое издание знаменитого учебника «Принципы квантовой механики»
1931 г.	Выходит в свет классическая статья Дирака, в которой впервые был употреблен термин «античастица», предсказано существование позитрона и антипротона, а также показана возможность существования магнитных монополей — уединенных магнитных полюсов. Поиски магнитных монополей ведутся уже давно, но эта задача все еще остается вызовом для физиков-экспериментаторов
1937 г.	Дирак высказывает предположение, что сила гравитационного притяжения уменьшается по мере «старения» Вселенной. Он был первым, кто поставил такой нетривиальный вопрос: не меняется ли со временем величина фундаментальных констант, определяющих силу различных взаимодействий?
1941 г.	Предложен оригинальный подход к релятивистской квантовой теории
1958—1963 гг.	Серия работ по теории гравитации

ПОЛЬ ДИРАК — ПРИНЦИПЫ ЛИЧНОСТИ

На мой взгляд, основная черта характера Дирака — это сочетание высокого профессионализма с безграничным удивлением перед окружающим миром.

Я не случайно поставил на первое место профессионализм. Казалось бы, очевидно, что выдающийся ученый должен быть прежде всего мастером своего дела. Однако еще бытует мнение, что владение научным аппаратом — это одно, а вот свежую и нетривиальную идею может выдвинуть любой человек, знакомый лишь с основными принципами науки. Один мой знакомый, ученик известного у нас академика, показывал мне груды писем, которые приходят на имя этого академика, с предложениями новых теорий развития Вселенной, физики элементарных частиц, с опровержениями теории относительности и квантовой механики. Я спросил у моего друга, попадаешь ли ему среди этих писем хотя бы одно, содержащее какую-нибудь действительно интересную мысль, заслуживающую внимания. Ответ был получен мгновенно: «Нет, ни разу мы не получали ничего стоящего». Лично мне глубоко импонируют авторы таких писем, по-моему, люди, размышляющие о судьбах Вселенной, заслуживают всяческого уважения. Однако столь же глубоко я убежден, что время дилетантов в большой науке безвозвратно прошло.

Научно-популярная литература при всей ее необходимости и больших достоинствах имеет один недостаток. Закономерное стремление авторов популярных книг доходчиво и просто объяснить довольно сложные проблемы современной науки подчас порождает у читателей иллюзию полного понимания данного вопроса и толкает некоторых к конструированию легковесных, доморощенных теорий. Именно для того, чтобы как-то нейтрализовать это вредное побочное влияние, я думаю, будет уместно еще раз напомнить, что Дирак обладал высокими профессиональными навыками и как физик, и как математик.

Мы уже упоминали о выдающихся математических способностях Дирака, о той серьезной математической подготовке, которую он получил к моменту приезда в Кембридж. Вообще говоря, математическое начало в творчестве Дирака проявляется очень сильно.

К сожалению, мы не можем показать математическую красоту работ Дирака. Хотя бы потому, что неписанный

закон научно-популярной литературы не допускает использования в книгах математических формул *. Однако некоторое представление о математических способностях Дирака читатель может себе составить, ознакомившись с такой историей, которую приводит известный физик Г. Гамов.

В 1926 году Дирак полгода провел в Копенгагене, в институте Нильса Бора, а затем полгода работал в Геттингене. Гамов рассказывает, что в то время среди физиков и математиков Геттингена была очень популярна такая задачка: как записать все числа от 1 до 100, используя только цифру 2 и все возможные алгебраические действия. Причем двойку можно было употреблять только четыре раза.

$$\begin{aligned} \text{Например: } 1 &= 2 \times 2 / 2 \times 2, \\ 2 &= 2 / 2 + 2 / 2, \\ 5 &= 2^2 + 2 / 2 \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Когда Дирака познакомили с условием этой задачи, он очень быстро нашел общее решение, то есть показал, как можно записать любое число N , причем используя цифру 2 только три раза. Вот это решение:

$$N = -\log_2 \log_2 \sqrt{\sqrt{\dots \sqrt{2}}},$$

где число корней равно N . Читатель, еще не позабывший школьного курса алгебры, может проверить вывод Дирака и оценить элегантность его математического мышления.

Однако профессионализм сам по себе — это всего лишь гарантия того, что ваши работы будут сделаны на надлежащем уровне. Это гарантия одобрения коллег. Работы же Дирака вызывали не просто одобрение («Хорошая, интересная статья!»), они изумляли и восхищали

* Интересно, как сам Дирак обходил это суровое правило научно-популярной литературы. Однажды он написал статью в журнал «Scientific American» (американский аналог наших журналов «Наука и жизнь» или «Природа»), в котором авторам вообще запрещается использовать какие-либо формулы. Дирак честно придерживался требований журнала, хотя это было непросто — его статья посвящалась развитию квантовой механики. Однако когда он дошел до описания идей де Бройля и Шредингера, то все-таки не выдержал и выписал знаменитые уравнения де Бройля и Шредингера, но дал их не в тексте статьи, а вместе с фотографиями и рисунками.

физиков. Идей, которые он выдвигал, отличались смелостью, оригинальностью, большой глубиной мысли. Мы упоминали, что уже в своих ранних работах Дирак поражал способностью найти новый подход к достаточно старым, вроде бы вдоль и поперек изученным проблемам. Мне кажется, что такая черта характера — умение взглянуть на обычное и примелькавшееся свежим взглядом, обнаружить в нем нечто оригинальное, новое — свойственна всем выдающимся людям как в науке, так и в искусстве. Корни этой способности следует искать прежде всего в умении удивляться простым и обычным явлениям окружающего мира.

В самом деле, даже наша повседневная жизнь полна далеко не тривиальных вещей, которые вполне заслуживают глубокого рассмотрения. Например, посмотрим глазами физика на то, что делается у нас на кухне.

Вряд ли большинство из нас задумывалось над тем, почему мы слышим звук от струи воды, льющейся в кастрюлю. А ведь это проявление неоднородностей, возникающих в потоке воды, бьющей в дно кастрюли. Изучение таких явлений — самая респектабельная область современной гидродинамики. Процессы, управляющие поведением капли масла на раскаленной сковородке, во многом аналогичны процессам, происходящим на границе раздела вещества и антивещества (мы подробно будем разбирать этот пример в главе 3). Наконец, каждый из нас видел облачко тумана, появляющееся над горлышком только что открытой бутылки шампанского или лимонада. На таком же принципе работает и камера Вильсона — физический прибор, с помощью которого была обнаружена первая античастица — позитрон.

Мы привели всего лишь несколько примеров, чтобы только мельком показать, какие интересные научные проблемы скрываются за самыми, казалось бы, обыденными вещами, о которых после достижения пятилетнего возраста, как правило, никто и не задумывается. Взрослея, мы теряем детское восприятие мира и тем самым теряем важнейшее качество исследователя — способность удивляться.

У Дирака же эта способность удивляться, смотреть на вещи открытыми глазами, преодолевать инерцию мышления была выражена очень ярко. Многие друзья Дирака отмечали его умение нестандартно реагировать в самых прозаических ситуациях. Г. Гамов рассказывает,

как однажды в Кембридже, в доме Капицы, Дирак обсуждал с Петром Леонидовичем некоторые научные проблемы. Вместе с ними в комнате сидела жена Капицы и что-то вязала. Окончив обсуждение, Дирак попрощался, однако через некоторое время вернулся, довольно взволнованный, и стал объяснять жене Капицы, что по дороге домой он задумался над топологической стороной вязания и ему пришло в голову, что можно вязать и по-другому. Он стал на пальцах показывать изобретенный им новый способ, и оказалось, что Дирак самостоятельно придумал не что иное, как известный всем вяжущим женщинам способ, который по общепринятой терминологии называется вязанием «с накидом».

Другой пример приводит историк науки Ягдиш Мехра, индеец по национальности. Он вспоминает о своей первой встрече с Дираком в Кембридже в 1955 году. Друг Мехры пригласил его пообедать в профессорскую столовую Кембриджа. Они думали, что, может быть, увидят там «живого» Дирака. В самом деле, Дирак был за столом. Друзья робко присели, и через некоторое время Мехра рискнул первым нарушить молчание. Вспомнив правила хорошего тона, принятые, по его мнению, в Англии, он решил заговорить о погоде. «Сегодня ужасно ветрено, не правда ли, профессор?» — сказал он. Дирак немного помолчал, затем встал и вышел из-за стола. Мехра ужаснулся. Он подумал, что сказал нечто совершенно недопустимое английским этикетом. Но Дирак подошел к двери, открыл ее, посмотрел на улицу, затем вернулся к столу и сказал: «Да».

Когда через 15 лет Мехра напомнил Дираку этот случай, тот сказал: «Действительно непонятно, почему я это сделал, ведь я уже должен был знать, что на улице ветер. Конечно, если погода не изменилась с тех пор, как я вошел в здание».

Мало кто знает, что Дирак — этот создатель рафинированных физических теорий, обладавший незаурядными математическими способностями, по всем внешним параметрам выглядевший как чистый теоретик, — сам ставил некоторые эксперименты. Все та же самостоятельность мышления позволила Дираку преодолеть клановые предрассудки теоретиков по отношению к «возне с железками». Стремление постичь природу физического явления было для него самым главным, а то, что для этого

придется сменить авторучку на гаечный ключ, его не останавливало.

Свою экспериментальную деятельность Дирак вел совместно с П. Л. Капицей. Они придумали новый метод разделения изотопов. Суть метода заключалась в том, что поток газа, состоящего из смеси изотопов, заставляли огибать стенку, при этом за счет центробежной силы молекулы газа с разными массами летели по разным траекториям. Поэтому в одном месте собирались молекулы более легкого изотопа, а в другом — более тяжелого. Дирак сам занимался налаживанием установки для этого эксперимента (между прочим, к тому времени он уже был нобелевским лауреатом). Однако вскоре Капица уехал в Советский Союз, а затем Э. Резерфорд передал в нашу страну все оборудование Мондовской лаборатории, и Дирак не смог закончить этот опыт. Интересно, что во время войны группа исследователей в Оксфорде, работавшая над атомной программой, исследовала возможности такого способа для разделения изотопов урана. Оказалось, что сам метод работает превосходно, но он не так эффективен, как другие способы. Поэтому широкого применения методика Дирака—Капицы не получила.

Дирак и Капица хотели выполнить еще один красивый эксперимент. Они опубликовали статью, в которой обсуждалась довольно оригинальная возможность наблюдения дифракции электронов. Вообще говоря, дифракция — это чисто волновой процесс, который возникает всякий раз, когда падающая волна встречает на своем пути некоторое препятствие. Важно только, чтобы размеры этого препятствия были сравнимы с длиной волны (то есть с расстоянием между соседними гребнями или впадинами волны). В качестве примера дифракции можно привести дифракцию света. Это явление можно наблюдать в буквальном смысле на пальцах. Надо просто посмотреть на источник света через щель, которая образуется, если указательный палец приблизить к большому пальцу. Вы увидите, что при достаточно малом расстоянии между пальцами возникает черная полоса — это и есть простейшая дифракционная картина. В оптике для изучения дифракции света используют дифракционные решетки — прозрачные пластинки с нанесенными на них тонкими штрихами. Но не только свет может испытывать дифракцию. Одним из самых удивительных открытий физики микромира стало обнаружение в 1927 году дифракции

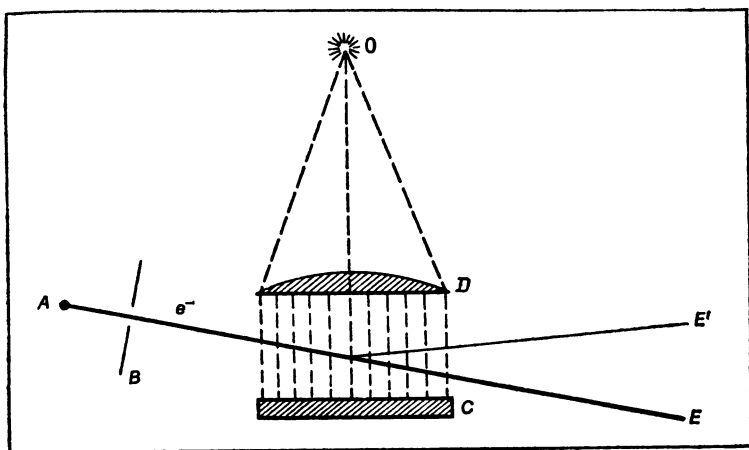


Рис. 2. Схема опыта, предложенного П. Л. Капицей и П. Дираком. Стоячие световые волны образуются при отражении зеркалом C света от источника O . Линза D служит для фокусирования света. Стоячие световые волны являются своеобразной дифракционной решеткой для электронов, которые испускаются источником электронов A и проходят через диафрагму B . В результате дифракции определенная часть электронов, вместо того чтобы попасть в точку E , рассеивается и попадает в точку E'

электронов. Оказалось, что эти частицы (в чем никто ранее не сомневался) имеют тем не менее волновые свойства. Однако длина волны, которая характерна для электрона, намного меньше, чем длина световых волн. Поэтому для наблюдения дифракции электронов требуются совершенно особые дифракционные решетки, с гораздо меньшим расстоянием между штрихами. В качестве таких решеток использовались упорядоченные структуры, которые образуют ионы в веществе кристаллов. Дирак и Капица предложили исследовать дифракцию электронов на совершенно необычной дифракционной решетке, состоящей из... стоячих световых волн. Представляете, какой красивый замысел — сделать решетку для рассеивания электронов из света!

На рис. 2 показана схема опыта, предложенного Капицей и Дираком. К сожалению, источники света, известные в то время, не могли позволить сделать этот замечательный эксперимент. Однако после изобретения лазера и этот эффект Капицы—Дирака был обнаружен.

Мы все время подчеркиваем неортодоксальность мышления Дирака, его способность выдвигать смелые, оригинальные идеи. При всем при том Дирак ни в коей мере не походил на такого гениального профессора, которого зачастую показывают нам в плохих фильмах из жизни «научников». Почему-то считается, что новатор в науке обязательно должен быть холериком с горящими глазами, взлохмаченной шевелюрой и порывистыми движениями. Долгие раздумья сменяются у него моментами творческого озарения, тогда он начинает бегать по «окружающему ландшафту», хватать прохожих за пуговицу и излагать им свои замечательные идеи.

Дирак, конечно, абсолютно не напоминал таких карикатурных гениев. Смелость мышления сочеталась у него с исключительной аккуратностью и даже педантизмом. Он был скрупулезно точен, последователен и абсолютно не переносил нечетких утверждений ни в своих научных трудах, ни в обычных разговорах.

Карл фон Вейцекер вспоминает, как однажды вечером в компании молодых физиков произошел такой случай. Подали чай, и Вольфганг Паули (один из известнейших физиков — основателей квантовой механики) взял себе слишком много сахара. Это сразу же стало предметом обсуждения, и кто-то спросил мнение Дирака. Он сказал — после некоторого размышления (!), отмечает Вейцекер: «Я думаю, что Паули будет достаточно и одного куска». Конечно, обсуждение «сахарной проблемы» скоро прекратилось, и разговор пошел своим чередом. Но тут Дирак вдруг заявил: «Я думаю, одного куска сахара будет достаточно любому». Молодые люди, наверное, переглянулись и продолжали разговаривать дальше. А Дирак спустя некоторое время еще раз уточнил: «Я думаю, что одного куска сахара, именно таких размеров, будет достаточно любому!»

Другую историю приводит Г. Гамов. Однажды после лекции Дирак отвечал на вопросы слушателей. Кто-то спросил его: «Профессор Дирак, я не понимаю, как вы вывели формулу, которая написана в левом верхнем углу доски». — «Это не вопрос, — сказал Дирак. — Это утверждение. Следующий вопрос, пожалуйста?»

Гамов пишет также, что как-то П. Капица дал прочитать Дираку «Преступление и наказание» Достоевского. Когда Дирак возвращал книжку, он сказал: «Хорошая

книга, но в одной главе автор сделал ошибку. У него солнце в один и тот же день восходит два раза».

Для понимания творческого метода Дирака и его стиля работы очень важна следующая цитата: «Мне удалось развить общую теорию преобразований^{*}, и это доставило мне большое удовлетворение. Я считаю, что из всех работ, которые я сделал за всю свою жизнь, именно эта работа принесла мне наибольшее удовлетворение. Она нравилась мне потому, что не явилась результатом некоего случайного счастливого стечения обстоятельств, она вытекает из логического обдумывания шаг за шагом, когда видишь, что каждый шаг приводит ко все более детальному знанию и наталкивает на новые вопросы, которые надо исследовать и разрешать. Именно по этому пути, продвигаясь шаг за шагом, я смог прийти к общей теории».

Чем характерно высказывание Дирака? Когда читаешь все эти повторяющиеся «шаг за шагом», невольно возникает образ путника, медленно бредущего по пустынной дороге. Правда, такое сравнение не совсем точно схватывает весьма существенный момент: Дирак говорит о труде ученого, и «шаг за шагом» приходится идти не по протоптанной аллее парка, а по нехоженным «тропам незнаемого».

Вернер Гейзенберг говорил о Дираке, что «...в своих научных исследованиях он похож на некоторых альпинистов, взбирающихся на сложную гору. Все дело в том, считают они, чтобы пройти следующие три ярда. Если делать это достаточно долго, вы доберетесь до вершины. Пытаться же представить себе все восхождение в целом, со всеми многочисленными трудностями, значит только прийти к разочарованию и потерять уверенность. Ведь и в самом деле, вы сталкиваетесь с настоящими проблемами, лишь когда достигаете самых трудных участков скалы». В этих словах мы опять-таки видим подчеркивание последовательности, методичности, постепенного продвижения вперед, как характерных особенностей научного стиля Дирака. Однако в науке открытие фундаментально новых вещей (а именно этим и славен Дирак) означает преодоление логических тупиков. Двигаясь шаг за шагом, можно лишь благополучно зайти в такой тупик,

^{*} О теории преобразований мы будем подробно говорить несколько позже.

преодоление его всегда есть некий скачок. Поэтому, пользуясь терминологией Гейзенберга, можно сказать, что Дирак очень хорошо умел перепрыгивать через трещины.

Кроме того, возвращаясь к высказыванию Дирака, мне хотелось бы обратить внимание читателя на ту часть цитаты, где говорится, что «каждый шаг... наталкивает на новые вопросы, которые надо исследовать и разрешать». Это тоже очень важная черта Дирака — стремление идти до конца в своих выводах, не бояться возникающих трудностей, не сглаживать или вообще оставлять в стороне неизбежно возникающие новые «острые» моменты.

Собственно говоря, первая теория Антимира вначале и представляла такую неприятность, которая возникла при успешном завершении одной из самых фундаментальных работ Дирака — релятивистской теории электрона. Огромная заслуга Дирака состоит в том, что он не оставил эту побочную неприятность в стороне, а подверг всестороннему анализу.

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ПЕРЕД ОТКРЫТИЕМ АНТИМИРА

Осенью 1927 года в Брюсселе проходил знаменитый 5-й Сольвеевский конгресс. Эта конференция физиков вошла в историю из-за легендарной дискуссии, которая разгорелась между Эйнштейном и Бором по вопросам физического обоснования квантовой механики. Ситуация, которая сложилась в то время, была достаточно уникальной: при изучении микромира физики столкнулись с кардинально новыми явлениями, совершенно не имевшими аналогов с тем, что было известно до сих пор.

Судите сами. Классическая физика считала самоочевидным, что любое движущееся тело описывает в пространстве некоторую траекторию. Причем в каждой точке этой траектории можно измерить одновременно скорость тела и его положение в пространстве. Квантовая механика утверждала, что понятие траектории для микрочастиц теряет всякий смысл. Если вы точно измерите скорость частицы, то ничего не будете знать о том, где она находится, и наоборот, точно измерив положение частицы, вы ничего не сможете сказать о ее скорости.

Но почему?

Классическая физика четко разделяла: есть частицы, отдельные «комочки» вещества, и есть волны, коллектив-

ные процессы, в которых участвует много «комочков» вещества. Квантовая механика показала, что микрообъекты в одних процессах могут вести себя как частицы, а в других явно демонстрируют характерные волновые свойства.

Но почему?

Классическая физика утверждала: всякая заряженная частица, движущаяся по криволинейной траектории, должна излучать. Из-за этого энергия частицы будет непрерывно уменьшаться. Оказалось же, что электроны в атоме могут двигаться вокруг ядра сколь угодно долго и не испускать излучения. Никакого непрерывного изменения энергии электронов нет, энергия электронов в атоме может изменяться только вполне определенными порциями.

Но почему?

Вся классическая физика покоится на том убеждении, что, зная закон движения частицы и факт появления ее в точке *A*, мы абсолютно точно можем предсказать, когда она попадет в точку *B*. Квантовая механика утверждает, что, зная закон движения микрочастицы и факт появления ее в точке *A*, мы можем определить всего лишь *вероятность* ее появления в точке *B*.

Но как же так?

Все эти вопросы требовали объяснения, все удивительные свойства микрообъектов нуждались в интерпретации. Физики сравнительно быстро нашли основные уравнения квантовой механики и экспериментально показали, что они довольно неплохо описывают действительность. Однако понимания того, почему эти законы квантовой механики работают именно так, а не иначе, не было. Процесс установления физического смысла тех величин, которые входят в уравнения квантовой механики, длился долго и протекал, можно сказать, довольно болезненно. Требовалось пересмотреть самые основные положения физического мышления, совершить переоценку веками сложившихся понятий.

Ситуация, создававшаяся в физике к моменту Сольвеевского конгресса 1927 года, очень напоминала положение дел у средневековых алхимиков. Алхимики в свое время затратили массу труда (полезного и бесполезного). Они получили много интересных результатов, обнаружили большое число неведомых ранее веществ, сконструировали различные научные приборы. Однако алхимики

могли установить лишь сам факт появления, например, какого-нибудь нового химического соединения. Они могли дать только некоторый рецепт: возьмем определенные вещества в определенных пропорциях и произведем над ними определенные действия — тогда получится искомый продукт. Алхимики не были в состоянии понять, почему в их колбах появляется именно то, что они видят. Они осмысливали свою деятельность главным образом с помощью языка символов и аллегорий.

Например, пеликан, кормящий птенцов, символизировал циклическую перегонку вещества, призванную усилить мощь чудодейственной квинтэссенции. Процесс осаждения — испарения представлялся в виде единоборства в воздухе двух орлов. Летучие продукты горения изображали вóроны, а золу — человеческие скелеты. С помощью подобных аллегорий все становилось нагляднее, но было ли это пониманием?

Так и в физике 20-х годов. С одной стороны, использовались классические понятия: скорость электрона, его траектория. С другой стороны, имелись чисто квантовые эффекты — волновые свойства электрона, квантование энергии. Понимания того, как соотносятся между собой эти обе стороны действительности, не было, и приходилось работать с квантовой теорией, пользуясь чуждым ей языком классических образов. Но это то же самое, что представить циклическую перегонку в виде кормежки пеликанов.

О такой неприспособленности нашего повседневного языка для описания явлений микромира очень образно говорил Нильс Бор. Однажды Гейзенберг пригласил его покататься на лыжах в горах. Они жили в заброшенной альпийской хижине, которая соответствовала санитарным стандартам чисто символически. И вот, моя посуду после ужина, Бор сказал: «Наш язык очень напоминает мне это мытье посуды. У нас грязная вода и грязные полотенца, и тем не менее мы хотим сделать тарелки и стаканы чистыми. Точно так же и с языком. Мы работаем с неясными понятиями, оперируем логикой, пределы применения которой неизвестны, и при всем при том мы еще хотим внести какую-то ясность в наше понимание природы!»

До 5-го Сольвеевского конгресса 1927 года существовало несколько интерпретаций квантовой механики. Наши сегодняшние представления о природе микромира основаны на том варианте, главным идеологом которого

был Нильс Бор. И именно этой трактовке квантовой механики был дан ожесточенный бой на 5-м Сольвеевском конгрессе.

Основным противником боровского истолкования был Альберт Эйнштейн. А основным пунктом, против которого возражал Эйнштейн, был постулат о вероятностной природе микромира. В классической физике — физике макромира — всегда можно было абсолютно точно предсказать какое-нибудь явление, если о нем имелось достаточно информации. С вероятностями в классической физике тоже сталкивались. Однако это происходило только в тех случаях, когда просто по техническим причинам нельзя было получить полной информации о рассматриваемом процессе.

Согласно же взглядам Бора и его сторонников, для микрочастицы не существует самого понятия «путь», «траектория». Все, что можно узнать о поведении микрочастицы, — это вероятность ее появления в том или ином месте.

Причем вероятностная природа микромира имеет совершенно фундаментальный характер. Она возникает отнюдь не из-за того, что мы не очень хорошо знаем свойства микрообъектов или не имеем достаточной информации о начальных условиях их движения.

Вероятностный подход к описанию микромира совсем не означает, что само это движение микрочастиц абсолютно произвольно и непредсказуемо. Если известны вероятности, с которыми осуществляются разные события, то это всегда можно экспериментально проверить. Вероятность обнаружить частицу в точке x во время t связана с так называемой волновой функцией частицы $\Psi(x, t)$.

Если мы знаем волновую функцию, то, пользуясь уравнениями квантовой механики, можем определить вероятность появления частицы в любом месте и в любое время.

Однако, подчеркиваю, опять-таки только вероятность.

Именно этот момент казался Эйнштейну абсолютно немыслимым, и в течение всей своей жизни он не мог примириться с боровской интерпретацией квантовой механики. Эйнштейн настойчиво искал слабые места в системе построений квантовой механики, предлагал различные парадоксы, которые, по его мнению, доказывали несостоятельность вероятностного подхода. И, надо сказать, такая его активная оппозиция квантовомеханическим иде-

ям сыграла положительную роль. Физики стали лучше понимать смысл вероятностного подхода именно после дискуссий с Эйнштейном. Разрешая парадоксы, предложенные Эйнштейном, разбирая его критические замечания, Бор и его последователи стали сами лучше понимать сущность своего же учения, обрели четкие формулировки и веские доказательства своей правоты.

Как мы уже упоминали, апогей дискуссий о физической сути квантовой механики наступил на Сольвеевском конгрессе. Споры Бора с Эйнштейном на конгрессе вошли в историю, сейчас они обстоятельно изучаются всеми историками и философами естествознания. Несколько дней подряд Эйнштейн каждое утро предлагал Бору очередной мысленный эксперимент, который, по его мнению, неопровержимо доказывал несостоятельность вероятностной трактовки микромира. В течение дня Бор и поддерживавшие его физики напряженно искали решение, и каждый день к ужину Бор уже был в состоянии показать Эйнштейну, в чем заключалась его ошибка.

Нам для дальнейшего рассказа об истории возникновения Антимира очень важно не столько содержание этих легендарных дискуссий, сколько небольшой разговор, который произошел между Бором и Дираком в перерыве между лекциями. Бор поинтересовался, над чем сейчас работает Дирак, и когда узнал, что тот занят разработкой релятивистской теории электрона, то с удивлением заметил: «Но ведь эта проблема уже решена Клейном?» У Дирака не было времени объяснить свою точку зрения — началась очередная лекция, и Бор удалился обдумывать очередной парадокс Эйнштейна. Вот и все. Но эта встреча произвела на Дирака глубокое впечатление. Парадоксальность сложившейся ситуации заключалась в том, что задача, при разработке которой было создано знаменитое релятивистское уравнение Дирака, а затем и первая теория Антимира, считалась уже решенной! Считалось, что это уже пройденный этап и думать над ней — лишь напрасная трата времени! Дирак писал, что точку зрения Бора разделяли тогда большинство физиков, а возможно, и все.

Рассмотрим теперь все по порядку: что такое релятивистское уравнение, в чем состояло решение Клейна и почему Дирак был им недоволен?

Исторически сложилось так, что вначале квантовая механика развивалась независимо от теории относительности. Эффекты, которые рассматривает теория относительности, проявляются только при движении тел с большими скоростями, сравнимыми со скоростью света. Квантовая же механика изначально строилась как теория явлений, происходящих при малых скоростях. Однако в микромире частицы довольно часто обладают большими скоростями и релятивистские эффекты для них становятся уже весьма существенными, если не определяющими. Это было первым основанием для попыток построить релятивистскую квантовую механику. Кроме того, с чисто эстетической точки зрения была необходимость создать теорию, которая бы одновременно удовлетворяла принципам квантовой механики и теории относительности.

Интересно, что человек, который первым нашел релятивистское уравнение для квантовой частицы, не осмелился опубликовать свои результаты. Этим человеком был не кто иной, как Эрвин Шредингер, а не решился он поведать миру о своем релятивистском уравнении потому, что оно давало результаты, совершенно не согласующиеся с экспериментальными данными. В чем же дело?

Дело в том, что, получив свое релятивистское уравнение, он решил проверить, как оно работает на примере стандартной задачи расчета спектра уровней атома водорода. Эта проблема была хорошо изучена с экспериментальной стороны и казалась наиболее подходящей с теоретической точки зрения. Действительно, атом водорода — простейшая квантовомеханическая система: протон плюс электрон. Но Шредингер тогда еще не знал, что электрон имеет одно важное свойство — спин. Это совершенно фундаментальная характеристика каждой элементарной частицы, такая же, как, например, масса или заряд. Наглядно спин можно представить как некоторый вращательный момент, внутренне присущий частице. Правда, наглядность тут довольно сомнительная: вряд ли можно вообразить волчок, вращение которого нельзя ни ускорить, ни замедлить, да к тому же оно не связано ни с каким перемещением в пространстве! На заре квантовой механики действительно считали, что электрон вращается в буквальном смысле, как веретено. Дирак рассказывал, какую злую шутку сыграло это заблуждение

с «отцами-основателями» понятия спина С. Гаудсмитом и Д. Уленбеком.

В то время они работали в Лейдене и, написав в 1925 году небольшую работу о спине электрона, показали ее своему профессору П. Эренфесту. Пауль Эренфест сыграл особую роль в развитии квантовой механики. Этот человек обладал исключительно острым критическим умом и незаурядным чувством нового. Гипотеза о спине сразу же понравилась Эренфесту, и он посоветовал Гаудсмиту и Уленбеку рассказать о ней Конраду Лоренцу, большому физiku и крупному специалисту в теории электрона. В Гарлеме, куда приехали для разговора с Лоренцом Гаудсмит и Уленбек, их ждало сильное разочарование. Лоренц утверждал, что он уже рассматривал такую идею и пришел к выводу, что электрон не может иметь спина, потому что тогда скорость вращения его поверхности превышала бы скорость света. Это был убийственный аргумент. Расстроенные Гаудсмит и Уленбек, вернувшись в Лейден, попросили Эренфеста отдать назад их работу. Но оказалось уже поздно, Эренфест послал статью в печать. И хотя Лоренц был совершенно прав — в классическом смысле вращение электрона противоречит основному постулату теории относительности, — тем не менее спин у электрона существует. Это есть чисто квантовый эффект, не связанный с каким-либо перемещением поверхности электрона в пространстве.

Как мы говорили, спиновое вращение частицы нельзя ускорить или замедлить. Можно изменить его направление. Однако и направление спина изменяется далеко не произвольным образом. Например, электрон имеет спин $1/2$. Это означает, что проекция его спина на любую выбранную ось в пространстве может принимать только два значения: «по» и «против» или «вверх» и «вниз» (рис. 3). Все промежуточные значения для проекций спина электрона запрещены. С математической точки зрения такие свойства спина электрона приводят к тому, что он описывается более сложным образом, нежели привычные нам величины. Возьмем, например, скорость. Скорость тела — это вектор, то есть она характеризуется не только величиной, но и определенным направлением в пространстве (рис. 4). Однако если проекция вектора скорости \vec{v} на выбранную ось z может принимать любые значения и является просто числом, то проекция вектора спина \vec{s} на ось

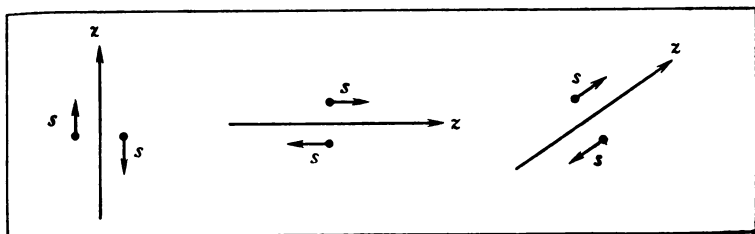


Рис. 3. У частицы со спином $s=1/2$ вектор спина может быть ориентирован либо по направлению оси z , либо против. Если в конкретной физической задаче нет выделенного направления, то ось z может выбираться произвольно

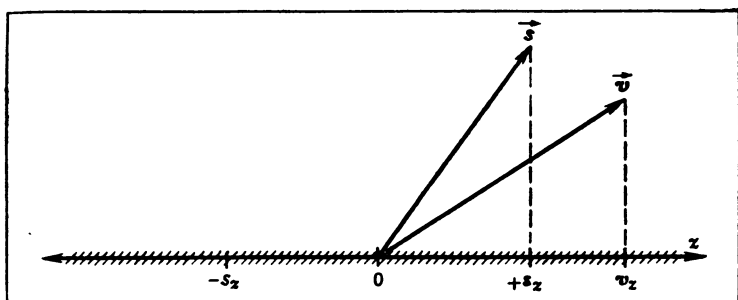


Рис. 4. Проекции вектора спина s на ось z могут принимать (в случае $s=1/2$) только два значения. Проекции же обычных векторов на ось z могут иметь любые значения в интервале от $v_z=-v$ до $v_z=+v$

z может принимать только значение $+s_z$ или $-s_z$. К тому же проекции спина на оси координат x , y и z не являются просто числами, как для обычных векторов, а матрицами. В случае спина $1/2$ их называют матрицами Паули (рис. 5).

Стало быть, для того чтобы полностью охарактеризовать движение электрона, мы должны знать не одну, а две волновые функции, которые соответствуют вероятности обнаружить электрон в некоторой точке x со спином «вверх» $\Psi_+(x, t)$ и со спином «вниз» $\Psi_-(x, t)$.

Когда Шредингер выполнял свои расчеты с релятивистским уравнением, всего этого он еще не знал и спин-овые эффекты, естественно, не учитывал. Именно это обстоятельство не позволило ему получить согласие с

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Рис. 5. Матрицы Паули

экспериментальными данными. Шредингер не был так смел, как Эренфест, и удачлив, как Гаудсмит и Уленбек. Он не стал публиковать работу о красивом релятивистском уравнении, дающем неправильные результаты. Вместо этого Шредингер проанализировал нерелятивистский случай и получил свое знаменитое (нерелятивистское) уравнение, которое вошло во все учебники квантовой механики.

Однако и релятивистское уравнение Шредингера тоже теперь находится в учебниках, правда, под именем открывших его заново в 1926 году О. Клейна и В. Гордона (независимо от них в том же году его получил наш известный физик В. А. Фок). Клейна и Гордона не смутило расхождение с опытом. Оказалось, что если релятивистское уравнение Шредингера применить к некоторым другим проблемам, то получаются вполне разумные результаты.

Итак, казалось бы, чего желать лучшего. У вас есть квантовое уравнение, удовлетворяющее релятивистским принципам, оно хорошо объясняет некоторый круг задач, и его решения согласуются с основными физическими законами. Правда, оказалось, что если вычислить согласно уравнению Клейна—Гордона вероятность обнаружения электрона в том или ином месте, то получалось, что она в принципе могла быть и отрицательной. С точки зрения здравого смысла отрицательная вероятность — такой же нонсенс, как квадратный круг. Но в те замечательные годы в квантовой механике появилось много идей, гораздо более «диких», чем отрицательная вероятность, и тем не менее прекрасно работающих. Поэтому совсем не удивительно, что научная общественность в целом была вполне удовлетворена уравнением Клейна—Гордона*. Даже Бор, как мы помним, удивился, когда

* Как мы сейчас понимаем, уравнение Клейна—Гордона — это релятивистское уравнение для частиц без спина (например, π -мезо-

узнал о том, что Дирак занимается релятивистской теорией электрона: «Но ведь эта проблема уже решена Клейном?»

Однако Дирак имел собственное мнение и никак не мог разделить общее благодушие, царившее вокруг этого вопроса. Причина заключалась в том, что отрицательные вероятности никаким образом не могли быть совмещены с любимой теорией Дирака — теорией преобразований.

Как мы знаем, волновая функция $\Psi(x, t)$ позволяет определить вероятность той или иной координаты частицы в определенный момент времени. А какова вероятность обнаружить у частицы наперед заданный импульс, энергию или угловой момент? Ответ на это и давала теория преобразований. Дирак показал, как, зная координатную волновую функцию $\Psi(x, t)$, можно найти вероятность того, что произвольная динамическая переменная (будь то импульс или энергия) приобретет заданное значение. По сути дела, эта работа Дирака привела квантовую механику к логическому завершению: теперь, зная $\Psi(x, t)$, вы могли определить все характеристики частицы. Однако если у электрона вероятность обрести какое-либо значение координаты становилась отрицательной, теорию преобразований применять было невозможно. С этим Дирак никак не мог смириться. «Теория преобразований стала моим любимым детищем (my darling), и меня не интересовала ни одна из теорий, которые не подходили для моего любимого творения», — говорил в своих воспоминаниях Дирак.

Надо подчеркнуть большое научное мужество Дирака. Ведь одно дело общие слова о том, что теория должна быть красивой и внутренне согласованной, а другое — когда вы начинаете вести конкретные исследования, которые большинство физиков считают полностью лишёнными смысла.

Однако Дирак глубоко верил, что красивая математическая теория не может быть неверной! В своих выступлениях он постоянно подчеркивает эту мысль. Подобно средневековому рыцарю, который повсюду сражался во имя красоты своей дамы, Дирак все время отстаивал принцип красоты физической теории как главный критерий ее истинности. В статье, посвященной столетию со-
на). Когда же его пытаются применить для описания поведения частиц со спином (например, электрона), тут-то и возникают все описанные выше несообразности.

дня рождения Эйнштейна, он ставит вопрос прямо: что произошло, если бы вдруг был сделан эксперимент, противоречащий такой красивой и логически замкнутой теории, как общая теория относительности? Следовало бы тогда объявить теорию в корне неверной? Дирак пишет: «Я сказал бы, что ответом на этот вопрос должно быть решительное **нет**. Любой, кто понимает глубокую гармонию, связывающую между собой явления природы и общие математические принципы, должен чувствовать, что если теория так прекрасна и изящна, как теория Эйнштейна, то она в основном безусловно верна. Если в каком-то случае применения такой теории появляется расхождение с наблюдениями, то его причиной, видимо, являются второстепенные факторы, которые относятся к этому применению и которые не были должным образом учтены, но никак не неправильность общих принципов теории».

УРАВНЕНИЕ ДИРАКА

Серьезный разговор об уравнении Дирака — это задача не для научно-популярной книжки. Однако мне очень хотелось, чтобы читатель получил некоторое представление о том, каким был ход рассуждений Дирака.

Моя задача облегчается тем, что наша промышленность в последнее время стала выпускать очень полезную новинку, а именно ранцы для школьников, на которых выписаны важнейшие математические и физические формулы: сумма квадратов $(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$, разные тригонометрические уравнения, а также знаменитое соотношение теории относительности $E=mc^2$. Я постараюсь рассказать о том, как было получено уравнение Дирака, практически не выходя за рамки формул, написанных на школьных ранцах.

Дирак вспоминал, что начал работать над своей релятивистской теорией, «играясь с уравнениями, а не пытаясь ввести какую-нибудь определенную физическую идею». В чем же состояла эта игра Дирака?

Он хотел найти такое уравнение, которое, во-первых, было бы релятивистским, то есть удовлетворяло принципам теории относительности, во-вторых, подчинялось бы требованиям его любимой теории преобразований и, наконец, в-третьих, было бы квантовомеханическим уравнением, описывающим движение электрона.

Но что значит «релятивистское уравнение»? Одним из характерных признаков такого уравнения является то, что в него должны входить совершенно равноправным образом как пространственные координаты x, y, z , так и временная координата t . Далее, уравнение должно быть квантовомеханическим, то есть содержать волновую функцию электрона $\Psi(x, y, z, t)$.

Гораздо труднее дело обстоит с непременным желанием Дирака, чтобы будущее уравнение подчинялось теории преобразований. Однако было известно, что, сделав соответствующие квантовомеханические трансформации, уравнение Клейна—Гордона можно получить непосредственно из знаменитого соотношения теории относительности $E=mc^2$. Надо заметить только, что это уравнение связывает энергию и массу покоящегося тела. Если же тело движется со скоростью \vec{v} , то есть имеет импульс $\vec{p}=m\vec{v}$, то соответствующее релятивистское уравнение будет:

$$E^2 = \vec{p}^2 + m^2 \quad (1)$$

(для удобства мы работаем в системе единиц, где скорость света $c=1$). Именно из уравнения (1) можно вывести уравнение Клейна—Гордона, но оно, как мы знаем, приводит к отрицательным вероятностям.

С математической точки зрения все эти неприятности происходят из-за того, что уравнение Клейна—Гордона содержит **квадрат** энергии — E^2 . Вот если бы найти релятивистское уравнение, в которое энергия E входила бы в первой степени... Тогда бы можно было удовлетворить требования теории преобразований и избежать отрицательных вероятностей. Но в чем проблема? Давайте извлечем квадратный корень из левой и правой части уравнения (1), и получим E в первой степени

$$E = \sqrt{\vec{p}^2 + m^2} = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + m^2}, \quad (2)$$

здесь p_x, p_y, p_z — проекции импульса \vec{p} на оси координат (рис. 6).

Всем хорошо уравнение (2), кроме одного: в нем нарушена нужная нам «демократия» между пространственными и временной координатами. Дело в том, что в квантовой механике проекции импульса p_x, p_y, p_z связаны с пространственными координатами x, y, z , а энергия E —

с временной координатой t . Видно, что в уравнение (2) энергия E входит в первой степени, а проекции импульса p_x , p_y , p_z — во второй. Следовательно, здесь нет равноправия между координатами x , y , z и t .

