

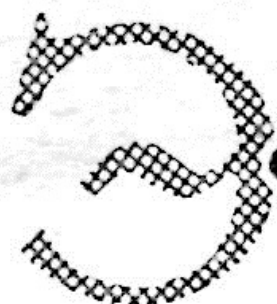
Ч. Янг

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ
ЧАСТИЦЫ

ГОСАТОМИЗДАТ - 1963

Ч. ЯНГ

Профессор Принстонского университета



ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ
НЕКОТОРЫХ ОТКРЫТИЙ
В АТОМНОЙ ФИЗИКЕ

Перевод с английского
А. М. МОИСЕЕВА



Государственное издательство литературы
по атомной науке и технике
Государственного комитета
по использованию атомной энергии СССР

МОСКВА 1963

УДК 539.12

ELEMENTARY PARTICLES

A short history
OF SOME DISCOVERIES
IN ATOMIC PHYSICS

Princeton, University Press
Princeton, New Jersey, 1961

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Книга известного физика-теоретика Ч. Янга «Элементарные частицы» посвящена истории развития одной из наиболее интересных отраслей современной физики, а именно физике микромира, физике частиц, которые считаются основными структурными единицами материи.

Не претендуя на полноту изложения, автор обрисовывает в исторической последовательности сложный процесс развития теоретических идей и блестящий прогресс экспериментальной физики за последние 60 лет, обусловивший современный высокий уровень понимания явлений микромира. Яркий фактический материал книги позволяет читателю как бы совершить экскурсию в мир физики, начиная со скромных лабораторий физиков начала этого века и кончая гигантскими современными физическими лабораториями, в которых вызываются искусственным путем и изучаются процессы взаимодействия между элементарными частицами.

Вместе с тем Янг довольно подробно останавливается на раскрытии физического смысла основных положений теории элементарных частиц, таких, как классификация типов взаимодействий, сохранение комбинированной четности и т. д.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, желающих получить общие сведения о физике элементарных частиц.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга представляет собой курс Вэнаксемских лекций, прочитанных мною в Принстонском университете в ноябре 1959 года.

Описывая идеи, воплотившиеся в открытии элементарных частиц, я пытался обрисовать общие контуры исследовательской работы за последние 60 лет, направленной на изучение строения материи. В общем случае, конечно, любая идея, особенно идея научная, не может быть осмыслена до конца, пока она не будет обрисована на фоне тех знаний, из которых она возникла и развивалась. Однако можно надеяться, что даже краткое описание с историческим уклоном, подобное предпринятому в этой книге, может дать определенное представление о настроениях и общей атмосфере, в которой физики приближались к пониманию проблем, связанных с элементарными частицами, даже если содержание этих проблем не может быть здесь рассмотрено соответствующим образом.

Список изданий, откуда позаимствованы иллюстрации, приведен в конце книги. Изображение всадников на рис. 36 сделано М. С. Эшером, которому я выражаю признательность за предоставленную возможность использовать этот рисунок.

Я также благодарен моей жене за обсуждение с ней доступности и ясности изложения материала рукописи. Ее замечания оказались очень ценными. Я приношу благодарность также Элизабет Горман за очень компетентную помощь, которую она оказала мне на всех стадиях подготовки книги к изданию. В заключение считаю приятным долгом поблагодарить Дж. Ф. Вильсона из «Принстон Университи Пресс» за подготовку иллюстраций, особенно рис. 33, который выполнен по его замыслу.

Ч. Янг



Г л а в а 1

На пороге нашего века в мире физики все яснее чувствовалась заря новой эры. К этому времени благодаря блестящим достижениям классической механики и теории электромагнетизма Фарадея—Максвелла было не только успешно завершено здание классической макроскопической физики, но уже повсюду ощущались новые веяния, появились новые факты, новые загадки, новые увлечения и предчувствия. Только недавно были открыты катодные лучи, фотоэлектричество, радиоактивность, эффект Зеемана, рентгеновские лучи и закон Ридберга для спектральных линий. Чем ознаменуется эта новая эра — в то время, конечно, было трудно предвидеть. Наряду с другими проблемами тогда много обсуждался вопрос о возможной атомарной структуре электричества. Но необходимо отметить, что, хотя концепция атомарной структуры материи привлекала человеческие умы с древних времен, она не могла еще быть предметом научных книг, так как без количественной экспериментальной проверки ни одно философское рассуждение нельзя принять за научную истину. Например, в 1897 году Кельвин, один из крупнейших физиков последней половины XIX века, писал еще, что идея «электричества как непрерывной однородной жидкости (а не имеющего атомарную структуру. — *Янг*) заслуживает тщательного рассмотрения» [1].

Такое рассмотрение стало, однако, уже ненужным, когда в том же году Дж. Томсон выполнил свой знаменитый эксперимент по определению отношения заряда к массе частиц катодного луча (e/m). Я не могу удержаться от искушения показать вам сначала фотографию прекрасного скульптурного бюста человека, который первым открыл дверь в физику элементарных частиц.

Прибор Томсона изображен на рис. 1. Рассмотрим его устройство по схеме на рис. 2. Катодные лучи из катода K пропускались через щели A и B , вырезающие узкий

пучок. Этот пучок затем проходил между пластинами *B* и *Г*, и его положение регистрировалось на экране со



Джозеф Джон Томсон.

шкалой, находящемся на правом конце трубки. Приложение к пластинам *B* и *Г* разности потенциалов вызывало отклонение пучка вверх или вниз. Направление отклонения показало, что заряд, переносимый пучком, был

отрицателен. Затем с помощью катушек (они хорошо видны на рис. 1) в пространстве между пластинами *B* и *Г* создавали магнитное поле, направленное перпендикулярно плоскости книги. Наблюдения показали, что маг-

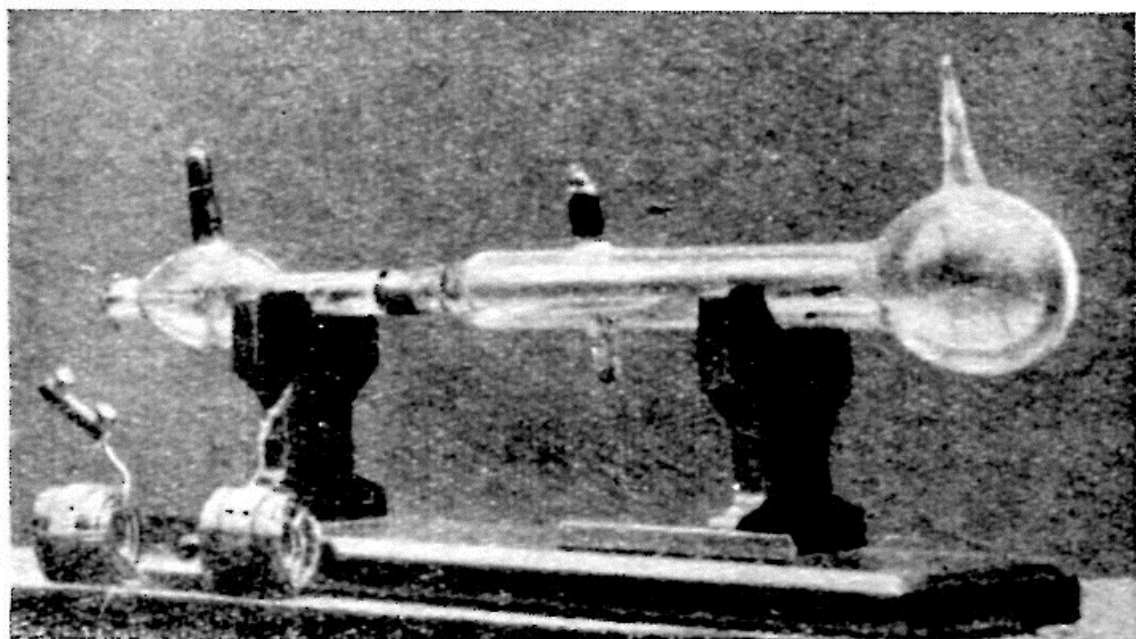


Рис. 1.