Для восстановления «справедливости» надо найти такое выражение X , куда бы проекции p_x , p_y , p_z входили в первой степени. Кроме того, должно выполняться равенство

$$E = X, \quad (3)$$

то есть

$$X^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + m^2. \quad (4)$$

Именно с этой задачей и начал «играться» Дирак, пытаясь найти подходящее выражение X , удовлетворяющее условиям (3) и (4). Довольно скоро он заметил такой интересный факт. Если взять известные нам матрицы Паули σ_x , σ_y и σ_z (см. рис. 5), то комбинируя их с проекциями импульса p_x , p_y и p_z , можно получить любопытное соотношение:

$$\underbrace{(\sigma_x p_x + \sigma_y p_y + \sigma_z p_z)^2}_{X^2(?)} = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2.$$

Видно, что это выражение очень похоже на уравнение (4), но только оно содержит сумму трех квадратов, а нам нужно получить сумму четырех квадратов. Тем не менее Дирак почувствовал, что находится на правильном пути и надо искать именно в этом направлении, то есть попытаться сконструировать подходящее выражение, используя матрицы Паули.

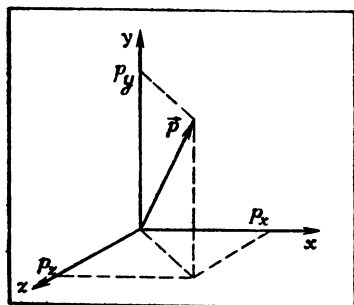


Рис. 6. Проекции импульса \vec{p}

В течение нескольких недель он пытался найти такое соотношение, но безуспешно. И тут Дирак сделал решающий шаг. То, что он придумал, очень напоминает решение известной задачи, как из шести спичек сложить четыре равносторонних треугольника. Как бы вы ни пытались расположить спички в плоскости, у вас ничего не получится. Единственный выход — это преодолеть своеобразный психологический барьер и расположить спички в пространстве, построив из них пирамиду (рис. 7). Точно так же и в нашем случае.

Если вы вернетесь к рис. 5, на котором изображены матрицы Паули, то увидите, что это матрицы два на два, то есть у них 2 столбца и 2 строки. Дирак же решил сконструировать из них матрицы большей размерности, состоящие из 4 столбцов и 4 строк. Оказалось, что с помощью таких матриц легко получается выражение для квадратного корня из суммы четырех квадратов:

$$\underbrace{(\gamma_1 p_x + \gamma_2 p_y + \gamma_3 p_z + \gamma_4 m)^2}_{X^2} = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 + m^2,$$

где $\gamma_1, \dots, \gamma_4$ — некоторые матрицы 4×4 , построенные из матриц Паули.

Вот так было открыто одно из самых основных уравнений современной физики. Как потом говорил Дирак: «На нем стоит большая часть физики и вся химия». Мы показываем это знаменитое уравнение Дирака на рис. 8.

Заметим, что в уравнение Дирака вошли матрицы Паули, но, как мы говорили раньше, они связаны со спином $1/2$. Поэтому не удивительно, что решения уравнения Ди-

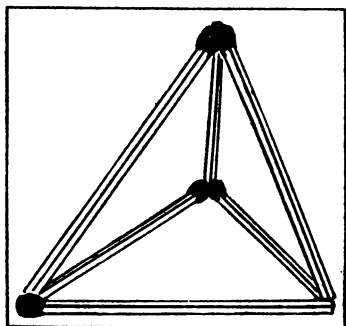


Рис. 7. Решение задачи о построении равносторонних треугольников

$$\left\{ i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_1 \frac{\partial}{\partial x_1} - \gamma_2 \frac{\partial}{\partial x_2} - \gamma_3 \frac{\partial}{\partial x_3} \right) + \gamma_4 m \right\} \Psi(\vec{r}, t) = 0$$

Рис. 8. Знаменитое уравнение Дирака

рака описывают движение частицы со спином $1/2$. Удивительно другое: в намерение Дирака не входило создание теории частиц со спином. Как мы видели, он хотел просто привести в соответствие релятивистские принципы и требования его любимой теории преобразований. И этот синтез вдруг дал неожиданные плоды. Оказалось, что существование фундаментальной характеристики частицы — спина — естественным образом возникает при объединении квантовой механики и теории относительности. Это был подлинный триумф теории Дирака!

На современников открытие Дирака произвело потрясающее впечатление. И в большей мере из-за того, что путь, по которому пошел Дирак, был совершенно неожиданным. Выдающийся современный физик Юджин Вигнер вспоминает, что именно в то время, совместно с другим большим физиком Паскуалем Йорданом, они тоже пытались построить релятивистское уравнение для частиц со спином $1/2$. Как мы уже говорили, такие частицы имеют только два состояния (спин вверх—спин вниз), поэтому вполне естественно было полагать, что искомое уравнение будет тоже двухкомпонентным. Совершенно случайно они узнали о работе Дирака: Макс Борн попросил его написать отзыв о работе одного автора. Дирак прислал письмо с советами, как сделать статью более «читаемой», и в конце письма в десяти строчках упомянул о своей работе по теории электрона и выписал свое четырехкомпонентное уравнение. «Мы с Йорданом были просто ошарашены (were quite flabbergasted)», — пишет Вигнер. В конце концов Йордан сказал: «Да, конечно, хорошо было бы, если бы мы нашли это уравнение. Но вывод его так красив, а само оно содержит столько смысла, что мы вообще должны быть счастливы, что оно существует».

А теперь, дорогой читатель, попробуйте поставить себя на место Дирака и угадайте, как он реагировал на

свое открытие? Воскликнул «Эврика!», побежал за шампанским или просто лег спать? Ни за что не угадаете!

Известный английский писатель Чарлз Сноу вспоминает, как Дирак однажды признался ему, что он почувствовал, когда вывел свое знаменитое уравнение. Прежде всего Дирак сразу прикинул, описывает ли оно спектр энергий атома водорода. Оказалось, все в порядке. «И тут,— говорит Дирак,— я так страшно испугался, что не мог пошевелинуться!» Но почему? Дирак объясняет Сноу, что, занимаясь творческой работой, человек всегда испытывает большие сомнения и большие надежды. Причем всегда наибольшие опасения охватывают исследователя именно в тот момент, когда он должен сделать решающий шаг вперед. В качестве примера Дирак говорит о К. Лоренце, который имел в своих руках все, чтобы создать специальную теорию относительности, но так и не отважился сделать решающий шаг.

Итак, оказалось, что квантовое уравнение, записанное с учетом требований теории относительности, естественным образом описывает поведение частиц со спином. Это было для физиков приятным сюрпризом. Но релятивистское начало в квантовой теории порождало целый ряд новых проблем. Как признавался Дирак, осмысление физических выводов, которые следуют из его уравнения, заняло у него гораздо больше времени и сил, чем вывод самого уравнения. Эти исследования «неприятных» следствий, возникающих при решении релятивистского квантового уравнения для электрона, и привели к созданию первой теории Антимира — теории дырок.

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГИИ, «ОСЛИНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ», ТЕОРИЯ ДЫРОК И ПУЗЫРЕК С ЛЕКАРСТВАМИ

Осень чувствовалась везде. И в голых ветках деревьев, и в шуршании листьев под ногами, но главное — воздух становился особенно прозрачным и холодноватым. Хорошо думалось. Двое вышли из лесной аллеи и не спеша стали подниматься по невысокому холму. Они шли молча, погруженные в свои мысли. Однако тишину все время нарушало какое-то слабенькое, но достаточно противное треньканье.

— Извините, профессор,— сказал более молодой из мужчин.— Я немного простыл и вынужден носить с собой склянку с аспирином.

Профессор, тоже достаточно молодой человек, лет 30, немного помолчал. Затем серьезно заметил: «Полагаю, шум от вашего пузырька будет максимальным, когда он заполнен таблетками наполовину. Не так ли?»

Английский физик Рудольф Пайерлс, рассказавший эту маленькую историю об одной прогулке Поля Дирака и его ассистента, замечает: «Мне стало ужасно интересно, произошел ли этот случай до или после изобретения Дираком теории «дырок». Я навел справки, и оказалось, что это было в середине 30-х годов, теория «дырок» уже была создана, и замечание Дирака становится понятным».

В этой главе мы постараемся объяснить читателю, в чем же заключается аналогия между дребезжащим пузырьком с таблетками и теорией дырок.

Уже в своей классической работе по релятивистской теории электрона Дирак отмечал существование двух трудностей. Первая трудность состояла в том, что квантовая механика того времени не могла правильным образом учесть эффекты спина электрона. Вторая трудность возникала из-за того, что в релятивистском подходе электрон получал возможность иметь отрицательную энергию. В предыдущей главе мы видели, как блестяще справился Дирак с решением первой проблемы. Однако проблема отрицательных энергий не давала покоя Дираку еще в течение нескольких лет.

Понять, как возникают отрицательные энергии и к каким неприятным последствиям это приводит, можно на примере хорошо знакомого нам релятивистского соотношения, связывающего энергию частицы E с ее массой m и импульсом p (для последующего изложения нам не важно, что импульс частицы — это вектор, и мы будем опускать стрелку над буквой p)

$$E = \sqrt{p^2 + m^2}.$$

Еще со школьной скамьи мы знаем, что перед квадратным корнем можно поставить либо знак плюс, либо минус. То есть

$$E = \pm \sqrt{p^2 + m^2}. \quad (1)$$

Следовательно, релятивизм не запрещает частице иметь отрицательную энергию. Однако в неквантовой теории (то есть в классической физике или в релятивистской теории) энергия частицы меняется непрерывно, начиная с некоторого минимального значения. Как нетрудно ви-

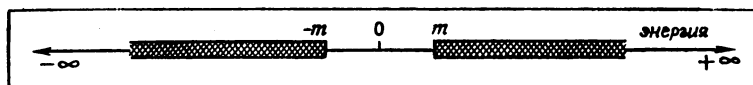


Рис. 9. Ось энергий. Заштрихованные участки этой прямой соответствуют тем значениям энергии, которые может иметь релятивистская частица с массой покоя m

деть, минимальной энергией обладает покоящаяся частица, то есть у которой $p=0$. Тогда

$$E_{\min} = \pm m.$$

На рис. 9 видно, что область $E>0$ отделена от области $E<0$ промежутком в $2m$ и частица с положительной энергией никогда не сможет попасть в область отрицательных E , если ее энергия меняется непрерывно. В квантовой теории энергия частицы меняется скачком, и у нее в принципе есть возможность «перепрыгнуть» из области $E>0$ в область $E<0$. Поэтому при решении уравнения Дирака возникают две полностью равноправные с математической точки зрения возможности: либо частица движется как обычно, с положительной энергией, либо с отрицательной. А что такое движение частицы с отрицательной энергией?

Представить это себе довольно трудно, в обычной, повседневной жизни все тела движутся только с положительной полной энергией. Правда, когда мы сталкиваемся с квантовыми явлениями, наше воображение отказывает во многих случаях. Поэтому то, что мы не в состоянии представить частицу с отрицательной энергией, само по себе не является каким-то криминалом. Однако строгое математическое рассмотрение показывает, что электрон с отрицательной энергией ($E<0$) должен двигаться во внешнем поле как частица с положительным зарядом. Тогда при переходе электрона из области с $E>0$ в область $E<0$ знак его заряда должен измениться на противоположный. Это противоречит закону сохранения электрического заряда. Таким образом, состояния с отрицательной энергией страшны не столько сами по себе, сколько тем, что переходы в эти состояния нарушают законы сохранения. Вот если бы как-то удалось запретить электрону совершать скачки из области положительных энергий!..

Неприятный квадратный корень в уравнении (1) приводит к возникновению еще одной экзотической возможности. Если перед квадратным корнем в (1) выбрать знак минус и положить $p=0$, то получим

$$E = -m.$$

Это означает, что если энергия E положительна, то масса m должна быть отрицательной! Представить себе в нашем мире частицу с отрицательной массой еще труднее, чем с отрицательной энергией.

Рассмотрим, например, хорошо известный закон Ньютона

$$\vec{F} = m \vec{a}.$$

Стрелки над буквами, как обычно, означают векторы, и если $m > 0$, то ускорение a направлено в ту же сторону, что и сила F . Но если масса отрицательна, то

$$\vec{F} = -m \vec{a}.$$

Сила, приложенная к телу, будет вызывать его движение в противоположном направлении! Если бы мы захотели сыграть в футбол с мячом отрицательной массы, то, чтобы забить его в чужие ворота, надо было бы бить мяч в направлении своих ворот. Если бы вы попытались остановить мяч отрицательной массы, то он полетел бы еще быстрее, и наоборот, при ударе с лета такой мяч прилип бы к ноге. Вообще говоря, нам вряд ли удалось бы позабавиться антифутболом. Мяч отрицательной массы в поле тяжести Земли просто взял бы и воспарил вверх (рис. 10).

Теперь, я думаю, понятно, почему Г. Гамов метко присвоил электронам с отрицательной массой прозвище «ослиные электроны».

Как же все-таки ликвидировать трудности с отрицательными энергиями и отрицательными массами? Не допускать же в храм науки «ослиные частицы».

И вот здесь Дирак опять предлагает совершенно неожиданное решение. Одним из основных свойств частиц с полущелым спином является то, что никогда любые две из них не могут находиться в одном и том же состоянии. Если у таких частиц одинаковые энергии, то проекции спина должны быть разными или, наоборот, если проекции спина одинаковы, то энергии частиц должны отли-

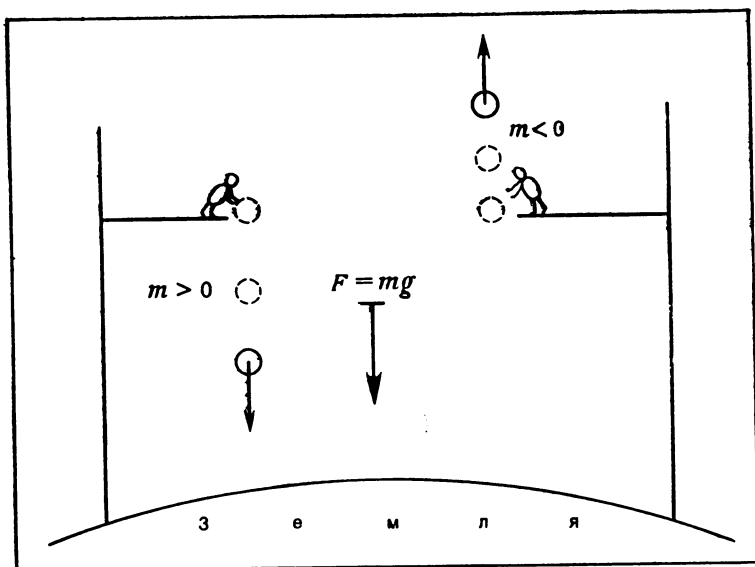


Рис. 10. Тело с отрицательной массой под действием силы притяжения F должно двигаться в сторону, противоположную направлению действия силы, то есть оно не падает на Землю, а, наоборот, улетает от нее

чаться. Это фундаментальное свойство частиц с полуцелым спином называется принципом Паули.

Так вот, Дирак смело предположил, что в нашем мире все состояния с отрицательной энергией полностью заняты электронами. Поэтому в силу принципа Паули электрон из области положительных энергий никогда не сможет перепрыгнуть в область отрицательных энергий. В этом смысле электрон с положительной энергией похож на командировочного, который безнадежно томится в холле переполненной гостиницы — все номера заняты.

Итак, проблема с отрицательными энергиями решается следующим образом. Само существование состояний с отрицательной энергией, по Дираку, разрешается, переходы в эти состояния запрещены. Однако какой ценой достается это решение! Посмотрим еще раз на ось энергий (см. рис. 9), ее положительный и отрицательный концы уходят в бесконечность. Следовательно, для того чтобы электрон совершенно никуда не мог деться из области

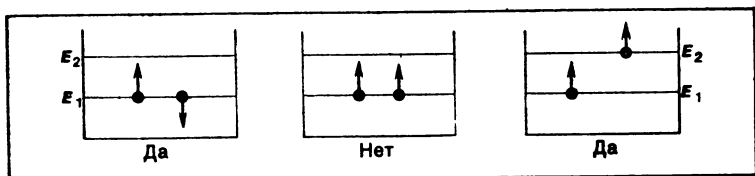


Рис. 11. Принцип Паули запрещает двум частицам с полуцелым спином находиться в одном и том же состоянии с одинаковыми энергиями и одинаковыми проекциями спина

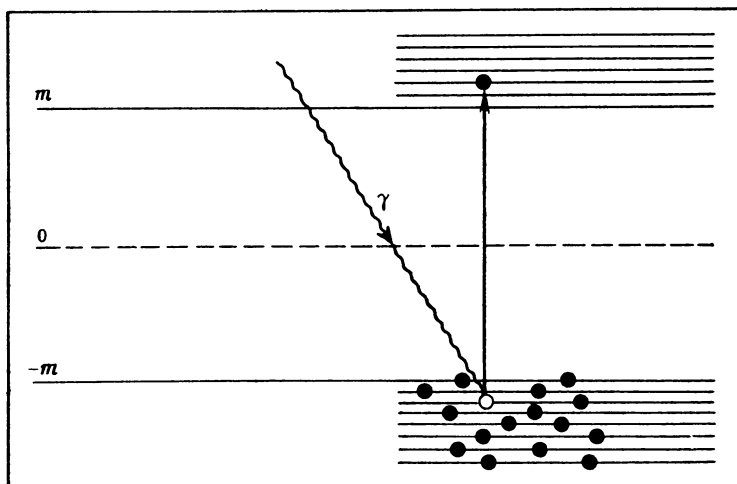


Рис. 12. Гамма-квант с большой энергией способен выбить электрон из области отрицательных энергий и перевести его в область $E > 0$. При этом в «море» электронов с отрицательной энергией одно состояние оказывается незаполненным. Образуется дырка

положительных энергий, число заполненных состояний с отрицательной энергией должно быть бесконечно! Это означает, что вакуум должен обладать бесконечным отрицательным зарядом, бесконечной отрицательной энергией и бесконечной плотностью. Тем не менее Дирак утверждает, что такой «дикий» вакуум не испортит никакие физические характеристики любой системы. Его аргументы таковы: все, что мы можем наблюдать, это отклонения, допустим, заряда или энергии системы от заряда или энергии вакуума. Но само отклонение всегда остается

ся неизменным, оно не зависит от того, каков заряд или энергия вакуума.

Если удивительная ситуация, предложенная Дираком, и в самом деле осуществляется, то иными должны быть все наши представления о вакууме. Раньше это было пустое пространство, место без вещества, теперь же, оказывается, оно битком набито электронами. Именно потому вакуум пуст, в нем ничего не происходит. Подобно пузырьку, туго заполненному таблетками, вакуум «не дребезжит»! (Вы вспоминаете рассказ Р. Пайерлса, который мы привели в начале главы? Теперь его суть должна быть вам ясна.)

Однако все-таки существует процесс, который позволит нам судить, так ли уж вакуум совершенно пуст или «внутри» него что-нибудь да есть.

Возьмем для этого гамма-квант большой энергии E^λ , достаточной, чтобы преодолеть энергетическую щель шириной $2m$ и вытащить электрон из вакуума (то есть $E_\gamma \geq 2m$). Тогда в области положительных энергий появится электрон, а в отрицательной области образуется дырка (рис. 12). Но каков физический смысл этой дырки? Рассмотрим подробно процесс ее появления.

1. Исходное положение — никаких частиц нет: заряд 0, масса 0.

2. Появился гамма-квант и выбил электрон: заряд $-e$, масса $+m$.

3. Посчитаем электрические заряды:

гамма-квант	заряд	0,
электрон	заряд	$-e$,
дырка	заряд	$+e$.

4. Посчитаем баланс энергий:

был гамма-квант	$E_\gamma \geq 2m$,
стал электрон	$E_e = m$,
осталось для дырки	$E_d \geq m$.

5. Следовательно, у дырки заряд $+e$, масса $\geq m$.

Таким образом, если вакуум «не пуст», то γ -кванты могут выбивать из него электроны и частицы с положительным зарядом и положительной массой. Однако если величина положительного заряда предсказывается для дырки совершенно однозначно — она равна заряду электрона, взятому с положительным знаком, — то масса дырки точно не определена. Видно только, что ее масса должна быть больше или равной массе электрона.

Подведем итог: теория электрона Дирака имеет трудности — наличие отрицательных энергий. Чтобы их избежать, заполним все состояния с отрицательной энергией электронами. Но если вы попытаетесь «вытащить» такой электрон из вакуума, то происходит некоторый фокус — в конечном состоянии появляется не одна частица, а две: обычный электрон и еще некоторая частица с зарядом $+e$ и положительной массой (дырка). Что это за частица?

Тут надо сделать некоторое отступление.

У меня на столе лежит справочник элементарных частиц, датированный апрелем 1980 года. В нем я насчитал около 170 элементарных частиц. Если еще учесть античастицы, то эту цифру надо увеличить раза в два. Ясно, что открытие еще одной или нескольких элементарных частиц теперь никого не удивляет, разве что они вдруг окажутся с какими-нибудь совсем экзотическими свойствами. Сейчас любой пик на экспериментальной кривой с легкостью объясняют существованием новой частицы.

Совершенно другой психологический климат был во времена накануне открытия позитрона. Электрон, протон и фотон — вот все элементарные частицы, известные тогда физикам. Собственно говоря, большего они и не желали. Есть квант света — фотон, квант отрицательного электричества — электрон, а положительного — протон. Что еще нужно? Физики были внутренне не подготовлены к тому, что элементарных частиц окажется так много. Поэтому совсем не удивительно, что Дирак сообразно с царившими тогда настроениями не стал отождествлять дырку с какой-то новой частицей, а сначала решил, что дырки — это обычные протоны. Такое предположение имело несколько привлекательных моментов. Во-первых, если оно оказывалось справедливым, то теория Дирака становилась применимой не только к электронам, но и к протонам! То есть вы получали всеобъемлющую теорию как отрицательного, так и положительного электричества. Во-вторых, чисто психологический момент: не нужно было вводить ничего лишнего.

Но напомним, что дырка — это незаполненное электронное состояние. И каким образом это электронное состояние приобретает массу протона, который почти в 2000 раз тяжелее электрона, было не ясно.

Кроме того, главная трудность, которую такая трактовка дырок не могла преодолеть, состояла в следующем.

Если интерпретация Дирака правильна, то обычный атом водорода, оказывается, есть композиция из электрона и дырки. Но, как мы говорили, дырка — это незанятое электронное состояние в области отрицательных энергий. Из энергетических соображений электрону выгодно «свалиться» в эту дырку, то есть занять состояние с меньшей энергией. Точные расчеты, сделанные Ю. Оппенгеймером, показали, что уже через 10^{-10} секунды электрон в атоме водорода свалится в протон-дырку и испустит при этом излучение, то есть атом исчезнет. Отсюда следовало, что дираковские дырки никак не могут быть протонами, а так как новых частиц понапрасну никто изобретать не хотел, то вся теория дырок была поставлена под серьезное сомнение и подвергнута, так сказать, дружескому вышучиванию.

Паули предложил ввести в действие такой критерий истинности теории — каждая теория должна быть немедленно применена к телу теоретика, который ее создал. Тогда применение теории Дирака к телу самого Дирака оставило бы от него одни гамма-кванты!

Бор придумал новый способ. Как Поймать Слона Живым. Метод заключался в следующем: около тропы, по которой слоны ходят на водопой, надо установить большой плакат с изложением дираковской теории дырок. Когда слон, который вообще есть очень умное животное, пойдет пить воду и прочтет плакат, он непременно будет ошеломлен и несколько минут будет стоять без движения. В это время охотники выскакивают из-за кустов и опутывают ноги слона толстыми веревками.

Несмотря на то что друзья изощрались в насмешках, Дирак не потерял веру в теорию дырок и в конце концов нашел в себе смелость сделать правильный вывод. Хотя в то время такой вывод казался совершенно неправдоподобным, но тем не менее он логически вытекал из его теории.

В статье, опубликованной в Трудах Королевского общества Великобритании в 1931 году, Дирак писал:

«Дырка должна быть новым типом частицы, неизвестной еще в экспериментальной физике, у нее должна быть та же масса, что и у электрона, а заряд — противоположный заряду электрона. Мы можем называть такие частицы антиэлектронами, потому что они быстро рекомбинируют с электронами, но мы можем получить их экспериментально в высоком вакууме, где они будут впол-

не стабильны и доступны для изучения. Столкновение двух жестких гамма-лучей (с энергией по крайней мере полмиллиона вольт) должно привести к одновременному рождению электрона и антиэлектрона... протоны же должны иметь свои собственные состояния с отрицательной энергией, все из них полностью заняты, а незанятое состояние будет вести себя как антипротон».

Эти строки Дирака трудно переоценить. Поражаешься, насколько четко и ясно Дирак представлял себе физику вопроса. Мало того, что он предсказывает существование новой, еще неоткрытой, частицы — антиэлектрона, Дирак указывает на то, какие свойства она будет иметь и в каком процессе может быть обнаружена. Наконец, предсказание антипротона! Дирак не побоялся довести до логического конца и этот момент. Он и здесь остался строго последователен и верен самому себе. Абсолютно все предсказания Дирака оказались правильными. Поэтому эти строчки кажутся сейчас просто магическими.

Хочу заметить, что здесь впервые в физической литературе появился и сам термин «античастица»! Сейчас слова с приставкой «анти» — антивещество, антимир, антиматерия — прочно вошли в наш повседневный лексикон (даже в стихотворения для детей!). Я думаю, будет полезно подчеркнуть, что этим мы обязаны именно Полю Дираку.

Итак, дело оставалось за малым — надо было найти эту античастицу.

ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА

Открытие первой античастицы — позитрона — это уникальный случай в истории физики. Подобной ситуации не возникало при обнаружении ни одной из известных сейчас элементарных частиц.

Начнем с того, что неизвестно, кто первым увидел позитрон. Считают, что его видели и наш известный физик, академик Д. Скобельцын, и Ф. Жолио-Кюри, и Л. Мейтнер, и Р. Милликен, и еще целый ряд исследователей. Но лишь Карл Андерсон в 1932 году осмелился заявить, что он наблюдал частицу с положительным зарядом и массой, близкой к массе электрона. В чем же дело? Как удавалось экспериментаторам до Андерсона видеть и в то же время «не замечать» существование позитрона?

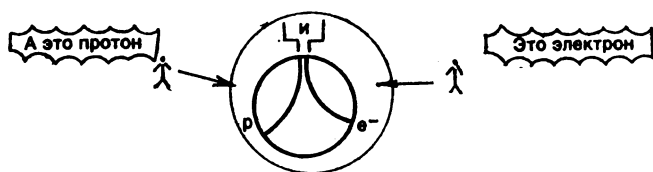


Рис. 13. Следы заряженных частиц в камере, помещенной в магнитное поле. Буквой «И» обозначен источник частиц

Напомним читателю, что в магнитном поле заряженные частицы двигаются по кривым траекториям. Положительно заряженные частицы отклоняются в одну сторону, отрицательные — в другую. Причем чем больше энергия частицы, тем меньше искривляется ее трек.

Так вот, проводя измерения с радиоактивными источниками, физики большей частью видели картинку, схематично изображенную на рис. 13.

Но иногда наблюдались следы, которые были очень похожи на треки от электронов, но закручивались они в другую сторону (рис. 14).

Такие следы должны давать частицы с положительным зарядом, но тогда была известна только одна частица, обладающая положительным зарядом, — протон. Однако аномальные треки отличались от следов, которые обычно давали протоны. Дело в том, что при одинаковой энергии след от протона должен выглядеть намного толще, жирнее, чем след от электрона. Аномальные треки были как раз очень похожи на тонкие следы, которые оставляли электроны. Почему же эти треки закручиваются в магнитном поле в другую сторону? Находчивые экспериментаторы объяснили аномальные треки так.

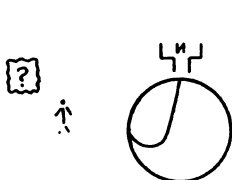


Рис. 14. Аномальный трек

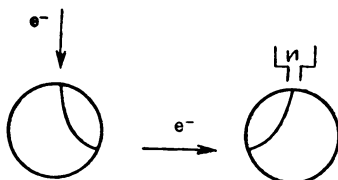


Рис. 15. «Объяснение» аномальных событий

Если электрон идет из источника, он действительно отклоняется вправо, но если он прилетел откуда-то сбоку, то магнитное поле отклонит его влево, в направлении источника, и создается иллюзия, будто бы источник испустил необычную частицу с положительным зарядом (рис. 15). Поэтому считалось, что аномальные события — это просто какие-то случайные электроны, двигающиеся в направлении источника, а не из него. Одним словом, фон и некоторая «грязь».

На самом деле, за всеми этими рассуждениями скрывалась все та же чисто психологическая трудность. Физики не были готовы к тому, что элементарных частиц будет так много. Поэтому они долгое время не обращали никакого внимания на аномальные треки. Хотя простой подсчет вероятности фоновому электрону попасть точно в маленькое окошко источника сразу показал бы, что здесь что-то не так.

Весьма любопытная деталь: Дирак в своих воспоминаниях говорит, что слышал об электронах, «падающих обратно в источник», на одном из коллоквиумов в Кавендишской лаборатории. Дирак уже не помнит точно, кто делал тогда доклад, но, по его мнению, речь шла о работах Д. Скобельцына.

Действительно, первый важный шаг на пути к открытию позитрона был сделан в 1927 году, когда Д. В. Скобельцын получил первые фотографии космических лучей — элементарных частиц, которые падают на Землю из космоса. Именно Скобельцын разработал ту методику регистрации космических лучей, которая впоследствии была использована в опытах Андерсона. Основу установки Скобельцына составляла так называемая камера Вильсона, помещенная в магнитное поле.

Камера Вильсона была первым прибором, с помощью которого физики смогли непосредственно наблюдать следы элементарных частиц. Она представляла собой небольшой сосуд, заполненный парами какой-либо жидкости. Например, в опытах Андерсона использовалась камера Вильсона размерами примерно с нашу книжку — $17 \times 17 \times 3$ сантиметра. Процессы, происходящие в камере Вильсона, очень похожи на те, которые каждый из нас наблюдал, открывая бутылку шампанского или лимонада. Мы видим, что, когда из бутылки вылетает пробка, над горлышком появляется облачко тумана. Это облачко возникает из-за того, что газ, сжатый в бутылке, быстро

расширяется. При этом его температура резко понижается и содержащийся в газе водяной пар частично конденсируется в виде тумана. В камере Вильсона тоже происходит быстрое расширение рабочего объема, температура газа тоже резко падает, но конденсация пара идет только по следу частицы. Дело в том, что заряженная частица, проходя через камеру, оставляет за собой шлейф из ионизованных атомов газа. Именно эти скопления ионов и являются затравочными центрами, на которых происходит конденсация пара.

Работы Скобельцына получили широкое признание, и многие физики стали вести дальнейшие исследования космических лучей, используя камеру Вильсона в магнитном поле. В Англии этим занялись сотрудники Кавендишской лаборатории П. Блэкетт и Дж. Оккиалини, в США аппаратуру для исследования космических лучей стали разрабатывать Р. Милликен и К. Андерсон.

Если Роберт Милликен был в то время уже маститым ученым, нобелевским лауреатом, всемирно известным своими работами по измерению заряда электрона, то молодой физик шведского происхождения Карл Андерсон только-только успел защитить диссертацию. В 1930 году, когда они с Милликеном начали свою работу с космическими лучами, Андерсону было всего лишь 25 лет. У него уже был опыт работы с камерой Вильсона, которую он использовал для изучения электронов, выбиваемых из вещества рентгеновскими лучами. После защиты диссертации Андерсон намеревался начать исследования процессов рассеяния гамма-лучей, испускаемых радиоактивными ядрами. И только по настоянию Милликена, который был его руководителем, Андерсон занялся космическими лучами. По всей видимости, это уникальный случай, когда вмешательство начальства привело к тому, что подчиненный получил Нобелевскую премию.

Первые результаты Андерсон и Милликен получили летом 1931 года. Они увидели следы от частиц как с отрицательным, так и с положительным зарядом. Аномальные треки тоже не заставили себя долго ждать. В ряде случаев на фотографиях было видно, что частицы выходят из одного центра, и треки положительно заряженных частиц гораздо сильнее походят на треки от электронов, чем от протонов. Вначале Андерсон и Милликен, как и все, считали, что это следы от электронов, которые попадают в камеру не сверху, из космоса, а снизу — от Земли,

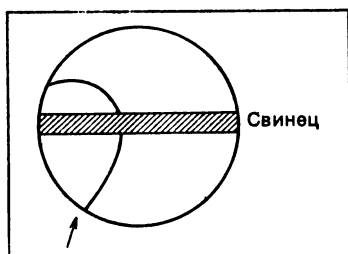
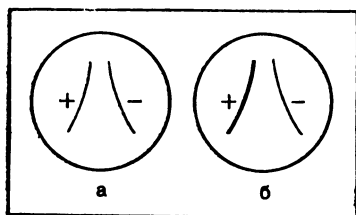


Рис. 16. Схема фотографий Р. Милликена. Левый след на рис. а, по мнению Милликена, принадлежал протону, а правый — электрону. На самом деле, если бы эта интерпретация была верна, трек протона должен быть гораздо толще, как на рис. б

Рис. 17. Схема первой фотографии позитрона. Стрелкой помечено место вхождения позитрона в камеру

Блэкетт и Оккиалини тоже наблюдали аналогичные события и еще удивлялись, почему так много электронов идет «от пола».

Осенью 1931 года Милликен приехал в Европу и на своих лекциях в Париже и Кембридже показывал такие фотографии — рис. 16. Милликен считал, что след от положительно заряженной частицы принадлежит протону с высокой энергией. Однако уже тогда Д. Скобельцын возражал Милликену, указывая на то, что трек от протона с той энергией, которую приписывал ему Милликен, должен быть раза в два толще, чем трек от электрона, который также виден на той же самой фотографии. Между тем оба следа на фотографиях Милликена выглядели абсолютно одинаково.

Аппаратура Милликена и Андерсона регистрировала все больше и больше таких непонятных событий, и в конце концов Андерсон решился заняться ими всерьез и окончательно выяснить, в каком направлении движутся эти загадочные частицы.

Для этого он поставил в камере свинцовую пластинку. По иронии судьбы позитрон влетел в камеру именно снизу, от Земли, но интерпретация этого события теперь была однозначной. На рис. 17 дана схема знаменитой фотографии Андерсона, полученной им вечером 2 августа 1932 года. Видно, что в верхней части камеры трек более изогнут, то есть частица имела там меньшую энергию. Она прилетела в направлении, показанном стрелкой, и потеряла энергию в свинце. Было определено, что, хотя

частица имеет положительный заряд, это не протон. (Трек частицы вверху был в 10 раз длиннее, чем можно было ожидать от протона.) Оказалось, что ее масса близка к массе электрона. Тут рука сама тянется написать: «в полном соответствии с предсказаниями Дирака». Однако сам Андерсон сделал совсем другой вывод. И это место его статьи читается сейчас с большим недоумением. Андерсон предположил, что он наблюдал вылетание позитрона, который являлся составной частью... нейтрона! А нейтрон, по Андерсону, состоит из позитрона и «отрицательного протона». Последний пока еще не обнаружен, и Андерсон призывал его искать, аргументируя его существование уже самим фактом открытия позитрона: должна же быть симметрия между отрицательными и положительными зарядами! Правда, если нейтрон все-таки «фундаментальная» частица, то есть не «делится» на части, то, оговаривался Андерсон, тогда протон есть нейтрон + позитрон, и мы видим позитроны от развала протона.

Все эти рассуждения Андерсона, которые сейчас кажутся наивными, объясняются довольно просто. Он совсем не был знаком с работами Дирака: ни со статьей о релятивистском электро-не, ни с предсказанием антиэлектрона, ни даже со знаменитым учебником Дирака «Принципы квантовой механики», который появился в 1930 году. Больше того, Андерсон честно признавался, что когда впоследствии он решил прочесть статьи Дирака, то не смог в них понять ровным счетом ничего!

За открытие позитрона Андерсон был удостоен Нобелевской премии. Может возникнуть вопрос: а не странно ли, что такую высокую награду получил человек, который по-настоящему и не представлял себе физической сущности открытого им явления и давал ему совершенно неверную интерпретацию?

На мой взгляд, незнание теории Дирака только делает честь Андерсону, еще более подчеркивает, насколько велика его заслуга. Ведь он не знал, что надо искать. Его не вели за руку мудрые оракулы-теоретики. Он поступал, как настоящий естествоиспытатель — перед ним был неизвестный феномен, и он честно его исследовал. Другие же видели в этом явлении просто экспериментальную «грязь», которая ни в какую теорию не укладывалась и поэтому считалась недостойной изучения.

Итак, сложилась интересная ситуация.

С одной стороны, Дирак уже предсказал существование антиэлектрона. Мы говорили о том, что физическая общественность в основном совершенно не приняла этого вывода из его теории. Добавим, что даже в 1933 году, через год после открытия позитрона, не кто иной, как Вольфганг Паули, писал: теория Дирака красива, но приводит к положительным электронам, следовательно, она ошибочна.

С другой стороны, Андерсон получил фотографии частицы с положительным зарядом и массой, как у электрона. Его открытие было тоже воспринято физиками без большого энтузиазма. Известно, что и выдающийся экспериментатор Резерфорд, и выдающийся теоретик Бор относились сначала к результатам Андерсона с известным скептицизмом. В том же 1932 году был открыт нейтрон. Но если обнаружение нейтрона сразу же решило целый ряд проблем в ядерной физике, которые долго не давались ученым, то открытие позитрона, как казалось большинству людей в то время, было абсолютно ненужным — никто не желал вводить новую частицу, никто не видел в ней нужды. Именно поэтому известный историк физики Н. Хэнсон в своей книге «Концепция позитрона» говорит о том, что позитрон был открыт трижды: один раз — Дираком, второй раз — Андерсоном, а третий раз позитрон открыли П. Блэккет и Дж. Оккиалини, которые показали, что антиэлектрон Дирака и частица Андерсона — это одно и то же.

Надо сказать, Блэккету и Оккиалини не повезло. Они разработали установку, способную регистрировать намного больше частиц, чем установка Андерсона. Он опередил их буквально на несколько месяцев. Поэтому Блэккет впоследствии сокрушался, что если бы Оккиалини в тот год не был бы так долго в отпуске, они бы первыми открыли позитрон! Однако Блэккет и Оккиалини сделали во многих отношениях замечательную работу, которая по праву занимает важное место в анналах физики. Они впервые в практике физического эксперимента применили управляемую камеру Вильсона. Если вы помните, мы говорили, что работа камеры Вильсона начинается с резкого расширения газа в камере. Проблема заключалась в том, в какой момент надо начинать расширение. И в установках Скобельцына, и в опытах Андерсона этот момент выбирался произвольно. Хорошо, если частица как раз в то мгновение попадала в камеру. Зачастую бывало

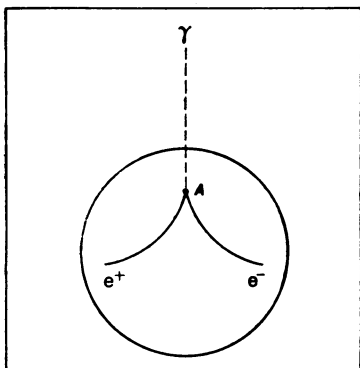
наоборот, камера работала вхолостую, и экспериментатор был подобен рыбаку, который наудачу забрасывает свою удочку и ждет, что ему попадется. Блэккетт и Оккиалини поставили сверху и снизу камеры счетчики Гейгера, и только когда частица проходила через оба этих счетчика, давался сигнал на запуск камеры. На первый взгляд это простенькое усовершенствование. Однако оно привело к тому, что если в опытах Скобельцына один трек получался на 10 холостых срабатываний камеры, у Андерсона — еще хуже, один трек был на 50 срабатываний, то Блэккетт и Оккиалини могли регистрировать почти 80 процентов всех частиц, проходящих через камеру. В настоящее время эта идея Блэккетта и Оккиалини используется практически в любом эксперименте по физике элементарных частиц.

Очень важным моментом в работе Блэккетта и Оккиалини было то, что они не просто наблюдали единичные позитроны, как это удалось сделать Андерсону. Они впервые смогли зарегистрировать рождение электрон-позитронной пары. На рис. 18 показано, как выглядит такое событие в камере.

С особым чувством читаешь сейчас соответствующее место из их статьи:

«Существуют три возможные гипотезы о происхождении этих частиц (позитронов и электронов). Они либо существовали в ядре до момента взаимодействия, либо находились в составе падающей частицы или могли рождаться в процессе столкновения. Не имея никакого независимого свидетельства о том, что эти частицы существо-

Рис. 18. Взаимодействие гамма-кванта большой энергии (след его в камере не виден) с электрическим полем атомного ядра газа приводит к образованию пары электрон—позитрон



вали по отдельности до момента столкновения, более разумно принять последнюю гипотезу. Более того, исходя из хорошо известных трудностей в рассмотрении электронов как независимых механических составляющих ядра, последняя гипотеза выглядит еще более приемлемой. Тогда возможно описывать такие ливни... как происходящие за счет рождения частиц».

В этих эпических строках, полных стремления к академической полноте, содержится описание фундаментального физического явления — это первый пример перехода энергии (налетающей частицы) в массу (электрона и позитрона). Хотя принципиальная возможность перехода энергии в массу была известна давно, лишь в экспериментах Блэккетта и Оккиалини было доказано, что она осуществляется в полной мере.

Наконец, в статье Блэккетта и Оккиалини содержится чрезвычайно важное утверждение о том, что позитроны, которые они наблюдали и которые видел Андерсон, это как раз те самые частицы, предсказываемые релятивистской теорией Дирака. Трудно сказать, насколько самостоятельно пришли Блэккетт и Оккиалини к этому заключению. В своей статье они несколько раз ссылаются на Дирака, благодарят его за ценные обсуждения. Дирак в то время работал в Кембридже, в колледже Св. Джона, который расположен в полумиле от Кавендишской лаборатории, где находилась установка Блэккетта и Оккиалини. Несомненно, все эти обстоятельства сыграли решающую роль в том, что позитрон, наконец, был правильно интерпретирован.

После работы Блэккетта и Оккиалини позитрон превратился из никому не нужного пасынка в важную частицу, существование которой было необходимо для общей теории. Первая античастица обрела, наконец, свои «гражданские права».

Как бы открылись невидимые шлюзы и хлынул целый поток сообщений о наблюдениях позитрона. Сразу же было обнаружено, что электрон-позитронные пары могут рождаться не только в космических лучах, но и под действием гамма-квантов, испускаемых радиоактивными источниками. Затем в том же 1933 году Ф. Жолио-Кюри и И. Кюри открыли, что позитроны могут вылетать при распаде некоторых нестабильных ядер. Таким образом, стало ясно, что позитрон наряду с протоном, нейтро-

ном и электроном принимает важное участие в ядерных взаимодействиях.

Популярность позитрона среди физиков возросла настолько, что возникло желание дать ему более благозвучное наименование. Надо сказать, филологическая борьба по поводу названия новых частиц встречается в физике довольно часто (в следующей главе читатель найдет еще один забавный пример). Даже Андерсон в своей знаменитой статье об открытии позитрона не удержался и предложил для симметрии переименовать электрон в негатрон. Кое-кому это очень не понравилось. Некто профессор Герберт Дингл направил в редакцию журнала «Нейчур» письмо, в котором он писал следующее: «Позитрон — это уродливое слово, оскорбляющее литературный вкус своим гибридным характером. Оно никак не связано с именем сопутствующей частицы — электроном, которого к тому же предлагают назвать «негатроном». К счастью, этот термин никто не употребляет». Дингл предлагал свое наименование — «орестон». Это название, говорил он, имеет благородный греческий оттенок и вызывает в памяти имена героев древнегреческих мифов Ореста и Электру, которые были братом и сестрой. Трудно сказать, почему не привилось это предложение Дингла; очевидно, физики посчитали, что аннигиляция электрона с позитроном не лучший пример взаимоотношений между братом и сестрой.

Как всегда бывает, вокруг нового явления возникает несколько гипотез для его объяснения. Сейчас нам покажется в высшей степени странным, но тогда всерьез обсуждалась возможность деления (!) кванта света — фотона на электрон и позитрон. Более того, ссылаясь на предсказание Дирака о существовании отрицательного протона, говорили, что фотон высокой энергии будет испытывать деление на положительный и отрицательный протоны. Наконец, самое интересное, таким процессом пытались объяснить расширение Вселенной! Ход рассуждений был следующим: материя испытывает меньшее гравитационное притяжение, чем излучение, следовательно, если излучение превращается в материю, это приведет к ослаблению притяжения, и Вселенная начнет расширяться.

Сегодня мы хорошо понимаем всю степень наивности такой гипотезы — ни о каком делении фотона не может быть и речи, не говоря уже о попытке вывести из этого

факта расширение Вселенной. Но полвека назад наши знания о природе были существенно меньше и подобные теории публиковались даже в самых уважаемых научных журналах, а разрабатывали их люди с солидной репутацией.

ЧТО ДАЛО ФИЗИКЕ ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА?

Антимир — кому он нужен?

Агния Барто

Я считаю, что открытие антиматерии было, возможно, самым большим скачком из всех больших скачков физики нашего столетия. Оно изменило все наши взгляды на природу материи.

Вернер Гейзенберг

Каждый из нас по себе знает, насколько легче перевернуть всю квартиру в поисках запропастившейся куда-то запонки, чем изменить саму систему своих взглядов, стать аккуратным и никогда не терять запонок. Так и с открытием позитрона: главные трудности заключались отнюдь не в том, что сложно было найти позитрон. Необходимо было изменить саму систему взглядов на основные свойства природы. Именно поэтому путь, которым физики пришли к открытию первой античастицы, был таким долгим и непростым.

Подытожим теперь те проблемы, которые после открытия позитрона предстали перед физиками в новом свете. Прежде всего надо отметить, что теория дырок, предсказывавшая существование позитрона, была первым подходом, где встал вопрос о структуре вакуума.

Сразу оговоримся, что с точки зрения современных представлений теория дырок является не более чем некоторой наглядной моделью, правильно охватывающей лишь определенные черты реальности. Она верно предсказывает, что частица и античастица должны рождаться парами. Она объясняет, почему масса частиц и античастиц одинакова, почему не наблюдаются электроны с отрицательными энергиями. Теория дырок долгое время верой и правдой служила физикам в качестве удобной схемы для расчетов различных процессов, связанных с образованием позитронов и их аннигиляцией. В ряде

случаев она позволяла получать вполне приемлемые результаты. Однако физики никак не могли смириться с мыслью, что дираковские представления о вакууме в самом деле соответствуют реальности.

В 1933 году в Ленинграде состоялась 1-я Всесоюзная конференция по проблемам атомного ядра. Это был представительный форум, на который собрались многие выдающиеся советские и зарубежные ученые, Дирак делал на этой конференции доклад о теории позитрона. Только что были выполнены опыты Андерсона, Блэкетта и Оккиалини. На самой конференции было представлено еще несколько новых сообщений о наблюдении позитрона. Кажалось бы, для теории дырок наступил «золотой период». Но вот в дискуссии по докладу Дирака выступил наш замечательный ученый В. А. Фок и очень точно охарактеризовал все трудности дираковской теории. Фок говорил:

«В основе теории позитронов лежит предположение о существовании неопределенного и бесконечного числа электронов с отрицательной кинетической энергией, причем ни бесконечно большой заряд, ни бесконечно большая масса этих электронов ничем себя не проявляет... Я должен признаться, что мной овладевает необычайное смущение, когда я пытаюсь осмыслить это основное положение теории, и, я думаю, что я не одинок в этом чувстве. Предположение о существовании бесконечных заряда и массы, притом ведущих себя так, как если бы их не было вовсе... заставляет себя спросить, что собственно разумеется в данном случае под словом «существование»?»

И действительно, главный недостаток теории дырок — введение лишенных физического смысла представлений о вакууме с бесконечной плотностью и бесконечной отрицательной энергией — этой модели так и не удалось преодолеть.

Слабое место теории дырок было еще и в том, что она представляла собой одночастичный подход. Вспомним, как теория дырок объясняет рождение пары: гамма-квант большой энергии переводит *одну* частицу из состояния с отрицательной энергией в область положительных энергий. Возникает электрон, а оставшаяся в состоянии с отрицательной энергией дырка и есть позитрон.

Но дырка всегда есть дырка в чем-то. Поэтому позитрон-дырка в известном смысле неотделим от всего остального «моря» состояний с отрицательной энергией. «Море» должно как-то влиять на свойства позитрона, но

это невозможно рассмотреть в рамках одночастичного подхода.

Как бы то ни было, теория дырок произвела полный переворот в нашем сознании. Революционной была сама мысль о том, что вакуум — пустота, место, не содержащее частиц, — имеет сложную структуру. Сейчас эта идея получила исключительно сильное развитие. Если раньше вакуум представлялся всего лишь сценой, подмостками, на которых разыгрывалась великолепная феерия физических явлений, то сейчас вакуум выступает в роли одного из главных действующих лиц. Оказывается, свойства вакуума, его строение имеют определяющее значение для правильного описания взаимодействий между элементарными частицами. Более того, исследование структуры вакуума позволило физикам приступить к решению совершенно грандиозной задачи, которая в прошлом считалась под силу лишь творцу всемогущему. А именно, к разработке теории рождения Вселенной. Мы еще со школьной скамьи знаем, что Вселенная расширяется. Созданы последовательные теории, которые описывают, как происходит это расширение (мы будем говорить о них в главе 4). Но основные вопросы: почему Вселенная расширяется, почему случился пресловутый Большой Взрыв, что было до начала расширения — до недавнего времени были за пределами досягаемости современной науки. И вот только сейчас появились привлекательные модели, которые объясняют причину Большого Взрыва, исходя именно из анализа свойств физического вакуума.

Очень важной заслугой теории дырок явилось то, что она предоставила физикам наглядную модель для понимания процессов, происходящих в атомных ядрах.

В 30-е годы физики столкнулись с загадкой ядерного бета-распада. Бета-распад ядра заключается в том, что нейтрон в ядре распадается на протон, электрон и антинейтрино (рис. 19). Причем протон остается в ядре, нейтрино в то время невозможно было регистрировать, и экспериментатор, изучающий бета-распад, видит, что из ядра вылетают только электроны. Естественно предположить, что эти электроны были в ядре и раньше, до распада нейтрона. Такое на первый взгляд невинное утверждение приводило к ряду парадоксов и вступало в противоречие с другими экспериментальными фактами.

Сейчас любой студент скажет, что ничего удивительного в бета-распаде нет, электроны просто рождаются

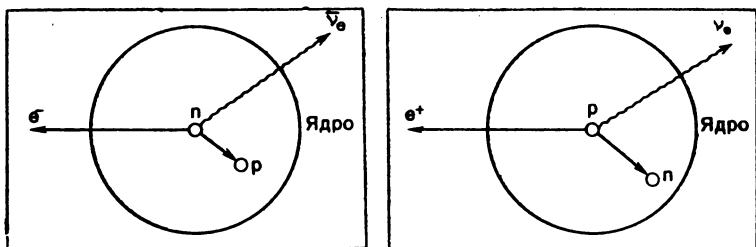


Рис. 19. Бета-распад ядра с испусканием электрона и антинейтрино
Рис. 20. Бета-распад ядра с испусканием позитрона и нейтрино

в момент распада, а вовсе не сидят где-то внутри ядра. А вот Б. М. Понтекорво на своих лекциях любит рассказывать, что у создателя теории бета-распада Энрико Ферми основная проблема была отнюдь не с написанием соответствующих уравнений, их он получил довольно быстро. Ферми признавался, что ему труднее всего было понять как раз то, что электронов в ядре нет, а они «просто рождаются» в момент распада нейтрона.

«В самом деле,— говорил Б. Понтекорво,— представьте себе, что взрывается дом. И вы видите, как во все стороны разлетаются обломки дверей, столов, стульев. Но вдруг вы обнаруживаете, что среди них летят еще, допустим, слоны и жирафы. Это как раз и есть аналог бета-распада: из дома при взрыве вылетает нечто, чего в доме не было!»

Такую экзотическую возможность трудно осознать.

Процесс распада некоторых нестабильных ядер с испусканием позитрона, который обнаружили Ф. Жолио-Кюри и И. Кюри, тоже относится к категории бета-распадов. Только в этом случае внутри ядра протон превращается в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино (рис. 20). Теперь внешний наблюдатель видит, что из ядра вылетают позитроны. Так, может быть, именно позитроны и есть истинные составляющие ядра, которые помогут разрешить загадку бета-распада?

Сразу же была придумана сложная и, как сейчас нам совершенно ясно, неверная позитронная теория бета-распада. Ядро представлялось в виде совокупности альфа-частиц (ядер гелия) и нейтронов, но позитрон тоже мог входить в состав ядра на равных правах. Процесс бета-распада мыслился следующим образом: альфа-частица

переходила с одного энергетического уровня на другой, освободившаяся энергия уносилась γ -квантом, в поле ядра этот γ -квант рождал пару e^+e^- , электрон убегал из ядра, а позитрон, наоборот, захватывался, и получалось новое ядро.

Вот видите, оказывается, физикам того времени было гораздо легче придумать такой сложный многоступенчатый механизм, чем поверить, что электрон «просто рождается».

Вернер Гейзенберг, одним из первых выдвинувший гипотезу о том, что ядро состоит лишь из протонов и нейтронов, вспоминает, как в свое время он получал гневные письма от известных ученых, в которых ему выговаривали за утверждение об отсутствии в ядрах электронов. «Как же их нет,— возмущались авторы этих писем,— когда все видят, что электроны вылетают из ядер!» Гейзенберг рассказывал, что однажды он пытался объяснить свою теорию группе коллег. Ожесточенный спор завязался прямо в университетском кафе, которое было расположено рядом с бассейном. Исчерпав все физические аргументы, Гейзенберг, чтобы доказать свою правоту, призвал на помощь более наглядные представления. «Посмотрите в окно! — призвал он коллег.— Вы видите, как в бассейн входят люди. Они одеты! Но неужели вы думаете, что и в бассейне они плавают в пальто? Откуда же берется такая уверенность, что из ядра выходят точно такие же частицы, что были внутри?»

Положение изменилось, когда Дирак предложил свою теорию дырок. Вначале в нее мало кто верил, но рождение частиц в рамках этой теории можно представить себе весьма наглядно, не прибегая к бассейновым аналогиям. После того как Блэкетт и Оккиалини обнаружили явление рождения электрон-позитронных пар и тем самым подтвердили теорию Дирака, физики стали все больше и больше убеждаться, что во взаимодействиях элементарных частиц возможно наблюдать не только изменение каких-то их характеристик, но и появление новых частиц. Поэтому не случайно Ферми в своей замечательной работе по бета-распаду, обосновывая возможность «просто рождения» электронов, ссылаясь именно на теорию Дирака.

Теория дырок придает совершенно другой смысл понятию «состоит из». Раньше считалось, что если посильнее стукнуть по предмету (неважно, кирпич ли это или

атом), то он развалится на составляющие его части. Вспомните, как рассуждал Карл Андерсон, интерпретируя свое открытие: из ядра вылетел положительный электрон — значит это либо составная часть протона (позитрон + нейтрон = протон), либо составная часть нейтрона (позитрон + отрицательный протон = нейтрон). Подобные представления были очень характерны для физиков того времени.

Мы в предыдущем разделе легко объяснили «матрешечные» рассуждения Андерсона тем, что он был не знаком с теорией Дирака. Однако дело обстоит гораздо сложнее. Даже те физики, которые понимали работы Дирака, все равно настойчиво пытались выяснить, частью какой частицы является вылетающий из ядра позитрон. Например, Ф. Жолио-Кюри в 1933 году прямо утверждал: «...протон является сложной частицей, состоящей из нейтрона и положительного электрона, тесно связанных между собой». Даже сам Гейзенберг одно время придерживался подобных взглядов.

Однако раз возможно предсказанное Дираком рождение пар, то получается, что когда вы бьете по предмету, он не только разваливается на части, но и порождает нечто такое, чего внутри него заведомо не было.

Самый простой пример — столкновение двух протонов. Если энергия налетающего протона достаточно велика, то можно выбить из протона-мишени пару протон—антипротон:

$$p + p \rightarrow p + p + \bar{p}.$$

Можно также получить пару более легких частиц, пи-мезонов:

$$p + p \rightarrow p + p + \pi^+ + \pi^-.$$

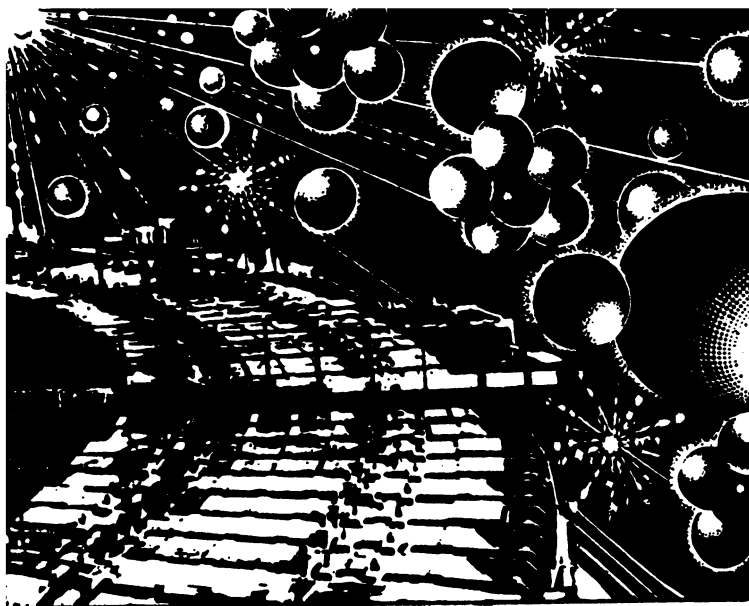
Наконец, экспериментально зарегистрирован процесс, в котором падающий пи-мезон выбивает из протона... ядро дейтерия!

$$\pi^- + p \rightarrow d + \bar{p}.$$

Последовательно придерживаясь точки зрения «камнедробилки», мы должны заключить, что протон «состоит из» пи-мезонов, антипротонов и даже ядер дейтерия. Ясно, что такой подход неверен. Элементарные частицы, конечно, нельзя представлять, как матрешки, вложенные друг в друга. В то же время нельзя считать, что элемен-

тарные частицы — это некоторые предельные единицы материи, не обладающие внутренней структурой. Как бы то ни было, после создания теории дырок и обнаружения процессов рождения пар наши представления о том, что же такое элементарная частица, сильно изменились.

Наконец, нельзя не отметить, что теория дырок — это первая модель Антимира. Хотя первоначально теория Дирака была разработана для частиц с полуцелым спином, позже было показано, что и у частиц с целым спином тоже должны быть античастицы. Таким образом, Дирак открыл принципиальную возможность существования наряду с нашим обычным миром, построенным из вещества, другого, столь же мощного мира из антивещества. В последующих главах мы рассмотрим вопрос о том, реализуется ли в природе эта возможность и если нет, то почему.



ГЛАВА 2

Антивещество и его свойства

В прошлой главе мы говорили о том, как возникла идея Антимира и как была обнаружена первая античастица — позитрон. Однако мы до сих пор не дали определения, что же такое античастицы, чем они отличаются от обычных частиц и каковы их свойства? Это упущение будет ликвидировано в настоящей главе. Но сначала мне хотелось бы сделать еще одно историческое отступление и рассказать о том, как были открыты другие элементарные «кирпичики» Антимира. Так что в этой главе речь пойдет в основном о работе физиков-экспериментаторов.

ЭКСПЕРИМЕНТАТОРЫ И КИНОЗВЕЗДЫ

Когда говорят о современной экспериментальной физике высоких энергий, обычно отмечают, что далеко в прошлое ушли те благословенные времена, когда пре-

краснодушные жрецы науки с помощью «сургуча и веревочки» открывали фундаментальные законы. Утверждают также, что время одиночек в науке прошло и теперь она делается, так сказать, «поротно»: большой коллектив «доцентов с кандидатами» наваливается на проблему и все сообща решают ее в два счета. Мне думается, что такие взгляды неверны, и идут они от непонимания, как на самом деле выполняются современные эксперименты.

На мой взгляд, лучше всего сравнить экспериментальную физику высоких энергий с киноиндустрией. Автору не приходилось бывать ни на одной из киностудий страны, но так как о кино пишут несравненно больше, чем о физике высоких энергий, то он знает, что сейчас художественный фильм создается большим коллективом людей: актеров, операторов, художников, монтажеров, костюмеров и, конечно, каскадеров. Он знает, что для участия в съемках подчас привлекаются целые воинские подразделения, пожарные и хоккейные команды. Однако у истоков фильма стоят всего лишь несколько человек, которые предлагают сценарий и разрабатывают способы его художественного воплощения.

Точно такое же положение и в экспериментальной физике. Хотя сейчас группы экспериментаторов обычно насчитывают несколько десятков физиков, а для создания необходимой аппаратуры требуется порой работа больших заводов, тем не менее саму идею опыта и способы его осуществления предлагают тоже всего лишь два-три человека.

Другое дело, трудно себе представить, чтобы в титрах фильма не было указано, кто главный режиссер, кто главный оператор, кто актеры, а просто давался бы список в алфавитном порядке. В физике это обыкновенное дело, и когда кто-нибудь из руководителей эксперимента ставит свою фамилию впереди длинного списка соавторов, такие вещи воспринимаются как дурной тон. А ведь руководитель эксперимента, как и главный режиссер фильма, несет огромную ответственность. Хотя бы потому, что стоимость современного опыта в физике высоких энергий сравнима со стоимостью полнометражной картины — несколько миллионов рублей.

Но нам пора возвращаться к античастицам, и мне хочется закончить наше сравнение кино и физического эк-

сперимента одной забавной историей, которая связана и с античастицами, и с Полем Дираком, и, наверное, с влиянием кино на физиков.

Дело было в 1975 году. Надо сказать, этот период был исключительно насыщен чрезвычайно важными открытиями в физике высоких энергий. Они многое изменили в нашей картине мира. К сожалению, мы не можем подробно остановиться на значении этих фундаментальных открытий. Заметим только, что значительная часть новых сведений была получена при изучении аннигиляции электронов и позитронов высокой энергии, где нашли целое семейство новых частиц с совершенно экзотическими свойствами.

К тому же появились сообщения об обнаружении в космических лучах магнитного монополя.

Существование магнитного монополя — частицы с одним (!) магнитным полюсом — было впервые предсказано Дираком в 1931 году. С тех пор экспериментаторы безуспешно пытались обнаружить монополь в опытах на ускорителях*. Поэтому весть об открытии монополя в космических лучах стала одной из главных научных сенсаций 1975 года.

Одним словом, за короткое время было получено очень много новых данных, и физики с нетерпением ожидали очередной международной конференции по физике высоких энергий, которая в этот раз должна была состояться в американском городе Стэнфорде. Была на этой конференции и делегация Объединенного института ядерных исследований в Дубне. По возвращению домой, как обычно, на общепрофессиональном семинаре состоялся доклад руководителя нашей делегации о том, как прошла конференция.

Интерес к этому семинару был необычайно велик, и центральная аудитория института была полностью запол-

* Сообщения об открытии магнитного монополя появлялись не раз. Но так же регулярно они и закрывались при последующем анализе. Монополь 1975 года тоже впоследствии был «закрыт», однако совсем недавно появилась работа, в которой опять говорится о наблюдении монополя. Она вызвала новый шквал проектов по поиску монополя, в сейчас его ищут около 25 экспериментальных групп. Отметим, что современные теории элементарных частиц подтверждают идею Дирака о существовании магнитного монополя. Считается, что масса монополя очень велика, намного больше, чем энергия современных ускорителей, и поэтому такие частицы невозможно обнаружить в опытах на ускорителях.

нена. Докладчик сначала немного рассмешил аудиторию рассказом о том, что новые частицы, которые были открыты почти одновременно двумя группами экспериментаторов, стали предметом некоторой филологической борьбы. Одна группа назвала их ψ -частицами, другая J-частицами. Почему-то в литературе более употребительным стало первое название — пси-частицы. Но экспериментаторы из второй группы не сдавались и всячески рекламировали свое название. Дело дошло до того, что они заказали себе особые майки, на которых была нарисована большая буква J и под ней — масса частицы — 3,1 ГэВ. Именно в такой майке лидер этого эксперимента и сделал доклад на конференции.

Поведав об этом казусе, наш докладчик стал перечислять все свойства новых частиц, добросовестно рассказывая, как они были определены и почему отпадают все другие гипотезы. Но новой информации было так много, что прошло уже три часа, а докладчик все говорил и говорил.

— Про монополь расскажите! — закричали наконец наиболее нетерпеливые.

— Товарищи, обязательно расскажу. Но давайте все по порядку! — отвечал докладчик.

— А много еще осталось? — спрашивали подавленные лавиной фактов слушатели.

— Я вообще планировал показать 49 слайдов. Но, наверное, придется немного подсократиться, — невозмутимо отвечал докладчик.

— Пожалуйста, пропустите слайд номер 26, и перейдем сразу к обсуждению рисунка номер 27.

Аудитория застонала. Все окончательно потеряли надежду, когда минут через пять лектор ослабил галстук и снял пиджак, как бы давая понять, что он намерен еще долго испытывать терпение слушателей. Но еще через пять минут он почему-то совсем снял галстук. Народ насторожился. А когда, не переставая говорить, докладчик начал расстегивать пуговицы на рубашке, зал притих. Даже те, кто нечаянно вздремнул под его монотонный голос, проснулись и с удивлением пытались понять, что же происходит.

Лектор невозмутимо раздевался. Со словами: «А теперь я хочу показать вам последнюю картинку!» — он скинул рубашку и остался в желтой майке, на которой была написана буква J и ниже — 3,1 GeV. Зал взорвался аплодисментами.

Вот так отдельные веяния кинематографа проникают даже в академическую атмосферу физического семинара.

ОТ АНТИПРОТОНА К АНТИТРИТИЮ

Как вы помните, мы уже приводили пророческие слова Дирака об антипротоне. Он предсказал его существование еще в 1931 году. В самом деле, протон, как и электрон, имеет спин $1/2$, то есть должен описываться релятивистским уравнением Дирака. Следовательно, у протона тоже есть возможность перепрыгнуть в область отрицательных энергий. Чтобы такого не происходило, согласно теории дырок надо заполнить все уровни с отрицательной энергией. Тогда дырка в «море» протонов отрицательной энергии и есть антипротон.

Пока что наши рассуждения ничем не отличаются от тех, которые мы приводили для электронов. Однако довольно скоро было обнаружено, что протоны не совсем дираковские частицы. Дело в том, что уравнение Дирака справедливо для точечных частиц, то есть для частиц без внутренней структуры. Протон же представляет собой довольно сложное образование, и поэтому некоторые его характеристики отличаются от величин, которые предсказывает теория Дирака.

Интересно, что после открытия позитрона отрицательное отношение к теории Дирака сменилось у теоретиков настолько безграничной верой в ее предсказания, что находчивые экспериментаторы не преминули этим воспользоваться. Отто Штерн, собираясь провести измерения магнитного момента протона,* заключил с некоторыми теоретиками пари о том, какое число будет получено в его эксперименте. Все теоретики, не сговариваясь, написали то значение магнитного момента протона, которое следует из теории Дирака. Они были неприятно удивлены, когда оказалось, что магнитный момент протона почти в три раза больше той величины, которая предсказывается теорией Дирака. Это различие возникает как раз за счет сложной внутренней структуры протона.

Протон приблизительно в 2000 раз тяжелее электрона. Поэтому, чтобы родить пару антипротон—протон, нужен гамма-квант гораздо большей энергии, чем в слу-

* О том, что такое магнитный момент, будет рассказано в этой главе, но только чуть позже.

чае рождения электрон-позитронной пары. Кроме того, антипротон намного сильнее позитрона взаимодействует с веществом. Это приводит к тому, что те немногие антипротоны, которые образуются в космических лучах, быстро аннигилируют, когда попадают в атмосферу. В этом смысле в отличие от позитронов антипротоны «с неба не падают». И физикам пришлось добывать их «своими руками» на ускорителях. Построить же ускоритель, разгоняющий частицы до столь высокой энергии, оказалось довольно сложным делом. Поэтому между предсказанием антипротона и его открытием прошло почти четверть века.

Только в 1955 году Э. Сегре, О. Чемберлен, К. Виганд и Т. Ипсилантис объявили об открытии антипротона. Прошло еще 10 лет, и группа физиков, возглавляемая Л. Ледерманом, открыла антидейтрон. Тем самым была доказана фундаментальная вещь: античастицы могут связываться в ядра так же, как и обычные частицы. Хотя до настоящего времени мы не знаем многих характеристик антиядер, физики твердо верят в то, что они подобны характеристикам обычных ядер. Косвенным аргументом в пользу этого служат и открытия ядер антигелия и антитрития, сделанные на ускорителе Института физики высоких энергий в Протвино. Там в 1970 году группа физиков под руководством члена-корреспондента АН СССР Ю. Д. Прокошкина обнаружила пять антиядер изотопа гелия — гелия-3 (${}^3\text{He}$). Гелий-3 содержит два протона и один нейтрон. Антигелий-3 — соответственно два антипротона и один антинейтрон. Через три года группа В. И. Петрухина и В. И. Рыкалина получила и другое антиядро — антитритий (${}^3\text{H}$). Антитритий состоит из двух антинейтронов и одного антипротона.

Все эти эксперименты по обнаружению частиц Антимира имеют много общего. Во-первых, это поисковые опыты. То есть опыты, призванные дать четкий ответ — да или нет. Потом уже другие эксперименты позволяют определить всевозможные характеристики явления. Пока что надо «просто» показать, что оно есть — существует. Обычно такие опыты проводятся в самом начале работы нового ускорителя. Когда перед физиками открывается возможность поработать в новом диапазоне энергий, то в первую очередь ищется, не лежит ли здесь что-нибудь совсем новенькое. Поэтому открытие антиядер всегда происходило в первых опытах на новых ускорителях. Так,

антипротон был обнаружен в самом начале работы ускорителя в Беркли (США), который чуть ли не для этого и был построен. Антидейтрон появился на новом ускорителе ЦЕРНа (Европейского центра по ядерным исследованиям) в Женеве. Когда же ввели в строй Серпуховской ускоритель, то одним из первых был опыт по обнаружению антигелия-3.

Старожилы Серпухова любят вспоминать это время, потому что ясно видно, как далеко шагнула наука за какие-нибудь 10 — 15 лет. Тогда же не было ни современной электроники, ни громадных детекторов, ни мощных компьютеров. Физики из Дубны смонтировали свою электронную аппаратуру для первых опытов прямо в автобусе. Автобус просто заезжал в экспериментальный зал серпуховского ускорителя, подключали питание и начинали работать.

Кроме поискового характера, все эксперименты по обнаружению античастиц были похожи друг на друга еще и потому, что осуществлялись они на основе одних и тех же идей.

Мы уже знаем, что так как античастицы всегда рождаются в паре с частицами, то для получения античастицы с массой M нужно затратить энергию по крайней мере $2M$. Стало быть, надо разогнать протон до нужной энергии и ударить по какой-нибудь ядерной мишени. При взаимодействии протона с ядром могут родиться не только наша искомая античастица с массой M , но и другие, более легкие частицы и античастицы. Причем чем меньше масса у частицы, тем легче ее родить и тем больше таких частиц будет вылетать из мишени. Лишь иногда при столкновении протона с ядром вся энергия не раздробится, не расплещется, а будет сосредоточена на рождении двух тяжелых частиц *. Поэтому задача экспериментатора состоит в том, чтобы выловить редкое событие рождения антиядра из целого потока вторичных частиц.

На практике идентифицировать античастицу означает определить ее заряд и массу. Выбрать частицы с нуж-

* Весьма важное значение для образования таких составных систем, как антиядра, имеет не только величина массы антиядра, но и степень связанности системы. Ясно, что если система «рыхлая», то есть связь между ее элементами слаба, то такую систему тоже сложно образовать в столкновениях частиц.

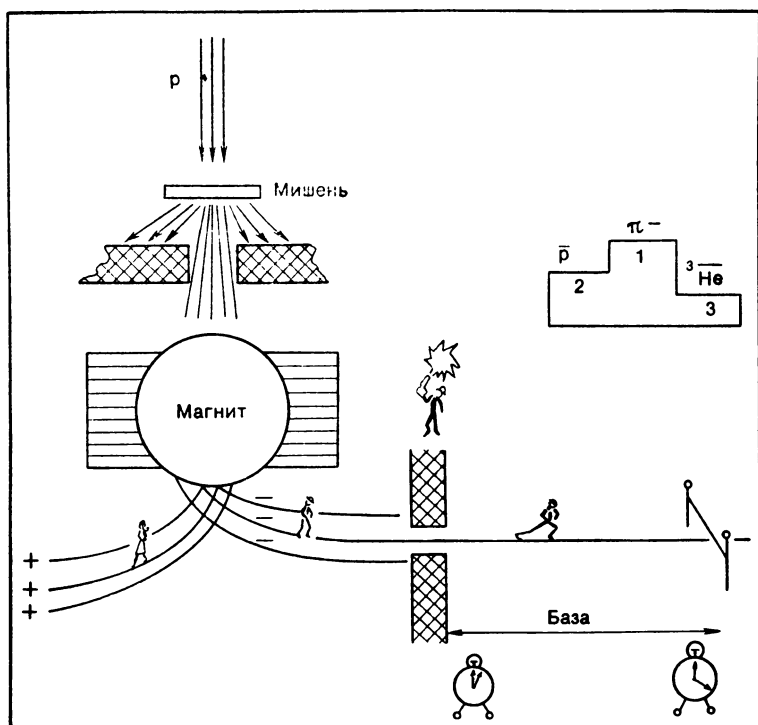


Рис. 21. Схема экспериментов по поиску античастиц. Протон высокой энергии падает на мишень и рождает большое количество вторичных частиц. Магнит сортирует их, отклоняя положительно заряженные частицы в одну сторону, отрицательные — в другую. Все антиядра имеют отрицательный заряд. Щель на выходе магнита пропускает отрицательные частицы только определенного импульса. Измеряют время прохождения частицей определенного фиксированного расстояния — базы. Чем легче частица, тем быстрее пролетает она через базу. Поэтому при одинаковом импульсе к финишу первыми приходят пи-мезоны, затем антипротоны и лишь потом антиядра

ным зарядом довольно просто. Идея точно такая, как в опытах Андерсона: в магнитном поле частица с положительным зарядом отклоняется в одну сторону, с отрицательным — в другую. Поэтому достаточно поставить на пути вторичного пучка магнит, и вы сможете выделить частицы нужного знака.

Но как их «взвесить»?

Тут делают следующее. Формируют пучок частиц с одинаковым импульсом. Для этого просто выводят частицы из магнита только в определенном месте, потому что степень отклонения частицы магнитом зависит от ее импульса. Чем больше импульс, тем меньше отклонение.

Но вот получили мы пучок с одинаковым импульсом. По определению $\text{импульс} = \text{масса} \times \text{скорость}$.

Если у частиц импульс одинаковый, а масса разная, то и скорости должны быть разными. Более тяжелые частицы будут иметь меньшую скорость. Значит, одно и то же расстояние они будут проходить медленнее, чем более легкие частицы. Вот физики и измеряют время, за которое частица пролетает какое-то фиксированное расстояние, которое называется базой.

Итак, импульс задают, измеряют время пролета, отсюда находят скорость и, следовательно, массу.

Таким образом, идея опытов по поиску античастиц и антиядер довольно проста. Другое дело — конкретное выполнение этой нехитрой «задумки». Трудность номер один состоит в том, что для того, чтобы «взвесить» античастицу, вы должны научиться измерять время пролета базы с очень хорошей точностью. Размеры базы довольно внушительны. В опыте в Беркли длина «дорожки», на которой определялись времена пролета антипротонов, была порядка 20 метров. В Серпухове ядра антитрития «бежали» уже на дистанцию в 102 метра, то есть длина базы была сравнима с длиной футбольного поля.

Скорости античастиц колоссальны. Например, антитрий летит со скоростью, отличающейся от скорости света лишь в третьем знаке. Поэтому базу, которая была использована в опытах на серпуховском ускорителе, он пролетает меньше, чем за миллионную долю секунды. На самом деле от экспериментаторов требуется умение измерять еще более короткие промежутки времени. Ведь первыми базу пролетают легкие частицы — пи-мезоны, затем уже приходят антипротоны и только после них появляются антиядра. Так вот разность по времени между прилетом пи-мезонов и антиядер фантастически мала — она порядка миллиардной доли секунды!

Другая трудность, которая подстерегает охотников за античастицами, состоит в том, что они ищут исключительно редкий процесс. Так мы говорили, в реакциях рождения гораздо более часто образуются легкие частицы, а ве-

роятность возникновения тяжелой частицы резко падает с ростом ее массы. Поэтому чем тяжелее античастица, которую вы желаете получить, тем больше легких частиц должна отбросить ваша аппаратура. Если сравнить добычу античастиц с сортировкой картофеля, то для получения одного антипротона каждый член группы Эмилио Сегре должен был отсортировать 15 тысяч вторичных частиц, добытчики антидейтрона выбрасывали с «транспортера» уже по 6 миллионов, а старатели из Серпухова — и вовсе астрономическую цифру, по 20 миллиардов фоновых частиц в расчете на каждого соавтора.

Так что поиск антиядер — занятие исключительной трудоемкости. Очевидно, из-за этого уже более десяти лет физики не «выдали на-гора» ни одного нового антиядра. Между тем энергия современных ускорителей настолько велика, что позволяет в принципе рождать даже ядра антиуглерода.

Помимо тех основных трудностей, которые мы привели выше, в опытах по рождению антиядер были и другие, «мелкие неприятности», которые тем не менее также сильно осложняли проведение экспериментов. Например, была сложность такого характера. Для того, чтобы добыть хотя бы одно антиядро, требуются месяцы непрерывной работы ускорителя. Значит, ваша электронная аппаратура должна тоже работать круглые сутки, бесперебойно, в течение нескольких месяцев. Однако поведение экспериментальной установки подчиняется своим собственным суровым законам, самый оптимистический из которых гласит: «С течением времени любая часть вашего оборудования, которая может испортиться, — портится, а та часть, которая не может испортиться, — портится тоже». Эти законы нельзя обойти, к ним можно лишь как-то приспособиться. То есть необходимо вести постоянный контроль за параметрами установки, чтобы всегда можно было знать, какой ее элемент начинает работать неверно.

Итак, можно сказать, что эксперименты по поиску античастиц и антиядер — это сложные, достаточно громоздкие по своим масштабам опыты, требующие создания самой современной аппаратуры и занимающие довольно длительное время на ускорителе. И как же оцениваются результаты всей этой деятельности?

За открытие антипротона была присуждена Нобелевская премия. Физическая общественность также высоко

расценила и получение антидейтрона — это было первое доказательство того, что ядерные взаимодействия между античастицами не отличаются от ядерных взаимодействий частиц. Однако обнаружение антитрития уже даже не было официально зарегистрировано как открытие. Авторам работы было сказано, что они не нашли чего-то принципиально нового и неожиданного. Таким образом, можно считать, что существование антиядер сейчас полагается саморазумеющимся и, так сказать, юридически узаконенным.

В этом плане становится ясно, почему один из руководителей серпуховского эксперимента по поиску антитрития В. И. Петрухин озадачил корреспондента журнала «Наука и жизнь» таким заявлением: «Научного содержания в нашей работе нет. Так, иллюстрация на тему: что может сегодня физика». Корреспондент решил, что «Валентин Иванович просто бравировал. Вообще с физиками это бывает...»

На самом деле никакой бравады не было. Представьте себе, что вы затрачиваете колоссальные усилия для того, чтобы получить результат, который заведомо всеми ожидается. Опыт по антитритию не давал практически никакой научной информации, кроме двух слов: «Антитритий есть (или нет)». В нем не было измерений всевозможных угловых, энергетических, импульсных распределений. Отсутствовал скрупулезный теоретический анализ. Можно сказать про такую работу, что в ней нет научного содержания?

Во время эксперимента по поиску антитрития один раз возникло критическое положение. Подошел конец года, надо было просить время для работы на ускорителе на следующий год, а в активе у группы было только два ядра антитрития. Вроде бы и что-то обнаружено, но эффект явно мал. Обсуждение в дирекции Института физики высоких энергий вопроса о том, стоит ли давать время на ускорителе для поиска антитрития, протекало довольно бурно. Высказывали как раз те аргументы, которые приводились выше. Тут уж проблема о научном содержании работы встала отнюдь не абстрактно. Все решило мнение тогдашнего директора ИФВЭ, а ныне вице-президента Академии наук СССР, академика А. А. Логунова. Эксперимент был продолжен, за три месяца работы обнаружили еще два ядра антитрития, и хотя кажется, что нет большой разницы между двумя и четырьмя

ядрами, но точные вычисления показывают, что вероятность имитации четырех ядер антитрития фоновыми частицами пренебрежимо мала. Таким образом, теперь можно было надежно утверждать о регистрации антитрития.

Так почему все же сочли поиск антитрития достойным занятием? Мне кажется, никогда не надо забывать, что все-таки устройство природы не зависит от наших убеждений. Даже если мы очень сильно во что-то поверили, от этого в реальном мире ничего не изменится. Мы всегда должны проверять даже самые очевидные для нас вещи. История физики знает массу примеров, когда возникала сильная оппозиция проведению экспериментов, направленных на проверку положений, считающихся общепризнанными. Стремление выдать свои убеждения за закон природы всегда было очень сильно.

Нобелевский лауреат Сэмюэль Тинг, один из открывателей J/ψ -частиц, о которых мы уже упоминали, рассказывал, что во время подготовки своего исторического опыта ему пришлось испытать большую критику. Многие известные физики недоумевали, зачем строить такую дорогостоящую установку с такими высокими параметрами. «Она может пригодиться только для изучения исключительно узких резонансов*, а их в природе нет», — говорили они. Действительно, узких резонансов, как ψ -частицы, в природе не было, вот Тинг их и открыл!

Самый яркий пример, когда эксперимент поверг в пух и прах все, казалось бы, твердо установленные положения, представляет собой история открытия нарушения CP -инвариантности. Мы будем детально обсуждать этот эффект в главе 5, а сейчас только скажем, что до 1964 года физики были почти абсолютно уверены в том, что все законы природы не изменятся, если поменять частицы на античастицы (C -преобразование) и одновременно заменить левое на правое (P -преобразование). Это и называется CP -инвариантность. Так вот, в 1964 году был выполнен эксперимент, который в конечном счете полностью похоронил стройную и весьма привлекательную теорию абсолютного сохранения CP .

* Узкими резонансами физики называют нестабильные элементарные частицы с большим временем жизни. Чем уже резонанс, тем дольше живет частица до распада. Характерной чертой таких частиц является именно исключительно большое по ядерным масштабам время жизни.

В заключение нашего рассказа о поисках античастиц на ускорителях мне хотелось бы обратить внимание читателя на то, что сама схема этих опытов при всей своей принципиальной простоте отнюдь не очевидна. Ведь, казалось бы, гораздо логичнее искать античастицы по их характерному признаку — аннигиляции с веществом, нежели измерять время пролета античастицей некоторого фиксированного расстояния. Однако самое логичное не всегда является самым простым и целесообразным. Поэтому Нобелевский комитет, присуждая премию по физике Э. Сегре и О. Чемберлену, особо отметил те оригинальные, остроумные методы детектирования и анализа, которые они использовали для обнаружения антипротона.

К сожалению, у славы есть и оборотные стороны. Один из довольно известных физиков, О. Пиччиони, возбуждал судебное дело против Сегре и Чемберлена, пытаясь доказать, что именно он первым предложил способ обнаружения античастиц по времени пролета. Пиччиони этот процесс проиграл, что совершенно справедливо. Ибо одно дело выдвинуть идею, а другое — воплотить ее в реальность. Вспомним все те громадные сложности, которые пришлось преодолеть первооткрывателям антипротона, и станет совершенно ясно, насколько беспочвенны притязания Пиччиони на роль «отца» антипротона.

СВОЙСТВА АНТИЧАСТИЦ

Наконец-то мы приступаем к той части нашей темы, которая по логике вещей должна была находиться в самом начале книги об антивеществе. А именно к определению, что же мы называет античастицей и каковы основные свойства антивещества.

Существуют совершенно общие физические принципы, из которых следует, что у каждой частицы должен быть двойник — античастица. Более того, те же самые общие принципы предписывают, что свойства частиц и античастиц должны быть связаны между собой вполне определенным образом. Мы подробно рассмотрим эту связь чуть позже, а сейчас обратимся к самой главной отличительной черте античастиц — способности к аннигиляции.