нитное поле также вызывало такое отклонение пучка вверх или вниз, которое находилось в согласии с заключением об отрицательном заряде катодных лучей. Взаимная компенсация отклонений, производимых электри-

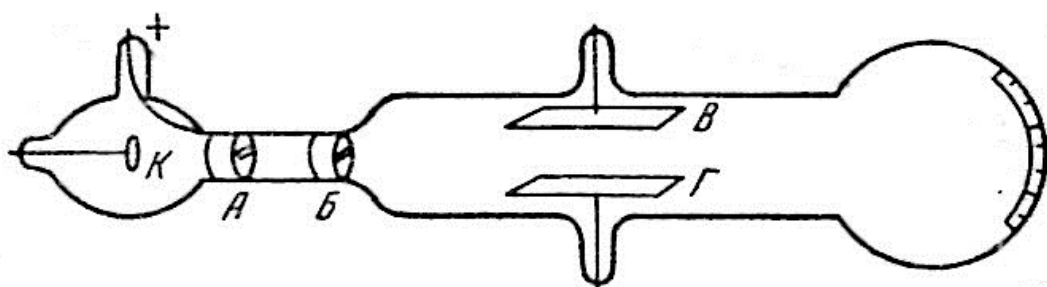


Рис. 2.

ческим и магнитным полями, позволила определить скорость пучка. Величина же отклонения, создаваемого каким-либо одним полем, дала возможность измерить e/m — отношение заряда к массе частиц, образующих пучок.

Можно спросить: почему этот эксперимент, который теперь кажется таким простым, не был в свое время оче-

видным? Ответ нам дал сам Томсон, когда он после завершения своего эксперимента писал [2]:

«При моей первой попытке отклонить пучок катодных лучей я пропускал пучок между двумя параллельными металлическими пластинами, укрепленными внутри разрядной трубки, и создавал в этой области электрическое поле. Устойчивое отклонение пучка получить таким образом не удалось».

Затем он указал на предполагаемую причину затруднений и добавил:

«Отсутствие отклонения с этой точки зрения обусловлено наличием газа — остаточное давление было слишком велико, так что основной задачей было получение более высокого вакуума. Однако это было легче сказать, чем сделать. Техника получения высокого вакуума в те дни находилась еще в начальной стадии».

Действительно, не кто иной, как Г. Герц, который открыл электромагнитные волны, пытался еще ранее провести этот же самый опыт и пришел к ошибочному заключению, что катодные лучи не имеют заряда. Этот случай наиболее ярко иллюстрирует очевидный факт, что прогресс в технике идет рука об руку с достижениями экспериментальных наук. Мы и дальше будем сталкиваться с примерами, подтверждающими эту истину.

Величина e/m , полученная Томсоном для катодных лучей, была много больше соответствующих величин для ионов в электролизе, больше в несколько тысяч раз. Томсон пришел к заключению, что катодные лучи состоят из отрицательно заряженных частиц с массой, много меньшей массы ионов; он назвал их корпускулами, а их заряд, который является основной структурной единицей электрических зарядов, электросном. В дальнейшем, однако, электронами стали называть сами частицы. Таково было «рождение» первой элементарной частицы, открытой человеком.

В других экспериментах, проведенных в те же годы, Томсон и его ученики определили приблизительную величину заряда $+e$, переносимого ионами. Затем Томсон рассмотрел фундаментальный вопрос структуры атомов и предложил следующую картину. Z электронов, каждый из которых обладает зарядом $-e$, размещены в положениях равновесия в непрерывно распределенном по

некоторой области положительном электрическом заряде Ze , образуя таким образом электрически нейтральный атом. Масса атома в основном сосредоточена в «облаке» положительного заряда. При возмущениях электроны, которые обладают малой массой и легко смещаются, осциллируют вокруг своих равновесных положений и поэтому испускают излучение. На рис. 3 показано схематическое изображение трех электронов, приведенное Томсоном в его Силлимэнских лекциях (Йел, 1903 год). Приняв распределение положительных зарядов однородным и сферическим, Томсон рассчитал частоты осцилляций электронов и приравнял их к полученным в эксперименте частотам оптических спектров. Таким образом он пришел к замечательно точному заключению, что атомы имеют радиус порядка 10^{-8} см.

Следующий значительный успех был достигнут в 1911 году при изучении Резерфордом прохождения α -частиц через тонкую фольгу. Альфа-частицы были открыты в составе естественного радиоактивного излучения, и к 1911 году было

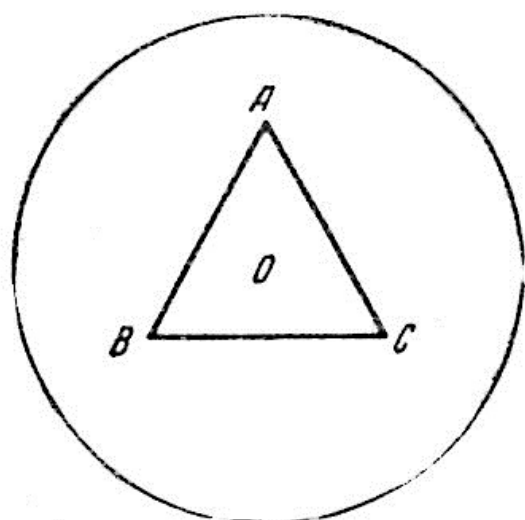


Рис. 3

точно установлено, что они несут заряд $+2e$ и что их масса в четыре раза больше массы атома водорода.

Еще раньше Томсон указал, что путь α -частицы через атом, построенный по его модели, должен быть в основном прямой линией по следующим причинам:

- а) α -частицу не может отклонить с ее пути электрон, потому что ее масса много больше массы электрона;
- б) влияние положительного заряда атома на α -частицу также должно быть слабо ввиду его рассредоточенности. Поэтому томсоновский атом не может отклонить α -частицу на большой угол [3].

Резерфорд пришел к выводу, что любой большой угол отклонения α -частицы, прошедшей через тонкую фольгу, которая, естественно, содержит много атомов, должен был бы быть статистической флуктуацией, обусловленной многими отдельными малыми отклонениями в одном направлении. Как обычно, при таких флуктуациях а) ве-

роятность отклонения следует гауссовскому распределению и б) корень квадратный из среднего квадратичного угла отклонения пропорционален корню квадратному от числа столкновений или от толщины фольги.

Резерфорд указал, что ни одно из этих заключений не согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Поэтому он предположил, что положительные заряды в атомах сконцентрированы в очень малой области. Действительно, экспериментальные данные позволяли сделать вывод, что диаметр этой области должен быть меньше 10^{-12} см. Этот вывод послужил основой знаменитой резерфордовской модели структуры атома как состоящего из малого ядра с электрическим зарядом $+Ze$ и Z вращающихся вокруг него электронов, которая год спустя была блестяще подтверждена экспериментально в работе его учеников Гейгера и Марсдена.

Открытие Резерфорда произвело на физиков и химиков тех дней поистине электризующее воздействие. Томсон был в это время в Кэвендишской лаборатории в Кембридже, а Резерфорд был в Манчестере. Позднее, в 1930 году, Нильс Бор так описал это время в своей Фарадеевской лекции [4]:

«Для каждого, кто, подобно мне, имел счастье бывать в физических лабораториях Кембриджа и Манчестера лет двадцать тому назад и работать под вдохновляющим влиянием идей их великих руководителей, незабываемо ощущение быть свидетелем почти ежедневных открытий доселе неизвестных свойств материи. Я помню, словно это было вчера, энтузиазм, с которым ученики Резерфорда обсуждали весной 1912 года новые перспективы развития физики и химии в целом, возникшие после открытия атомных ядер. Помимо всего, мы понимали, что локализация положительного электрического заряда в практически бесконечно малой области позволяет сильно упростить классификацию свойств материи. Действительно, появилась далеко идущая возможность разграничить свойства атомов, целиком определяемые полным зарядом и массой ядра, и свойства, непосредственно зависящие от его внутреннего строения. Радиоактивность, которая, согласно всем опытам, не зависит от физических и химических условий, является типичным примером свойств последнего рода. С другой стороны, обычные физические и химические свойства материи за-

висят, в первую очередь, от полного электрического заряда и массы атомов, а также от конфигурации электронной оболочки вокруг ядра, которая определяет реакцию атома на внешние воздействия. Более того, можно предположить, что в изолированном атоме конфигурация электронной оболочки должна зависеть почти полностью от заряда ядра и очень незначительно от его массы, которая так велика по сравнению с массой электрона, что движением ядра в первом приближении можно пренебречь. Эти простые выводы из предложенной модели атома действительно сразу объясняли, например, подобие свойств двух элементов, обладающих различным атомным весом и совершенно разными свойствами радиоактивности, подобие настолько полное, что их нельзя даже разделить химическими методами».