В буквальном переводе слово «аннигиляция» означает «превращение в ничто». Физики употребляют этот термин для обозначения такой реакции, в которой частица

и античастица превращаются либо в излучение (то есть в фотоны), либо в другие частицы. Вообще говоря, в физике высоких энергий есть сколько угодно процессов, когда одни частицы переходят в другие. Но только в процессах аннигиляции исчезают обе начальные частицы. Конечно, они исчезают не в буквальном смысле, превращаясь в «ничто», а переходят в любые другие элементарные частицы, рождение которых разрешено законами сохранения.

Характерный пример — аннигиляция электрона и позитрона

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Заметим, что в такой реакции не может возникнуть только один гамма-квант. Этому препятствует закон сохранения импульса (рис. 22). С точки зрения дираковской теории дырок процесс аннигиляции напоминает испускание света атомами. Ведь аннигиляция, по Дираку, — это переход электрона из состояния с положительной энергией в свободное состояние с отрицательной энергией — позитронную дырку. В атоме при переходе электрона из одного состояния с положительной энергией в другое фотоны уносят освободившуюся энергию. Точно так же происходит и при аннигиляции — избыток энергии уносится гамма-квантами.

Совсем не обязательно, чтобы при аннигиляции возникли только γ -кванты. Если ускорить начальные электроны и позитроны, то можно получить все, что угодно (разумеется, не противоречащее законам сохранения). Например, π -мезоны:

$$e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-.$$

Знакомые нам ψ -частицы тоже были впервые обнаружены в реакции аннигиляции:

$$e^+ + e^- \rightarrow \psi + \text{все остальное}.$$

Что же еще мы знаем об античастицах, помимо того, что они способны к аннигиляции? В данном контексте слово «знаем» имеет два оттенка: во-первых, какие свойства должны быть у античастиц, если исходить из общепризнанных теоретических представлений, и, во-вторых, какие из этих свойств мы действительно измерили на сегодняшний день.

В первом смысле мы знаем о том, как соотносятся основные свойства античастиц с соответствующими ха-

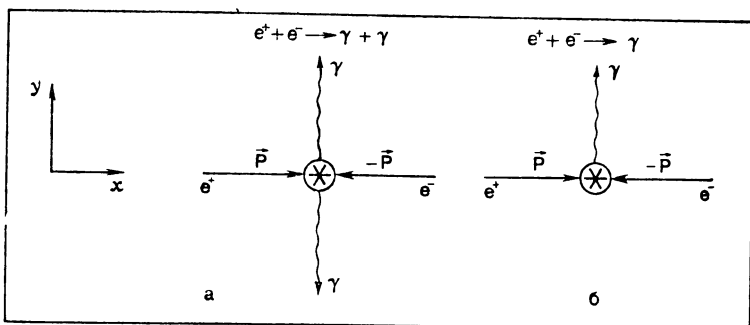


Рис. 22. Аннигиляция e^+e^- на два гамма-кванта (а) разрешена, а с вылетом одного гамма-кванта (б) запрещена из-за нарушения закона сохранения импульса. Видно, что в случае (а) сумма проекций импульсов частиц на оси y и x в начальном и конечном состоянии равна нулю. При вылете же одного гамма-кванта (б) в конечном состоянии появляется один ненулевой импульс, то есть нарушается закон сохранения импульса

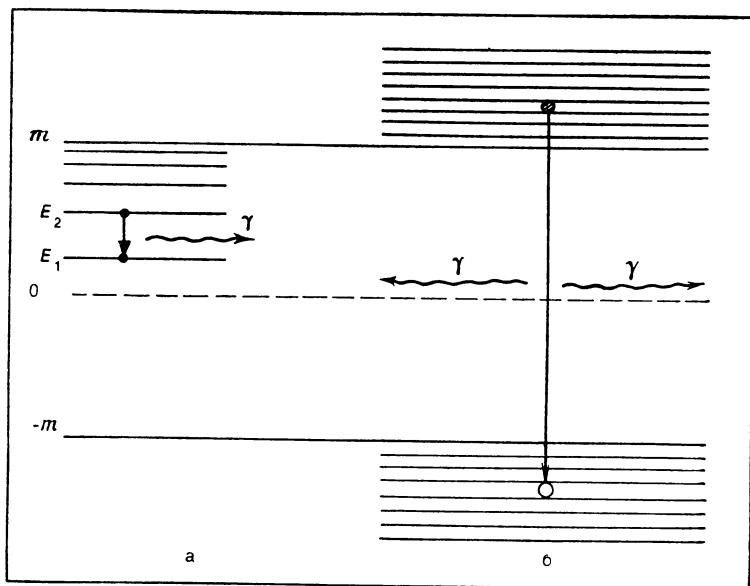


Рис. 23. При переходах электрона в атоме из одного состояния с энергией E_2 в другое состояние с энергией E_1 образуется фотон, который уносит энергию $E_2 - E_1$ (а). Точно так же выглядит аннигиляция электрона и позитрона в дираковской модели дырок (б). Электрон переходит в дырку — незанятое электронное состояние с отрицательной энергией. Освободившуюся энергию уносят два гамма-кванта

рактическими для обычных частиц, практически все. Такую взаимосвязь дает нам так называемый принцип *CPT*-инвариантности.

Уже упоминалось: большой неожиданностью для физиков было обнаружение нарушения *CP*-инвариантности. Оказалось, законы природы изменяются при одновременной замене частица—античастица и правое—левое. Однако совершенно общие принципы квантовой теории поля приводят к заключению о том, что должна выполняться так называемая *CPT*-инвариантность. Законы природы не меняются при одновременной тройной замене:

частица — античастица,
правое — левое,
прямой ход времени — обратный ход времени.

CPT-инвариантность является действительно фундаментальнейшим физическим принципом, который непременно следует из требований специальной теории относительности и соблюдения причинности. Надо сказать, что *CPT*-инвариантность проверена на опыте с колоссальной точностью порядка 10^{-12} *. Именно потому, что мы твердо верим в теоретические основы *CPT*-инвариантности и имели возможность убедиться экспериментально, что она хорошо выполняется, можно с уверенностью сказать, какими должны быть основные свойства античастиц. Предсказание этих характеристик представляет собой одно из важных следствий принципа *CPT*.

Итак, согласно *CPT*-теореме основные параметры античастиц должны быть такими:

	Частица	Античастица
1. Электрический заряд	e	$-e$
2. Масса	m	m
3. Спин	s	s
4. Магнитный момент	μ	$-\mu$
5. Время жизни	τ	τ
6. Барийный заряд	B	$-B$
7. Лептонный заряд	L	$-L$

* Эта цифра получена в опытах по измерению аномального магнитного момента позитрона.

То есть частица и античастица должны иметь в точности те же самые массу, спин и время жизни. Их электрический, барионный и лептонный заряды, а также магнитный момент должны быть одинаковыми по величине, но противоположными по знаку.

Написанное в первых двух строчках таблицы, я думаю, понятно. В первой главе, когда речь шла о теории дырок, мы уже разбирали, почему у античастиц та же самая масса, как и у частиц, но противоположный электрический заряд. Из теории дырок также следует равенство спинов частицы и античастицы. Ведь античастица — это незаполненное состояние в «море» Дирака частицы со спином.

Магнитный момент характеризует магнитные свойства частицы. Почему у античастицы он имеет другой знак, можно понять, если записать выражение для магнитного момента, например, электрона

$$\mu = \frac{e}{2m},$$

где e — заряд электрона *, а m — его масса.

Видно, что так как в это выражение входит величина заряда e , то магнитный момент у античастицы будет другого знака.

Барионный и лептонный заряды есть некоторые числа, которые приписываются частицам. Причем по определению эти заряды имеют разные знаки для частиц и античастиц. Физики сочли удобным разделить все многообразие наблюдаемых элементарных частиц на три класса: лептоны, барионы и мезоны (табл. 2). Наблюдается следующий экспериментальный факт: в любой реакции разность числа барионов (лептонов) и антибарионов (антилептонов) остается постоянной, не меняется. Так вот, барионный и лептонный заряды и были введены для того, чтобы просто отразить это обстоятельство.

Фундаментальное отличие барионного и лептонного зарядов от хорошо известного нам электрического заряда состоит в том, что с электрическим зарядом связано электромагнитное поле. Насколько это известно в настоящее время, ни барионный, ни лептонный заряды не являются источниками какого-либо поля, аналогичного

* Напомним, что мы работаем в системе единиц, где скорость света c и постоянная Планка \hbar положены равными единице.

электромагнитному. И вообще говоря, непонятно, почему эти заряды сохраняются. Существуют веские основания считать, что барионный заряд может не сохраняться. Этот факт привел бы к исключительно интересным следствиям, которые имеют прямое отношение к теме нашего рассказа. Однако чтобы не нарушать логику изложения, мы отложим подробное описание удивительных следствий несохранения барионного числа и опытов, которые запланированы для проверки этого предположения, до главы 5. Сейчас лишь повторим, что по определению всем барионам приписывается барионный заряд B , равный $+1$, а у антибарионов $B = -1$. Барионный заряд мезонов считается равным нулю.

Т а б л и ц а 2. Три класса элементарных частиц

Классы	Примеры	Масса (МэВ)
1. Лептоны (L)	Электрон e Мюон μ Нейтрино ν_e, ν_μ	0,51 106 0(?)
2. Мезоны ($B = 0$)	π -мезон K-мезон ψ -частицы	~ 139 ~ 497 ~ 3100
3. Барионы (B)	Протон p Нейтрон n	938 939

(Мы приводим в этой таблице лишь некоторые, наиболее хорошо известные частицы. Отметим, что существуют три типа лептонного заряда. Например, паре (e, ν_e) присваивается лептонный заряд L_e , паре (μ, ν_μ) — L_μ) Открыт еще один лептон — тяжелый τ -лептон с массой 1784 МэВ, у него должно быть свое нейтрино, но оно пока не обнаружено. В любой реакции происходит сохранение лептонных зарядов по отдельности. Относительно массы нейтрино имеются сомнения, в точности ли она равна нулю или нет. Есть указания на то, что масса нейтрино приблизительно равно 30 эВ — см. с. 142.)

До сих пор мы говорили о тех свойствах античастиц, которые следуют из теории. Там положение вполне ясное. Однако экспериментально характеристики античастиц изучены очень плохо, гораздо хуже, чем соответствующие величины для частиц. Например, время жизни протона известно с фантастической точностью: $\tau_p \geq 10^{30}$

лет! То есть если протон распадается, то время его жизни больше 10^{30} лет. Заметим, что возраст Вселенной значительно меньше, «всего лишь» 10^{10} лет *. Поэтому измерение времени жизни протона — это действительно яркая иллюстрация того, что сейчас может физика. Чего никак нельзя сказать об измерении времени жизни антипротона. Все, что мы знаем на сегодняшний день, так это то, что время жизни антипротона больше недели: $\tau_{\bar{p}} \gg 1700$ часов.

Еще в 1956 году была открыта довольно интересная античастица — антинейтрон. Антинейтрон не имеет электрического заряда, и поэтому он проходит через наши детекторы, как заправский диверсант, не оставляя следов. Но так как барионный заряд антинейтрона $B = -1$, то он может аннигилировать с веществом и тем самым обнаруживает свое существование. Так вот до сих пор не смогли измерить даже массу антинейтрона, не говоря уже о других характеристиках.

Список нашего незнания свойств античастиц можно продолжить. У нас нет данных, например, о ядерных характеристиках антинейтрона. До сих пор не получено ни одного антиатома — простейшей системы из антипротона и позитрона. Плохо изучен сам элементарный акт аннигиляции антипротона с протоном.

Такое положение есть просто следствие того, что окружающий нас мир состоит из вещества и античастицы — это только наши редкие гости. Тем не менее недавно были построены и введены в действие специальные ускорители, рассчитанные на получение больших потоков античастиц. Это позволяет надеяться, что в ближайшем будущем многие из перечисленных выше пробелов в физике антивещества будут ликвидированы.

* Даже студенты-физики иногда попадают впросак, когда сталкиваются с таким громадным числом. «Как же можно измерить время жизни частицы, если оно превышает возраст Вселенной?» — недоумевают они. Все дело в том, что время жизни — вероятностная характеристика. Она определяет вероятность распада одной частицы. Однако если в вашем распоряжении много частиц, то вероятность наблюдения распада во много раз увеличивается. Например, один протон за год имеет вероятность распасться $\leq 10^{-30}$, а если вы имеете возможность наблюдать за поведением 10^{30} протонов, то, может быть, вам удастся зарегистрировать в год распад одного протона. Оговорка «может быть» поставлена потому, что пока таких процессов не наблюдали (подробнее об этом см. главу 5).

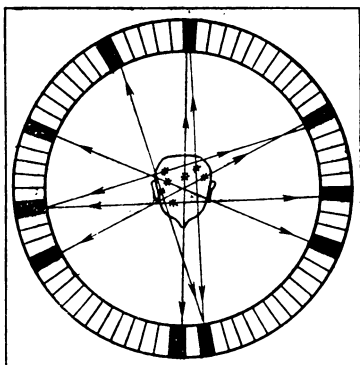
Исследования процессов аннигиляции относятся к классу фундаментальных задач, решение которых позволит нам лучше понять природу взаимодействий между элементарными частицами. Казалось бы, совершенно неуместно спрашивать, какую пользу может извлечь, так сказать, народное хозяйство в результате этих экспериментов, на первый взгляд совершенно далеких от наших повседневных нужд. Тем не менее явление аннигиляции, оказывается, можно успешно использовать для решения ряда прикладных задач. Например, в последнее время в медицине появился новый, очень перспективный метод диагностики — позитронная томография.

Принцип позитронной томографии довольно прост, хотя, как часто бывает, для его практического воплощения надо решить несколько далеко не тривиальных задач. В первой главе мы говорили, что некоторые радиоактивные ядра в процессе бета-распада могут испускать позитроны. (см. рис. 20). Многие химические элементы, жизненно важные для человека, имеют изотопы, которые распадаются с вылетом позитрона. Такие радиоактивные изотопы есть, например, у кислорода, азота и углерода. Это обстоятельство позволяет создавать различные химические соединения, у которых атомы обычных элементов замещены на атомы их изотопов. Например, если заменить в молекуле воды атом кислорода-16 его радиоактивным изотопом кислородом-15, то получится «позитронная» вода, то есть вода, в которой за счет распадов кислорода-15 будут возникать позитроны.

Подобным образом можно пометить радиоактивными изотопами несколько сот различных химических соединений. Если теперь ввести в тело пациента «меченое» соединение, то позитроны от распада изотопов будут аннигилировать с электронами окружающих тканей. Как мы хорошо знаем, в такой аннигиляции образуются два γ -кванта: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$, которые можно зарегистрировать. Позитроны в теле человека способны пройти до аннигиляции всего лишь несколько миллиметров, поэтому местонахождение «меченого» соединения устанавливается с большой точностью.

Для получения изображения исследуемого органа тело пациента окружают кольцом счетчиков, детектирующих гамма-кванты. Информация с этих счетчиков поступает в компьютер, который с помощью довольно слож-

Рис. 24. В методе позитронной томографии регистрируют гамма-кванты, возникающие при аннигиляции позитронов с электронами тканей исследуемого органа. Характерной чертой этой аннигиляции является то, что гамма-кванты разлетаются в противоположные стороны под углом 180° . Кольцо счетчиков, окружающее пациента, детектирует такие пары гамма-квантов во всех направлениях (в плоскости кольца). Полученная информация обрабатывается компьютером, который восстанавливает изображение интересующего органа



ных программ восстанавливает изображение органа (рис. 24).

В настоящее время разработаны системы, которые позволяют получать до 7 томографических картинок одновременно и с хорошим пространственным разрешением. Последовательные снимки можно получить с интервалами менее минуты.

Позитронную томографию применяют сейчас в клинической онкологии, при изучении инфарктов миокарда, при исследованиях кровеносных сосудов мозга и даже при лечении шизофрении. Как видно, список областей медицины, в которых используется явление аннигиляции, довольно большой, и он непрерывно растет.

Однако нам пора возвращаться к основной теме — антивеществу во Вселенной. Именно процесс аннигиляции дает нам принципиальную возможность определить, есть или нет где-нибудь во Вселенной Антимир — скопление антивещества в большом масштабе. Ведь на границе Мира и Антимира неизбежно должна идти аннигиляция. Поэтому давайте посмотрим, какие эффекты аннигиляции можно наблюдать.

СВОЙСТВА АННИГИЛЯЦИИ

А все-таки жаль, что в Москве
Больше нету извозчиков.
Хотя б одного — и исчезла б
Из сердца печаль.

Булат Окуджава

Ностальгия по прошлому — великое дело. Сейчас много придумали разных способов путешествия. Всякие там нуль-транспортировки, проколы вакуума. Но любой настоящий ценитель научной фантастики сразу скажет вам, что лучше всего добираться до Тау Кита старым, добрым фотонным звездолетом. И действительно, фотонный звездолет работает за счет аннигиляции антивещества, а антивещество — самое идеальное топливо.

Происходит это из-за того, что аннигиляция — это единственный процесс, в котором, как мы уже говорили, исчезают обе начальные частицы и вся их масса полностью переходит, например, в энергию фотонов. Никакая другая реакция, используемая в энергетике, таким свойством не обладает. И при делении урана, и в процессах термоядерного синтеза в энергию превращается лишь небольшая часть (порядка десятых долей процента) массы покоя частиц, участвующих в реакции. Поэтому аннигиляция антивещества с веществом дает в тысячу раз больше энергии, чем при делении такого же количества урана. Если бы в нашем распоряжении была небольшая планетка из антивещества, то все проблемы с энергетическим кризисом сразу отпали. Предположим, мы научились бы переводить всю энергию аннигиляции в электрическую. Тогда для того, чтобы обеспечить нашу страну годовым запасом электроэнергии, надо отколоть от планетки и подвергнуть аннигиляции всего лишь 100-килограммовый кусок антивещества. Сравните эти 100 килограммов с сотнями миллионов тонн угля и нефти, которые мы добываем ежегодно, чтобы решить ту же самую задачу!

Т а б л и ц а 3. Сколько энергии выделяется в разных реакциях в расчете на 1 грамм топлива

- | | |
|--|-----------------------------|
| 1. Аннигиляция вещества и антивещества | — $9 \cdot 10^{13}$ джоулей |
| 2. Деление урана | ~ $9 \cdot 10^{10}$ джоулей |
| 3. Сжигание угля | ~ $2,9 \cdot 10^4$ джоулей |

Антивещество было бы идеальным топливом еще и потому, что оно не загрязняет окружающую среду. После

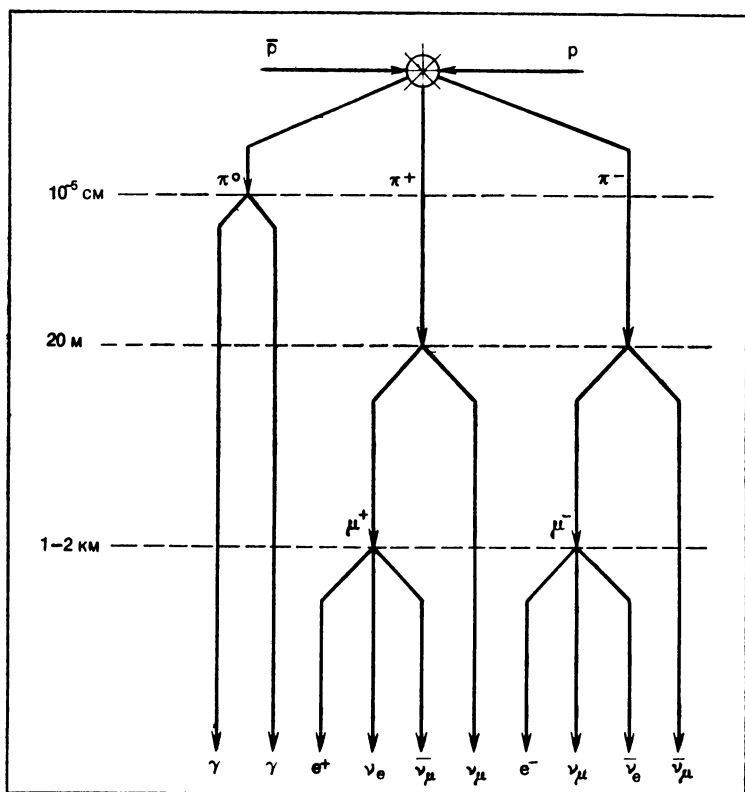


Рис. 25. Схема распадов продуктов аннигиляции протон—антипротон. Цифры в левой части рисунка соответствуют тому пути, который проходит частица в космосе до момента ее распада

аннигиляции в конечном счете остаются только фотоны высокой энергии и нейтрино. Рассмотрим, например, как происходит аннигиляция протона и антипротона. Процессы, возникающие при этой реакции, схематически показаны на рис. 25. Разберем их последовательно, шаг за шагом.

1. Образование пионов

Образование пионов — это наиболее вероятный процесс при антипротон-протонной аннигиляции. Пионы

(или π -мезоны) — легкие частицы с массой ~ 140 МэВ и барионным зарядом $B=0$. Максимальное число пионов, которое образуется в аннигиляции, легко посчитать:

$$N_{\max} = \frac{\text{Масса } \bar{p} + \text{Масса } p}{\text{Масса } \pi} \approx 13.$$

Минимальное число пи-мезонов равно 2. (Один пи-мезон не может образоваться, так как это запрещает закон сохранения импульса, см. рис. 22). Наиболее часто при аннигиляции $p\bar{p}$ вылетают 5—6 пи-мезонов. Иногда, правда, довольно редко, вся энергия аннигиляции сразу преобразуется в энергию фотонов, то есть идет процесс $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$.

В качестве примера рассмотрим, что произойдет, когда в $p\bar{p}$ -аннигиляции родятся три пи-мезона разных знаков:

$$p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0.$$

$Q =$	$+1$	-1	$+1$	-1	0
$B =$	$+1$	-1	0	0	0

2. Распад пионов

Пи-мезоны — это нестабильные частицы. Время их жизни по нашим повседневным масштабам исключительно мало. Заряженные пионы живут порядка сотен миллионных долей секунды, а затем распадаются на другие частицы — мюоны и нейтрино. Тем не менее если у нас аннигиляция протона и антипротона происходит не в топке фотонного звездолета, а в открытом космосе, то заряженные пионы успевают пройти до своего распада довольно значительный путь, порядка 20 метров. Распадаются заряженные пионы главным образом на мюоны и нейтрино. Время жизни нейтрального пиона настолько мало, что в нашем языке нельзя уже отыскать подходящего числительного для обозначения этой малости. В цифрах время жизни нейтрального пиона — $0,8 \cdot 10^{-16}$ секунды. Он живет в 100 миллионов раз меньше, чем заряженные пионы, и поэтому от места рождения он может уйти не дальше чем на 10^{-5} сантиметра. После этого он распадается на два фотона с высокой энергией ~ 70 МэВ.

Итак, характерные реакции, по которым происходят распады пионов, таковы:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma,$$

где ν_μ — мюонное нейтрино. Чуть ниже мы употребим символ ν_e для обозначения электронного нейтрино. Это два типа нейтрино. Первый появляется лишь в реакциях с мюоном, второй — в процессах, где есть электрон. Каждому типу нейтрино присвоен свой лептонный заряд: L_e и L_μ .

3. Распад мюонов

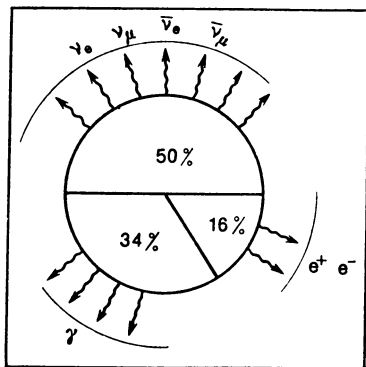
Мюоны — тоже нестабильные частицы. Однако они живут в 100 раз дольше, чем пионы, и в космосе могут пробежать до своего распада в 100 раз дальше — 1—2 километра. Потом они распадаются на электроны, позитроны и нейтрино:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu,$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Таким образом, на расстоянии порядка 2 километров от точки аннигиляции протона и антипротона остаются лишь фотоны высокой энергии, электроны, позитроны и нейтрино. Все эти частицы, по современным представлениям, стабильны и могут продолжать свое путешествие

Рис. 26. На этой диаграмме показано, какую долю энергии, освободившейся в антипротон-протонной аннигиляции, уносят нейтрино, e^+e^- и гамма-кванты. Видно, что около 50% энергии уносят нейтрино. Конструкторам фотонных ракет придется здорово потрудиться, чтобы научиться улавливать энергию нейтрино



в космосе до тех пор, пока не провзаимодействуют с веществом. Причем такие частицы (особенно фотоны и нейтрино) способны проходить во Вселенной колоссальные расстояния и могут в принципе доставить нам информацию об аннигиляции, даже если она происходит в других галактиках.

Иное дело, как выделить эту информацию. В космосе происходит много разных процессов, в ходе которых появляются электроны, позитроны, фотоны и нейтрино. Поэтому задача охотника за антивеществом очень сложна. Как минимум он должен уметь хорошо детектировать продукты аннигиляции. К сожалению, современные возможности регистрации предполагаемых продуктов аннигиляции нельзя охарактеризовать даже скромным эпитетом «хорошо». В следующей главе мы подробнее разберем ситуацию, сложившуюся в этой области. Сейчас же давайте подытожим, что же мы должны искать, чтобы убедиться в существовании во Вселенной антивещества.

Итак:

1. Где-то в космосе произошла аннигиляция вещества и антивещества.

2. Разыскиваются свидетели:

фотоны высоких энергий, γ ;

электроны, e^- ;

позитроны, e^+ ;

нейтрино, ν_e , ν_μ , $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$.

3. Особые приметы: обладают большой энергией (больше 100 МэВ), высокой проникающей способностью (нейтрино проходит через чугунную плиту размером в Галактику). При себе имеют отрицательный (электроны) и положительный (позитроны) электрический заряды, а также различные лептонные заряды.



ГЛАВА 3

Ищем Антимир

«Если мы станем на ту точку зрения, что полная симметрия между положительными и отрицательными электрическими зарядами является фундаментальным законом природы, то мы должны рассматривать как своего рода случайность, что Земля и, вероятно, вся Солнечная система содержит избыток обычных отрицательных электронов и положительных протонов. Вполне возможно, что некоторые звезды построены иным путем, именно главным образом из позитронов и отрицательных протонов. Конечно, в мире должно быть одинаковое число звезд каждого сорта. Оба сорта звезд будут иметь в точности одинаковые спектры, и в настоящее время нет возможности различить их каким-либо астрономическим методом».

Эти слова Дирак произнес в своей Нобелевской лекции в 1933 году. Опять поражаешься интеллектуальной смелости этого выдающегося ученого. Конечно, потен-

циально возможность существования Антимира в известном смысле уже содержится в релятивистской теории Дирака. Но насколько сильно надо верить в свою теорию, чтобы предсказывать существование целого нового мира, имея в своем распоряжении лишь одну открытую к тому времени античастицу!

С тех пор прошло 50 лет. Было открыто множество элементарных частиц, и практически для каждой частицы найден свой «двойник» — античастица. Естественно, казалось бы, предполагать, что такая же симметрия между веществом и антивеществом должна царить и в больших масштабах. На первый взгляд не видно никаких оснований, почему бы нашей Вселенной не состоять из одинакового количества вещества и антивещества. Однако согласно общепринятому мнению антивещества в больших масштабах в природе нет. Этот вывод следует как из современной теории развития Вселенной, так и из результатов наблюдений. Тем не менее было бы ошибкой считать, что уже все проблемы, связанные с существованием антивещества во Вселенной, решены, и это поле деятельности полностью ископано трудолюбивыми экспериментаторами.

В этой главе мы расскажем о поисках антивещества во Вселенной. Наша главная цель состоит в том, чтобы показать читателю, насколько твердо обосновано утверждение об отсутствии Антимира. Автор одного обзора по нашей проблеме (придерживающийся точки зрения, что Антимира нет) предпослал своему исследованию такой едкий эпиграф: «Ужасные трагедии в науке состоят в безжалостном убийстве прекрасных теорий безобразными фактами». Мы рассмотрим, действительно ли произошло убийство красивой, симметричной теории миров и антимиров или, может быть, она всего лишь тяжело ранена.

Кроме того, эксперименты по поиску антивещества интересны еще и тем, что они проводятся в тех областях физики и астрофизики, которые возникли совсем недавно и сейчас интенсивно развиваются. В первую очередь это относится к гамма-астрономии и детектированию космических нейтрино. Мы постараемся ознакомить читателя с последними достижениями науки в этих направлениях.

Наконец, история поисков Антимира очень поучительна. Она хорошо показывает, что происходит, когда люди

ищут явление, которое законы природы не запрещают, но в существование которого никто не верит.

Итак, давайте перейдем к рассмотрению «безобразных» фактов.

Прилетают ли к нам «кусочки» антимира?

Ненаучное слово «кусочки» стоит в заглавии для того, чтобы подчеркнуть возможность двух типов наблюдений антивещества. Во-первых, на границе Мир—Антимир должна идти аннигиляция, и наши приборы могут в принципе уловить продукты аннигиляции. Кроме того, не исключена возможность непосредственной регистрации каких-нибудь частей, «кусочков» Антимира, например античастиц, антиядер или более сложных антител. Но прилетают ли к нам гости из Антимира?

Античастицы. Нашу Землю регулярно бомбардирует поток космических лучей — частиц высоких энергий, которые генерируются при различных процессах, происходящих в Галактике. Большую часть этих частиц составляют протоны и ядра гелия.

Но совсем недавно, в 1979 году, в космических лучах были найдены и антипротоны. Об этом сообщили сразу две группы: советские физики из Ленинградского физико-технического института им. А. И. Иоффе (руководитель Э. Богомолов) и американские ученые из Центра космических полетов им. Л. Джонсона (руководитель Р. Голден). Позитрон, как вы помните, тоже был обнаружен в космических лучах, но было это в 1932 году. Такой большой промежуток времени между открытием в космических лучах позитрона и антипротона объясняется тем, что антипротон намного сильнее взаимодействует с веществом, чем позитрон. Антипротоны из космоса не успевают дойти до поверхности Земли, они аннигилируют уже в самых верхних слоях атмосферы. Именно поэтому поиск антипротонов в космических лучах представляет собой сложную техническую задачу. Надо поднять детектор как можно выше, к границе атмосферы. Все эксперименты по поиску античастиц в космических лучах были выполнены на аэростатах. Например, в опытах Р. Голдена воздушный шар поднимал на высоту 36 километров примерно 2 тонны аппаратуры.

Но можно ли считать, что эти антипротоны прилетели к нам на Землю от Антимира? Вообще говоря, нельзя. В космических лучах есть протоны достаточно высокой

энергии, и при столкновении с частицами, например, межзвездного газа они могут рождать антипротоны в той же самой реакции, что идет и на ускорителях:

$$p + p \rightarrow \bar{p} + p + p + p.$$

Таким образом, сам факт обнаружения антипротонов в космических лучах можно объяснить, не привлекая гипотезы об Антимире.

Однако сразу было замечено, что поток антипротонов, который наблюдали в своих опытах группы Э. Богомолова и Р. Голдена, не очень хорошо согласуется с простыми моделями распространения космических лучей в Галактике. Ситуация еще более осложнилась, после того как в июне 1980 года группа американских астрофизиков под руководством А. Баффингтона выполнила измерения потока космических антипротонов низких энергий. Совершенно неожиданно оказалось, что поток антипротонов низких энергий в 100 раз превышает то значение, которое следует из теории (рис. 27)! На сегодняшний день результаты Баффингтона не имеют удовлетворительного объяснения.

Естественно, адепты Антимира не преминули воспользоваться таким положением и попытались дать свою интерпретацию данным о потоке антипротонов.

Их гипотеза такова.

Когда мы говорим, что согласно общепринятым представлениям антивещества в больших масштабах во Вселенной нет, эта фраза неточна. Вся совокупность современных наблюдательных данных позволяет нам более или менее уверенно говорить об отсутствии антивещества только в некоторой, хотя и достаточно большой, области окружающего нас пространства, а именно в масштабах нашего скопления галактик. Это достаточно сильное утверждение, ведь размеры нашего скопления галактик охватывают громадное расстояние, которое свет проходит за десятки миллионов лет. Однако есть ли антивещество за пределами нашего скопления галактик — этот вопрос пока еще открыт. Так вот, делается предположение, что соседнее скопление галактик состоит из антивещества и антипротоны из этого скопления могут «просачиваться» в нашу Галактику и в конечном счете в Солнечную систему, создавая тот самый избыток антипротонов, который наблюдается в космических лу-

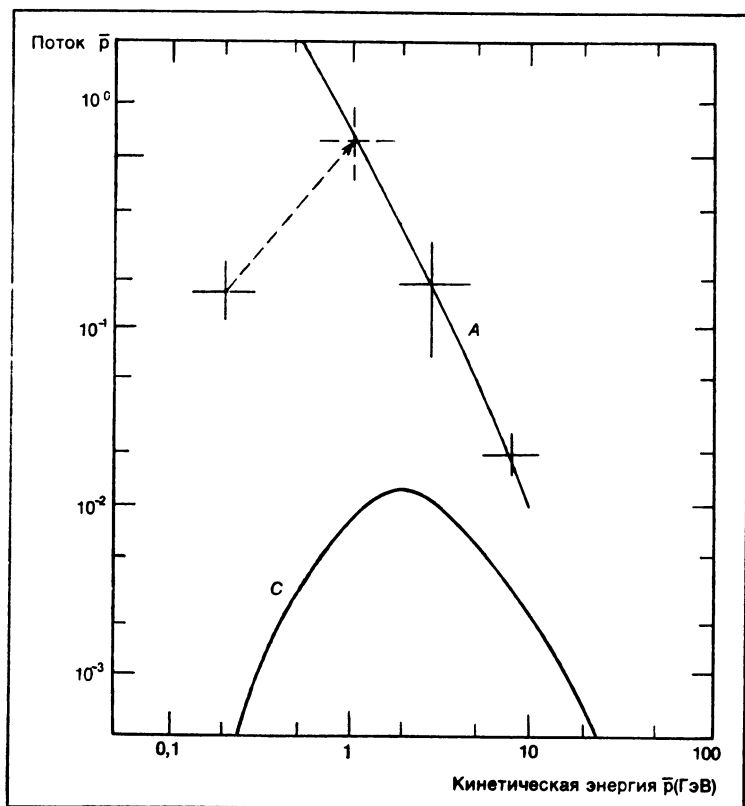


Рис. 27. Результаты измерений и теоретических предсказаний потока антипротонов. Экспериментальные данные обозначены крестами. Измерения Баффингтона проводились в период повышенной солнечной активности, поэтому для них необходимо сделать некоторые модельно-зависимые коррекции. Результат, получающийся после такой коррекции, обозначен пунктирным крестиком. Кривая С показывает, каким должен быть поток антипротонов, возникающих при взаимодействии космических лучей с межзвездным газом, согласно стандартной модели распространения космических лучей. Кривая А показывает результаты расчетов по аннигиляционной гипотезе. Отметим, что в этих расчетах делалось не только предположение о возможности истечения антипротонов из скопления «антигалактик», но предполагалось, что средняя мощность галактик как источников космических лучей должна быть в 20 раз больше, чем соответствующая мощность нашей Галактики

чах. На рис. 27 (кривая А) показаны результаты предварительных расчетов по этой гипотезе. Видно, что они хорошо описывают всю совокупность данных по наблюдаемым потокам антипротонов.

Однако абсолютно неясно, каким образом низкоэнергетические антипротоны могут проходить гигантские расстояния в сотни миллионов световых лет между скоплениями галактик. Никаких убедительных доводов сторонники Антимира предоставить не могут. Поэтому на самом деле все, что можно утверждать на сегодняшний день, так это то, что вопрос о природе антипротонной составляющей космических лучей открыт. В первую очередь требуются новые эксперименты для проверки результатов Баффингтона. Кроме того, гипотеза «первичного» происхождения антипротонов может быть проверена косвенным образом. Она предсказывает, что из соседнего «антископления» галактик должно быть истечение не только антипротонов, но и антиядер, главным образом ядер антигелия.

Антиядра. В космических лучах наблюдались обычные ядра многих элементов таблицы Менделеева, вплоть до урана. Однако ни одного антиядра в космических лучах до сих пор обнаружено не было. Правда, пределы, которые были получены в опытах по поиску антиядер, еще не настолько низки, чтобы можно уверенно исключить возможность их существования. Сторонники Антимира считают, что поток ядер антигелия должен быть в 10 раз меньше той величины, которую удалось измерить на сегодняшний день. Предсказываемое значение не слишком мало и в принципе достижимо уже в ближайшем будущем.

Надо сказать, что если бы удалось обнаружить хотя бы одно ядро антигелия, а еще лучше — антиуглерода, то это стало бы исключительно серьезным подтверждением гипотезы о существовании Антимира. В газетах бы тогда точно написали: «Открыт Антимир!» Дело в том, что вероятность создать антигелий за счет столкновения протонов космических лучей с веществом межзвездного газа пренебрежимо мала, меньше 10^{-11} . В то же время если существуют антизвезды, то в них антиводород должен перегорать в антигелий, а затем в антиуглерод.

Как бы то ни было, антиядер пока не зарегистрировано, хотя с большой уверенностью отрицать их присутствие в космических лучах нельзя.

Антитела. Не наблюдали ли мы когда-нибудь появление на Земле не отдельных частичек, а целых «кусков» антивещества? Это довольно скользкий вопрос. В науке, помимо твердо установленных фактов и общепризнанных теорий, всегда есть некоторый фольклор — совокупность гипотез, в которые верят только их создатели. Конечно, обсуждать и проверять такие гипотезы тоже надо, но не стоит их переоценивать. Поэтому мы не будем останавливаться на закрытой современной наукой гипотезе об антивещественной природе Тунгусского метеорита, а также на явно спекулятивной теории шведского астрофизика Х. Альфвена о том, что половина звезд и комет в нашей Галактике состоит из антивещества. Рассмотрим только одну очень интересную гипотезу, авторы которой не только декларировали, но и проверили ее экспериментально.

В начале 60-х годов академик Б. П. Константинов поставил вопрос о том, не могут ли некоторые метеоры состоять из антивещества. Метеоры — это те самые «падающие звезды», которые каждый из нас не раз наблюдал. Они представляют собой твердые частицы различных размеров вплоть до десятой доли миллиметра. Их след возникает при сгорании метесра, движущегося с высокой скоростью, в плотных слоях атмосферы. Если частицы метеорной пыли имеют малую скорость, то они могут не сгореть в атмосфере, а благополучно опуститься на поверхность Земли. Оказывается, ежедневно на Землю падает до 3 тысяч тонн такой пыли!

Так вот, интересен сам вопрос: предположим, в атмосферу влетает метеор из антивещества. Что произойдет? Удивительно, но точный анализ показывает, что, в общем-то, ничего особенного мы не увидим. «На глаз» метеор от антиметеора не должен отличаться. Разумеется, если вы успеете загадать желание во время падения антиметеора, то должен исполниться «антижеланный» результат. Однако такие факты трудно анализировать. К счастью, имеются и другие признаки, которыми должны обладать антиметеоры. В результате аннигиляции антиметеоров в атмосфере в спектре их излучения будут появляться фотоны высокой энергии, которые возникают от распада π^0 -мезона (рис. 28), а также фотоны с меньшей энергией от аннигиляции электрона и позитрона. Кроме того, продукты аннигиляции должны выбивать из ядер атмосферы некоторое количество нейтронов.

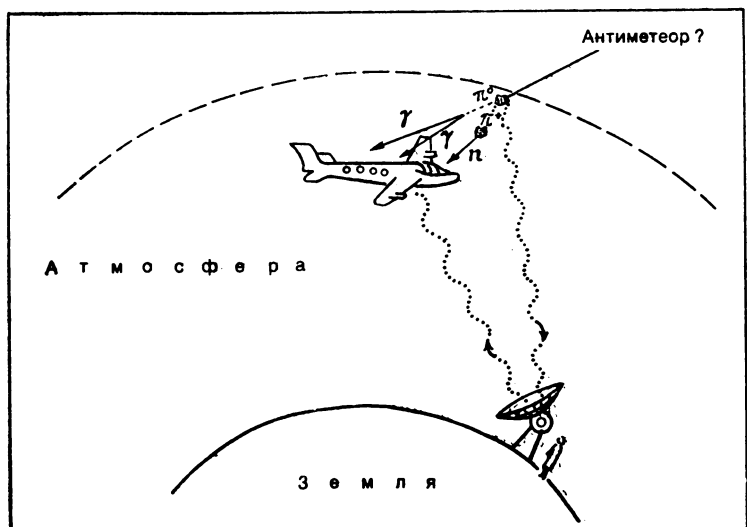


Рис. 28. Схема опыта по поиску антиметеоров. Обнаружение метеора выполнялось с помощью радиолокационной станции. Детектирующая аппаратура, расположенная на самолете, регистрировала, появляются ли в этот момент времени жесткие гамма-кванты и нейтроны, которые продукты аннигиляции могут выбивать из ядер атмосферы

Под руководством Б. П. Константинова сотрудники Ленинградского физического института выполнили два крупномасштабных эксперимента для проверки гипотезы существования антиметеоров. Интересно, что оба эксперимента дали положительные результаты.

В первом из них изучалось, сопровождается ли появление отдельных метеоров повышением интенсивности нейтронов и высокоэнергетических гамма-квантов (с энергией больше 100 МэВ). Детектирующая аппаратура была поднята на самолете на высоту 13—18 километров, а наблюдатели на Земле определяли момент вхождения метеора в атмосферу. Измерения проводились несколько лет, и было исследовано 20 метеорных потоков. Оказалось, что почти во всех этих потоках появление метеоров сопровождается увеличением потока гамма-квантов на 2 процента по сравнению с естественным фоном. Точность измерения этих 2 процентов была достаточно велика, и можно утверждать, что хотя эффект мал, но он дейст-

вительно существует. Если считать, что такое увеличение потока гамма-квантов происходит за счет аннигиляции антиметеоров, то соответствующий поток антивещества, попадающего на Землю, должен быть порядка 20 миллиграммов за сутки.