Дальше в той же самой лекции Бор сказал:

«Характеризуя ситуацию в целом, можно сказать, что в вопросе о согласовании всех обычных свойств материи модель Резерфорда поставила перед нами задачу, напоминающую древнюю мечту философов: свести интерпретацию законов природы к рассмотрению простых чисел».

В этой-то атмосфере, полной энтузиазма, вызванного новыми открытиями, и ожидания скорого рождения открытий еще более общих и фундаментальных, Нильс Бор предложил свою знаменитую теорию атома водорода.

Работы Резерфорда и Бора дали картину элементарных частиц, показанную на рис. 4. По горизонтальной оси отложен электрический заряд, а по вертикальной, схематически, не в масштабе, — масса частиц.

Протон p является ядром атома водорода, а фотон, обозначенный γ , не имеет массы и представляет собой квант электромагнитного излучения.

История открытия фотона весьма примечательна.

Макс Планк, занимаясь теорией излучения черного тела, получил эмпирическую формулу, хорошо описываю-

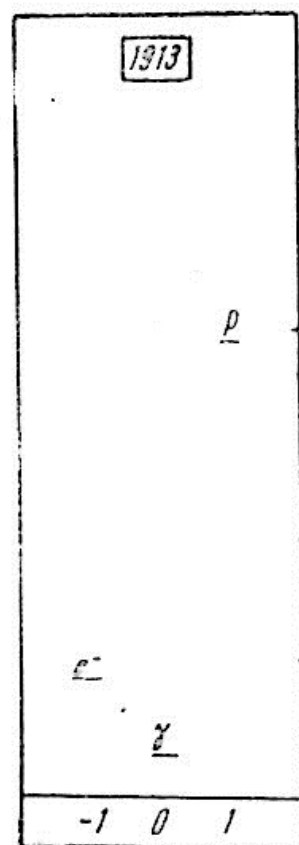


Рис. 4.

щую экспериментальные данные. Эта формула находилась, однако, в противоречии с классическими представлениями об электромагнитном излучении. Чтобы объяснить свою формулу, он сделал в 1901 году смелое предположение, что электромагнитное излучение может испускаться или поглощаться только определенными дискретными количествами, или квантами, причем каждый квант имеет энергию $h\nu$, где ν — частота излучения и h — универсальная постоянная, введенная Планком и позднее названная в честь его постоянной Планка.

Эта атомарная концепция обмена энергией между материей и полем излучения была настолько революционной, что она могла возникнуть только в результате чрезвычайно глубокого и упорного изучения вопроса, которым отличались работы Планка. Эта концепция, облаченная Эйнштейном в 1905 году в законченную форму, оказала большое влияние на Бора при создании им его теории атома.

После 1913 года были предприняты титанические усилия, чтобы добиться большего понимания физической сущности квантовой концепции, особенно с помощью принципа соответствия Бора, и связать химические свойства атомов с их квантовой структурой. Для тех из нас, кто был обучен в строгом современном духе и принял участие в заключительной стадии формулирования квантовой механики, неуловимость проблем и атмосфера предприимчивости дней, предшествующих появлению квантовой механики, одновременно полных надежд и отчаяния, приобретают теперь почти мрачную окраску.

Мы можем только удивляться, что действительно было время, когда достижение правильных заключений с помощью доводов, которые были очевидно противоречивы, составляло основное искусство профессии.

Кульминационной точкой этого периода, как все мы знаем, стало развитие квантовой механики в 1924—1927 годах. История напряженной драмы тех дней еще ждет своего написания. Разрешите мне здесь только процитировать красноречивое описание, данное Р. Оппенгеймером в его Райтовских лекциях в 1952 году, изданных в виде отдельной книги под названием «Наука и общее понимание» [5].

«Наше представление об атомной физике, которое мы называем квантовой теорией атомных систем, зародилось в начале нашего века и достигло своего синтеза и разрешения в двадцатые годы. Это было героическое время. Развитие этой теории не было деянием отдельного человека; эта работа объединяла множество ученых из многих стран, хотя с начала до конца глубоко творческий, острый и критический дух Нильса Бора направлял, очищал, углублял и в конечном счете преобразовал все учение. Это был период кропотливой работы в лабораториях, решающих экспериментов и смелых начинаний, период многих ошибочных исходных позиций и ненадежных предположений. Это было время неофициальных сообщений и спешно созываемых конференций, споров, критики и блестящих математических импровизаций... Для всех, участвовавших в этой работе, это было время творческих свершений, и в их новых прозрениях были и восторг, и ужас. Это время, по-видимому, не будет очень полно отражено в истории, потому что для этого потребовалось бы такое же высокое мастерство, как для создания легенды об Эдипе или истории Кромвеля. К тому же, эта область деятельности так далека от сферы общечеловеческого опыта, что вряд ли она знакома какому-либо поэту или историку».

Здесь невозможно дать хотя сколько-нибудь достаточного описания принципов квантовой механики. Однако для понимания наших дальнейших рассуждений необходимо пояснить один специфический вопрос квантовой механики. Напомним, что Планк, Эйнштейн и Бор выдвинули идею о квантовой природе поля излучения, которое, как было хорошо известно, в классическом случае является волновым.

Корпускулярный аспект электромагнитных волн был подтвержден в 1916 году опытами Милликэна по фотоэлектричеству и снова в 1923 году А. Комптоном, обнаружившим, что при столкновении с электронами γ -лучи, которые являются электромагнитными волнами, ведут себя при передаче энергии и импульса полностью как частицы. Эти частицы, из которых состоят γ -лучи, были названы фотонами и обозначены символом γ (см. рис. 4).

Экспериментально установлено, что произведение длины волны фотона на его импульс p равно постоянной Планка h . Поэтому в 1924 году Луи де Бройль поднял в

своей статье вопрос: не должны ли частицы проявлять волновую природу, так же как волны проявляют корпускулярную? Он предположил, что частицы ведут себя именно таким образом и что волны, соответствующие ча-

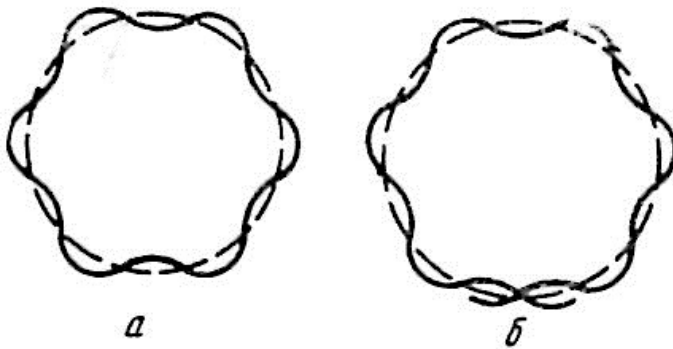


Рис. 5.

стицам, имеют длину волны, равную частному от деления постоянной Планка на величину импульса, как и в случае фотона. Это чрезвычайно смелое предположение привело его к картине движения электрона по ор-

бите, изображенной на рис. 5.

Де Бройль утверждал, что если длина орбиты не содержит целого числа длин волн, как это изображено на рис. 5, б, то волны не могут резонировать. Однако в случае, приведенном на рис. 5, а, резонанс имеет место, и поэтому такая орбита возможна. Таким гипотетическим путем де Бройль действительно пришел к понятию квантового состояния, введенному Бором в 1913 году. Дальнейшее исследование этих предположений, произведенное Э. Шредингером в 1926 году, привело к знаменитому уравнению Шредингера, которое явилось одним из краеугольных камней квантовой механики.

Таким образом, в квантовой механике частица проявляет волновые свойства, причем длина волны обратно пропорциональна ее импульсу.

Далее, общеизвестно, что для локализации волны в малой области пространства длина волны должна быть меньше размеров этой области. Поэтому для исследования все более мелких областей пространства необходимо использовать частицы со все большими импульсами, такими, чтобы соответствующая им длина волны была достаточно мала. Это положение проиллюстрировано в табл. 1, которая объясняет причину создания ускорителей со все большей и большей энергией ускоряемых частиц. К этому вопросу мы вернемся позднее.

Ранее мы цитировали отрывки из Фарадеевской лекции Нильса Бора, прочитанной им в 1930 году. Он описал важное принципиальное отличие атомных и молекулярных явлений от ядерных явлений, которое удалось

сформулировать на основе Резерфордской модели атома.

С развитием квантовой механики понимание атомных и молекулярных явлений достигло такого уровня, который мы можем считать полным, глубоким и точным количественно, что, несомненно, является одним из величайших триумфов человеческого разума за все времена. Однако подобный уровень в понимании внутриядерных явлений достигнут не был, как он не достигнут и теперь. Во многих отношениях положение в годы, близкие к 1930, которые можно считать зарей эры ядерной физики, было подобно положению, имевшему место в 1900 году, на заре эры атомной физики.

Таблица 1

Расстояние см	Импульс \times скорость света, Мэв ¹
10^{-8}	0,002 (атомные явления)
10^{-12}	20 (ядерные явления)
10^{-14}	2000 (настоящее время)
10^{-16}	200000 (будущее?)

¹ Мэв — миллион электронвольт — энергия электрического заряда e , приобретаемая им при прохождении разности потенциалов в один миллион вольт.

Первой элементарной частицей, открытой в этой новой эре, был нейтрон. Ирэн Кюри и Ф. Жолио-Кюри обнаружили в 1932 году, что в установке, подобной изображенной на рис. 6, бериллий при бомбардировке его α -частицами из полониевого источника испускает какие-то электрически нейтральные частицы, обладающие высокой проникающей способностью, которые, как они установили, могут выбивать протоны из водородсодержащих материалов, помещаемых перед счетчиком (см. рис. 6). Естественно было предположить, что эти нейтральные частицы — фотоны. Но фотон не имеет массы, и выбить обнаруженные в опыте протоны могли

только фотоны огромных энергий. Действительно, Кюри пришли к выводу, что фотоны должны были бы иметь энергию, очень высокую для того времени, — больше

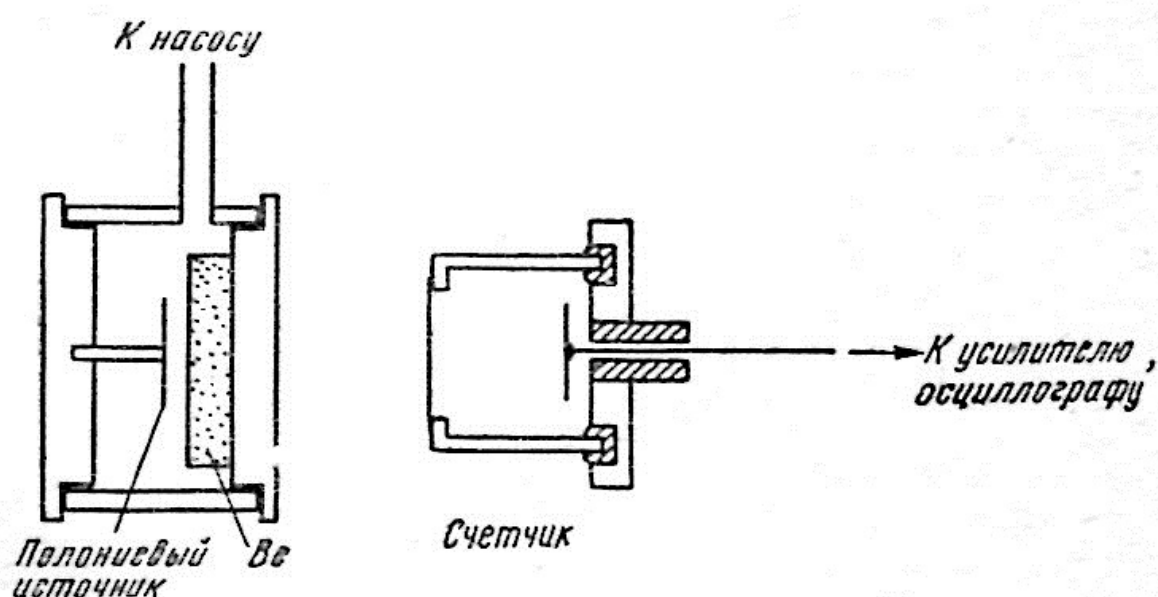


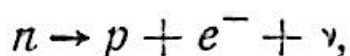
Рис. 6.

50 Мэв. Как только результаты опыта Кюри стали известны, Дж. Чедвик в Кембридже (Англия) продолжил этот эксперимент и показал, что проникающие частицы не только не были частицами без массы, но и обладали приблизительно массой протона. Возможность существования такой нейтральной частицы действительно обсуждалась Резерфордом еще в 1920 году, и последняя была названа тогда нейтроном. Для ее обнаружения в 20-е годы было поставлено много экспериментов, но все они окончились безрезультатно.

После открытия нейтрона сразу стало очевидным, что атомные ядра построены из нейтронов и протонов, находящихся в них почти в равных количествах. Более точные измерения показали, что масса нейтрона чуть больше массы протона. Поэтому несколько позже было сделано предположение, что нейтрон — частица нестабильная, распадающаяся на электрон и протон, подобно тому как распадаются β -радиоактивные элементы, о существовании которых было известно еще примерно с 1900 года.

Однако эксперименты по β -радиоактивности показали, что для удовлетворения закона сохранения энергии в этом распаде должен присутствовать новый вид нейтральных частиц, уносящих избыток энергии. Энрико

Ферми назвал этот новый вид частиц нейтрино. Процесс распада нейтрона стали рассматривать поэтому как



где n и ν обозначены нейтрон и нейтрино соответственно.

За два последующие года, 1932—1933, была обнаружена другая новая частица — позитрон. Это открытие стало возможным благодаря использованию чрезвычайно остроумно задуманного прибора, названного камерой Вильсона, по имени ее изобретателя Ч. Т. Р. Вильсона. Сам Вильсон описывает историю появления своей камеры так [6]: «В сентябре 1894 года я несколько недель работал в обсерватории, которая тогда находилась на вершине Бен Невис, самой высокой горы Шотландии. Удивительные оптические явления, возникающие при освещении солнечными лучами окружающих вершину облаков, и особенно разноцветные кольца вокруг Солнца или теней, бросаемых вершиной горы или самим наблюдателем на окружающий туман или облака, чрезвычайно заинтересовали меня, и я решил получить их в лаборатории. В начале 1895 года я проделал с этой целью несколько экспериментов, образуя облака путем расширения паров, подобно Койлье и Эйткену. Но сразу же я наголкулся на нечто такое, что обещало стать более интересным, чем те оптические эффекты, которые я намеревался изучать».

Это «нечто» и привело к созданию камеры Вильсона, в которой частицы оставляют видимые следы из капелек воды в парах, ставших перенасыщенными в результате быстрого расширения. На рис. 7 и 8 изображена камера Вильсона, с помощью которой сам Вильсон сделал много отличных фотографий следов частиц.

С подобной камеры К. Д. Андерсон сделал в 1932 году снимок, воспроизведенный на рис. 9. Заряженная частица вошла в камеру снизу, и под воздействием сильного магнитного поля в объеме камеры ее траектория в камере искривилась. Пройдя через 6-миллиметровую свинцовую пластинку, частица сильно замедлилась, и поэтому кривизна ее траектории после пластинки стала значительно больше. Кривизна верхней части траектории больше, чем нижней, — это доказывает, что частица летела снизу вверх. Зная направление движения частицы, Ан-