Другой эксперимент был выполнен во время полета спутника «Космос-135». Установленные на нем детекторы измеряли спектр низкоэнергетичных гамма-квантов (с энергией 0,2—4 МэВ). Как мы говорили, при аннигиляции электрона и позитрона большей частью должны образовываться 2 гамма-кванта *. Причем если начальные энергии позитронов и электронов были достаточно малы, то полная энергия, которая уносится обоими гамма-квантами, должна соответствовать удвоенной массе электрона. Масса электрона приблизительно 0,5 МэВ, следовательно, при аннигиляции электрон-позитронной пары должны испускаться гамма-кванты с фиксированной энергией в 0,5 МэВ. Аппаратура «Космоса-135» регистрировала такие гамма-кванты, но само по себе это опять-таки ни о чем не говорит: позитроны могут образовываться во многих процессах, идущих в атмосфере под действием космических лучей. Важно другое: было обнаружено, что интенсивность потока гамма-квантов с энергией 0,5 МэВ меняется со временем. Причем в тот момент, когда Земля попадала в мощные метеорные потоки, интенсивность аннигиляционных гамма-квантов возрастала на 50 процентов. Существенно, что интенсивность потока заряженных частиц и гамма-квантов других энергий со временем практически не менялась.

Как можно интерпретировать результаты этих экспериментов? Сразу надо сказать, что приемлемых теоретических объяснений оба найденных эффекта не получили. Гипотеза об антиметеорах могла бы объяснить эти явления, но она сама нуждается в обосновании. Непонятно, откуда взялись антиметеоры, каков механизм их образования. Если обычные метеоры, по-видимому, возникают при развале комет, то антиметеоры должны образовываться из антикомет. Приняв возможность существования антикомет, мы сразу же должны допустить возможность существования антизвезд. А это уже противоречит другим наблюдательным фактам.

* При аннигиляции e^+e^- возможно также образование 3 гамма-квантов, но это уже менее вероятный процесс.

Итак, результаты ленинградских опытов нельзя рассматривать как доказательство существования антиметеров. Несомненно одно: поиски антивещества привели к открытию ранее неизвестных эффектов, изучение которых интересно само по себе. Существование этих явлений до сих пор никем не опровергнуто. А ведь как вначале было воспринято предложение Б. П. Константинова? Один из его учеников вспоминает: «Гипотеза встретила острую оппозицию подавляющего большинства астрофизиков. Хотя значительная часть возражений носила при этом скорее эмоциональный, чем научный характер, тем не менее можно было указать на ряд действительно сильных возражений против такой гипотезы».

Мораль, которую можно извлечь из этой истории, на мой взгляд, такова. Если есть возможность выполнить опыт для проверки наших представлений об основных закономерностях природы, такой эксперимент обязательно надо ставить. Потому что при любом его исходе мы все равно получаем очень важную информацию. Кроме того, никогда не следует забывать об известной ограниченности даже самых популярных теоретических построений.

В несколько своеобразной форме эту мысль выразил известный американский теоретик Г. Джорджи, который на последней международной конференции по физике высоких энергий в Париже закончил свой доклад показом маленького комикса, хорошо иллюстрирующего взаимоотношения между теоретиками и экспериментаторами. Он продемонстрировал три картинки на тему, как крестьяне во Франции ищут трюфеля с помощью свиней. Причем под крестьянином подразумевался теоретик, под свиньей — экспериментатор, а трюфеля — это открытия. На первой картинке крестьянин ведет свинью в лес, на второй — свинья роет землю и ищет трюфеля, а на третьей картинке был изображен момент, когда свинья находит трюфеля. Тогда крестьянин бьет ее палкой, отгоняет от вырытой ямы и забирает трюфеля себе. «Единственное различие между крестьянином и теоретиком, — замечает Джорджи, — состоит в том, что крестьянин всегда точно знает, в каком лесу есть трюфеля, чего никак нельзя сказать о теоретиках».

Подведем некоторый итог. У нас нет надежных доказательств того, что какие-либо частицы Антимира прилетают к нам на Землю. Пока мы не наблюдали ни од-

ного антиядра; результаты по измерению потока антипротонов не могут расцениваться как доказательство существования Антимира — слишком много для этого требуется предположений, которые нуждаются в объяснении и проверке. Вместе с тем наши экспериментальные результаты не настолько полны и точны, чтобы совсем закрыть возможность существования Антимира.

Однако данные по космическим лучам могут наложить некоторые ограничения на примесь антивещества в нашей Галактике. Считается, что почти все космические лучи генерируются в процессах, которые происходят «внутри» нашей Галактики. Поэтому доля антивещества, возможно существующего в Галактике, не должна превышать доли антипротонов и антиядер в космических лучах. Известно, что в космических лучах отношение числа антипротонов к числу протонов приблизительно равно 10^{-4} , а отношение числа ядер антигелия к числу протонов по крайней мере меньше 10^{-5} .

Отсюда делается вывод: примесь антивещества в Галактике меньше 10^{-4} — 10^{-5} . Это означает, что экспериментальные данные по космическим лучам не противоречат наличию, грубо говоря, одной антизвезды на каждые 10—100 тысяч обычных звезд. Подчеркнем, что такая оценка отнюдь не является доказательством существования антизвезд. Совершенно неясно, как могли такие антизвезды образоваться в нашей Галактике. Цифры 10^{-4} — 10^{-5} надо скорее рассматривать как меру нашей способности «расправиться» с вопросом об антивеществе. Видно, что, используя имеющиеся данные по космическим лучам, мы не можем ни найти антивещество, ни изгнать его совсем даже из нашей Галактики. Правда, есть более жесткие ограничения на долю антивещества в Галактике. Они получены из других наблюдений, к рассмотрению которых мы сейчас перейдем.

Антивещество в Метагалактике

Напомним, что Метагалактикой называют всю видимую нами часть Вселенной. Распределение вещества в Метагалактике имеет довольно интересные закономерности. В очень больших масштабах (порядка миллиардов световых лет) оно однородно и изотропно, то есть в любом «кубике» пространства размерами в миллиарды световых лет содержится одинаковое количество вещества. В меньших масштабах наблюдается много разнооб-

разных структур. Например, наша Галактика вместе со своими ближайшими соседями — туманностью Андромеды, Магеллановыми облаками и другими галактиками — образует так называемую Местную группу. Эта Местная группа галактик движется со скоростью порядка 300—500 километров в секунду по направлению к крупному скоплению галактик в созвездии Девы. Там находится центр гигантской системы, объединяющей несколько больших и малых скоплений галактик. В свою очередь, скопления и сверхскопления галактик образуют определенные структуры, напоминающие пчелиные соты. В центре галактических сот имеются колоссальных размеров пустоты, где плотность вещества очень мала, а скопления и сверхскопления галактик группируются по «стенкам» сот.

Так вот, предположим, что где-то существует область антивещества размерами с галактику или скопления галактик. Как в этом случае можно обнаружить антивещество? Еще Дирак подчеркивал, что использовать для этой цели видимый свет не удастся, фотонам безразлично, испускаются ли они обычным атомом или антиатомом. Но на границе между веществом и антивеществом должна идти аннигиляция. Давайте в общих чертах рассмотрим, как она протекает.

Физика реакций, идущих на границе вещество—антивещество, во многом напоминает процесс, который мы (или наши жены) наблюдаем чуть ли не каждый день. Речь идет об испарении капли воды на горячей сковородке. Если температура сковородки мала, то капля воды, попав на сковородку, спокойно испаряется. Причем если нанести на график время жизни капли в зависимости от температуры сковородки, то мы увидим, что чем выше температура, тем быстрее происходит испарение капли. Однако при некоторой достаточно высокой температуре время жизни капли внезапно увеличивается. Для того чтобы понять, что же происходит, оторвемся от графика и посмотрим на раскаленную сковородку. Мы увидим, что, попав на нее, капля как бы начинает прыгать и плясать, причем продолжается это довольно долго, в течение одной—двух минут. Причина такого странного поведения капли заключается в том, что между каплей и поверхностью сковородки образуется своеобразная воздушная подушка. Ее создает водяной пар, испаряющийся из капли. Давление пара тем сильнее, чем выше

температура сковородки. Когда давление становится настолько большим, что подымает каплю, контакт между поверхностью капли и сковородкой разрывается и испарение резко замедляется. Поэтому время жизни капли увеличивается. Такое явление называется эффектом Лейденфроста.

Оказывается, эффект Лейденфроста имеет очень важное для нашей темы приложение.

Дело в том, что при контакте областей вещества и антивещества за счет аннигиляции возникают высокоэнергетические электроны и гамма-кванты. Они сильно взаимодействуют с остальными частицами, передавая им свою большую энергию, и как давление водяного пара отталкивает каплю от сковородки, так и давление, создаваемое продуктами аннигиляции, приводит к расталкиванию вещества и антивещества в разные стороны. Такой эффект препятствует перемешиванию двух наших субстанций и приводит к тому, что аннигиляция идет лишь в поверхностном слое, который называется пленкой Лейденфроста.

Именно за счет этого явления поверхность раздела не превращается в гигантский пылесос, втягивающий в себя вещество и антивещество, и становится возможным выживание большого количества антивещества.

Мы можем в принципе регистрировать продукты аннигиляции, которая происходит в пленке Лейденфроста. Для этого, как мы говорили в предыдущей главе, надо исследовать приходящие из космоса потоки электронов, позитронов, нейтрино и гамма-квантов. Именно эти частицы «выживают» после аннигиляции антипротона с протоном. Однако сразу надо отметить, что все эти частицы могут возникать и в обычных процессах, происходящих во Вселенной, например при распространении космических лучей в межзвездной среде. Поэтому, изучая космические нейтрино, гамма-кванты и позитроны, мы можем получить лишь косвенные указания на существование антивещества. Только в исключительно благоприятном случае, когда ни одна «нормальная» теория, основанная на обычных предположениях, не сможет никаким образом объяснить данные наблюдений, а гипотеза об их аннигиляционном происхождении даст блестящее согласие с экспериментом, можно будет о чем-то говорить.

Итак, начнем с вопроса о регистрации электронов и позитронов из космоса.

Видим ли мы e^+ и e^- от аннигиляции?

К сожалению, изучение электрон-позитронной компоненты космического излучения не поможет нам дать решающий ответ: «Есть!» или «Нет!» Слишком много электронов и позитронов рождается при взаимодействии космических лучей и с межзвездным газом, и с атмосферой Земли. В такой толчее этих частиц, попадающих в наши детекторы, пришелец из Антимира непременно затеряется. Однако время от времени астрономы открывают разные необычные объекты, поражающие нас количеством выделяемой в них энергии (например, квазары, сейфертовские галактики, сильные радиоисточники и т. д.). Поэтому с такой же регулярностью появляются гипотезы, авторы которых пытаются объяснить это повышенное энерговыделение за счет аннигиляции. Они используют тот факт, что электроны и позитроны, двигаясь в магнитных полях по искривленным траекториям, довольно легко отдают свою энергию в виде излучения и вся их энергия выделяется в значительной степени локально. Однако, как мы обсуждали ранее (см. также рис. 25 и 26), при аннигиляции образуются не только e^+ и e^- , но неизбежно должны возникать и γ -кванты.

Следовательно, источник, «светящийся» за счет «горения» антивещества, должен быть сильнейшим гамма-источником. Этого мы пока не наблюдаем, но подробнее чуть позже.

Видим ли мы нейтрино от аннигиляции?

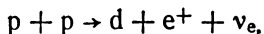
Знающие люди лишь усмехнутся, услышав такой вопрос. Если позитронов и электронов в космических лучах слишком много и трудно разобраться в их происхождении, то в случае с нейтрино другая беда. Нейтрино из космоса регистрируют слишком мало, чтобы делать какие-то заключения. Нейтринные телескопы функционируют уже лет пятнадцать, и за все это время физикам удалось накопить не больше тысячи событий, вызванных космическими нейтрино. Причем такая бедная статистика объясняется не тем, что нейтрино редкий гость на Земле. Напротив, мы с вами живем под постоянным нейтринным дождем, по сравнению с которым тропические ливни — просто ничто. Например, через спичечный коробок каждую секунду проходит более тысячи миллиардов нейтрино, которые возникают в процессах солнечного

термоядерного синтеза. Однако нейтрино фантастически слабо взаимодействует с веществом, и именно поэтому так скуден наш «улов» космических нейтрино.

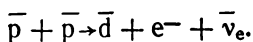
Колоссальная проникающая способность нейтрино ставит перед физиками, желающими его регистрировать, сложные технические задачи. Нужно создавать такие детекторы, которые имели бы максимально возможные размеры, то есть содержали бы как можно больше вещества. На практике используются детекторы весом в сотни тонн. Из-за того, что ожидаемое число нейтринных событий измеряется единицами в год, детектор нейтрино должен быть надежно защищен от мощного фона космических лучей. Поэтому все нейтринные телескопы располагаются либо в глубоких шахтах, либо в туннелях, выбитых в недрах гор, имеется также проект создания детектора нейтрино на пятикилометровой глубине в океане.

Сразу надо сказать, что нейтрино от аннигиляции в настоящее время не обнаружены, и вряд ли можно надеяться, что их смогут регистрировать в ближайшие годы: слишком много проблем должна решить нейтринная астрономия, чтобы достичь такого уровня. На сегодняшний день физики смогли найти нейтрино только от двух естественных источников. Это нейтрино от Солнца и нейтрино, рождающиеся при взаимодействии космических лучей с атмосферой Земли. Однако в принципе изучение потоков космических нейтрино может сыграть важную роль для обнаружения Антимира. И уже планируется создание таких установок, которые смогут обнаружить нейтринный сигнал, испускаемый из областей антивещества.

Мы говорили, что свет от антизвезды нельзя отличить от видимого света обычных звезд. Однако процессы термоядерного синтеза, который обеспечивает «горение» звезд, идут по-разному для звезд и антизвезд. Если в первом случае реакции термоядерного синтеза сопровождаются испусканием нейтрино, например в таких процессах:



то в антизвездах аналогичные реакции приводят к вылету антинейтрино



С экспериментальной точки зрения более выгодно искать громадные потоки антинейтрино, которые могут возникать на последней стадии эволюции антизвезд. Дело в том, что когда звезда исчерпывает все свои запасы термоядерного топлива, она начинает катастрофически быстро сжиматься под действием своих гравитационных сил. Если масса звезды составляет одну-три массы Солнца, то это сжатие продолжается до тех пор, пока электроны не «вдавливаются» внутрь атомных ядер, из которых состоит звезда. При этом происходит превращение протонов ядер в нейтроны и испускаются нейтрино

$$e^- + p \rightarrow n + \nu_e$$

Когда вся звезда почти целиком будет состоять из нейтронов, сжатие прекратится, так как силы гравитационного притяжения будут уравновешены мощными силами отталкивания, которые возникают между нейтронами. Происходит образование так называемой нейтронной звезды — стабильного объекта с исключительно большой плотностью и малыми размерами. Радиус нейтронной звезды с массой Солнца порядка 10 километров, то есть она свободно уместилась бы в пределах, охватываемых Московской кольцевой дорогой. (Чтобы у вас было представление, насколько сильно изменяются размеры звезды при ее коллапсе, напомним, что радиус Солнца порядка 700 000 километров.)

Ясно, что при коллапсе антизвезды должны образовываться антинейтроны, и процесс образования антинейтронной звезды будет сопровождаться испусканием антинейтрино

$$e^+ + \bar{p} \rightarrow \bar{n} + \bar{\nu}_e$$

Поток таких антинейтрино должен быть исключительно велик, ведь при коллапсе практически каждый из громадного числа протонов звезды, превращаясь в нейтрон, дает одно нейтрино: число антинейтрино \approx число антипротонов в антизвезде $\approx 10^{57}$.

Уже существующие нейтринные телескопы могут зарегистрировать возникновение такой колоссальной нейтринной вспышки, если она произошла в нашей Галактике.

Особые надежды сторонники Антимира связывают с проектом создания нового детектора космических нейт-

рино под названием ДЮМАНД *. Еще в 1960 году академик М. А. Марков предложил использовать океан для регистрации нейтрино. И вот спустя 20 лет эта интересная идея стала претворяться в жизнь. Авторы проекта ДЮМАНД намереваются разместить на глубине 5 километров в океане около тысячи детекторов, которые будут регистрировать световое излучение, возникающее при распространении в воде океана продуктов взаимодействия нейтрино. Проект ориентирован на обнаружение нейтрино сверхвысоких энергий, недостижимых в настоящее время на ускорителях. Нейтрино такой энергии при взаимодействии с веществом способны вызывать мощные каскады вторичных частиц, в которых участвует до нескольких миллионов заряженных частиц. Распространяясь в океанской воде, эти заряженные частицы будут испускать миллионы световых вспышек, которые могут быть зарегистрированы чувствительными световыми детекторами. Планируется опустить на дно океана целый «ковер» из таких счетчиков, которые будут просматривать почти кубический километр океанской воды.

Следовательно, вес мишени, в которой будут изучаться взаимодействия нейтрино, составит более 100 миллионов тонн! В нынешних нейтринных телескопах детектор весит «всего лишь» несколько сот тонн. Кроме того, они хуже экранированы от фона космических лучей, чем аппаратура ДЮМАНДа. Исследователи, разрабатывающие проект ДЮМАНД, надеются также, что можно будет с хорошей точностью не только измерять энергию нейтрино, но и определять направление прилета этой частицы. Это особенно важно для отождествления источника нейтрино с каким-либо звездным объектом.

Интересно, что нейтрино сверхвысоких энергий можно не только «видеть», регистрируя излучение продуктов его взаимодействия, но и слышать! Дело в том, что энергия, выделяющаяся в нейтринном каскаде, настолько велика, что приводит к нагреванию узкой «трубки» океанской воды, в которой распространяется каскад. Эта «трубка» теплой воды, расширяясь, приводит к образованию в океане звуковой волны.

Расчеты показали, что звук от нейтрино распространяется под углом 90 градусов к оси «трубки» и сосредото-

* Это аббревиатура английского названия проекта: «Глубоководный детектор мюонов и нейтрино».

точен в тонком диске толщиной примерно 10 метров и диаметром около 1 километра. Опустив в океан сеть из гидрофонов, можно регистрировать звук от нейтринных каскадов и определять направление прилета нейтрино.

Исследования советских физиков под руководством Г. А. Аскарьяна * и Б. А. Долгошеина показали, что акустические сенсоры выгодно применять для создания еще более крупномасштабных детекторов, чем ДЮМАНД. Размеры таких нейтринных телескопов могут быть (в километрах) $10 \times 10 \times 1$, то есть гидрофоны будут прослушивать объем морской воды весом в десятки миллиардов тонн. Этот сверхгигантский нейтринный телескоп будет хорошо приспособлен для решения задач внегалактической нейтринной астрономии.

Пока что не начато финансирование даже первой очереди проекта ДЮМАНД, которая по оценкам обойдется в 5 миллионов долларов. Однако вблизи Гавайских островов уже выбрано место для установки аппаратуры ДЮМАНДа и проведены первые предварительные эксперименты (рис. 29).

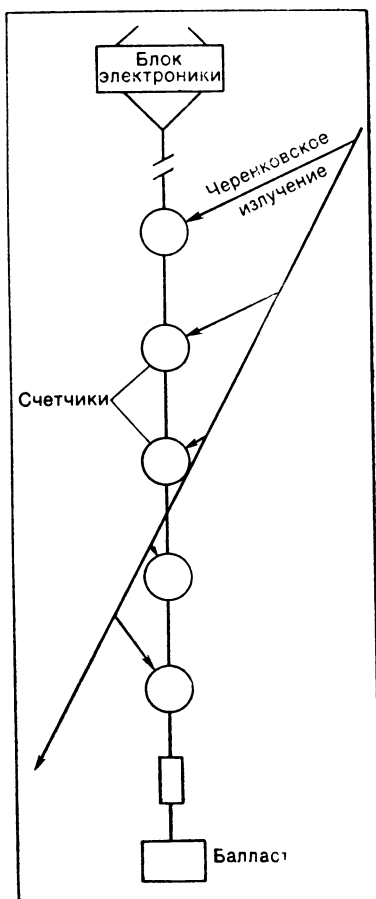
Естественно, предложения о поиске Антимира с помощью нейтрино сверхвысоких энергий не заставили себя долго ждать. Американский астрофизик Ф. Стеккер предложил использовать для обнаружения больших количеств антивещества процессы взаимодействия антипротонов высоких энергий с так называемым реликтовым излучением **, которое равномерно заполняет всю нашу Вселенную. В результате цепочки реакций, рассмотренных Стеккером (рис. 30), должны возникать антинейтрино высоких энергий. (Аналогичные процессы с участием протонов, как и в случаях, обсуждавшихся выше, приводят к образованию нейтрино.) Существует область энергий, в которой антинейтрино должны особенно сильно взаимодействовать с веществом. Она как раз входит в энергетический диапазон, который будет исследован в проекте ДЮМАНД.

При воплощении в жизнь смелой идеи использовать океан для регистрации нейтрино одновременно как экран,

* Еще в 1957 году Г. А. Аскарьян на основе теоретических расчетов первым предложил использовать акустический метод для регистрации заряженных частиц.

** Подробнее о том, что такое реликтовое излучение, мы будем говорить в следующей главе.

Рис. 29. «Мюонная струна» — первый эксперимент, планируемый в рамках проекта ДЮМАНД. Пять счетчиков черенковского излучения опускаются в океан на разные глубины — от 1 до 4,5 километра. Мюоны из космических лучей имеют высокую проникающую способность. При распространении в океанской воде они дают характерное черенковское излучение под углом 42° к направлению движения. Эксперимент «Мюонная струна» призван дать ответ, как работает электронная аппаратура на большой глубине в океане, и исследовать фоновые условия. К сожалению, первая попытка опустить такую гирлянду счетчиков в океан окончилась неудачно: рассчитанный на 20-кратную нагрузку трос тем не менее лопнул, и вся аппаратура пошла на дно



мишень и детектор физикам наверняка придется преодолеть немало трудностей. Но будем надеяться, что в ближайшие 10—15 лет нейтринные телескопы тоже смогут включиться в поиски Антимира.

Видим ли мы гамма-лучи от аннигиляции?

Напомним читателю, что гамма-лучи, образующиеся при аннигиляции антипротона с протоном, должны иметь энергию порядка десятков — сотен МэВ. Это жесткое излучение не проходит сквозь нашу атмосферу.

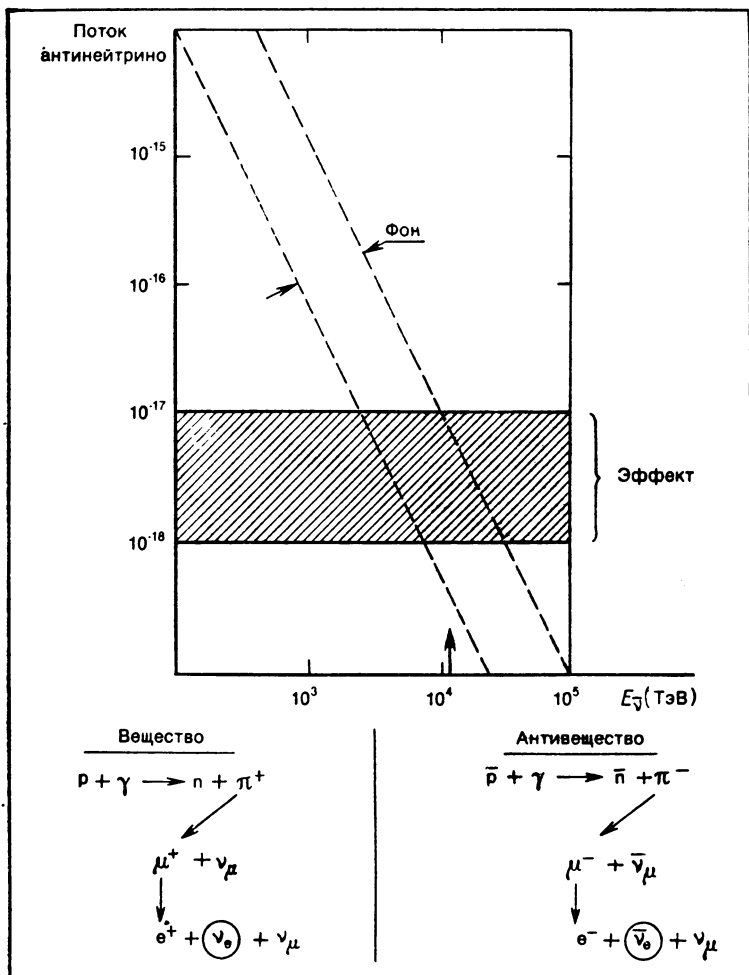
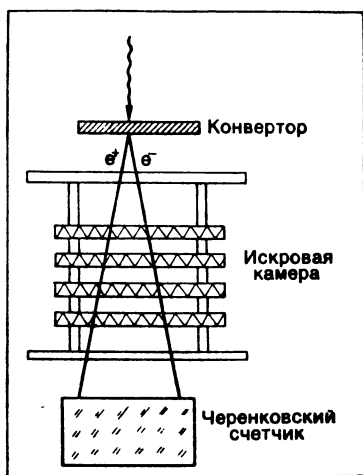


Рис. 30. Предложение Стеккера основывается на том, что при взаимодействии высокоэнергетичных протонов с фотонами реликтового излучения возникают преимущественно π^+ -мезоны, которые в конечном счете дают $\bar{\nu}_e$. Для антипротонов ситуация обратная: в результате $\bar{p}\gamma$ -взаимодействия должны возникать антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Заштрихованная часть на рисунке соответствует возможному потоку антинейтрино за счет реакции антипротонов. Пунктиром показаны верхняя и нижняя границы ожидаемого фона, который возникает из-за того, что $\bar{\nu}_e$ могут получаться и при взаимодействии космических лучей с атмосферой. Стрелка обозначает тот район, где взаимодействие $\bar{\nu}_e$ с электронами атмосферы имеет резонансный характер, то есть должно быть самым сильным. По оси абсцисс отложена энергия антинейтрино в ТэВах ($1 \text{ ТэВ} = 10^3 \text{ ГэВ} = 10^{12} \text{ эВ}$)

Рис. 31. Схема простейшего гамма-телескопа. Гамма-квант рождает пару e^+e^- в конверторе телескопа, который представляет собой железную или свинцовую пластину. Следы электрона и позитрона регистрируются каким-либо трековым детектором (обычно используют искровую камеру). Черенковский счетчик служит для запуска трекового детектора, отбирая только события, прошедшие сверху вниз



Поэтому все данные, о которых мы будем говорить, получены на специальных спутниках или во время полета космических кораблей.

Принцип работы гамма-телескопов довольно прост. В них используется все та же реакция рождения электрон-позитронной пары, которую впервые обнаружили Блэкett и Оккиалини. Регистрируя следы прохождения электрона и позитрона в детекторе, можно восстановить направление прихода родившего их гамма-кванта. Правда, точность, с которой можно определить это направление, не очень велика, и это обстоятельство затрудняет идентификацию источников гамма-лучей с известными звездными объектами. По этой причине имеются трудности при создании моделей космических гамма-источников.

Как же выглядит небо в гамма-лучах? К сожалению, пока наши «гамма-глаза» довольно слабы. А для близорукого человека все великолепие звездного неба пропадает: слабосветящиеся звезды совсем ему не видны, более сильные источники, расположенные близко друг к другу, сливаются в одно пятно и в результате вместо звездной россыпи он видит один непрерывный фон. Приблизительно такую же картину рисует перед нами

сегодняшняя гамма-астрономия. Наша Галактика, открывающаяся невооруженному оку в виде полосы Млечного Пути, в гамма-лучах выглядит пока что всего лишь одним ярким пятном, на фоне которого мы смогли выделить только около 20 дискретных источников. Кроме того, зарегистрировано диффузное гамма-излучение, по-видимому, имеющее внегалактическую природу.

Гамма-астрономия — исключительно молодая наука, ей чуть больше 10 лет, и ее основные открытия еще впереди. Но уже сейчас исследования в этой области дали целый ряд важных результатов, и именно данные гамма-астрономии позволили наложить самые жесткие ограничения на существование антивещества во Вселенной. Делается это следующим образом.

Предполагают, что весь наблюдаемый поток гамма-квантов возникает исключительно за счет аннигиляции вещества и антивещества. Тогда этот поток S должен быть прямо пропорционален доле антивещества f , имеющегося в данной области пространства, плотности среды в этой области ρ и скорости r , с которой происходит реакция аннигиляции:

$$S \sim f\rho^2r.$$

Скорость аннигиляции мы определяем в лабораторных опытах на ускорителях, она зависит от того, насколько сильно взаимодействуют антинуклоны с веществом. Плотность среды оценивают из астрономических наблюдений. Тогда, измерив поток гамма-квантов, можно определить долю антивещества. (Заметим, что это будет максимальная оценка возможного количества антивещества, ведь в поток гамма-квантов, помимо гипотетической аннигиляции, вносят свой вклад и многие другие процессы, происходящие в космосе.)

И вот какие ограничения на величину f получаются:

Области пространства и космические объекты	Доля антивещества f
Наша Галактика	$\leq 10^{-10} - 10^{-15}$
Горячий межгалактический газ	$\leq 10^{-7}$
Скопление галактик	$\leq 10^{-5}$
Антизвезды	$\leq 10^{-4}$

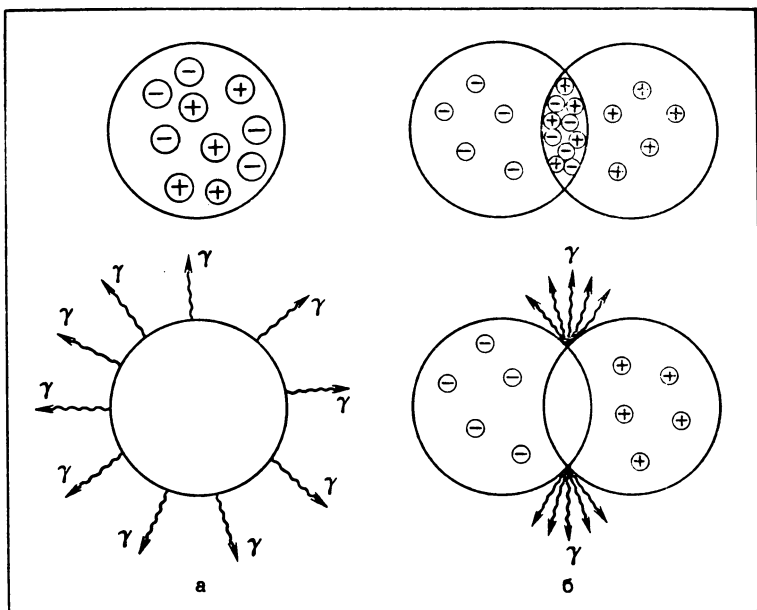


Рис. 32. Если вещество и антивещество равномерно перемешаны (а), то после аннигиляции возникает поток гамма-квантов S , измеряя который, можно определить долю антивещества f . Однако если вещество и антивещество разделены и аннигиляция идет только в пограничном слое (б), то величина f совсем не совпадает с истинным количеством антивещества и может быть гораздо меньше

Какие из этого можно сделать выводы? Казалось бы, приведенные здесь значения полностью исключают возможность существования антивещества в нашей Галактике, межгалактическом газе и налагают сильные ограничения на его количество в скоплениях галактик. Однако надо подчеркнуть, что величина f характеризует истинную долю антивещества в данной области только для равномерно перемешанного газа из частиц и античастиц. Если же вещество и антивещество каким-то образом разделены и аннигиляция идет только на границе раздела этих двух сред, то f будет иметь смысл доли антивещества, участвующего в такой аннигиляции. Например, если $f=0$, то это может означать, что антивещества либо нет, либо оно полностью отделено от вещества. Поэтому сама по себе величина f не дает нам полной инфор-

мации о том, сколько же на самом деле антивещества содержится в данном объекте, излучающем гамма-кванты.

Это очень важное положение хорошо иллюстрируется сравнением доли антивещества в нашей Галактике $f \leq 10^{-10} - 10^{-15}$ с его долей в виде антизвезд $f \leq 10^{-4}$. Оба значения, так сильно отличающиеся друг от друга, считаются, тем не менее, исходя из одного и того же потока гамма-квантов для нашей Галактики. Но если в первом случае мы предполагали, что вещество и антивещество равномерно перемешаны в горячем межзвездном газе, то в другом случае мы допустили, что антивещество каким-то неизвестным образом сумело сконденсироваться в антизвезды. Ясно, что тогда поверхность контакта двух миров резко уменьшается, и доля антивещества, «разрешаемого» наблюдениями гамма-астрономии, столь же резко возрастает. Добавим еще, что концентрация антизвезд на уровне 10^{-4} соответствует возможному существованию 10 миллионов (!) антизвезд в нашей Галактике. Говоря более точно, данные по гамма-излучению не противоречат наличию в Галактике такого количества антизвезд. Интересно, что подобный предел на количество антивещества в нашей Галактике получается и по данным об исследовании космических лучей.

Как бы то ни было, модели образования нашей Галактики не способны объяснить существование антизвезд и вообще непонятно, как антивещество могло бы выжить во Вселенной достаточно длительное время до момента образования галактик. Поэтому общепринятая трактовка данных гамма-астрономии, о которых мы говорили, состоит в том, что они свидетельствуют об отсутствии значительных количеств антивещества в нашей Галактике.

Если мы обратимся к внегалактическому гамма-излучению, то тут же данные гамма-астрономии не столь сильно ограничивают фантазии сторонников Антимира и, более того, вселяют в них некоторый оптимизм.

На рис. 33 показан энергетический спектр диффузного внегалактического излучения. Видно, что число гамма-квантов быстро падает с увеличением энергии. При внимательном рассмотрении этого графика можно заметить, что падение потока гамма-лучей не монотонно. В области энергий 10—50 МэВ наблюдается определенный избыток гамма-квантов. На рисунке пунктиром обо-

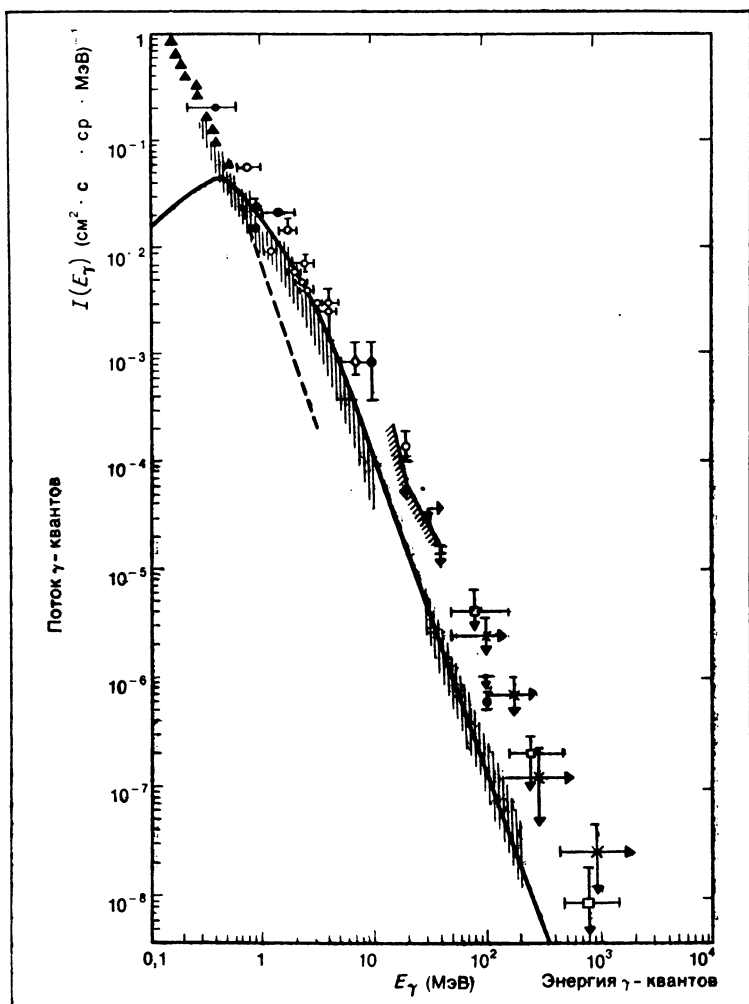


Рис. 33. Энергетический спектр внегалактического гамма-излучения. Сплошная линия — результат расчета Ф. Стеккера в предположении об аннигиляционном характере гамма-квантов. Пунктиром показано то поведение спектра, которое ожидалось при экстраполяции из области меньших энергий. Отчетливо виден избыток гамма-квантов в районе энергий ≥ 10 МэВ

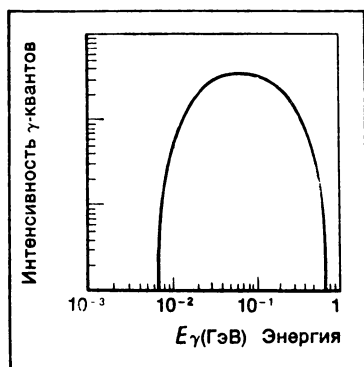


Рис. 34. Энергетический спектр гамма-квантов от распадов покоящегося π^0 -мезона

значено, каким должен быть спектр, если просто экстраполировать его поведение из области более низких энергий. За счет чего же возникает избыток?

Американский астрофизик Ф. Стеккер выполнил расчеты внегалактического спектра гамма-фона, предположив, что он полностью обусловлен аннигиляцией антивещества. Однако, как мы помним, гамма-кванты в процессе аннигиляции возникают при распадах π^0 -мезонов (см. рис. 25) и должны преимущественно иметь большую энергию, порядка 100 МэВ. Точный вид спектра гамма-квантов от аннигиляции приведен на рис. 34. Вроде бы сразу видно, что ни форма спектра, ни положение максимума на этом рисунке не совпадают с экспериментальной зависимостью, показанной на рис. 33. Но Стеккер остроумно предположил, что мы видим гамма-кванты от аннигиляции, которая произошла не в нашу эпоху, а на гораздо более ранних стадиях развития Вселенной. Тогда длина волны фотона, путешествующего в расширяющейся Вселенной, будет увеличиваться, а энергия уменьшаться (почему это происходит, мы будем подробно разбирать через несколько страниц, в самом начале следующей главы). По мере расширения Вселенной весь спектр гамма-излучения сдвигается в область малых энергий и его форма меняется. Стеккер рассчитал, что если аннигиляция имела место, когда возраст Вселенной был порядка 10^7 — 10^8 лет, то получается такой энергетический спектр гамма-квантов, который довольно хорошо согласуется с экспериментальными данными. На рис. 33 ре-

зультаты расчета Ф. Стеккера показаны сплошной линией.

Существует целый ряд других моделей, которые не используют аннигиляционную гипотезу, но тоже способны удовлетворительно описать экспериментальные результаты. В некотором, не самом последнем обзоре по этой проблеме я насчитал девять возможных теорий, объясняющих природу этого спектра. Дело дошло до того, что автор одной из работ призвал коллег объявить мораторий на разработку всех дальнейших моделей гамма-спектра до тех пор, пока не появятся новые экспериментальные результаты. Поэтому все, что мы можем сказать после работы Стеккера, так это то, что аннигиляционная гипотеза о происхождении внегалактического гамма-излучения не противоречит наблюдательным данным. Отнюдь нельзя считать, что эти исследования доказывают существование Антимира, расположенного далеко за пределами нашей Галактики.

Правда, совсем недавно сторонники Антимира вроде бы выиграли еще одно очко. В июньском номере журнала «Нейчур» за 1982 год появилась статья двух немецких астрофизиков Р. Шликайзера и К. Тилхайма, которые проанализировали такой вопрос: есть ли у нас уверенность в том, что в своих опытах мы наблюдаем действительно внегалактическое гамма-излучение? Дело в том, что наша Солнечная система расположена на краю галактического диска и для того, чтобы измерить внегалактическое излучение, гамма-телескопы просто разворачивали в сторону, противоположную центру Галактики. Шликайзер и Тилхайм утверждают, что при такой постановке наблюдений не весь поток гамма-квантов приходит от внегалактических источников: «небольшая» часть Галактики, которая нас окружает, тоже вносит свой вклад. Согласно их расчетам этот вклад довольно велик, и если вычесть его из наблюдаемых данных (чтобы определить только «чистый» внегалактический гамма-фон), то энергетический спектр, который показан на рис. 33, будет гораздо сильнее уменьшаться при энергиях $E_\gamma \sim 100$ МэВ. Оказывается, гипотеза Стеккера как раз предсказывает именно такое сильное падение спектра гамма-лучей. В то же время обычные модели образования гамма-квантов за счет столкновения частиц с веществом межгалактического газа дают гораздо более

медленное падение спектра внегалактических гамма-лучей с ростом энергии.

Таким образом, природа гамма-излучения, приходящего в нашу Галактику извне, остается не до конца ясной. Несомненно требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования этого вопроса.

Мы обрушили на голову читателя в этой главе большой поток цифр, фактов и разных гипотез. Давайте подведем итог. В табл. 4 мы собрали вместе все численные пределы на долю антивещества в различных областях Вселенной.

Т а б л и ц а 4. Результаты поисков антивещества во Вселенной

I. Прямой поиск антивещества	Примечания
1. Антипротоны $\frac{\text{Поток } \bar{p}}{\text{Поток } p} \leq 10^{-4}$	Не согласуется с обычными теориями образования \bar{p} в реакции $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$
2. Антиядра $\frac{\text{Поток } \bar{\alpha}}{\text{Поток } p} \leq 10^{-5}$	Ни одного антиядра в космических лучах не зарегистрировано
3. Антиметеоры Поток антиметеоров ~ 20 мг в сутки	Строгих доказательств существования антиметеоров нет
4. Антипланеты В Солнечной системе нет	
II. Косвенные указания (по данным гамма-астрономии)	
1. Наша Галактика $f \leq 10^{-10} - 10^{-15}$	Интерпретация по соотношению $S \sim f p^2 r$
2. Горячий межгалактический газ $f \leq 10^{-7}$	
3. Скопление галактик $f \leq 10^{-5}$	
4. Антизвезды в нашей Галактике $f \leq 10^{-4}$	Не противоречит возможному существованию $\sim 10^7$ антизвезд
5. Внегалактический изотропный фон (ВИФ)	Энергетический спектр ВИФ хорошо описывается на основе аннигиляционной гипотезы в предположении о том, что аннигиляция происходила, когда возраст Вселенной был $10^7 - 10^8$ лет

Общий вывод таков.

У нас нет ни одного прямого указания на существование сегодня большого количества антивещества. Одна-

ко у нас нет ни одного факта, который мог бы полностью закрыть эту гипотезу! Прежде всего такое положение создается из-за недостаточного числа экспериментальных данных, которые позволили бы сильнее «зажать» фантазию сторонников Антимира в рамках твердо установленных величин.

Таким образом, на основной вопрос в этой главе: произошло ли «убийство» теории Антимира «безобразными фактами» астрономии и астрофизики? — по всей видимости, можно дать тот же ответ, что дал на консилиуме народный лекарь Богомол после осмотра небезизвестного Буратино.

— Одно из двух, — сказал Богомол, — или пациент жив, или он умер. Если он жив — он останется жив, или не останется жив. Если он мертв — его можно оживить или нельзя оживить.



ГЛАВА 4

Большой Взрыв и проблема антивещества

Одна моя знакомая, молодой драматург, объясняла мне, почему так трудно сделать хорошую пьесу из жизни физиков. «Понимаешь,— говорила она,— предмет ваших занятий настолько сложен, что если напрямую перенести на сцену те коллизии, которые разыгрываются у вас в лабораториях, то зритель просто окажется не в состоянии понять, о чем идет речь. Максимум, что будет видно со стороны, так это то, что физики любят свою работу и считают ее очень важной. Но от самой физики как науки остаются лишь декорации — мигающие лампочки и пучки проводов».

Она совершенно права: физиков нельзя показывать в отрыве от тех дел, которыми они занимаются. Получится всего лишь еще один портрет «молодого современника», только на фоне осциллографов. Но разве действительно

те проблемы, которыми мы занимаемся, так сложны и невоспроизводимы на сцене? Ведь большинство людей незнакомо с тонкостями кардиологии или пилотирования авиалайнеров, однако это никому не мешает с интересом смотреть фильмы и пьесы о врачах и летчиках. Мы не понимаем, как хирург проводит операцию, но борьба за жизнь человека нас не может не волновать. Точно так же частные вопросы физики могут быть непонятны широкой аудитории, но есть в физике и такие проблемы, которые имеют общечеловеческую значимость.

И совсем не нужно обладать соответствующим дипломом, чтобы почувствовать их важность и удивительную красоту.

Кто скажет, сколько надо иметь классов образования, чтобы почувствовать волшебную прелесть звездного неба? Его великолепие волнует человечество в течение всех веков. Разве можно утверждать, что сегодняшнему зрителю уже не интересна тайна происхождения Вселенной? Я глубоко уверен, что рассказ о том, как физики решают проблемы развития Вселенной, обладает не меньшим сценическим «потенциалом», чем история любовного треугольника или конфликта с «плохим директором». Тем более, что современная космология достигла поразительных результатов.

Уже в древности люди могли предсказывать движения отдельных планет, не так давно началось интенсивное изучение видимой части Вселенной. Сегодня же мы способны рассчитать отдельные моменты развития всей Вселенной как целого. В последнее время авторы почти каждого обзора по космологии не удерживаются от соблазна привести своеобразное «расписание движения» Вселенной. С точностью не то что до секунды, а до таких интервалов времени, которым уже в нашем языке не находится подходящих числительных, современные маги от космологии рассчитывают процессы, которые происходили во Вселенной.

Такие «расписания» производят очень сильное впечатление, как будто мы имеем дело не с описанием поведения невообразимых количеств вещества при колоссальных температурах и давлениях, а с движением какой-нибудь пригородной электрички!

Космология дает нам удивительный пример единства природы. Оказывается, в макром мире существенную роль

играют законы микромира. Именно процессы, которые происходят на исключительно малых расстояниях, определяют судьбы вещества в космических просторах. Фантастическая взаимосвязь явлений в природе позволяет нам, исследуя поведение элементарных частиц, делать предсказания о поведении всей Вселенной как целого. Более того, возникает и обратная связь: наблюдая развитие Вселенной, можно получить информацию о свойствах элементарных частиц. В ряде случаев сведения об элементарных частицах, полученные с помощью анализа наблюдений на телескопах, гораздо более точны, чем данные, которые предоставляют нам современные микроскопы — ускорители.

Конечно, восхищение удивительными достижениями космологии довольно быстро может смениться вполне естественным подозрением: насколько все это верно? Насколько твердо обоснованы такие впечатляющие результаты? Может быть, это разновидность современной алхимии? Основные положения сегодняшней теории Вселенной выглядят настолько вызывающими, что отнюдь не все ее полностью принимают. Например, известный шведский астрофизик, лауреат Нобелевской премии Ханнес Альфвен совсем недавно, в 1979 году, писал в нашем сборнике «Будущее науки» буквально следующее: «Современная 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 теперешней интеллектуальной атмосфере огромным преимуществом космологии «Большого Взрыва» служит то, что она является оскорблением здравого смысла: *sed, quia absurdum* («верю, ибо это абсурдно»)!

В этой главе мы как раз и будем заниматься рассмотрением «оскорбляющей здравый смысл» теории Большого Взрыва.

Надо сразу сказать, что отнюдь не все проблемы космологии сполна уже решены. В нашем распоряжении сейчас не так много экспериментальных данных, как хотелось бы.

Однако сегодня теория Большого Взрыва — это общепринятая модель, которая позволяет дать единое объяснение целому ряду наблюдательных фактов.

Можно много гадать, как будет развиваться космология в будущем. Вполне возможно, что «расписание движения» Вселенной изменится. Но, как сказал выдающийся американский физик С. Вайнберг: «Очень примечательно, что есть возможность сказать, на что была похожа Вселенная в конце первой секунды или первой минуты или первого года... Откровенно говоря, мы не абсолютно уверены во всем этом, но весьма волнует, что сейчас мы способны говорить о подобных вещах хоть с какой-то долей уверенности».

О модели Большого Взрыва, об истории ее возникновения и о современном состоянии написано много хороших книг, в том числе и научно-популярных. Поэтому мы отсылаем читателя, ищущего подробностей, к списку литературы в конце книги. Нас же будут интересовать в первую очередь те особенности этой теории, которые имеют отношение к проблеме антивещества.

Как мы видели в предыдущей главе, экспериментальные данные не подтверждают существования больших количеств антивещества во Вселенной, хотя полностью исключить такую возможность они не могут. Однако все-таки «общественное мнение» физиков и астрономов склоняется к тому, что Антимира все же нет. Дело в том, что мало утверждать о возможных размерах областей антивещества, надо также иметь внятный ответ на вопрос, откуда вообще взялась эта антиматерия.

Для объяснения возникновения Антимира в свое время было выдвинуто несколько теорий, но все они имели много противоречий и подчас просто не согласовывались со всей совокупностью экспериментальных фактов. На сегодняшний день у нас нет удовлетворительной модели появления и развития Антимира.

С другой стороны, общепринятая космологическая теория с уверенностью дает совершенно четкое предсказание: если бы в начале развития Вселенной было одинаковое количество вещества и антивещества, то это привело бы к совершенно драматическим последствиям. Не только Антимир, но даже наш Мир не мог бы возникнуть в этом случае.

Для того чтобы лучше понять, откуда возникает такой грустный (для сторонников Антимира) вывод, давайте ознакомимся с основными положениями теории Большого Взрыва.

1. Вселенная расширяется

Еще в начале века американский астрофизик В. Слайфер, который изучал спектры излучения слабых туманностей, заметил, что линии этих спектров смещены в сторону больших (красных) длин волн. Правда, были и объекты, спектры которых сдвигались в сторону меньших (голубых) длин волн. Обычно сдвиг линий означает, что источник излучения движется: либо удаляется от наблюдателя (красное смещение), либо приближается к нему (голубое). Это есть проявление хорошо известного эффекта Доплера (рис. 35). Однако в то время астрономы еще не придумали способа, каким можно было бы измерить расстояние до таких слабых туманностей. Поэтому сам факт того, что одни звездные объекты удаляются от нас, а другие приближаются, никого не удивил.

В 20-е годы американский астроном Эдвин Хаббл смог определить расстояния до нескольких ближайших к нам галактик. Когда он сравнил эти расстояния с уже измеренными смещениями спектра излучения галактик, то обнаружились довольно интересная картина: все без исключения спектры галактик были сдвинуты в сторону красных длин волн, причем чем дальше от нас находилась галактика, тем больше сдвигался спектр ее излучения. Но это означает, что галактики удаляются от нас и, как следует из рассмотрения рис. 35, скорости их разбегания растут по мере увеличения расстояния до галактики. По своим данным Хаббл смог установить, какому закону подчиняется такое возрастание скоростей. Оказалось, что

$$v = HR,$$

то есть скорость убегания галактики v прямо пропорциональна расстоянию R до нее. Коэффициент пропорциональности H называют сейчас постоянной Хаббла.

С тех пор прошло уже полвека, и за это время астрономы измерили красные смещения и расстояния у множества объектов внегалактического происхождения. Оказалось, что для всех них закон Хаббла хорошо выполняется.

Такое поведение галактик приводит к ряду совершенно фундаментальных выводов. Во-первых, разбегание галактик свидетельствует о том, что наша Вселенная расширяется. Причем существует очень глубокая связь меж-

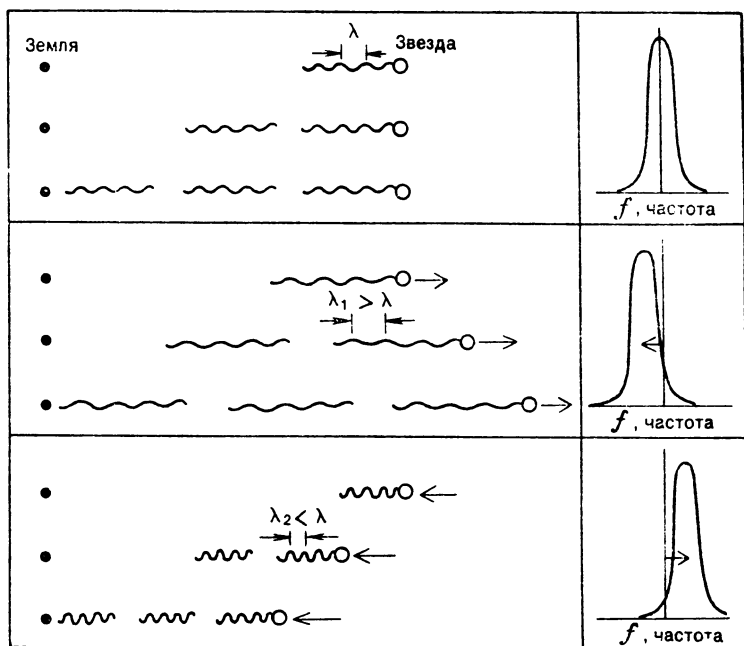


Рис. 35. Эффект Доплера. Пусть излучение покоящегося источника характеризуется такими параметрами: длиной волны λ — расстоянием между гребнями или впадинами и частотой испускания фотонов в единицу времени f . Связь между ними такова: $\lambda = c/f$, где c — скорость света. Если источник света удаляется от нас, число фотонов, которое попадает от него на Землю в единицу времени, будет уменьшаться, то есть частота излучения f уменьшается. Следовательно, длина волны λ увеличивается и происходит сдвиг линии излучения в красную область спектра. Когда источник движется на нас, число фотонов, приходящих от него в единицу времени, будет увеличиваться. Следовательно, длина волны уменьшается. Возникнет голубое смещение. Чем больше скорость движения источника, тем больше будут сдвинуты линии его излучения

ду наблюдаемой изотропией в распределении вещества во Вселенной, о котором мы говорили в предыдущей главе, и тем, что закон расширения имеет такой именно вид, как и закон Хаббла (рис. 36).

Персонаж телевизионного фильма из цикла «Следствие ведут знатоки» говорит, что цена старинных вещей может увеличиваться, так как Вселенная расширяется и их становится меньше. Конечно, хорошо, что современные космологические представления так популярны сре-

ди населения. Однако справедливости ради надо отметить, что разбегание галактик никак не затрагивает вещество, которое в них содержится. Звезды, планеты, наша Земля отнюдь не расширяются, поэтому количество антикварных ценностей на единицу объема тоже не меняется в ходе расширения Вселенной.

Но если сейчас мы видим разбегание галактик, не означает ли это, что в прошлом они были расположены «достаточно близко» друг от друга? Оказывается, зная численное значение постоянной Хаббла, можно установить «возраст» Вселенной, то есть время, прошедшее от того момента, когда все видимые наши галактики были в «одной точке», до сегодняшнего дня. Оно пропорционально обратной величине константы Хаббла

$$t_{\text{Вселенной}} = 1/H$$

и по порядку величины составляет 10—20 миллиардов лет.

Этот вывод из закона Хаббла уже действительно кажется оскорбляющим здравый смысл. Он порождает массу вопросов. Что значит «галактики были в одной точке»? Почему Вселенная вдруг стала расширяться? Что было до момента начала расширения? В каких условиях находилось вещество в ранней Вселенной? Все эти вопросы долгое время оставались без ответа (некоторые из них и до сих пор не решены), поэтому модель Большого

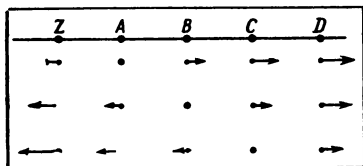


Рис. 36. Однородность и закон Хаббла. Если пространство однородно, то наблюдатель в любой галактике *A*, *B*, *C* должен видеть одно и то же. Стрелками показаны скорости галактик. В 1-й строчке — картина, видимая из галактики *A*, во 2-й — из *B*, а в 3-й — из *C*. Требование однородности приводит к тому, чтобы скорость *C*, видимая из *B*, должна быть такой же, как скорость *C*, видимая из *A*. Отсюда скорость *C*, видимая из *A*, есть 2 скорости *B*. Стало быть, скорости галактик должны линейно возрастать с увеличением расстояния до них (по С. Вайнбергу)

Взрыва долгое время считалась лишь одной из возможных космологических гипотез, причем не самой лучшей.

2. Реликтовое излучение

Решающим фактором для формирования современных взглядов на Вселенную стало открытие в 1965 году реликтового излучения с температурой три градуса по шкале Кельвина. Его открыватели американские радиоастрономы А. Пензиас и Р. Вилсон намеревались изучить радиоизлучение, испускаемое нашей Галактикой вне плоскости Млечного Пути. Совершенно неожиданно они обнаружили некое фоновое излучение, интенсивность которого оставалась постоянной для разных участков неба и не менялась со временем. Пензиас и Вилсон нашли, что температура этого излучения составляет примерно три градуса выше абсолютного нуля, то есть три градуса по шкале Кельвина. Впоследствии такой же равномерно распределенный по небу фон был обнаружен для разных диапазонов волн, и оказалось, что зависимость интенсивности фона от длины волны в точности повторяет спектр излучения черного тела с температурой примерно 2,9 К (рис. 37).

Что же такое черное тело? Этим мрачным термином физики называют вполне безобидные объекты. Представим себе термос, в который брошен маленький раскаленный уголек. Уголек излучает фотоны, которые, ударяясь о стенки термоса, могут либо отразиться от стенок, либо поглотиться ими. При этом температура стенок повышается, они тоже начинают испускать излучение в виде фотонов. В конце концов наступает такой момент, когда стенки термоса поглощают ровно столько фотонов, сколько излучают обратно. Это и называется тепловым равновесием, а тело, находящееся в тепловом равновесии с излучением, называется черным. Черное тело может излучать фотоны с разными энергиями, причем зависимость числа фотонов, испускаемых черным телом, от энергии имеет вполне определенный спектр и обусловлена лишь одним параметром — температурой. На рис. 38 показан характерный спектр черного тела для разных температур. Интересно, что современная квантовая физика началась именно с решения задачи об излучении черного тела. Все попытки описать спектр этого излучения на основе обычных классических представлений оказались безуспешными. Лишь нарушив каноны классической физики и предположив, что черное тело излучает и

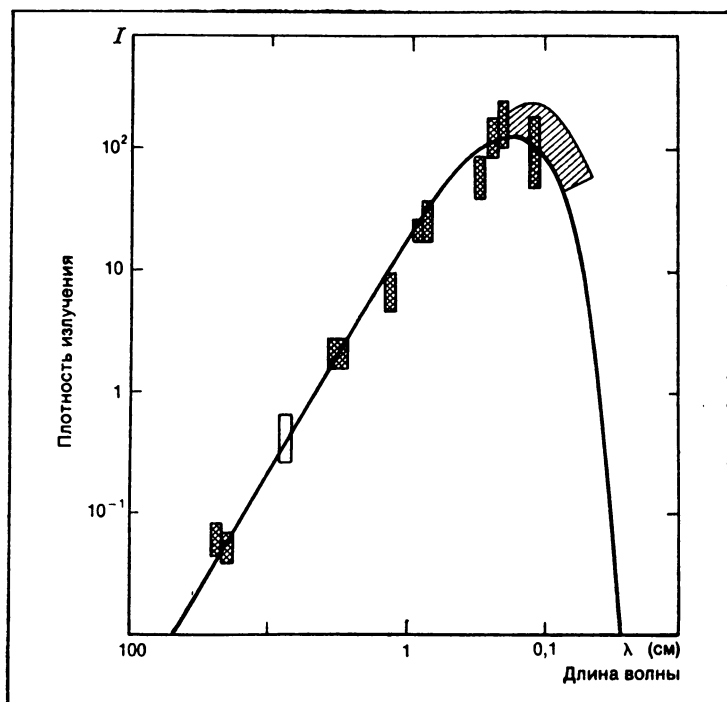


Рис. 37. Спектр реликтового фонового излучения, впервые обнаруженного А. Пензиасом и Р. Вилсоном (их измерения показаны незаштрихованным прямоугольником). Последующие наблюдения подтвердили первоначальную гипотезу о том, что спектр реликтового излучения подобен спектру излучения черного тела с температурой 2,9 К (сплошная кривая)

поглощает энергию только вполне определенными порциями — квантами, Макс Планк смог объяснить наблюдаемый вид спектра излучения черного тела.

Итак, вернемся к астрофизике. Никакой Шерлок Холмс не смог бы вывести из открытия Пензиаса и Вилсона столько фундаментальных следствий, сколько получили астрофизики. Прежде всего отсутствие каких-либо изменений фона трехградусного излучения от направления и времени измерений указывало на то, что эти радиоволны приходят к нам не от нашей Галактики, а от значительно большего объема Вселенной. Пензиас и Вил-

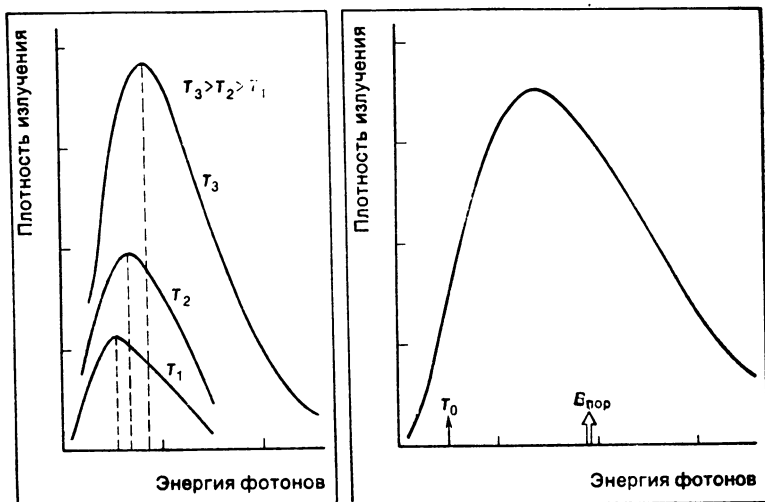


Рис. 38. Слева: спектры излучения черного тела для разных температур T . Справа: спектр излучения черного тела с температурой $T_0 = 500$ МэВ. Стрелка на рисунке соответствует значению той минимальной, пороговой энергии $E_{\text{пор}}$, которую необходимо иметь фотону, чтобы породить пару нуклон—антинуклон

сон обнаружили действительно совершенно удивительную вещь. Если раньше считали, что мир состоит, очень грубо говоря, из звезд и их света (излучения), то Пензиас и Вилсон обнаружили «свет», который не принадлежит звездам. Это излучение равномерно заполняет всю нашу Вселенную и является отголоском тех процессов, которые происходили во Вселенной в эпоху ее молодости. Поэтому такое излучение называют реликтовым. Какую же информацию несут нам реликтовые фотоны?

а) Молодая Вселенная должна быть горячей

Чтобы понять это утверждение, рассмотрим, что происходит с излучением в расширяющейся Вселенной.

Средняя плотность вещества в настоящее время исключительно мала, порядка одного атома в кубическом метре пространства. Поэтому сегодняшняя Вселенная практически прозрачна для излучения. Фотоны почти не тратят свою энергию на столкновения с частицами вещества. Тем не менее энергия фотонов в расширяющейся

Вселенной уменьшается. Мы уже говорили, что спектры излучения убегающих от нас галактик за счет эффекта Доплера испытывают красное смещение. Точно так же спектр излучения реликтовых фотонов, распространяющихся в расширяющейся Вселенной, «краснеет», то есть сдвигается в область больших длин волн. Но энергия фотона E обратно пропорциональна длине волн λ

$$E \sim 1/\lambda.$$

Увеличение длины волны фотона приводит к уменьшению его энергии, а это в конечном счете приводит к уменьшению температуры фотонного газа. Следовательно, при расширении Вселенной газ реликтовых фотонов остывает. В ранней Вселенной закон изменения температуры излучения со временем таков:

$$T = \frac{1,5 \cdot 10^{10}}{\sqrt{t}}.$$

Здесь время t надо брать в секундах, а температура T будет в градусах Кельвина. Видно, что при $t=1$ секунде температура Вселенной была колоссальной: $T=1,5 \cdot 10^{10}$ К. Для сравнения: температура наружных слоев Солнца составляет «всего лишь» 5770 К.

б) В молодой Вселенной должно быть тепловое равновесие

Мы только что показали, что в расширяющейся Вселенной, прозрачной для излучения, реликтовые фотоны уменьшают свою энергию. Очень важно то обстоятельство, что в процессе охлаждения фотонного газа фотоны разных энергий теряют свою энергию таким образом, что сам характер энергетического спектра фотонов не меняется в процессе расширения Вселенной. То есть если сейчас мы наблюдаем реликтовое излучение со спектром как у черного тела, то такой же спектр должны иметь фотоны и в ранней Вселенной. Только температура фотонного газа была гораздо более высокой, чем сейчас.

Но черное тело — это объект, находящийся в тепловом равновесии со своим излучением. Следовательно, в истории Вселенной был такой период, когда излучение и вещество находились в тепловом равновесии*.

* Приведенное выше рассуждение не является строгим и требует более полного рассмотрения, которое, к сожалению, мы не можем привести из-за недостатка места. Рекомендуем обратиться к дополнительной литературе, указанной в конце книги.

Это исключительно важное заключение, и вот почему. Во-первых, из него сразу следует, что в ранней Вселенной должно быть колоссальное количество античастиц, примерно столько же, сколько и обычных частиц. В первые моменты развития Вселенной в ней царили необычайно высокие температуры и плотности. Фотоны излучения эффективно взаимодействовали с веществом, и молодая Вселенная была непрозрачна для излучения. Так как энергии фотонов были достаточно велики, то, взаимодействуя с веществом, они могли рождать пары частица—античастица. Вещество и излучение находились в ранней Вселенной в тепловом равновесии, это означает, что в единичном объеме в единицу времени ровно столько пар частица—античастица рождалось под действием фотонов, сколько фотонов возникало за счет последующей аннигиляции этих пар. То есть в горячей, молодой Вселенной тепловое равновесие обеспечивалось непрерывным рождением и аннигиляцией пар частица—античастица.

Во-вторых, важная особенность системы в тепловом равновесии состоит в том, что она «забывает» свою историю. Каким образом система пришла к состоянию равновесия, какие изменения претерпевала, что за условия были в ней до начала установления теплового равновесия—вся эта информация о прошлом пропадает, теряется и «размывается» *. Поэтому до некоторой степени нам неважно знать, что происходило во Вселенной до момента установления теплового равновесия. Мы можем описывать ее развитие, даже не представляя, что творилось во Вселенной в самые первые мгновения ее существования. Как ведет себя вещество, находящееся в тепловом равновесии с излучением, довольно хорошо известно, и именно поэтому наше «расписание движения» Вселенной так точно.

в) Вселенная состоит из света!

Парадоксальным следствием открытия реликтового излучения стало то обстоятельство, что хотя мы видим вокруг себя гораздо больше вещества, чем света,— это

* Правда, надо уточнить, что не все начальные характеристики системы пропадают при наступлении теплового равновесия. Сохраняются, конечно, во всех процессах величины типа электрического или барионного зарядов.

всего лишь иллюзия. Вещество (или, точнее, барионы) составляет лишь ничтожную часть нашего мира по сравнению с фотонами. Подсчеты показали, что в каждом кубическом сантиметре находится приблизительно 500 реликтовых фотонов. Если же равномерно «размазать» по пространству все вещество Вселенной, то в одном кубометре будет находиться всего лишь один атом. Отсюда вытекает фундаментальное отношение

$$\frac{\text{Число фотонов}}{\text{Число барионов}} = 10^9 \pm 1$$

(ошибка ± 1 порядок связана с неопределенностью, с которой мы знаем плотность вещества). Следовательно, сейчас на каждый барион во Вселенной приходится около миллиарда фотонов!

Это отношение полезно запомнить, оно будет часто встречаться в дальнейшем.

Однако основной вклад в плотность Вселенной вносит сегодня именно вещество. Реликтовые фотоны уже остыли настолько, что хотя их намного больше барионов, тем не менее их «взнос» в общую плотность Вселенной слишком мал. Совсем по-другому обстояло дело в ранней Вселенной, тогда энергии фотонов были настолько велики, что плотность Вселенной определялась именно излучением. К сожалению, мы знаем плотность Вселенной не очень хорошо. А ведь от величины этого параметра зависит вся дальнейшая судьба Вселенной!

г) Ранняя Вселенная — суперускоритель

Оказывается, молодая Вселенная может служить лабораторией для изучения взаимодействий элементарных частиц при сверхвысоких энергиях. Если предположить, что период теплового равновесия наступил во Вселенной с самых первых мгновений ее существования, то легко подсчитать, какими гигантскими энергиями обладали тогда фотоны излучения. Сегодня физики могут изучать явления, происходящие при энергиях несколько сот ГэВ ($1 \text{ ГэВ} = 1000 \text{ МэВ} = 10^9 \text{ эВ}$). Такую температуру имела Вселенная приблизительно в 10^{-10} долю секунды от начала расширения *. Как мы увидим в следующей главе,

* Читатель уже привык, наверное, что мы везде выражаем массу и энергию в одних и тех же единицах. Температуры, которые дости-

главную роль для решения парадокса Антимира играют процессы, которые идут при еще гораздо более высоких энергиях, порядка 10^{14} — 10^{15} ГэВ. Такие фантастические энергии недостижимы в обозримом будущем ни на современных ускорителях, ни в космических лучах. Однако первые теории поведения элементарных частиц при таких энергиях уже созданы. В ранней же Вселенной температуры в 10^{14} — 10^{15} ГэВ достигались в момент 10^{-34} — 10^{-35} секунды с начала расширения. Оказывается, процессы, которые протекали во Вселенной в эти невообразимо малые промежутки времени, определяют всю ее дальнейшую историю и в конечном счете само наше с вами, дорогой читатель, существование. Но об этом мы будем подробно говорить в следующей главе. Сейчас же посмотрим, как обстоит дело с антивеществом в горячей Вселенной.

БАРИОНЫ И АНТИБАРИОНЫ В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Итак, модель Большого Взрыва предсказывает, что в ранней Вселенной должно было происходить непрерывное рождение и уничтожение пар частица—античастица. Причем так как излучение находилось в тепловом равновесии с веществом, то число пар должно было быть примерно равно числу фотонов излучения. Следовательно, молодая Вселенная могла иметь громадное количество барионов и антибарионов. Приблизительно в миллиард раз больше, чем мы видим сегодня. Куда же делась такая масса вещества и антивещества? Для ответа на этот вопрос рассмотрим более детально, что могло происходить во Вселенной, когда ее возраст не превышал 1 секунды.

Начнем наш рассказ с того момента, когда с начала расширения прошло 10^{-6} секунды. Тогда температура излучения во Вселенной была порядка нескольких ГэВ. Фотоны с такой энергией могут эффективно рождать

гаются в горячей Вселенной, настолько велики, что их тоже удобнее измерять в энергетических единицах, а не ворочать сотнями миллиардов градусов. В физике и космологии очень часто используют не стандартную систему единиц СИ, а так называемую естественную систему. В ней скорость света, постоянная Планка и постоянная Больцмана равны единице. Тогда масса, энергия и температура измеряются в одинаковых единицах. Полезно запомнить, что $1 \text{ МэВ} \sim 10^{10}$ градусов Кельвина $\approx 1,7 \cdot 10^{-27}$ грамма.

пары нуклон—antinуклон*, суммарная масса которых приблизительно 2 ГэВ.

Вообще говоря, по современным представлениям при таких температурах во Вселенной существовали не целые нуклоны и антинуклоны, а их «составляющие части» — кварки и антикварки. Но динамика кварковой плазмы еще не очень хорошо изучена, и мы проиллюстрируем судьбу барионов и антибарионов в горячей Вселенной на примере хорошо знакомых нам нуклонов и антинуклонов.

Итак, по мере расширения Вселенной фотонный газ охлаждается, энергии фотонов уменьшаются и, наконец, температура излучения становится меньше минимальной энергии, которая требуется для рождения пары нуклон—antinуклон. Однако рождение этих пар не прекращается! Дело в том, что в спектре излучения черного тела с определенной температурой всегда присутствует какая-то доля фотонов с большой энергией. Для примера рассмотрим спектр излучения черного тела с температурой $T_0 = 500$ МэВ (рис. 38, правый). Видно, что при такой температуре больше всего фотонов имеют энергии порядка $3T_0$. Некоторая, правда, значительно меньшая, часть фотонов обладает еще более высокой энергией. Такие фотоны вполне могут при взаимодействии с веществом образовать пару нуклон—antinуклон. Поэтому, даже когда температура излучения во Вселенной падает ниже порога рождения нуклона и антинуклона, эти пары все равно продолжают появляться, но уже с меньшей вероятностью. Поэтому если вначале число пар нуклон—antinуклон было почти таким же, как число фотонов, то после того, как температура падает ниже порога рождения, число этих пар начинает резко уменьшаться. Из теории следует, что уменьшение концентрации пар должно происходить экспоненциальным образом:

$$\text{число нуклонов} = \text{число антинуклонов} \sim e^{-m/T},$$

где m — масса нуклона, а T — температура излучения. Так как экспоненциальная функция исключительно быстро меняется при изменении своего аргумента, то это приводит к моментальному падению концентрации нуклонов и антинуклонов. Уже к 10^{-3} секунде доля нуклонов ста-

* Нуклонами называют протоны и нейтроны, подчеркивая тем самым, что из этих частиц построены все атомные ядра («ядро» по-латыни nucleus).

новится порядка 10^{-17} от числа фотонов! То есть за время от 10^{-6} до 10^{-3} секунды практически все вещество и антивещество во Вселенной исчезает в результате аннигиляции. Точные расчеты показывают, что если во Вселенной с самого начала (то есть при временах, меньших 10^{-6} секунды) было одинаковое число нуклонов и антинуклонов, то к настоящему времени их концентрация составляла бы астрономически малое значение:

$$R = \frac{\text{число нуклонов}}{\text{число фотонов}} = \frac{\text{число антинуклонов}}{\text{число фотонов}} \sim 10^{-18}.$$

Эта почти на десять порядков (в сто миллиардов раз!) меньше, чем наблюдаемое отношение $R=10^{-9\pm 1}$.

Следовательно, если в ранней Вселенной было бы совершенно одинаковое число барионов и антибарионов, то к настоящему моменту во Вселенной практически не было бы ни барионов, ни антибарионов. А значит, не мог бы существовать не только Антимир, но и сам наш Мир!

Вот к такому ошеломляющему выводу приводит на первый взгляд совершенно естественное предположение о полном равноправии вещества и антивещества в ранней Вселенной.

С физической точки зрения столь быстрое исчезновение нуклон-антинуклонных пар происходит из-за того, что, когда температура падает ниже порога рождения, пары слишком долго находятся в состоянии теплового равновесия с излучением. Только при этом условии справедлив закон экспоненциального падения концентраций нуклонов и антинуклонов. Если бы эти частицы вышли из состояния теплового равновесия по отношению к излучению, то их концентрации менялись бы совсем по-другому, гораздо медленнее. Но что значит «вышли из состояния равновесия»? Тут необходимо некоторое пояснение.

Расширяющаяся Вселенная совсем не похожа на закрытый термос с угольком, на примере которого мы поясняли понятие черного тела, находящегося в равновесии со своим излучением. Температура Вселенной все время падает в ходе расширения, и, чтобы вещество и излучение тем не менее оставались в тепловом равновесии, необходимо, чтобы скорость процессов, устанавливающих это равновесие, была бы намного больше, чем скорость изменения температуры Вселенной.

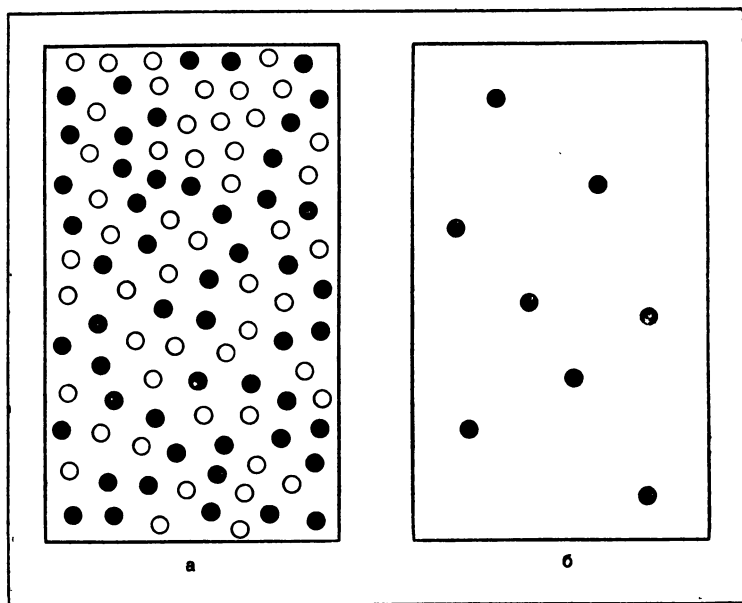


Рис. 39. В ранней Вселенной до момента $t \sim 10^{-6}$ секунды (а) было большое количество барионов (темные кружки) и антибарионов (незаштрихованные кружки). Ничтожный избыток барионов — один лишний барион на миллиард барионов и антибарионов — уцелел после аннигиляции (б) и образовал весь наш Мир

К несчастью для приверженцев Антимира, скорость реакции аннигиляции, которая в нашем случае ответственна за восстановление равновесия между нуклонами и излучением, слишком велика. Нуклоны и антинуклоны очень «охотно» аннигилируют друг с другом. Поэтому они слишком долго не выходят из состояния теплового равновесия с излучением и падение их концентрации по экспоненциальному закону неизбежно приводит к почти полному исчезновению тех огромных количеств вещества и антивещества, которые имелись в ранней Вселенной.

Если исчезновение антивещества, в общем-то, согласуется с наблюдениями (мы действительно нигде не видим во Вселенной антивещества в больших масштабах), то как быть с веществом? Ведь мы-то с вами все-таки

существуем? Откуда тогда берутся те нуклоны, из которых состоит окружающий нас Мир?

Долгое время этот, казалось бы, простой вопрос оставался нерешенным. Обычно предполагали, что Вселенная устроена таким образом, что с самого начала барионов было чуть больше, чем антибарионов. Оказывается, чтобы не вступать в противоречие с наблюдаемым отношением числа барионов к числу фотонов, надо считать, что число барионов было в 1,000000001 раза больше числа антибарионов. То есть на каждый миллиард пар барионов и антибарионов приходился бы один лишний барион. Тогда в процессе расширения весь этот миллиард проаннигилировал бы и исчез, а примесь барионов выжила бы и создала все окружающее нас великолепие.

Но откуда взялись эти «лишние» барионы? Если бы можно было объяснить возникновение такого избытка барионов, то это было бы совсем замечательно. Тогда, с одной стороны, получало бы обоснование существование нашего Мира, а с другой стороны, становилось понятным, почему все поиски Антимира не дают положительных результатов.

Надо сказать, что расчеты концентрации антибарионов в несимметричной Вселенной, где с самого начала присутствовал некоторый избыток барионов, дают совершенно убийственные результаты для гипотезы Антимира. Получается, что из горнила ранней Вселенной уцелеет лишь один антибарион на 10^{87} фотонов! То есть

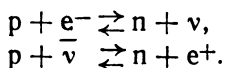
$$\frac{\text{число антибарионов}}{\text{число фотонов}} = 10^{-87}.$$

Такое совершенно мизерное значение, которое предсказывается барион-несимметричной моделью развития Вселенной, не оставляет ни малейшего шанса для поисков Антимира. Казалось, для окончательного захоронения гипотезы Антимира оставалось совсем «немного», надо было объяснить происхождение избытка барионов в ранней Вселенной. После этого теорию Антимира можно было с легким сердцем отправить в кунсткамеру, где хранятся несбывшиеся физические теории типа тепловой жидкости — флогистона или всемирного эфира. И вот в конце 60-х годов был придуман механизм, с помощью которого можно создать «излишек» барионов в молодой Вселенной.

ВЕЩЕСТВО В ГОРЯЧЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Итак, в предыдущем разделе, мы обсудили два варианта молодой Вселенной. В первом из них полагалось, что вещества и антивещества было поровну, во втором — делалось предположение о существовании изначально малого избытка барионов над антибарионами. Обе эти схемы исключают возможность «выживания» после 10^{-3} секунды с начала расширения Вселенной какого-либо значительного количества антибарионов. Запомним этот факт, непреложно вытекающий из стандартной модели горячей Вселенной. В следующей главе мы дадим ему полное физическое обоснование, а затем попытаемся его опровергнуть и возродить мечту об Антимире, но уже на новом уровне.

Теперь посмотрим, что происходило с веществом — барионами — после 10^{-3} секунды. В первую очередь нас будет интересовать судьба протонов и нейтронов — основных компонент, из которых построен наш Мир, а точнее, атомные ядра всех химических элементов. К моменту 10^{-3} секунды температура Вселенной составляла приблизительно 50 МэВ, то есть $5 \cdot 10^{11}$ К. Наша Метагалактика — наблюдаемая сегодня часть Вселенной размером около 18 миллиардов световых лет — была сжата тогда до размера одного светового месяца. Число протонов и нейтронов было приблизительно одинаковым. Причем под действием высокоэнергичных лептонов — электронов, позитронов и нейтрино — происходили непрерывные переходы протонов и нейтронов друг в друга

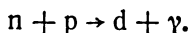


Но нейтрон чуть тяжелее протона, и лептону «легче» перевести нейтрон в протон, нежели обратно. Поэтому концентрация нейтронов со временем уменьшалась. Так продолжалось до тех пор, пока с начала расширения не прошло 3 минуты 44 секунды *. Этот момент в истории

* У нас нет возможности детально останавливаться на тех важных событиях, которые происходили во Вселенной в интервале времен от 10^{-3} секунды до 3 минут. Отметим лишь, что при $t \sim 0,1-0,3$ секунды плотность Вселенной уменьшилась настолько, что нейтрино стали выходить из равновесия с излучением. В дальнейшем нейтрино распространялись в прозрачной для них Вселенной подобно реликтовым фотонам. При $t \sim 10$ секунд происходила интенсивная аннигиляция

Вселенной выделен потому, что с него начинается образование ядер легких элементов. Нас особо будет интересовать, что именно тогда происходило, так как это имеет отношение к поискам Антимира.

Вообще говоря, легчайшее ядро — дейтрон — может образовываться в горячей Вселенной не только после первых 3 минут ее существования. Это происходит в такой реакции:



Однако в достаточно молодой Вселенной энергия фотонов велика, и они сразу же расщепляют ядро дейтерия обратно на протон и нейтрон. Когда же Вселенная остывает настолько, что энергии фотонов уже недостаточны, чтобы разрушить дейтрон, тогда-то и начинается эффективное образование дейтронов, а с ним и других легких ядер. По-научному этот период звучно называется эрой космологического нуклеосинтеза, хотя длится эта эра всего лишь полчаса. Тем не менее значение космологического нуклеосинтеза трудно переоценить, именно в этот период во вселенской кухне были приготовлены основные полуфабрикаты для изготовления нашего Мира.

Цепочка процессов, протекающих в то время, показана на рис. 40. Мы видим, что протоны сливаются с нейтронами в дейтроны, затем образуются изотопы гелия (гелий-3) и водорода (тритий). Эти изотопы, в свою очередь, «перегорают» в обычный гелий — ${}^4\text{He}$. А что же дальше?

А дальше ничего! Оказывается, наш Мир устроен так хитро, что в природе нет стабильного ядра с 5 нуклонами. В таблице элементов вслед за гелием, состоящим из 2 протонов и 2 нейтронов, следует литий-6: 3 протона и 3 нейтрона. Но литий-6 нельзя получить из гелия-4 путем простого столкновения с одним нуклоном. Другие же реакции с образованием лития сильно подавлены. Поэтому практически весь процесс космологического нуклеосинтеза кончается образованием гелия-4. Так как для построения гелия требуются два нейтрона, нуклеосинтез идет до тех пор, пока все нейтроны не свяжутся в гелий.

электронов и позитронов. Во Вселенной осталось лишь небольшое количество электронов, скомпенсировавшее положительный электрический заряд протонов.