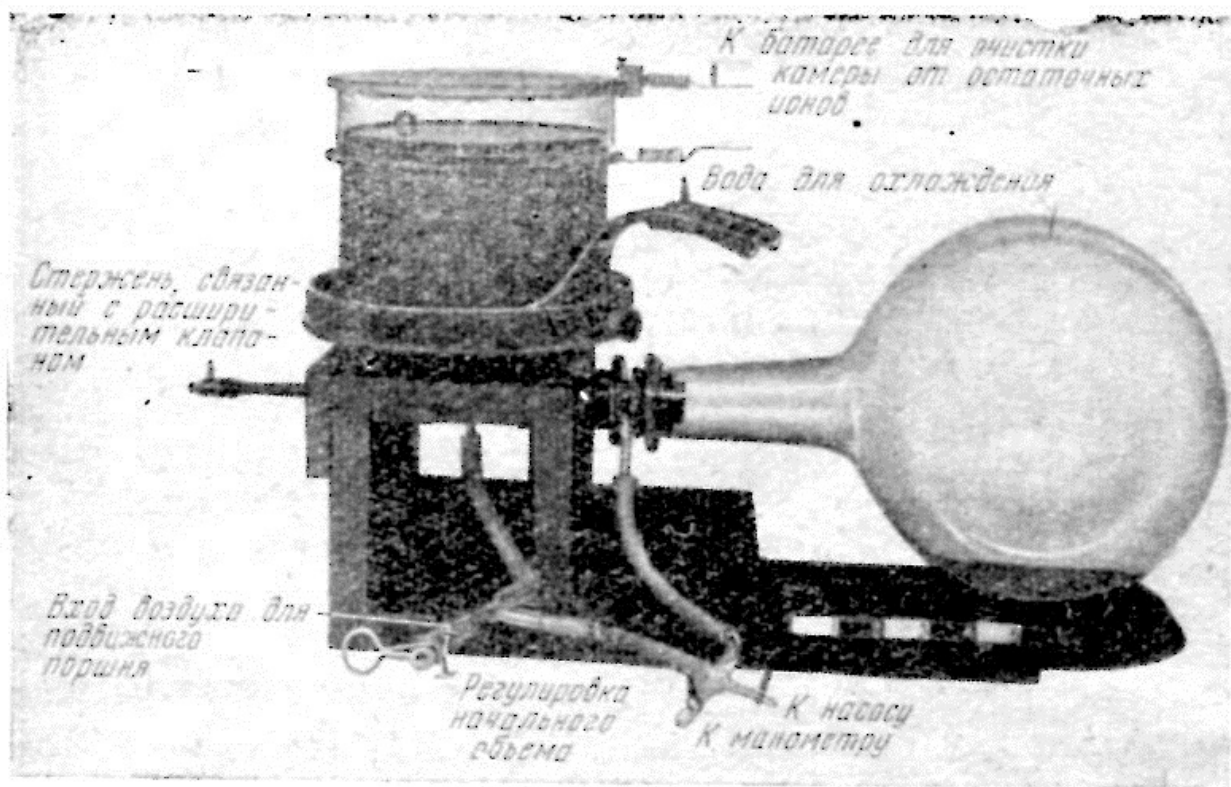


Рис. 7.

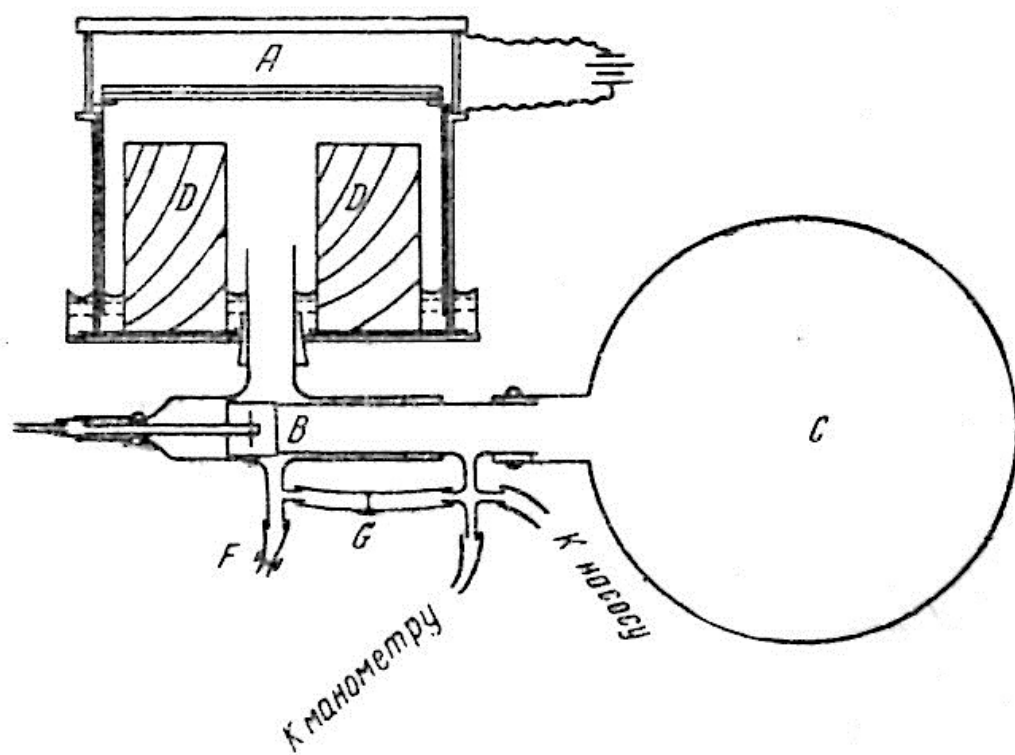


Рис. 8.

Андерсон смог сделать заключение, что заряд частицы был положительным. Кроме того, по величине изменения кривизны после пересечения свинцовой пластинки он смог убедительно показать, что эта частица гораздо легче протона. Поэтому Андерсон пришел к заключению, что она фактически имеет массу электрона и назвал ее позитроном.

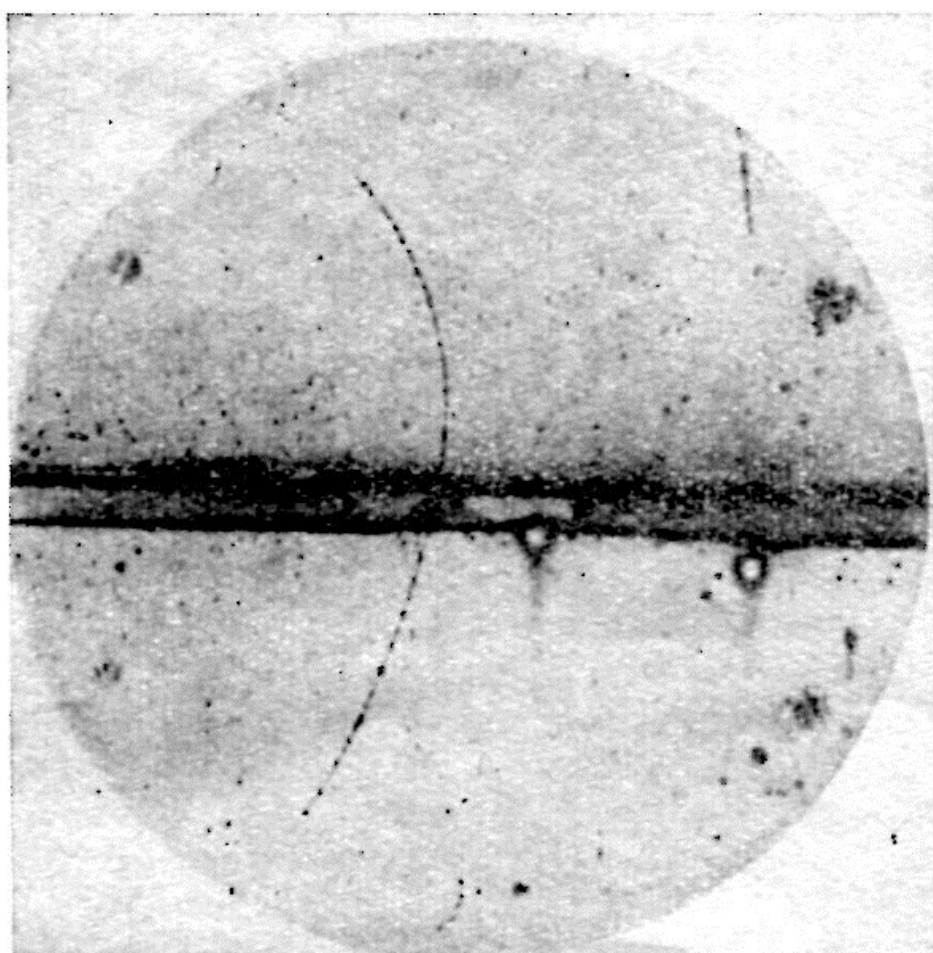


Рис 9.

Существование позитрона было действительно предсказано теоретически еще в 1930—1931 годах. Это предсказание было основано на предложенной Дираком изящной теории электрона, развитие которой привело к так называемому принципу инвариантности относительно зарядового сопряжения. Одним из следствий этого принципа было заключение, что для каждой частицы существует зарядово-сопряженная частица, или античастица, обладающая такой же массой и зарядом, равным по величине заряду частицы, но противоположным по знаку. Позитрон, обнаруженный Андерсоном, был античастицей электрона.

В 1933 году количество известных элементарных частиц сильно увеличилось, как это показано на рис. 10 (величины массы отложены схемотически, не в масштабе; нестабильные частицы отмечены волнистой линией).