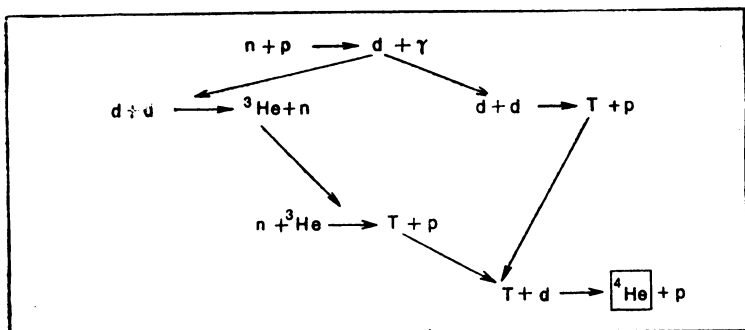
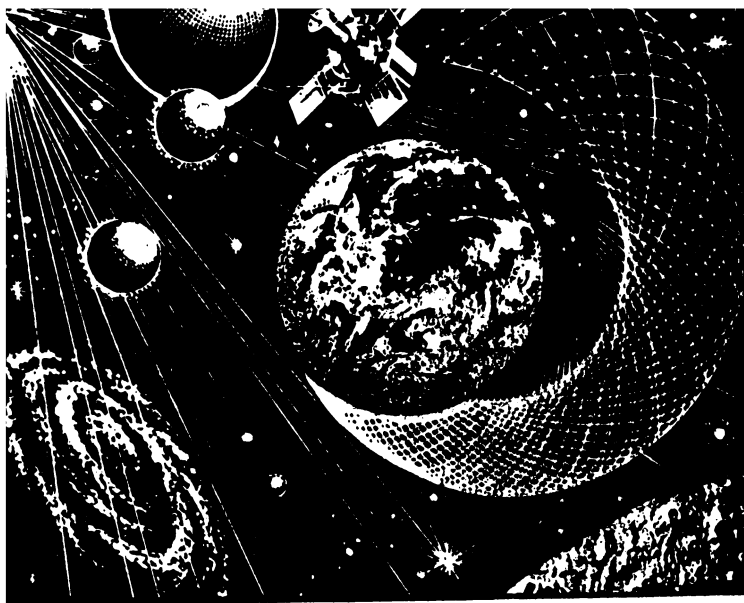


Рис. 40. Основные реакции, протекающие в эпоху нуклеосинтеза

Стандартная модель горячей Вселенной предсказывает, что концентрация ${}^4\text{He}$ должна быть порядка 25 процентов. И в самом деле, астрономические данные показывают именно такое обилие гелия во Вселенной. Более того, хотя мы знаем, что гелий может образовываться в звездах за счет термоядерного синтеза, тем не менее современные модели эволюции Вселенной не в состоянии объяснить образование такого колоссального количества гелия в звездах. Поэтому все говорит о том, что имеющийся сейчас гелий в основном приготовлен в течение первого получаса в жизни Вселенной. Так что это еще один довод в пользу модели Большого Взрыва.

После окончания нуклеосинтеза во Вселенной началась сравнительно спокойная жизнь. В течение почти 300 тысяч лет она тихо остывала, излучение по-прежнему находилось в состоянии теплового равновесия с теми остатками вещества, которые уцелели после бурной эпохи ранней Вселенной. Наконец, температура фотонного газа упала ниже нескольких электронвольт и смогли образоваться атомы — электроны соединились с ядрами, и излучение уже было не в состоянии развалить даже такие слабосвязанные системы. В этот момент Вселенная стала прозрачной для фотонов: ведь атом электрически нейтрален, а излучение слабо взаимодействует с нейтральным веществом. Именно тогда и начали свой путь реликтовые фотоны, которые сейчас, через 10 миллиардов лет, были впервые зарегистрированы Пензасом и Вилсоном.



ГЛАВА 5

Почему наш мир — это Мир?

«Что касается современной науки, то мы здесь полностью должны отказаться от мысли, что, проникая все глубже в область малого, мы достигнем когда-нибудь последнего рубежа. Я уверен, что от этой идеи мы можем отказаться без сожалений. Вселенная бесконечна во всех направлениях, не только в большом мире вокруг нас, но и в самом малом. Если мы примем за масштаб нашу человеческую шкалу и будем изучать Вселенную все далее и далее, мы, наконец, и в большом и в малом достигнем такой туманной дали, где нам откажут сначала наши чувства, а потом и наш разум».

Эти слова были сказаны известным немецким физиком Э. Вихертом в 1896 году. Сегодня, спустя почти 90 лет, мы можем с удовлетворением констатировать, что научились работать «и в большом и в малом» с такими понятиями, которые наши чувства уже не в состоянии воспринять. Мы не можем представить себе поведение

квантовых микрообъектов, точно так же трудно вообразить Вселенную, сжатую до размеров спичечного коробка. Но рассчитать ее поведение, предсказать те или иные процессы в мире элементарных частиц — пожалуйста! Успехи современной космологии и физики микромира вызывают благоговейное удивление перед мощью человеческого разума. И хотя явления, о которых мы будем говорить в этой главе, происходят при столь высоких энергиях, при таких фантастически малых временах с момента рождения нашего мира, будем надеяться, что это еще не совсем «туманная даль» и предсказание Вихерта пока не сбывается.

В предыдущей главе мы говорили, что для того, чтобы полностью расправиться с Антимиром, а также лучше понять происхождение нашего мира, необходимо разобраться в причинах возникновения в ранней Вселенной «лишних» барионов. Эта проблема долгое время была вызовом для теоретиков, которые стремились найти в рамках модели Большого Взрыва такой механизм или целую совокупность физических процессов, приводящих к образованию барионного избытка. Их исследования увенчались успехом. Была предложена красивая схема, которая позволяет, стартуя с произвольного начального состояния (то есть число частиц может быть равным числу античастиц, а может быть и нет), прийти именно к избытку барионов. Привлекательно в этом подходе то, что он наглядно показывает неразрывную связь между поведением элементарных частиц и судьбой всей Вселенной в целом.

Вообще говоря, законы, установленные при исследовании микромира, довольно широко используются астрофизиками — это вполне естественно. Но хотелось бы, чтобы такое сотрудничество было обоюдовыгодным: всегда интересно знать, нельзя ли получить какие-то полезные выводы для теории элементарных частиц, изучая, например, процессы развития Вселенной. Оказывается, в ряде случаев мы действительно можем извлечь из астрофизических данных информацию о свойствах элементарных частиц и их взаимодействиях. Хороший пример тому — недавнее обнаружение антипротонов в составе космических лучей. Мы подробно говорили об этом в третьей главе. Так вот на сегодняшний день из опытов на ускорителях мы знаем, что время жизни антипротона по крайней мере больше 1700 часов. Гораздо лучшую оценку

времени жизни антипротона предоставляют нам результаты, полученные в полетах аэростатов. Так как космические лучи генерируются преимущественно в нашей Галактике, то, прежде чем попасть в наши детекторы, антипротоны могут пройти довольно значительные расстояния, сравнимые с размером Галактики. На это им потребуется около 10^7 лет. Значит, можно считать, что время жизни антипротона должно превышать эту цифру. Стало быть, астрофизикам удалось измерить время жизни антипротона в 500 миллионов раз лучше, чем их коллегам на ускорителях.

Связь между микрофизикой и космологией проявляется и в том, что сам факт существования барионной асимметрии Вселенной, отсутствия в ней Антимира, может рассматриваться как экспериментальное подтверждение правильности основных предположений одной из самых интересных современных теорий элементарных частиц — теории великого объединения. Эта красивая модель описывает с единых позиций слабые, сильные и электромагнитные взаимодействия частиц. Однако характерная область энергий, при которых эффекты теории великого объединения начинают играть существенную роль, настолько далека от энергетического диапазона, достигнутого на наших многокилометровых ускорителях, что никто не берет на себя смелость сказать, когда же мы сможем изучить в полной мере предсказания моделей великого объединения, как говорят биологи, *in vitro* (в пробирке). Правда, уже сейчас отдельные положения теории великого объединения подвергаются экспериментальной проверке. Мы будем говорить об этих трудоемких опытах чуть позже, а пока заметим, что единственной лабораторией, в которой были получены колоссальные энергии великого объединения, является на сегодняшний день наша Вселенная. К сожалению, эта лаборатория уже давно не работает по тематике физики сверхвысоких энергий. Но результаты ее деятельности — прямо перед нами. Мы видим Мир и не видим Антимира. Объяснить, как в процессе развития Вселенной могла получиться такая ситуация, и есть основная задача этой главы. Но сначала несколько сведений из физики микромира.

АСИММЕТРИЯ МИКРОМИРА

Мы видели, что в макромире барионам отдается предпочтение, а антибарионы выступают в роли Золушки. В физике элементарных частиц на первый взгляд такой дискриминации нет — у каждой частицы есть античастица. Они появляются всегда парами, вместе же и исчезают. Тем не менее полного равноправия между частицами и античастицами в микромире тоже не существует.

Симметричное здание современной физики стало сильно проседать на один угол, когда в 1956 году было обнаружено несохранение пространственной четности. То есть оказалось, что законы физики меняются при замене левого на правое. Такое преобразование происходит при отражении в зеркале и называется *P*-преобразованием, от английского слова *parity* — четность. До 1956 года существовала молчаливая уверенность в том, что все физические процессы как в нашем мире, так и в «зазеркалье» (то есть будучи отраженными в зеркале) идут одинаково. Так как при зеркальном отражении левая перчатка превращается в правую, эту уверенность в симметрии относительно *P*-преобразования иногда выражали в утверждении, что в микромире правое и левое неотличимы. Однако обнаружилось, что существуют такие процессы, для которых это утверждение несправедливо. Можно вспомнить миниатюру из спектакля театра кукол Сергея Образцова про две фабрики, одна из которых выпускала только левые перчатки, а другая — только правые. Так вот, в микромире одна из этих фабрик гораздо лучше справляется с плановым заданием, чем другая.

Одновременно с открытием несохранения пространственной четности было найдено, что законы физики неинвариантны относительно преобразования *C*-четности, которое состоит в том, что все частицы заменяются на античастицы. Подчеркнем, что и *C*-четность, и *P*-четность нарушается не во всех процессах, а только в реакциях, идущих за счет слабого взаимодействия. (Это взаимодействие ответственно, например, за бета-распад ядер, о котором мы говорили в первой главе.) Поэтому дискриминация между частицами и античастицами в микромире отнюдь не глобальна.

В 1957 году Л. Д. Ландау, а также американские теоретики Т. Ли и Ч. Янг предложили, что, может быть, существует симметрия законов физики относительно ком-

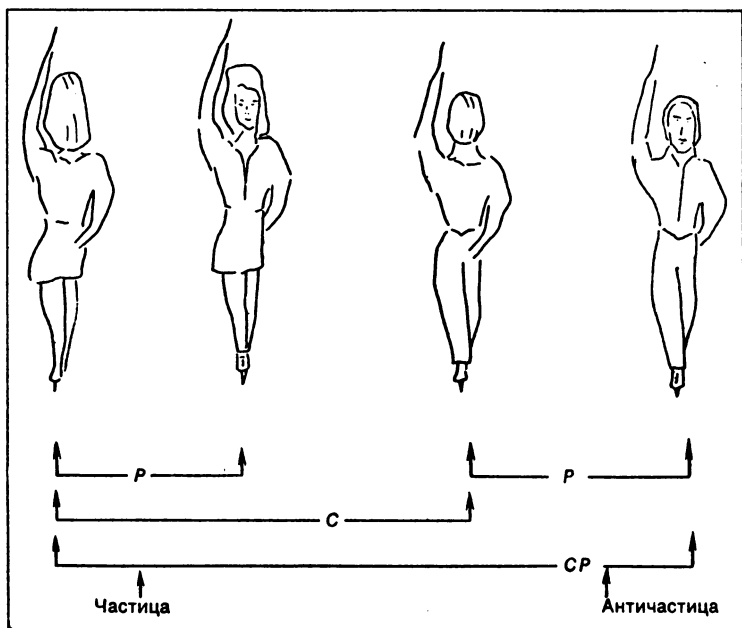


Рис. 41. Схематическое изображение преобразований P -, C - и CP -четности. C -преобразование осуществляет замену «частицы» на «античастицу», но не меняет левое на правое. P -преобразование эквивалентно отражению в зеркале

бинированного CP -преобразования. То есть если одновременно поменять левое на правое и частицы на античастицы, то ничего не изменится. Однако в 1964 году Дж. Кронин и В. Фитч обнаружили процесс, в котором CP -четность не сохранялась. Мы уже говорили, что это был исключительно неожиданный результат. Правда, до сегодняшнего дня найдено нарушение CP -четности только в одном процессе — при распадах нейтральных K -мезонов. Однако важна сама принципиальная возможность несохранения CP .

Итак, в микромире у нас есть много примеров нарушения симметрий. Из числа тех преобразований, которые мы рассматривали выше, только единое CPT -преобразование не меняет законы физики. По отдельности же нарушаются и C -четность, и P -четность, и CP -четность, а стало быть, нет и симметрии относительно изменения на-

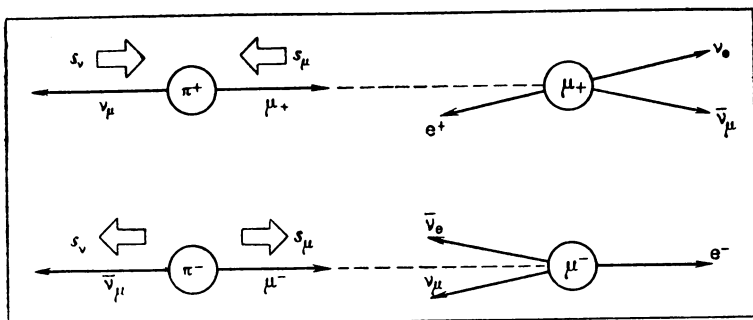


Рис. 43. Совместное нарушение C - и P -четностей в распадах π - и μ -мезонов приводит к тому, что электроны и позитроны, которые в конечном счете образуются в таких распадах, будут вылетать в разные стороны. Число e^+ и e^- остается в точности одинаковым, но некоторая «мгновенная» асимметрия между частицами и античастицами в разных областях пространства может возникать. Однако если посмотреть много распадов π^+ - и π^- -мезонов, продукты которых могут равновероятно вылетать в любом направлении, то в целом никакой асимметрии между частицами и античастицами не будет

дем к выводу, что в целом весь наш объем будет содержать в точности одинаковые количества электронов и позитронов. Никакой генерации избытка частиц (или античастиц) за счет нарушения только зарядовой симметрии не происходит.

Тем не менее в микромире есть такие реакции, в которых проявляется абсолютное неравноправие между частицами и античастицами. Происходят они за счет нарушения CP -симметрии. Как мы говорили, это нарушение происходит при распадах нейтральных K -мезонов. Так вот, одна из разновидностей нейтральных K -мезонов — долгоживущий K^0 -мезон может распадаться по следующим каналам: с испусканием позитрона:

$$K_L^0 \rightarrow e^+ + \pi^- + \nu_e$$

и с испусканием электрона:

$$K_L^0 \rightarrow e^- + \pi^+ + \bar{\nu}_e$$

Строгое рассмотрение показывает, что если бы CP -четность сохранялась, то вероятности этих обоих распадов должны быть в точности одинаковыми. Однако экспериментально обнаружено, что K_L^0 -мезоны предпочита-

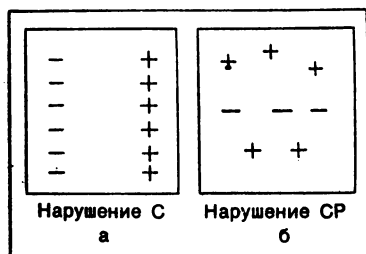


Рис. 44. Схема воображаемых моментальных фотографий «ящиков» с π^+ - и π^- -мезонами (а) и K_L^0 -мезонами (б). Для простоты мы не показываем на рисунке самих этих частиц, а только электроны (—) и позитроны (+). Нарушение C -четности в распадах π^\pm -мезонов приводит к тому, что в разных областях «ящика» (а) будет разное число позитронов и электронов, однако общее число e^+ и e^- одинаково. Нарушение же CP -четности в распадах K_L^0 -мезонов (б) приводит к тому, что общее число e^+ и e^- будет различно. Позитронов будет возникать чуть больше

ют распадаться с вылетом позитронов. Хотя эта их «склонность» не очень ярко выражена (позитронов появляется всего лишь в 1,006 раза больше, чем электронов), все равно твердо установлено, что такая асимметрия налицо.

Следовательно, если заполнить некоторый «ящик» K_L^0 -мезонами, то нарушение CP в их распадах приводит к тому, что на моментальной фотографии такого объема можно будет заметить больше позитронов, чем электронов. На рис. 44 показаны воображаемые моментальные фотографии «ящиков» с π -мезонами и K_L^0 -мезонами. В первом случае из-за нарушения только C -четности в распадах π -мезонов будет появляться *одинаковое* число e^+ и e^- , а во втором — нарушение CP приведет к тому, что число e^+ и e^- , возникающих в распадах K_L^0 -мезонов, будет *разным*.

Надо подчеркнуть, что объяснить барионную асимметрию Вселенной с помощью данного распада K -мезонов нельзя. Хотя бы потому, что в этих распадах возникает избыток лептонов одного сорта (позитроны и электроны относятся именно к этому классу элементарных частиц, см. стр. 78), а не барионов. Более того, совместно с позитронами в распаде K_L^0 испускаются и π^- -мезоны. Цепочку их распада мы неоднократно рассматрива-

правления времени — T -четность тоже нарушается. Такая «кособокость» микромира нам на руку. Ведь основная наша цель в этой главе — объяснить, как из симметричного состояния с одинаковыми количествами частиц и античастиц во Вселенной тем не менее возник наш резко асимметричный мир, практически полностью состоящий из барионов. Большое количество нарушенных симметрий в микромире вселяет уверенность, что, может быть, удастся выбрать из их числа такие нарушенные симметрии, которые помогут нам решить задачу барионной асимметрии Вселенной.

Первым претендентом на эту роль является, несомненно, нарушение зарядовой четности. C -преобразование меняет частицы на античастицы, и, если какой-нибудь процесс несимметричен относительно C -преобразования, значит, имеется нужное нам неравноправие между частицами и античастицами. Но что фактически означает это неопределенное слово «неравноправие»? Нам нужен ответ на конкретный вопрос: может ли одно только нарушение зарядовой симметрии обеспечить требуемый избыток частиц над античастицами или нет? Поэтому рассмотрим подробнее, что происходит при нарушении зарядовой симметрии.

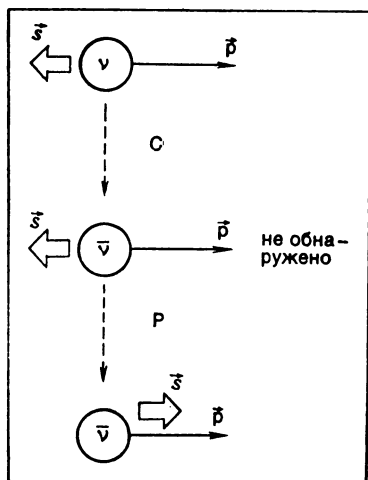
Мы знаем, что нейтрино — это частица с нулевой массой покоя* и спином $1/2$. Экспериментально установлено, что спин нейтрино всегда ориентирован в направлении, противоположном импульсу нейтрино, а спин антинейтрино всегда параллелен его импульсу (рис. 42). Но как раз это обстоятельство и противоречит зарядовой симметрии. В самом деле, если заменить нейтрино на антинейтрино, не меняя направления его спина (а именно так происходит при C -преобразовании), то мы получим необнаруженное в природе антинейтрино, у которого спин и импульс смотрят в противоположных направле-

* В недавних экспериментах группы В. А. Любимова из Института теоретической и экспериментальной физики в Москве получено указание на то, что масса нейтрино отлична от нуля. Если такой результат подтвердится, это будет иметь серьезнейшие последствия как для теории элементарных частиц, так и для космологии. Однако для простоты мы будем считать, что масса нейтрино равна нулю, придерживаясь, быть может, устаревших, но еще окончательно не опровергнутых представлений. Основной вывод о роли нарушения C -четности для генерации избытка античастиц при этом не изменится.

ниях. Такое нарушение зарядовой симметрии для нейтрино приводит к тому, что в случае распада π^+ -мезона ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) направление спина μ^+ -мезона будет всегда антипараллельно направлению его импульса (рис. 43). В последующем распаде μ^+ -мезона ($\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$) не сохраняется пространственная четность, и позитроны вылетают преимущественно в сторону, противоположную линии полета μ^+ -мезонов. Аналогичное рассмотрение распадов π^- -мезонов показывает (см. рис. 43), что электроны будут, наоборот, вылетать в основном по направлению линии полета μ^- -мезона. Следовательно, если мы возьмем равную смесь из π^+ - и π^- -мезонов, то при их распадах электроны и позитроны будут вылетать в разные стороны. Общее число частиц и античастиц в этих реакциях не меняется.

Таким образом, подводя итог, можно сказать, что нарушение C -четности не приводит к появлению абсолютной асимметрии между частицами и античастицами. Некоторая же относительная асимметрия может возникать. То есть на моментальной фотографии объема, в котором сосредоточены равные количества π^+ - и π^- -мезонов, может обнаружиться, что в какой-то области этого объема находится больше электронов, а в другой — больше позитронов. Однако, усредняя результат по времени, мы при-

Рис. 42. C -преобразование переводит нейтрино в антинейтрино, не меняя ориентировки спина нейтрино по направлению импульса (\vec{p}). Такого антинейтрино в природе не обнаружено. В этом и проявляется нарушение C -четности для нейтрино. Если же в дополнении к C -преобразованию сделать еще и P -преобразование, которое изменяет направление спина, тогда нейтрино перейдет в антинейтрино, реально наблюдающееся в эксперименте



ли выше (см. рис. 43) и видели, что она заканчивается возникновением электронов и нейтрино. То есть хотя непосредственно в распаде K_L^0 -мезона возникает больше позитронов, чем электронов, последующие реакции сводят на нет эту асимметрию и в конце концов число позитронов и число электронов становятся одинаковыми.

Как бы то ни было, нарушение CP -четности позволяет нам надеяться, что в природе может осуществляться такая ситуация, когда в распадах некоторой гипотетической частицы X будет образовываться больше частиц, чем античастиц, появляющихся за счет таких же распадов \bar{X} -частицы. Читатель, который еще помнит обсуждение CPT -теоремы из второй главы, может возразить: не вступает ли такое предположение в противоречие с CPT -теоремой? Ведь она требует, чтобы время жизни частицы и античастицы было одинаковым. Время жизни определяется вероятностью распадов данной частицы. Чем больше вероятность частице распасться, тем, естественно, время ее жизни будет меньше. Следовательно, если вероятность распадов X на частицы больше, чем соответствующая вероятность распадов \bar{X} на античастицы, то время жизни X и \bar{X} должно быть различным!

Такое возражение бдительного читателя будет совершенно правильным. Нам надо сформулировать свои утверждения более четко. Предположим, что X может распадаться несколькими способами (для простоты рассмотрим только два канала распада):

$$X \rightarrow b + \text{что-то еще с вероятностью } A_1,$$

$$X \rightarrow l + \text{что-то еще с вероятностью } A_2.$$

Соответствующие каналы распада для античастицы \bar{X} таковы:

$$\bar{X} \rightarrow \bar{b} + \text{что-то еще с вероятностью } B_1,$$

$$\bar{X} \rightarrow \bar{l} + \text{что-то еще с вероятностью } B_2.$$

CPT -теорема требует, чтобы полная вероятность распада X была равна полной же вероятности для распада \bar{X} . То есть $A_1 + A_2 = B_1 + B_2$.

Однако никто не запрещает нам, чтобы частичная или, выражаясь по-научному, парциальная вероятность распада A_1 была бы неравна парциальной вероятности

соответствующего распада античастицы B_1 . Нарушение CP -четности позволяет нам сделать парциальные вероятности A_1 и B_1 разными, например A_1 больше B_1 . Чтобы скомпенсировать это неравенство, A_2 должно быть меньше B_2 . Тогда время жизни X и \bar{X} будет одинаковым и CPT -теорема не нарушится. Если под частицей b подразумевают барионы, а под частицей l — лептоны, то неравенство $A_1 > B_1$ означает, что в процессах распада X будет возникать больше барионов, чем антибарионов в распадах \bar{X} . (Что делается в лептонных каналах, нам пока неважно.) Главная цель вроде бы достигнута — нарушение CP привело к возникновению избытка барионов. Остается только найти эту желанную частицу X , и все.

Между тем дело обстоит гораздо сложнее. Равная смесь из X - и \bar{X} -частиц должна обладать нулевым барионным зарядом. Если после распадов этих частиц образуется все-таки избыток барионов, это означает, что барионный заряд такой системы будет уже отличен от нуля. Но во всех известных на сегодняшний день реакциях барионный заряд строго сохраняется: число барионов минус число антибарионов во всех системах остается в точности неизменным. Поэтому, если мы хотим объяснить возникновение барионной асимметрии Вселенной, нам будет недостаточно одного нарушения C - и CP -четности. Неизбежно придется постулировать и несохранение барионного заряда. А это чрезвычайно сильное утверждение, которое, можно сказать, подрывает стабильность нашего мира. Разберем его подробнее.

НЕСОХРАНЕНИЕ БАРИОННОГО ЗАРЯДА

Мы уже говорили во второй главе, что если барионное число не сохраняется, то легчайший барион — протон, имеющий барионный заряд $+1$, — может распадаться на частицы, суммарный барионный заряд которых равен нулю. Например,

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

$$B = +1 \quad 0 \quad 0$$

Однако экспериментально распад протона до сих пор не обнаружен. Выше уже говорилось, что если он происходит, то вероятность его настолько мала, что протон может оставаться стабильным в течение по крайней ме-

ре 10^{30} лет. Это намного больше возраста Вселенной, то есть того времени, которое прошло с момента начала расширения до сегодняшнего дня. Оно составляет $(10—20) \cdot 10^{10}$ лет.

Промежуток времени в 10^{30} лет уже настолько велик, что трудно придумать какой-нибудь процесс, который бы имел такую длительность. Например, вы помните, наверное, мифологического орла, который раз в сто лет прилетает на высокую гору точить свой клюв. Можно легко посчитать то время, которое понадобится орлу, чтобы таким образом сточить до основания гору размером с Эльбрус. Оказывается, оно приблизительно в 100 миллионов раз меньше, чем время жизни протона.

Невольно закрадывается подозрение: как же физики сумели измерить такой фантастически большой временной интервал? Конечно, соответствующие опыты были достаточно сложны и трудоемки, но мне хотелось бы показать читателю, что в принципе можно получить достаточно сильные ограничения на время жизни протона, вообще не пользуясь никакой аппаратурой и в буквальном смысле не сходя с места.

В теле человека содержится около 10^{29} протонов. Распад протона сопровождается большим энерговыделением, и если посчитать, какую дозу облучения получало бы наше тело за счет возможного распада содержащихся в нем протонов, то результат будет такой:

$$\text{доза, которую получает тело при распаде протона} = \frac{6 \cdot 10^{18}}{\tau} \text{ рад/год},$$

где τ —время жизни протона. Напомним, что рад — это единица измерения ионизирующих излучений, которая соответствует энерговыделению в 1 грамме $6 \cdot 10^7$ МэВ энергии. Естественная доза облучения, которую получает наше тело из-за действия космических лучей и естественной радиоактивности, составляет 0,12 рад в год. Считается, что для организма не опасно получать в год около 5 рад. Если доза облучения за счет распада протона превысит в 100 раз допустимую дозу, это приведет к серьезным последствиям. Но мы-то с вами чувствуем себя сравнительно хорошо, значит, доза от распада протона по крайней мере не превышает 500 рад в год. Отсюда, пользуясь соотношением, которое приведено выше, можно посчитать время жизни протона. Получается, что оно должно быть больше 10^{16} лет. Это число не так велико,

как экспериментальное значение, но все же оно превышает возраст Вселенной! Вот так, оказывается, наше здоровье напрямую связано с фундаментальными свойствами элементарных частиц.

Итак, на сегодня у нас нет никаких экспериментальных доказательств несохранения барионного заряда. Время жизни протона измерено с такой колоссальной точностью, что, казалось, у нас нет никаких оснований подозревать нарушение закона сохранения барионного числа. Однако сейчас проводится больше десятка опытов по поиску распада протона. Каждый такой эксперимент стоит несколько миллионов долларов, и уже сам размер этой суммы денег свидетельствует о том, что физики отнюдь не уверены в стабильности протона, а следовательно, и в выполнении закона сохранения барионного числа.

Надо сказать, этот закон всегда стоял как-то особняком среди других законов сохранения. Дело в том, что для каждой сохраняющейся величины, будь то электрический заряд, энергия или импульс, существует определенный тип симметрии. То есть если законы физики симметричны относительно некоторого преобразования, то обязательно существует определенная величина, связанная с этим преобразованием, которая сохраняется. Например, можно показать, что сохранению полной энергии системы соответствует симметрия относительно сдвига во времени. Законы физики не меняются для различных моментов времени. Это, в общем-то, понятно: результат опыта не должен зависеть от того, провели ли мы этот опыт сегодня, вчера или послезавтра. Так же очевидно, что эксперимент в Москве и в Токио должен, вообще говоря, давать одинаковые результаты. Это означает наличие симметрии относительно сдвигов в пространстве. Такой симметрии соответствует сохранение импульса системы. А вот барионный заряд вроде бы сохраняется, но никакой симметрии, соответствующей такому сохранению, мы не находим.

Еще больше подозрения о несохранении барионного числа усилились после возникновения теорий великого объединения. Мы будем говорить о них чуть позже, а сейчас просто предположим, что барионное число может меняться, и посмотрим, какие следствия будут вытекать из этого для нашей задачи.

На первый взгляд кажется, что уже одного такого предположения вполне достаточно, чтобы объяснить ба-

рионную асимметрию Вселенной. Пусть, например, у нас антипротоны распадаются быстрее, чем протоны. Тогда требуемый избыток барионов получается немедленно. Эта возможность всерьез обсуждалась в литературе. Однако, как мы уже говорили, такое предположение противоречит *CPT*-теореме, из которой следует, что время жизни частицы и античастицы должно быть одинаково. Отступать от *CPT*-инвариантности, даже ценой объяснения барионной асимметрии, никому не хочется. Слишком уж многие твердо установленные взгляды окажутся тогда под угрозой.

Можно показать строго, что если у вас есть одинаковая смесь из частиц и античастиц, то за счет одного только нарушения закона сохранения барионного заряда невозможно получить никакой барионной асимметрии. В самом деле, распады частиц с нарушением барионного числа будут генерировать положительный барионный заряд, но точно такие же распады античастиц приведут к образованию избытка отрицательного барионного заряда (ведь, как мы помним, антибарионам приписывается отрицательный барионный заряд). Величины же избытка барионов и антибарионов будут в точности одинаковыми, но только при одном условии. Если не нарушаются симметрии относительно *C*- и *CP*-преобразований. Как мы обсуждали ранее, если *C* и *CP* нарушаются, тогда есть возможность, что определенные распады с испусканием частиц могут происходить с большей вероятностью, чем аналогичные распады с вылетом античастиц.

Таким образом, рецепт создания барионной асимметрии у нас почти готов. Уже выяснено, что в него должны входить две компоненты: нарушение *C*- и *CP*-симметрий и несохранение барионного числа.

Остается только подыскать подходящую частицу *X*, в распадах которой выполнялись бы оба этих условия, и посмотреть, как будет вести себя смесь из *X*- и \bar{X} -частиц во Вселенной.

ТЕОРИИ ВЕЛИКОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Теории великого объединения будут интересовать нас по двум причинам. Во-первых, они предсказывают несохранение барионного заряда и, во-вторых, предоставляют кандидата на роль необходимой нам частицы *X*.

До недавнего времени полагали, что существуют четыре основных типа взаимодействия: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное. В повседневной жизни мы хорошо знакомы с проявлениями гравитации и электромагнитного взаимодействия. Сильное взаимодействие тоже весьма существенно для нас, ведь именно за счет него протоны и нейтроны связываются друг с другом в атомных ядрах. Слабое взаимодействие ответственно за такие процессы, как бета-распад ядер. И хотя это в некотором роде экзотический процесс, наша жизнь без слабого взаимодействия выглядела бы совершенно по-другому, так как реакции слабого взаимодействия очень важны для энергетики звезд.

В табл. 5 показаны основные характеристики каждого взаимодействия: радиус действия, масса кванта, который переносит взаимодействие, и величина так называемой константы связи, которой принято характеризовать силу взаимодействия. Видно, что все эти величины сильно отличаются друг от друга.

Таблица 5. Основные характеристики различных взаимодействий

Тип взаимодействия	Радиус действия, см	Квант—переносчик взаимодействия	Величина константы взаимодействия*
1. Сильное	10–13	?	1
2. Электромагнитное	∞	γ , $m=0$	1/137
3. Слабое	10–15	W^+ , W^- , Z^0 бозоны $m \approx 80$ ГэВ	$10^{-5}/m_p^2$
4. Гравитационное	∞	гравитон, $m=0$	$10^{-38}/m_p^2$

* Константы слабого и гравитационного взаимодействий имеют размерность, поэтому в соответствующих строках появляется множитель $1/m_p^2$, где m_p —масса протона.

Тем дерзновеннее кажутся попытки физиков создать единую теорию для всех взаимодействий, то есть с одной точки зрения описать множество, казалось бы, совершенно различных явлений. Создание такой теории было в течение многих лет заветной целью А. Эйнштейна. По целому ряду причин ему не удалось это сделать, в пер-

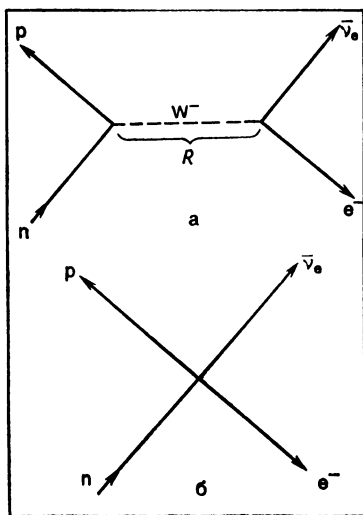
вую очередь из-за отсутствия полной экспериментальной информации о разных взаимодействиях. Но сама идея единой теории выглядела очень привлекательно, и попытки создать общую теорию, хотя бы не всех, а только некоторых взаимодействий, продолжались. Основная трудность состояла в том, чтобы из большого числа различных принципов, по которым можно было бы объединять взаимодействия, выбрать один, наиболее существенный.

До недавнего времени лишь только электромагнитное взаимодействие описывалось «настоящей» квантовой теорией — логически замкнутой, не содержащей произвольных предположений и математически обоснованной. Слабое и сильное взаимодействия рассматривались в рамках некоторых полуфеноменологических моделей, то есть «полувзятых с потолка», чтобы удовлетворительно описать экспериментальные данные. Примерные контуры единой теории начали вырисовываться с середины 50-х годов, когда была сделана попытка построить теорию сильных взаимодействий по образу и подобию теории электромагнетизма. Хотя эта первая попытка окончилась неудачей, но стало ясно, что будущая теория должна удовлетворять таким же принципам симметрии, каким удовлетворяет теория электромагнетизма.

В середине 60-х годов усилиями Ш. Глэшоу, А. Салама и С. Вайнберга была построена первая единая теория для процессов в микромире, которая объединила слабое и электромагнитное взаимодействия. Было показано, что при достаточно больших энергиях (порядка нескольких сот ГэВ) силы электромагнитного и слабого взаимодействия становятся сравнимыми по величине, кванты — переносчики слабого и электромагнитного полей — можно объединить в одно семейство, и слабые и электромагнитные процессы будут описываться одними и теми же уравнениями. При переходе к более низким энергиям эта симметрия нарушается. Если раньше кванты слабого взаимодействия подобно фотонам имели нулевую массу покоя, то теперь они приобретают довольно значительную массу покоя ~ 80 ГэВ, а это приводит к целому ряду следствий. Во-первых, уменьшается радиус слабого взаимодействия (рис. 45); во-вторых, при энергиях, малых по сравнению с массой кванта — переносчика взаимодействия, константа слабого взаимодействия становится тоже малой, то есть «сила» взаимодействия уменьшается,

Разработка теории электрослабого взаимодействия представляла собой одно из крупнейших достижений в физике элементарных частиц, естественно, стали появляться попытки распространить основные ее идеи и дальше для создания единой теории сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий. Надо сказать, что теория сильных взаимодействий долгое время оставалась в наиболее плохом положении. Из-за большой величины константы связи сильного взаимодействия его эффекты хуже всего поддавались точному расчету. Однако в последнее

Рис. 45. До создания теории электрослабого взаимодействия долгое время предполагали, что слабые взаимодействия имеют нулевой радиус действия. То есть в процессах типа бета-распада не происходит какого-либо обмена квантами слабого поля (*б*). Если бы такой обмен происходил, то за характерное время взаимодействия τ частицы могли обменяться квантом, переносящим энергию E : нейтрон должен перейти в протон, испустив квант W^- , масса которого намного больше, чем масса нейтрона и протона. Затем через время τ , пройдя расстояние R , W^- распадается на $\bar{\nu}_e$ и e^- (*а*). Ясно, что при рождении W^- должен нарушаться закон сохранения энергии. Принцип неопределенности разрешает нарушение закона сохранения энергии только на время $\tau \leq \hbar/E$, где \hbar — постоянная Планка. За это время квант может пройти расстояние $R \sim c\tau \leq \hbar c/E$, где c — скорость света. По порядку величины это означает, что радиус взаимодействия $R \sim \hbar c/m$, где m — масса кванта-переносчика взаимодействия. W^- -бозон — квант слабого взаимодействия очень массивен: $m_{W^-} \approx 80$ ГэВ, поэтому радиус этого взаимодействия мал: $\leq 10^{-15}$ см



время был достигнут значительный прогресс и в описании сильных взаимодействий. Он связан в первую очередь с осознанием того факта, что протоны, нейтроны и прочие барионы (а также мезоны) не являются истинно элементарными системами, а представляют собой довольно сложные образования из «более элементарных» частиц — кварков.

Кварки обладают целым рядом экзотических свойств. Они имеют дробный электрический заряд, дробный барионный заряд, и, кроме того, у них есть еще три особых типа «цветовых» зарядов: «красный», «зеленый» и «синий». Чтобы понять, почему физики выбрали такие названия (а заодно и немного отвлечься), напомним читателям строчки из стихотворения для детей польского поэта Людвика-Ежи Керна:

Быть может, и вы размышляли
об этом —
Не лучше ли снег,
Обладающий цветом?
Или лиловый,
Или бордовый,
Или зеленый,
Или же
Беж.

Кончается стихотворение такой строфой:

Не худо бы сбывься мечте этой смелой...
Но с неба по-прежнему падает белый,
Белый, белейший,
Нежный, нежнейший,
Снежный, снежнейший
Снег.

Так вот, хотя каждый кварк имеет цветовой заряд, цветных протонов или π^0 -мезонов в природе нет, как нет бордового или лилового снега. «Цвета» кварков должны комбинироваться таким образом, чтобы частица, состоящая из них, подобно «нежнейшему и снежнейшему» снегу, была «белой», бесцветной. Обычный белый цвет можно получить при смешении красного, зеленого и синего цветов. Именно поэтому цветовым зарядам кварков были присвоены такие наименования.

Введение цветных кварков позволяет не только удобным образом сформулировать правила, согласно которым надо из кварков составлять бесцветные частицы, но и объясняет ряд экспериментальных фактов.

Согласно современным представлениям связь кварков в адроне осуществляется за счет обменов глюонами (от английского слова glue — клей) — безмассовыми частицами, которые в известном смысле подобны фотонам, переносчикам электромагнитного взаимодействия. Однако фотоны сами не имеют электрического заряда, а глюоны, напротив, имеют определенный цветовой заряд. Поэтому в отличие от фотонов глюоны могут взаимодействовать друг с другом. Это обстоятельство приводит к тому, что теория цветных кварков — квантовая хромодинамика строится по образцу квантовой электродинамики, возможность глюон-глюонных взаимодействий существенно усложняет количественный анализ экспериментальных данных. Тем не менее квантовая хромодинамика предсказывает некоторые интересные качественные эффекты. Во всех обычных взаимодействиях, например гравитационном или электромагнитном, по мере уменьшения расстояния между частицами силы возрастают. У кварков же происходит обратное: с уменьшением расстояния между ними цветное взаимодействие ослабевает. Наступает так называемая асимптотическая свобода: на очень маленьких расстояниях кварки ведут себя подобно свободным частицам. Но для того, чтобы локализовать частицы в малых объемах, надо затратить большие энергии. Явление «асимптотической свободы» наводит на мысль, что при больших энергиях взаимодействие между кварками должно уменьшаться, стало быть, константа сильных взаимодействий должна падать с ростом энергии.

Точные расчеты показывают, что такое уменьшение величины константы сильного взаимодействия действительно происходит, однако с ростом энергии она падает очень медленно. Лишь при фантастически большой энергии, порядка 10^{14} — 10^{15} ГэВ, константа сильного взаимодействия сравнивается по величине с константой электро слабого взаимодействия. Это означает, что при столь громадных энергиях процессы сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий идут с одинаковой вероятностью и можно попытаться описать их в рамках единой теории.

Т а б л и ц а 6

Основные свойства кварков и глюонов

1. По современным представлениям существуют 6 кварков и 8 глюонов
2. Тип кварка и его электрический заряд (Q):

u	d	s	c	b	t
$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$	$2/3$	$-1/3$

3. Барионный заряд кварка $B=1/3$
4. Каждый кварк имеет соответствующий антикварк
5. Каждый кварк имеет три цветовых заряда
6. Взаимодействие между кварками осуществляют глюоны
7. Глюоны несут цветовой заряд и могут взаимодействовать друг с другом
8. Каждый барион строится из трех кварков, каждый мезон — из двух

Примеры:

1. π^+ -мезон ($B=0, Q=1$):

$$\begin{array}{rcl} u & + & \bar{d} \\ B = 1/3 & & -1/3 \\ Q = 2/3 & & 1/3 \end{array}$$
2. Протон ($B=1, Q=1$):

$$\begin{array}{rcl} u & + & u & + & d \\ B = 1/3 & & 1/3 & & 1/3 \\ Q = 2/3 & & 2/3 & & -1/3 \end{array}$$

Первые модели такого великого объединения были созданы американскими теоретиками Г. Джорджи и Ш. Глэшоу. Так как по своему смыслу подобные модели должны одновременно описывать сильные и слабые взаимодействия, то в них кварки, основные действующие лица сильных взаимодействий, и лептоны, участвующие главным образом в слабых взаимодействиях, объединяются в одно семейство. Причем вводится новое взаимодействие, которое переводит члены этого семейства друг в друга. Но кварки имеют барионный заряд, а лептоны — нет. Следовательно, это новое лептокварковое взаимодействие должно нарушать закон сохранения барионного числа. Квант — переносчик такого взаимодействия — должен обладать исключительно большой массой, порядка энергии, при которой происходит великое объединение, то есть около 10^{14} — 10^{15} ГэВ. Такие частицы, называемые лептокварками, невозможно получить ни на современных ускорителях, ни в космических лучах. Их масса уже настолько велика, что сравнима с массой простейших бактерий!