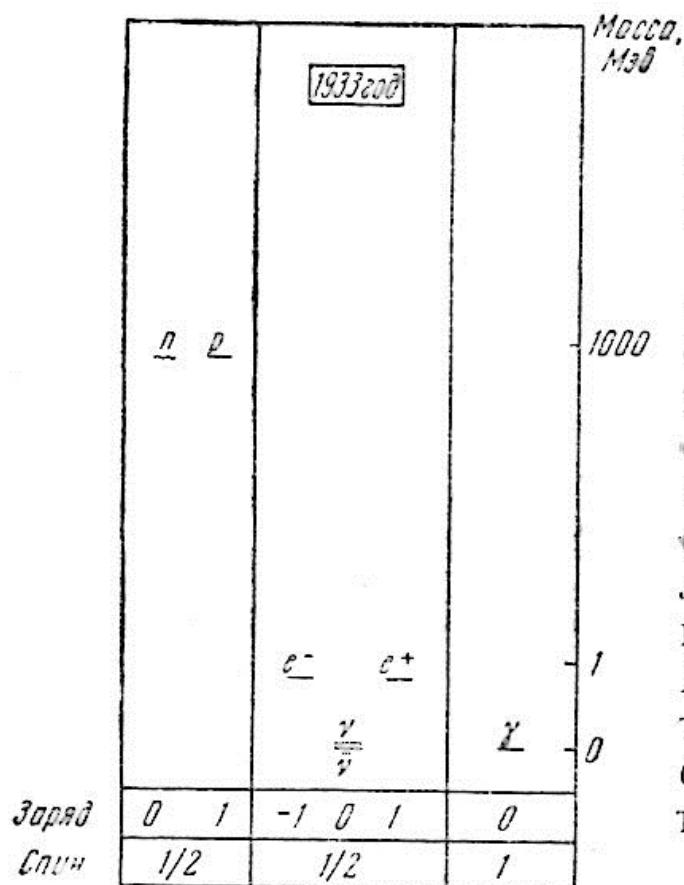
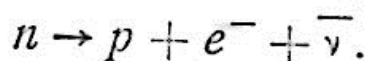


Рис. 10.

В нижней части рис. 10, под числами, означающими заряды частиц, приведены значения присущего частицам собственного углового момента, или спина. Они даны в единицах константы Планка, деленной на 2. То, что выраженный в таких единицах угловой момент кратен $1/2$, является прямым предсказанием квантовой механики, которое, как было обнаружено, находится в отличном согласии с экспериментами.

На этом рисунке e^- и e^+ обозначены электрон и позитрон, ν и $\bar{\nu}$ — зарядово-сопряженные частицы нейтрино и антинейтрино.

По мере постепенного изучения свойств частиц сложившиеся представления иногда изменяются, случайно или намеренно, и наше современное представление о нейтрино отлично от первоначально предложенного Э. Ферми. Мы называем теперь нейтральную частицу, испускаемую при распаде нейтрона, антинейтрино:



Античастица фотона тождественна с ним. В





Глава 2

История открытия следующей элементарной частицы длинна и запутанна. Она началась в 1935 году с предположения Х. Юкавы, что в ядрах нейтроны и протоны связаны друг с другом промежуточным полем подобно тому, как в атомах ядра и электроны связаны электромагнитным полем. Согласно Юкаве, малые размеры ядер указывают на короткодействие ядерных сил, что, в свою очередь, как мы рассмотрели это в предыдущей главе, приводит к большому импульсу, переносимому полем.

Из принципов специальной теории относительности средний импульс, переносимый полем, имеет порядок произведения скорости света на массу кванта, связанного с этим полем. Таким образом, исходя из размеров ядер, Юкава получил, что эта масса должна быть примерно в 200 раз больше массы электрона. Однако в конце своей статьи он заметил [7]: «Так как квант с такой большой массой в экспериментах никогда не наблюдался, вышеизложенная теория, кажется, находится на ложном пути».

Юкава не знал, что в это самое время К. Д. Андерсон и С. Г. Неддермайер проводили широкое изучение способности заряженных частиц космических лучей проходить через вещество. Это исследование было крайне трудным, так как получение достаточного экспериментального материала требовало долгого времени. Более того, эти эксперименты были трудными и потому, что явления, наблюдаемые в космических лучах, были для физиков доселе совершенно неизвестны; не были даже твердо установлены направления и рамки, в которых следовало изучать эти явления.

Когда встречались странные и неожиданные явления, что происходило нередко, то было неясно, связано ли это

с новыми частицами и новыми законами, или старые частицы и известные принципы проявляли новые, удивительные свойства в этой области исследования. Андерсон и Неддермайер проявили большую настойчивость и несмотря на эти трудности в результате исключительно тщательных исследований, проведенных в 1934—1936 годах, пришли к заключению, что в составе космических лучей присутствуют новые частицы — некоторые с положительным, некоторые с отрицательным зарядом. Эти частицы имели массу, промежуточную между массами электрона и протона, и было естественно сделать заключение, что они были как раз теми частицами, существование которых предсказал Юкава и с помощью которых передаются ядерные силы. Сначала их называли мезотронами, а позже просто мезонами.

Открытие мезонов вызвало настоящую сенсацию среди физиков, как это свидетельствует следующая выдержка из письма Нильса Бора Милликэну [8] в 1938 году:

«История открытия этих частиц в высшей степени замечательна, и неосторожность, с которой я выразил свое мнение в незабываемые дни позапрошлой весны в Пасадене, диктовалась только признанием огромного значения работы Андерсона, если свидетельства существования новых частиц действительно убедительны. Временами я даже не знаю, заслуживают ли большего восхищения изобретательность и дар предвидения Юкавы или упорство, с которым группа сотрудников Вашего института занималась поисками проявлений новых эффектов.

Но «родовые муки» этих новых частиц еще не закончились, так как различные измерения массы мезонов давали совершенно различные результаты. Эту ситуацию хорошо иллюстрирует рис. 11, на котором приведены суммарные данные по экспериментальным результатам, опубликованным к 1945 году (масса мезона измерена в единицах массы электрона). Среднее значение было найдено равным $172 m_e$, но отклонения от него были слишком велики. Позднее были приложены огромные усилия, чтобы измерить массу более точно и тщательнее проанализировать данные теоретически, но первые определенные указания, что положение на самом деле сложнее, чем казалось сначала, появились в работе М. Конверси, Е. Панчини и О. Пиччиони, посвященной изучению

взаимодействия мезонов космических лучей с атомными ядрами.

Результаты их эксперимента, опубликованные в 1947 году, показывали, что эти взаимодействия чрезвычайно

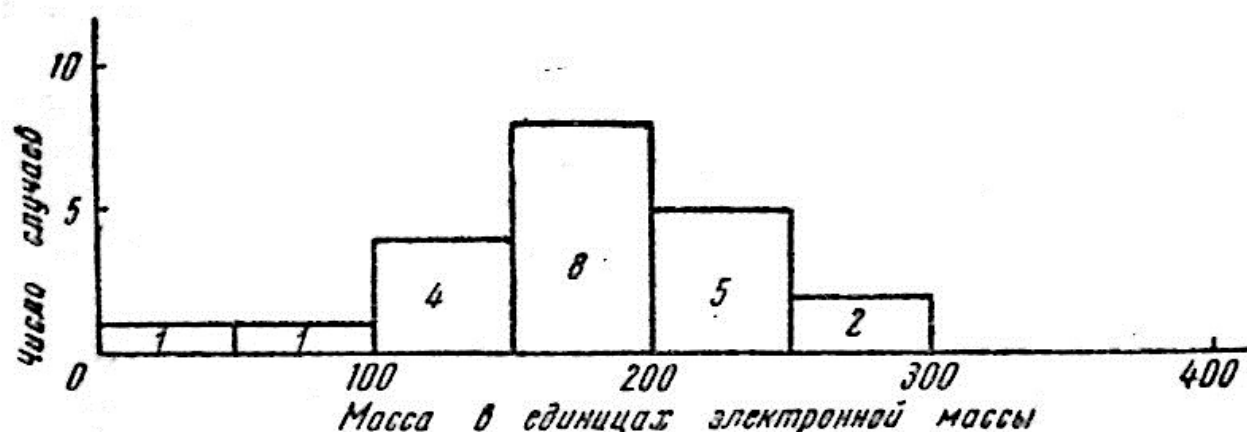


Рис. 11.