Столь большая масса кванта — переносчика лептокваркового взаимодействия объясняет, почему протон «живет» так долго. Дело в том, что такие взаимодействия должны при наших малых энергиях иметь очень малую вероятность. Лишь при энергиях, сравнимых с массой кванта лептокваркового взаимодействия, процессы с нарушением барионного заряда становятся преобладающими. Теории великого объединения дают для времени жизни протона такое значение: $\tau_p = 10^{31 \pm 1}$ лет.

Сейчас это предсказание подвергается усиленной проверке во многих лабораториях мира. Существует уже по

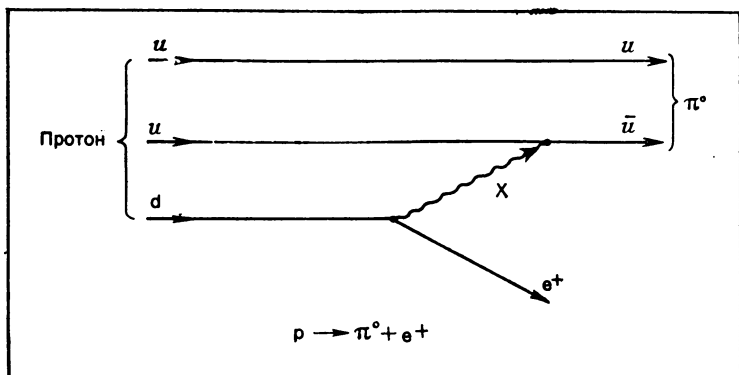


Рис. 46. Распад протона $p \rightarrow e^+ + \pi^0$, предсказываемый теориями великого объединения, должен неизбежно происходить, если существует взаимодействие, переводящее кварки в лептоны. Переносчиком такого взаимодействия является лептокварк X . В обмене между кварками протона d -кварк переводится в лептон e^+ , а один из u -кварков — в свою античастицу \bar{u}

крайней мере 13 проектов экспериментов по поиску распада протона. Идея этих опытов довольно проста: чтобы зарегистрировать распад протона, отнюдь не надо ждать 10^{31} лет, этот распад может произойти в любое мгновение, но только с очень малой вероятностью. Однако если взять достаточно большое количество вещества, то эта вероятность повысится. Например, в 1000 тонн воды содержится $6 \cdot 10^{32}$ нуклонов, стало быть, при времени жизни $\tau^p = 10^{32}$ лет в этом объеме воды за год произойдет 6 протонных распадов. Если $\tau_p = 10^{31}$ лет, то таких распадов будет 60 и т. д.

Главная трудность при регистрации подобных редких процессов заключается в том, чтобы надежно избавиться от фона космических лучей, которые тоже будут взаимодействовать с веществом детектора и давать ложные события. Поэтому все эти тысячи тонн вещества размещают глубоко под землей. Чтобы читатель получил определенное представление о том, какие громадные усилия затрачиваются сейчас на поиск распада протона, приведем два примера уже действующих установок.

В июне 1982 года начала работать огромная установка, расположенная в бывшей соляной шахте около города Кливленда (США). Там на глубине 600 метров была

вырыта полость размерами 18 на 24 и высотой 21 метр. В эту полость было залито 8 тысяч тонн воды и размещено 2400 детекторов излучения. При распаде протона в конечном счете возникают высокоэнергетичные электроны и позитроны, которые при распространении в воде испускают черенковское излучение. Свет от этого излучения образует характерный конус (рис. 47), который достигает поверхности воды и детектируется счетчиками.

Летом 1982 года заработала и установка итальянских физиков, расположенная в автомобильном туннеле под горой Монблан. Она представляет собой 134 железные пластины, каждая весом в 1 тонну, пронизанные крест-накрест 43 тысячами специальных трубок, наполненных газом и предназначенных для регистрации продуктов распада протона.

Аналогичные эксперименты ведутся сейчас в СССР, Японии, Индии, Франции. Уже обнаружены первые шесть событий — кандидатов на распад протона. Их нашла японо-индийская группа, работающая на установке, расположенной в заброшенной шахте на юге Индии, где раньше добывали золото (см. рис. 48). Однако пока есть сомнения в интерпретации этих случаев, и считается, что на сегодняшний день (осень 1983 года) распад протона не обнаружен. Экспериментальное ограничение на время его жизни таково: $\tau_p > 6 \cdot 10^{31}$ лет. Тем не менее уже к вы-

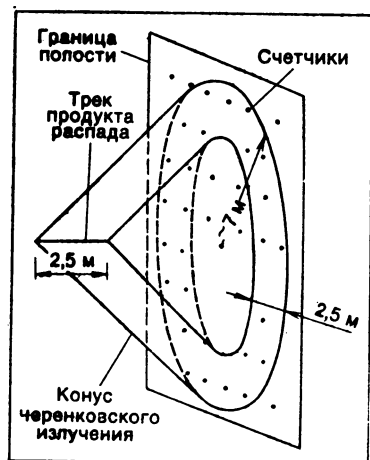


Рис. 47. Схема эксперимента в Кливленде

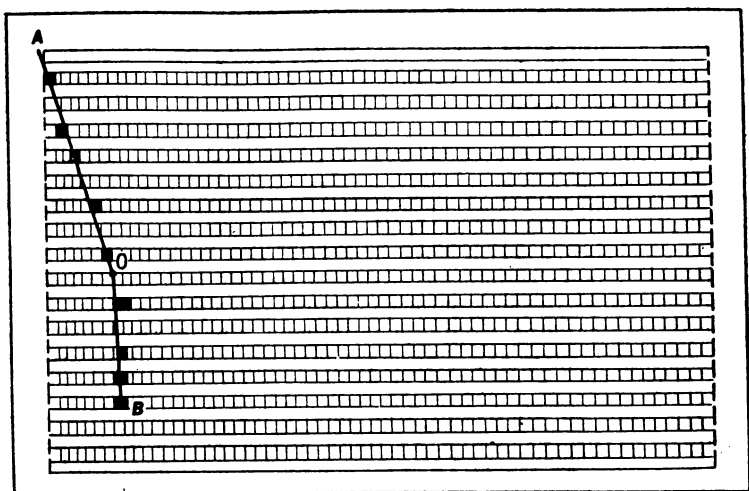


Рис. 48. Возможный случай распада протона, который наблюдался японо-индийской группой. Их детектор представлял собой ряд железных пластин, прослоенных счетчиками. В точке O , возможно, произошел распад протона. Черными квадратиками показаны сработавшие счетчики. Одна из заряженных частиц полетела по линии AO , другая — по линии OB . Однако этот случай вызывает сомнения потому, что трек AO не оканчивается в объеме детектора. Неясно, произошел ли он от распада протона или его оставила какая-нибудь частица, прилетевшая в детектор снаружи и вызвавшая взаимодействие в точке O

ходу этой книги должны появиться новые данные о времени жизни протона. Он либо будет найден, либо экспериментаторы получат еще более строгие ограничения на его время жизни.

Подведем итог. Мы видели, что современные теории не запрещают существование процессов, идущих с нарушением барионного заряда. Правда, экспериментально такие реакции еще не обнаружены, но в ближайшем будущем ситуация должна проясниться. Из теории также следует, что наиболее интенсивно подобные процессы должны происходить при сверхвысоких энергиях, порядка 10^{14} — 10^{15} ГэВ. В качестве нужной нам X -частицы, распады которой будут генерировать барионную асимметрию, можно выбрать лептокварки, переносящие взаимодействие между кварками и лептонами.

Теперь у нас почти все готово, чтобы дать ответ на основной вопрос этой главы: «Почему наш мир — это Мир?»

КАК СОЗДАТЬ МИР

В четвертой главе, когда мы обсуждали процессы в горячей Вселенной, у нас хватило смелости рассуждать лишь о временах порядка 10^{-6} секунды от начала расширения, что соответствовало температуре Вселенной в несколько гигаэлектронвольт. Теперь мы же перейдем к рассмотрению реакций, происходивших во времена 10^{-35} секунды от момента Большого Взрыва, когда температура Вселенной достигала фантастических значений: 10^{14} — 10^{15} ГэВ.

На рис. 49 показано, как ведут себя константы различных взаимодействий по мере возрастания температуры Вселенной. На горизонтальной шкале наверху графика отложены моменты времени, в которые достигалась соответствующая температура Вселенной, указанная на нижней горизонтальной оси. Видно, что при низких температурах сильное взаимодействие примерно в 100 раз превосходит электромагнитное, а константа слабого взаимодействия приблизительно в 10^{-12} раз меньше электромагнитной.

Начнем теперь двигаться в область высоких температур. С ростом энергии константа слабого взаимодействия растет и при $T \sim 10^{15}$ К сравнивается по величине с константой электромагнитных сил. Это происходит в районе энергий порядка сотен гигаэлектронвольт, когда с начала расширения Вселенной прошло 10^{-7} — 10^{-8} секунды. Наступает первое, «малое» объединение — процессы слабого и электромагнитного взаимодействия идут с одинаковой вероятностью.

Последуем дальше. Когда температура Вселенной превысит 10^{21} К, на нашем графике появляется новая линия, соответствующая лептокварковому взаимодействию. Процессы с нарушением барионного числа начинают играть все большую и большую роль, пока, наконец, в районе температур 10^{27} — 10^{28} К величины констант всех взаимодействий, кроме гравитационного, не станут одинаковыми. Это царство теории великого объединения. Именно в этот момент, который отделен от начала расширения промежутком в 10^{-35} — 10^{-36} секунды, и будут происходить основные события нашего рассказа.

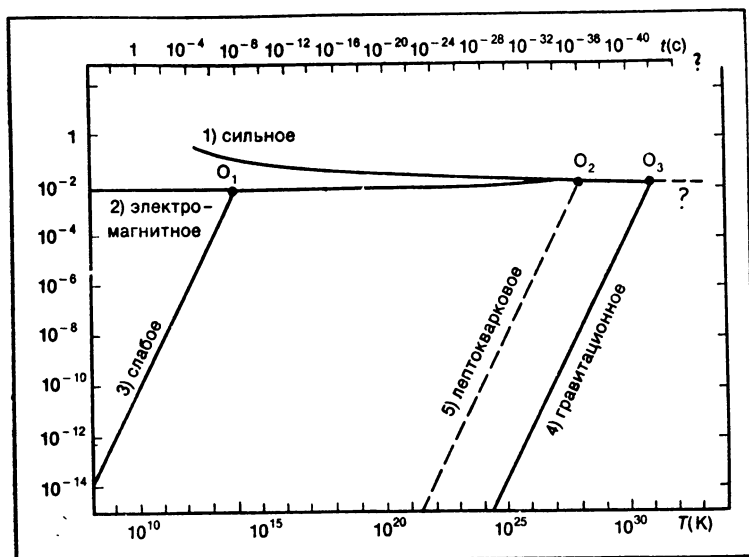


Рис. 49. Поведение констант различных взаимодействий в зависимости от температуры Вселенной. На верхней горизонтальной шкале отложено время от момента Большого Взрыва

Во Вселенной тогда присутствовали только фотоны, лептоны, кварки, глюоны, W -бозоны, лептокварки и еще некоторые сверхтяжелые частицы, предсказываемые теориями великого объединения. Все они находились в состоянии теплового равновесия. Наблюдаемая сегодня часть Вселенной — Метагалактика — была сжата до размеров 3,66 сантиметра!

Предположим теперь, что вначале у нас имелась равная смесь из лептокварков и их античастиц. (В действительности, как мы покажем чуть позже, в этом предположении нет нужды. X -частиц могло быть и меньше, чем \bar{X} -частиц.) Напишем возможные каналы распада X -частицы. Аналогичные схемы распадов мы уже несколько раз приводили. Но то были всего лишь некоторые примеры, далекие от действительности. Сейчас же мы рассмотрим более или менее реальный случай.

Напомним, что барионный заряд кварка $1/3$, для лептокварка $B=0$. Электрический же заряд у одних квар-

ков может быть $2/3$, а у других $1/3$. Электрический заряд лептокварка $4/3$.

Возможны такие каналы распада лептокварка:

$$\begin{array}{lcl} X \rightarrow q + q & & \text{с вероятностью } A, \\ B = 0 & 1/3 & 1/3 \\ Q = 4/3 & 2/3 & 2/3 \\ X \rightarrow \bar{q} + \bar{l} & & \text{с вероятностью } (1-A). \\ B = 0 & -1/3 & 0 \\ Q = 4/3 & +1/3 & +1 \end{array}$$

Здесь q обозначает кварк, а l — лептон. Видно, что оба распада нарушают закон сохранения барионного числа.

Соответствующие распады для \bar{X} таковы:

$$\begin{array}{lcl} \bar{X} \rightarrow \bar{q} + \bar{q} & & \text{с вероятностью } C, \\ B = 0 & -1/3 & -1/3 \\ Q = -4/3 & -2/3 & -2/3 \\ \bar{X} \rightarrow \bar{q} + l & & \text{с вероятностью } (1-C). \\ B = 0 & -1/3 & 0 \\ Q = -4/3 & -1/3 & -1 \end{array}$$

Если C - и CP -инвариантности нарушаются, то, как мы неоднократно обсуждали, вероятности A и C могут быть разными. Тогда можно легко посчитать, что избыток барионного числа, который образуется при распаде пары X — \bar{X} -частиц, будет равен $A-C$. Если $A > C$, это означает, что в таких процессах будет появляться больше кварков, чем антикварков.

Казалось бы, все прекрасно. Однако мы забыли, что распады лептокварков происходят в горячей Вселенной, где вещество находится в состоянии теплового равновесия. А это значит, что у нас будут идти не только те реакции, которые перечислены выше, но и обратные им: $q + q \rightarrow X$; $\bar{q} + \bar{l} \rightarrow X$ и т. д.

Кроме того, возможны такие переходы: $q + \bar{l} \rightarrow \bar{q} + l$.

Именно эти, последние, процессы приводят к тому, что избыток барионного заряда, образующийся при распадах X -частиц, будет эффективно ликвидироваться. Ведь чем больше будет образовываться кварков, тем охотнее они будут при столкновении с лептонами перехо-

дить в антикварки. Можно строго показать, что в равновесной первичной плазме никакой генерации барионов не происходит! Даже если C - и CP -четность нарушается и возможны процессы с несохранением барионного заряда.

Единственное спасение — нарушить равновесную ситуацию, подавить реакции, восстанавливающие барионную симметрию. И это действительно происходит только в расширяющейся Вселенной. Ведь со временем ее температура падает. Когда она становится порядка массы лептокварка, X -частицы выходят из равновесия с излучением и начинают преимущественно распадаться, создавая избыток барионов. Скорость ликвидации этого избытка по мере падения температуры быстро снижается, и концентрация «лишних» кварков как бы замораживается. Уже при временах $t > 10^{-33}$ секунды в первичной плазме не остается X -частиц, и процесс бариосинтеза заканчивается. Избыток же кварков выживает до низких температур, затем из кварков образуются нуклоны и антинуклоны, причем нуклонов оказывается чуть больше. После интенсивной аннигиляции нуклон-антинуклонных пар, которая заканчивается ко времени $t \sim 10^{-8}$ секунды, остаются лишь избыточные нуклоны, образующие затем весь окружающий нас мир.

Интересно, что в сценарии появления избытка барионов, который мы только что набросали, не имеет никакого значения, было ли в самом начале во Вселенной одинаковое количество вещества и антивещества или нет. Мы исходили из того, что вначале X -частиц и \bar{X} -частиц было поровну. Но даже если бы во Вселенной сначала было больше антибарионов, чем барионов, то наш механизм сначала компенсирует этот избыток, а затем уже начнет генерировать положительный барионный заряд.

Таким образом, рецепт, как получить Мир, состоит в следующем:

- а) возьмем очень горячую Вселенную,
- б) нарушим C - и CP -инвариантности,
- в) нарушим закон сохранения барионного заряда,
- г) нарушим тепловое равновесие.

Параметры распадов X -частиц можно подобрать так, чтобы в конце концов получилось наблюдаемое отношение числа барионов к числу фотонов:

$$\frac{\text{число барионов}}{\text{число фотонов}} = 10^{-8} - 10^{-9}.$$

Что касается антибарионов, то про них в таком подходе можно забыть! Ведь как мы говорили в четвертой главе, при наличии избытка барионов число реликтовых антибарионов, выживающих после аннигиляции, пренебрежимо мало:

$$\frac{\text{число антибарионов}}{\text{число фотонов}} = 10^{-87}.$$

КАК СОЗДАТЬ АНТИМИР

Не удивляйтесь, дорогой читатель, было бы наивно думать, что теоретики так легко откажутся от идеи Антимира и не найдут лазейку, через которую можно протащить его существование. На этот раз они просто взяли сценарий «Как создать Мир», который мы только что обсудили, и, лишь немного видоизменив его, показали, что в рамках той же самой схемы можно с таким же успехом создавать и Антимир!

Действительно, ключевым предположением, которое позволяет генерировать в распадах X -частиц именно барионный избыток, является то, что CP -симметрия должна нарушаться только вполне определенным образом: вероятность распада $X \rightarrow qq$, которую мы обозначали через A , должна быть обязательно больше, чем вероятность S распада $\bar{X} \rightarrow \bar{q}\bar{q}$. Ведь избыток барионного заряда, который получается при распаде одной пары $X - \bar{X}$, равен $A - S$. Если $A > S$, то у нас будет образовываться больше кварков, если, наоборот, $S > A$, то преимущественно будут возникать антикварки.

Как на самом деле происходит распад лептокварков, по вполне понятным причинам никто не изучал. Поэтому неизвестно, каково должно быть соотношение между вероятностями разных распадов. Более того, причины нарушения CP -инвариантности не очень хорошо поняты, и из теоретических соображений трудно определить, в какую «сторону» должно происходить нарушение CP .

Ясно одно: если бы в результате распадов лептокварков накапливался избыток антибарионов, то буквальное повторение сценария «Как создать Мир» привело бы к тому, что уже сегодня в нашем мире практически не осталось бы никаких барионов и все вещество во Вселенной было бы построено только из антибарионов. Несомненно, такая крайность не устраивает сторонников

Антимира, тела которых состоят все-таки из барионов. Они начинают утверждать следующее.

Откуда известно, что абсолютно все процессы должны протекать во Вселенной одинаковым образом? Ведь за какое-то время t свет может пройти лишь вполне определенное расстояние R . Так как никакое взаимодействие не может передаваться быстрее скорости света, то те области Вселенной, которые расположены «за горизонтом» R , никак не взаимодействовали с нашим миром. В эпоху бариосинтеза, то есть во времена $t \sim 10^{-35}$ секунды, размеры «горизонта» были исключительно малы и в Метагалактике существовало много причинно-несвязанных областей, которые совершенно не взаимодействовали друг с другом.

Предположим далее, что вначале физические законы во Вселенной были инвариантны относительно CP -преобразования. Однако затем произошло нарушение CP , причем в разных причинно-несвязанных областях оно происходило по-разному. Если говорить в терминах распадов лептокварков, то в одной части Вселенной вероятность A могла стать больше C , а в другой — C больше A . В результате в одной области Вселенной образовался избыток барионов, а в другой — антибарионов. По мере расширения Вселенной эти области увеличивались, вступали в контакт друг с другом, начиналась аннигиляция, создавалась пленка Лейденфроста. И вообще: смотрите в третьей главе рис. 33, там изображена кривая расчета гамма-фона, которая прекрасно соответствует экспериментальным данным!

Как можно прокомментировать такой монолог адептов Антимира? Основной момент в их аргументации — это то, что нарушение CP может происходить по-разному в причинно-несвязанных областях Вселенной. Такая ситуация возможна. Важно, однако, подчеркнуть, что слово «по-разному» имеет оттенок некоторого произвола. Невольно складывается впечатление, что в областях, разделенных световым горизонтом, может вообще происходить все, что угодно. Почему бы тогда и антибарионам не появляться?

На самом деле доводы сторонников Антимира гораздо тоньше. Утверждая, что нарушение CP идет по-разному в невзаимодействующих друг с другом частях Вселенной, они понимают под этим так называемое спонтанное нарушение CP -симметрии.

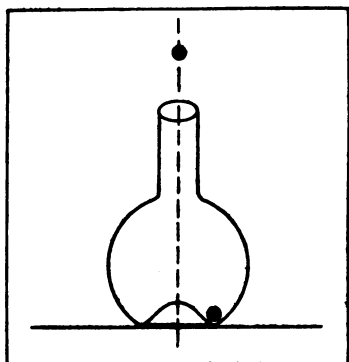


Рис. 50. Шарик в бутылке с выпуклым дном

Идея спонтанного нарушения симметрии необычайно красива и широко используется в современных теориях элементарных частиц. Мы поясним ее на примере, ставшем уже классическим.

Рассмотрим бросание шарика в бутылку с выпуклым дном (рис. 50). Даже если вы бросаете шарик строго по оси симметрии и дно бутылки тоже идеально симметрично относительно этой оси, все равно шарик скатывается куда-нибудь в уголок. То есть хотя уравнения движения шарика и начальные условия симметричны, тем не менее конечное состояние такой симметрией не обладает. Причина, по которой шарик все время попадает к стенкам бутылки, а не остается в центре, совершенно очевидна. Если положить шарик на дно бутылки, в самый центр, то его потенциальная энергия в этой точке будет наибольшей, а устойчивость — наименьшей. Малейший толчок — и шарик охотно займет наиболее устойчивое положение с минимальной потенциальной энергией у стенок бутылки. Тем самым имевшаяся до этого симметрия спонтанно нарушается. Важно, что хотя каждое конечное состояние шарика, естественно, несимметрично относительно оси бутылки, тем не менее совокупность всех возможных состояний шарика такой симметрией обладает.

Мы подробно говорим о столь простых вещах только потому, что пример с шариком помогает понять, как физики решили нетривиальную проблему описания процессов, в которых нарушается симметрия. В таких случаях всегда возникает вопрос: что делать? Видоизменять ли

сами уравнения движения, добавляя в них члены, нарушающие симметрию, или, может быть, лучше предположить, что сама арена, на которой разворачиваются все физические явления,— вакуум, является несколько «кособокой»? И тот и другой пути не кажутся особенно привлекательными. Мы уже говорили, как много симметрий нарушается в микромире, и если описывать их нарушение прямо, «в лоб», то соответствующие уравнения выглядели бы совершенно ужасно и вряд ли поддавались бы анализу.

Идея спонтанного нарушения симметрии позволяет спасти и красивые симметричные уравнения, и симметричность вакуума. Однако она предполагает, что физический вакуум должен иметь довольно сложную структуру, заставляющую вспомнить дно бутылки.

Вакуум, по определению,— это состояние системы с наименьшей энергией. Механизм спонтанного нарушения предполагает, что у системы имеется несколько таких состояний. При преобразовании симметрии они переходят друг в друга, и вся в целом совокупность этих состояний симметрична относительно соответствующего преобразования. Однако само по себе каждое из этих состояний напоминает положение шарика у стенки бутылки: оно несимметрично и обладает наименьшей потенциальной энергией. Кроме того, у вакуума должно быть еще симметричное состояние с наибольшей потенциальной энергией — аналог центра бутылочного дна. Такое состояние будет наиболее неустойчивым, и система, находящаяся в нем, будет стремиться перейти в одно из устойчивых, но несимметричных вакуумных состояний. В какое именно состояние оно попадет — решает случай.

Если считать, что нарушение CP происходит именно спонтанным образом, то красота этого предположения в том, что хотя в разных частях Вселенной оно действительно может происходить по-разному, но особого произвола в этом нет. Физические процессы в причинно-несвязанных областях будут подчиняться одинаковым законам, вакуум тоже будет в известном смысле един, но вот дальнейшая судьба таких областей станет разной. В одних будут накапливаться барионы, в других — антибарионы. Последующую динамику развития этих областей довольно трудно рассчитать. Требуется известный оптимизм, чтобы предположить, что они доживают до нашего

времени, разрастаясь до огромных размеров скоплений галактик.

Подведем итог. В принципе возможно составить рецепт «Как создать Антимир». Для этого необходимо:

- 1) взять горячую Вселенную,
- 2) в которой *СР*-симметрия нарушается спонтанным образом,
- 3) нарушить закон сохранения барионного заряда,
- 4) нарушить тепловое равновесие,
- 5) придумать механизм выживания и увеличения областей антивещества до размеров скоплений галактик.

Видно, что схема получения Антимира гораздо сложнее, чем сценарий образования Мира. Некоторые ее моменты еще не до конца разработаны, и вообще она пока выглядит не очень привлекательно. Как бы то ни было, принципиальная возможность создать Антимир все же существует.

АНТИВЕЩЕСТВО ВО ВСЕЛЕННОЙ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Итак, разделаться с Антимиром в теоретическом плане оказалось не так-то просто. Однако «борьба» с ним плодотворна и привела к ряду интересных результатов. Для объяснения барионной асимметрии Вселенной пришлось разработать теорию процессов, протекающих в фантастически малые промежутки с начала Большого Взрыва. Если распад протона будет обнаружен, а гамма-астрономия получит еще более строгие ограничения на количество антивещества во Вселенной, то само существование нашего Мира может считаться подтверждением основных постулатов теории великого объединения, результатов уникального эксперимента, выполненного самой Природой.

В последнее время появились новые предположения о возможных источниках антивещества во Вселенной. Прежде всего к ним относятся так называемые первичные черные дыры. Сама по себе черная дыра, по современным представлениям, — это вполне закономерный продукт конечной стадии эволюции массивных звезд. Когда у звезды исчерпываются запасы термоядерного «горючего», давление ее теплового излучения уже не в состоянии противостоять мощным гравитационным силам, стремящимся сжать звезду. Этот процесс сжатия, звездный

коллапс, может происходить по-разному, и конечный его результат зависит от того, насколько была велика масса звезды. Если она превышала массу Солнца приблизительно в три раза и если в процессе коллапса стареющая звезда не смогла выбросить в пространство достаточное количество вещества, то никакие силы в природе уже не могут остановить ее гравитационное сжатие. По мере коллапса напряженность гравитационного поля вокруг звезды становится все больше и больше, до тех пор пока не достигнет такой величины, что даже свет, испущенный с поверхности умирающей звезды, не сможет преодолеть ее колоссальное гравитационное притяжение.

Но раз так, то, казалось бы, черные дыры не должны испускать совершенно никакого излучения, а лишь захватывать все вещество, попадающее в сферу их гравитационного притяжения. Однако в 1975 году выдающийся английский астрофизик С. Хоукинг сделал удивительное открытие. Он доказал, что черные дыры могут излучать! Дело в том, что гравитационное поле черной дыры настолько велико, что способно рождать пары частица — античастица. Если бы эти частицы подчинялись законам классической физики, то они никогда не смогли бы преодолеть гравитационного притяжения черной дыры, которое представляет собой своеобразный потенциальный барьер. Но законы квантовой механики позволяют микрочастицам проникать сквозь потенциальный барьер. Это явление хорошо изучено в ядерной физике и называется туннельным эффектом. Конечно, квантовая частица может благодаря туннельному эффекту «просочиться» через потенциальный барьер только с некоторой вероятностью. Если барьер достаточно «толст», эта вероятность будет маленькой, но все-таки отличной от нуля. Таким образом, за счет квантовых эффектов черные дыры начинают излучать. Оказывается, спектр их излучения совпадает с хорошо известным нам спектром излучения черного тела. Расчеты показывают, что температура массивных черных дыр, образующихся в результате эволюции звезд, исключительно мала, порядка 10^{-7} К.

Для нашего рассказа особый интерес представляет так называемые первичные черные дыры, которые были впервые рассмотрены советскими астрофизиками Я. Б. Зельдовичем и И. Д. Новиковым. Первичные черные дыры — это черные дыры с малой массой. В отличие от обычных черных дыр они не могли образоваться

за счет эволюции звезд. Однако в ранней Вселенной, когда плотность вещества была очень велика, большие флуктуации плотности могли в принципе усиливаться и перерасти в черную дыру. Чем меньше масса черной дыры, тем меньше область, в которой ее гравитационное поле достаточно сильно. Поэтому ширина потенциального барьера у первичных черных дыр довольно мала и частицы могут проникать сквозь него с большей вероятностью, чем у обычных черных дыр. Это приводит к тому, что черная дыра малой массы интенсивно излучает. Температура ее излучения обратно пропорциональна массе дыры:

$$T = 10^{13} \text{ ГэВ}/M,$$

где M — масса черной дыры в граммах. Видно, что черные дыры с массой $M \sim 10^{13}$ граммов испускают излучение с температурой порядка 1 ГэВ. В спектре такого излучения уже могут присутствовать и протон-антипротонные пары. Следовательно, в результате излучения первичных черных дыр во Вселенной может появиться какое-то количество антивещества.

Однако в результате интенсивного излучения масса черной дыры уменьшается, и в конце концов она полностью испаряется. Причем процесс испарения идет с нарастающей скоростью, черная дыра перед своей кончиной испускает все более и более энергичные частицы, и температура ее излучения может достигать колоссальных величин. Полное же количество энергии, выделяемое черной дырой за последнюю секунду испарения, эквивалентно взрыву водородной бомбы мощностью миллион мегатонн!

Время, за которое испарится первичная черная дыра с массой 10^{13} граммов, испускающая протоны и антипротоны, равно 10^{12} секунд. То есть если считать, что первичные черные дыры образуются только в ранней Вселенной, то приблизительно через 10^{12} — 10^{13} секунд после начала расширения такие дыры должны исчезнуть. Итак, предсказывается появление нового источника антивещества, действующего в течение первых 30—300 тысяч лет.

До сих пор мы обсуждали с вами проблемы существования Антимира либо в наше время, либо в очень ранней Вселенной. Теперь же давайте посмотрим, какова судьба антивещества, возникающего в результате испарения первичных черных дыр в течение первых 30—300 тысяч лет с момента Большого Взрыва.

Сразу надо сказать, что антивещество, образовавшееся в этот период, по всей видимости, уже полностью проаннигилировало и с помощью первичных черных дыр нам не удастся создать Антимир в полном смысле этого слова. Количество античастиц, испускаемых первичными черными дырами, не столь велико, чтобы стать строительным материалом для образования скоплений антигалактик. Однако ответ на вопрос, сколько антивещества было во Вселенной в то время, очень важен как для астрофизики, так и для современных моделей элементарных частиц. Во-первых, тогда можно было бы оценить, сколько первичных черных дыр существовало в ту эпоху, а во-вторых, как показали советские теоретики М. Ю. Хлопов и А. Г. Полнарев, количество первичных черных дыр тесно связано со свойствами новых элементарных частиц, предсказываемых в рамках теорий великого объединения.

Что же представляла собой Вселенная в этот период? В четвертой главе мы говорили, что после первых 30 минут от начала расширения вещество во Вселенной состояло из нейтрино, электронов, протонов и ядер легких элементов. Причем в течение 300 тысяч лет Вселенная была непрозрачна для фотонов, которые эффективно взаимодействовали с веществом и находились с ним в тепловом равновесии. Так что, изучая реликтовое фоновое излучение, мы как бы видим снимок Вселенной, какой она выглядела после 300 тысяч лет. И лишь по некоторым «морщинам» на ее «лице» можно как-то догадываться, что ей пришлось пережить к этому моменту.

Аннигиляция антивещества в то время, когда Вселенная была непрозрачна для излучения, практически не искажает спектра реликтового излучения. Гамма-кванты от аннигиляции быстро термализуются, теряют свою энергию и становятся неотличимыми от «обычных» фотонов*. Поэтому из данных по спектру реликтовых фотонов можно лишь заключить, что антибарионов в эпоху теплового равновесия было не больше, чем барионов, и только.

* Лишь аннигиляция очень больших количеств антивещества в момент, непосредственно предшествующий окончанию стадии теплового равновесия во Вселенной, могла бы приводить к искажению спектра реликтового излучения. Однако таких искажений мы не видим. Реликтовое излучение с очень высокой точностью однородно.

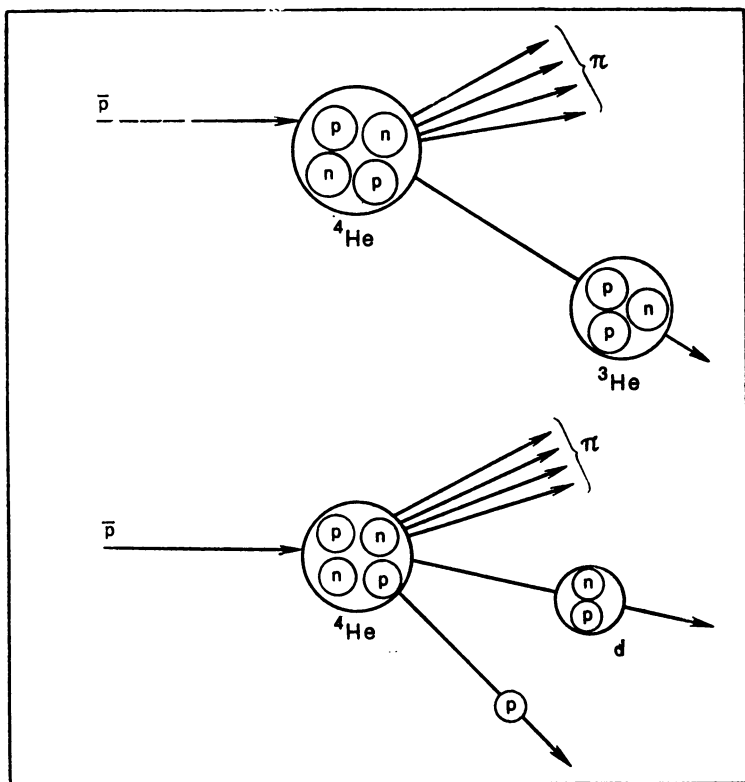


Рис. 51. Аннигиляция антипротонов с ${}^4\text{He}$. В результате такой реакции должно образовываться несколько π -мезонов и три нуклона, которые могут быть либо объединены в ядро ${}^3\text{He}$ (а), либо в ядро дейтерия плюс самостоятельно двигающийся протон (б), либо все три нуклона могут разлетаться независимо друг от друга

Но, оказывается, все-таки можно получить более существенные ограничения на количество антивещества в этот период. Интересно, что для этого требуется не только проведение наблюдений на радиотелескопах, но и выполнение эксперимента на ускорителе. Сама идея принадлежит выдающемуся советскому физiku Я. Б. Зельдовичу. Как мы помним из обсуждения в главе 4, после окончания нуклеосинтеза во Вселенной оказывается довольно много гелия-4 — около 25 процентов. Ядер же

других легких элементов — дейтерия и гелия-3 — во Вселенной значительно меньше, их концентрации приблизительно в 10^{-4} раза ниже концентрации гелия-4.

Предположим теперь, что у нас в это время начинает «работать» источник антивещества. Тогда антипротоны, которые он испускает, могут взаимодействовать не только с протонами, но и с гелием-4. В процессе такой аннигиляции ядро гелия разваливается, и среди его осколков могут быть и ядра дейтерия и ядра гелия-3. Из-за того что концентрация гелия-4 очень большая, а других элементов очень мало, достаточно лишь небольшой (порядка 10^{-4}) доле гелия-4 проаннигилировать, чтобы создать весь наблюдаемый сегодня дейтерий или гелий-3.

Количество дейтерия $Y_d^{\text{анн}}$, образующегося при аннигиляции, зависит от

доли антивещества в ранней Вселенной — R ,

концентрации гелия-4 — n ,

вероятности появления дейтерия при аннигиляции антипротонов и гелия-4 — f_d :

$$Y_d^{\text{анн}} = n f_d R.$$

Величина n , то есть концентрация гелия-4, нам известна из астрономических наблюдений, величину f_d можно измерить в лабораторных опытах. Тогда, если предположить, что при аннигиляции не должно образоваться дейтерия больше, чем его мы видим во Вселенной сейчас $Y_d^{\text{анн}} \leq Y_d^{\text{набл}}$, можно оценить долю антивещества — R .

В настоящее время группа ученых из Объединенного института ядерных исследований в Дубне под руководством С. А. Бунятова и И. В. Фаломкина совместно с итальянскими физиками из Турина подготавливает эксперимент по измерению вероятности образования дейтерия и гелия-3 при аннигиляции антипротонов и гелия-4. В распоряжении астрофизиков появится важная экспериментальная информация, которая поможет наложить ограничения на возможное количество антивещества в ранней Вселенной.

В ближайшие годы должны быть получены новые данные в области гамма-астрономии. Существенный прогресс в изучении фонового внегалактического гамма-излучения ожидается в связи с ведущимися в Советском Союзе работами по созданию нового мощного гамма-телескопа. Планируется вывести на орбиту космический ко-

рабль с более чем двумя тоннами научного оборудования, предназначенного для исследований гамма-лучей в широком диапазоне энергий. Эту орбитальную космическую обсерваторию проектирует группа специалистов из Института космических исследований АН СССР и Московского инженерно-физического института с участием французских специалистов из лабораторий в Сакле и Тулузе. Проект большой гамма-обсерватории разрабатывается американскими учеными. Нет сомнений, что результаты, которые будут получены в этих исследованиях, окажутся весьма важными для окончательного решения вопроса: существует Антимир или нет.

— Ну вот! — скажет недовольный читатель. — Говорили, говорили, а в конце концов получилось, как в лекции из кинофильма «Карнавальная ночь»: есть ли жизнь на Марсе, нет ли жизни на Марсе — это науке пока неизвестно!

Мне не хотелось бы, чтобы у читателя сложилось впечатление, что наука совсем уж ничего не может сказать о проблеме Антимира. Напротив, в последнее время мнение научного сообщества все больше и больше склоняется к тому, что Антимира в настоящее время не существует. И действительно, в пользу этого говорят многие факты. Однако я старался изложить все доводы «за» и «против», чтобы читатель получил представление о том, на чем основано это общепризнанное мнение; что оно отнюдь не является истиной в последней инстанции. Поэтому, я думаю, уместно будет закончить наше обсуждение такими словами Дирака:

«Посвящая себя исследовательской работе, нужно стремиться сохранять свободу суждений и ни во что не следует слишком сильно верить; всегда надо быть готовым к тому, что убеждения, которых придерживался в течение долгого времени, могут оказаться ошибочными».

ЧТО МОЖНО ПРОЧИТАТЬ ЕЩЕ

ГЛАВА 1

1. 50 лет современной ядерной физике. Сб. статей. Под ред. Б. М. Кедрова. М., Энергоатомиздат, 1982.
2. Данин Д. Вероятностный мир. М., Знание, 1981.
3. Дирак П. А. Пути физики. М., Энергоатомиздат, 1983.

ГЛАВА 2

1. Власов Н. А. Антивещество. М., Атомиздат, 1960.
2. Прилуцкий О. Ф., Розенталь И. Л. Антивещество во Вселенной.— Природа, 1976, № 4.

ГЛАВА 3

1. Шкловский И. С. Проблемы современной астрофизики. М., Наука, 1982.
2. Долгошеин Б. А. Звук от нейтрино.— Природа, 1978, № 8.
3. Проблемы современной физики. Сб. памяти академика Б. П. Константинова. Л., Наука, 1974.

ГЛАВА 4

1. Вайнберг С. Первые три минуты. М., Энергоиздат, 1981.
2. Новиков И. Д. Эволюция Вселенной. М., Наука, 1979.
3. Херрман Д. Открыватели неба. М., Мир, 1981.
4. Силк Дж. Большой Взрыв. М., Мир, 1983.

ГЛАВА 5

1. Долгов А. Д., Зельдович Я. Б. Вещество и антивещество во Вселенной.— Природа, 1982, № 8.
2. Кауфман У. Космические рубежи теории относительности. М., Мир, 1981.
3. Киржниц Д. А., Линде А. Д. Фазовые превращения в микромире и во Вселенной.— Природа, 1979, № 11.
4. Кириллов-Угрюмов В. Г., Сагдеев Р. З., Семенов Ю. П. Перспективы наблюдательной гамма-астрономии.— Земля и Вселенная, 1981, № 4.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Академик Б. М. Понтекоров. Предисловие. . .	3
От автора.	4
Глава 1. ПОЛЬ ДИРАК — ЧЕЛОВЕК, ОТКРЫВ- ШИЙ АНТИМИР	6
Глава 2. АНТИВЕЩЕСТВО И ЕГО СВОЙСТВА	61
Глава 3. ИЩЕМ АНТИМИР	87
Глава 4. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ И ПРОБЛЕМА АН- ТИВЕЩЕСТВА	116
Глава 5. ПОЧЕМУ НАШ МИР — ЭТО МИР? . .	137
Что можно прочитать еще	175

Михаил Григорьевич Сапожников

АНТИМИР — РЕАЛЬНОСТЬ?

Главный отраслевой редактор *В. П. Демьянов*

Редактор *Н. Ф. Яснопольский*

Мл. редактор *Н. А. Львова*

Оформление *А. А. Астрецов*

Худ. редактор *Т. С. Егорова*

Техн. редактор *С. А. Птицына*

Корректор *Н. Д. Мелешкина*

ИБ № 5748

Сдано в набор 28.03.83. Подписано к печати 25.10.83. А 05820.
Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 1. Гарнитура литера-
турная. Печать высокая. Усл. печ. л. 9,24. Усл. кр.-отт. 9,56.
Уч.-изд. л. 9,53. Тираж 100 000 экз. Заказ 3-195. Цена 30 коп.
Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд
Серова, д. 4. Индекс заказа 837730.

Киевская книжная фабрика. 252054, Киев, ул. Воровского, 24.



М. САПОЖНИКОВ

АНТИМИР- РЕАЛЬНОСТЬ?

Москва 1983

Издательство "Знание"