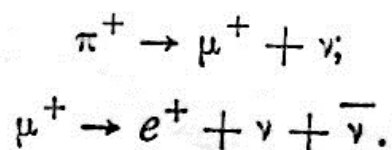
слабы. Э. Ферми, Э. Теллер и В. Ф. Вайскопф сразу обратили внимание на то, что во всей проблеме найденных в космических лучах мезонов где-то имеется грубое упущение, потому что частицы, так слабо взаимодействующие с ядрами, не могут служить для передачи очень больших ядерных сил. Они показали, что мезоны космических лучей могут быть носителями сил только в 10^{13} раз слабее ядерных. Это резкое противоречие привело к появлению многих интересных теоретических предположений. В частности, С. Саката и Т. Иноэ, Х. Бете и Р. Маршак выдвинули гипотезу, что мезоны космических лучей, обнаруженные до сих пор, не были мезонами Юкавы. По их предположению, последние также должны существовать в космических лучах, но их время жизни слишком мало, чтобы они могли быть зарегистрированы с помощью существовавшей тогда аппаратуры. Окончательное решение проблемы произошло следующим образом.

Примерно в это самое время в Бристоле К. Пауэлл и его группа разработали методику использования фотографических эмульсий для регистрации заряженных частиц. В эмульсиях вдоль следа заряженных частиц образуются ионы, приводящие к появлению на проявленных пластинках черных зерен. Эти зерна отмечают след (или трек) заряженной частицы в эмульсии. Пауэлл и его сотрудники исследовали треки, оставленные заряженными

ми частицами космических лучей в слое фотоэмульсии. На рис. 12 показаны некоторые из этих треков (изображения представляют мозаику кусков треков, видимых в микроскоп). Мы видим, что в каждом случае среди произвольно распределенных фоновых зерен ясно вырисовываются два длинных извилистых трека. Значительную информацию о частице можно получить по величине изменения плотности зерен вдоль трека и по отклонению трека от прямой линии, обусловленному рассеянием частицы при прохождении ею эмульсии. Например, по мере того, как частица замедляется, ее ионизирующая способность возрастает и поэтому число зерен вдоль ее следа увеличивается. Так, на левом мозаичном изображении частица вошла в эмульсию снизу слева, замедлилась, остановилась в правом нижнем углу и претерпела распад на какую-то нейтральную частицу, которая не оставила следа, и заряженную частицу, полетевшую вверх, замедлившуюся и вышедшую из области, охваченной мозаичным изображением. В правой части рисунка запечатлен точно такой же случай.

Эти два примера и были первыми опубликованными группой Пауэлла случаями, когда остановившиеся мезоны давали начало трекам вторичных мезонов. Они называли первичные и вторичные мезоны π (π)- и μ (μ)-мезонами, как это показано на рис. 13.

Позже, когда стали применять фотоэмульсии большей чувствительности, было обнаружено, что μ -мезон, остановившийся в эмульсии, в свою очередь давал начало очень слабому треку, который, как было установлено, принадлежал электрону. Примеры таких распадов приведены на рис. 13. Весь процесс был описан так:



Нейтрино и антинейтрино, будучи нейтральными частицами, не оставляют видимых треков. Их присутствие в подобных распадах было установлено из детального изучения балансов энергии, импульса и углового момента в актах распадов. Отрицательно заряженные π - и μ -мезоны распадаются подобным же образом. Массы π - и μ -мезонов были определены в результате тщательного

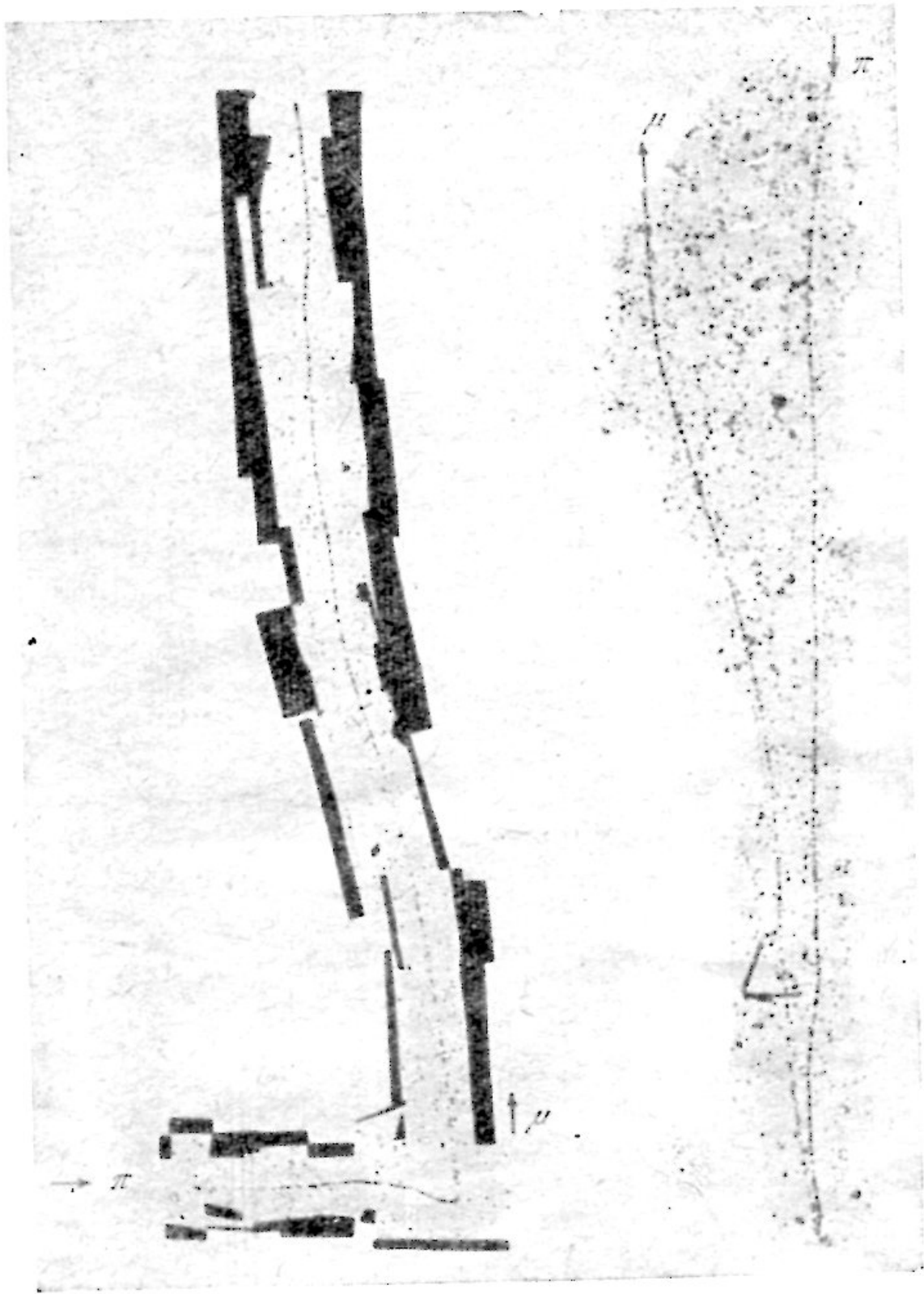


Рис. 12.

изучения их продуктов распада. Они оказались соответственно в 273 и 207 раз больше массы электрона.

Открытие существования двух родов мезонов устранило описанное ранее противоречие. π -Мезон, идентифицированный как мезон Юкавы, представляет собой, сле-

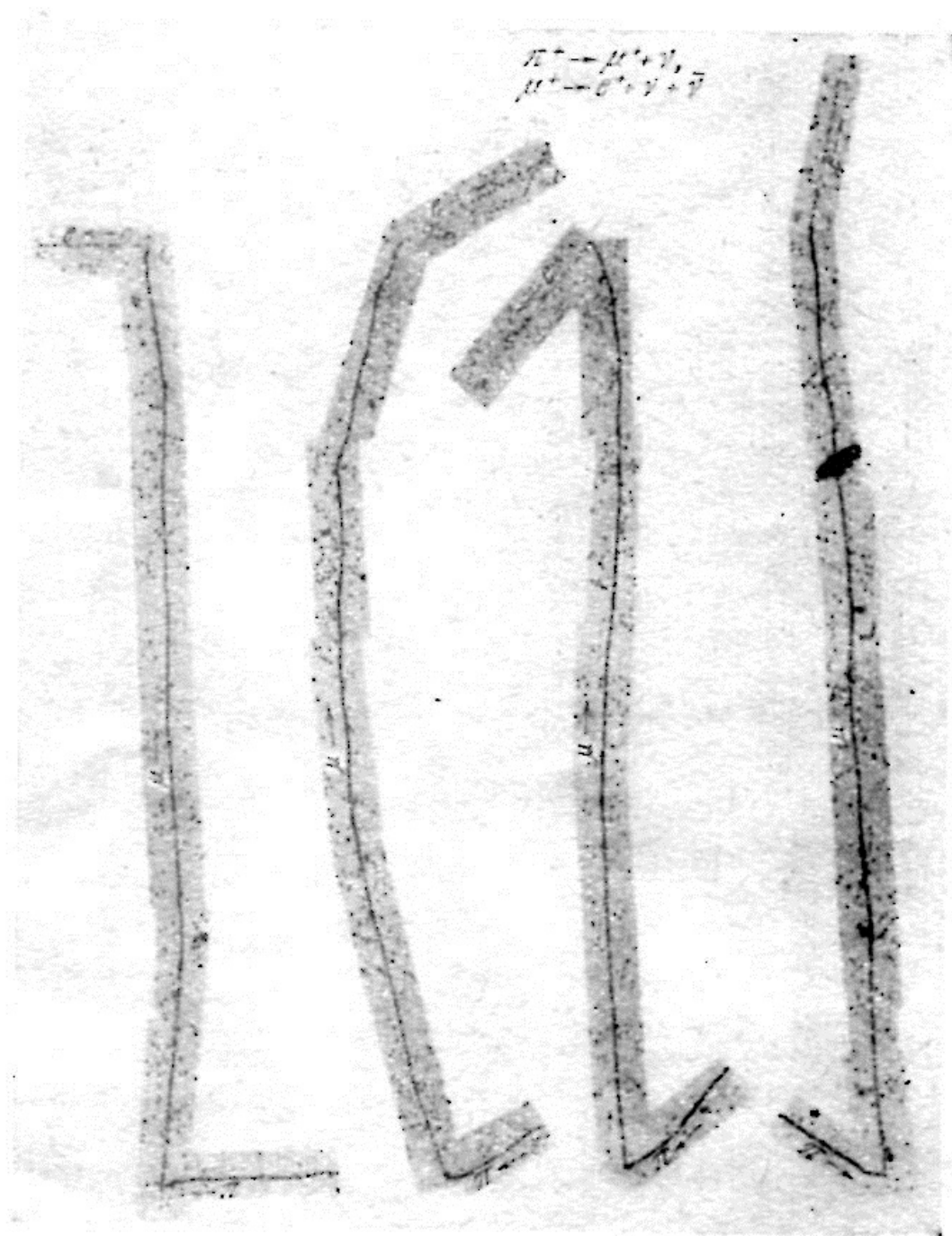


Рис. 13.

довательно, обменную частицу ядерных сил, тогда как его дочерний мезон, μ -мезон, обнаруженный Конверси, Панчини и Пиччиони в космических лучах, с ядрами сильно не взаимодействует.

Отлично выполненная и очень своевременная работа группы Пауэлла, обнаружившей столь неожиданную

иерархию в мире мезонов, еще раз подтвердила, что успехи в наших физических познаниях облегчаются, а иногда и вообще становятся возможными лишь с развитием и совершенствованием экспериментальной физики.

Таким образом, к 1947 году наши знания об элементарных частицах как бы представляли картину, изображенную на рис. 14 (величины массы отложены не в мас-

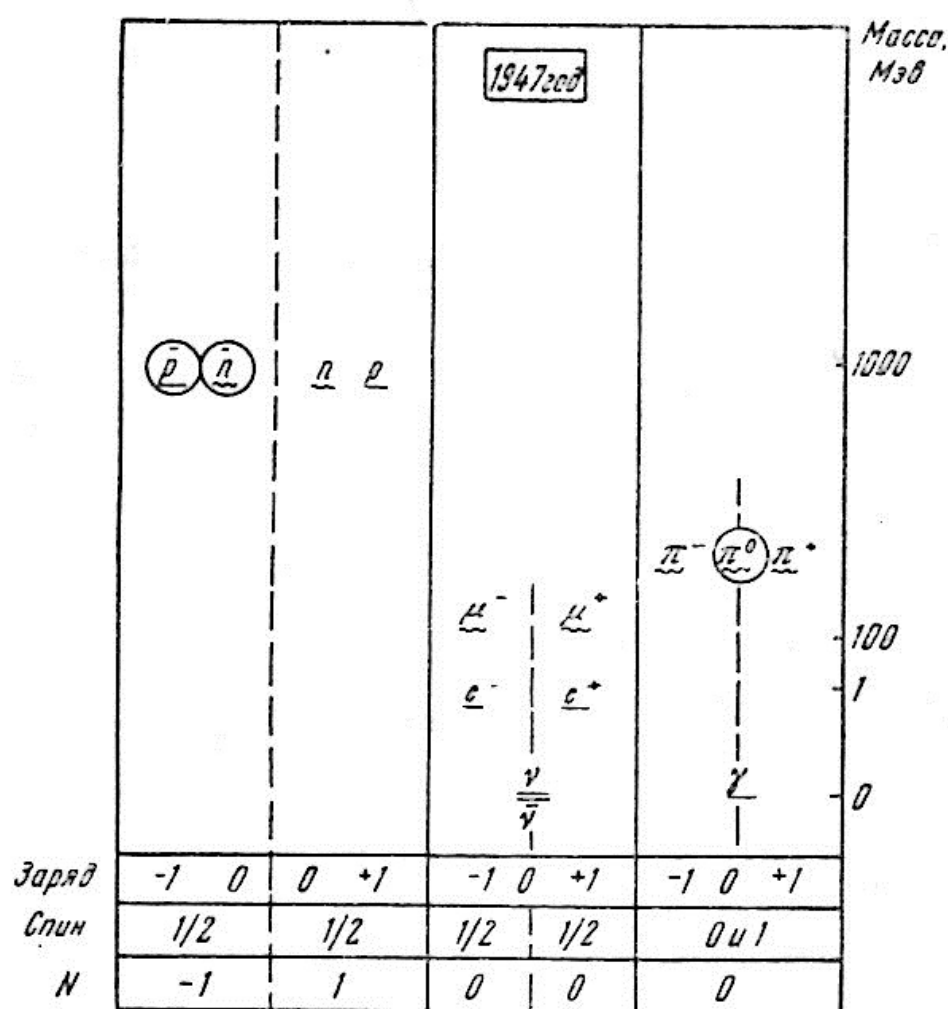


Рис. 14.

штабе, схематически). Новые частицы в этой диаграмме π^+ , π^- , μ^+ и μ^- -мезоны¹. Кружками обведены те частицы, существование которых было предсказано теоретически, но еще не подтверждено экспериментально. Это электрически нейтральный π^0 -мезон, антипротон \bar{p} и антинейтрон \bar{n} .

Концепция симметрии относительно зарядового сопряжения, которая в это время получила широкое рас-

¹ Продуктами распада π^- , μ^- , n являются античастицы продуктов распада π^+ , μ^+ , p : $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$; $\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$; $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$.

пространение, проиллюстрирована на диаграмме с помощью вертикальных пунктирных линий. В каждой из трех вертикальных колонок частицы и соответствующие им античастицы являются взаимными зеркальными отображениями относительно этих пунктирных линий; π^0 - и γ -квант тождественны своим античастицам. Можно заметить, что внизу таблицы введен новый ряд чисел, обозначенный буквой N . Смысл этих чисел можно объяснить следующим образом. Большинство частиц, приведенных на этой диаграмме, могут распасться на частицы с меньшей массой. Например, распадаются π - и μ -мезоны; нейтрон n и его античастица \bar{n} также нестабильны. Способы их распада обсуждены в работе [10] (нестабильные частицы подчеркнуты на рис. 14 волнистой линией). Протон p , однако, не распадается, что очевидно из факта стабильности атомов водорода. Кроме протона, стабильными частицами являются e^- , позитрон e^+ , нейтрино ν , антинейтрино $\bar{\nu}$ и фотон γ . Стабильность трех последних частиц легко объяснить. Как известно, масса является эквивалентом энергии. По закону сохранения энергии, частица может распасться только на частицы, более легкие, чем она сама, причем баланс масс обеспечивается кинетической энергией продуктов распада. Нейтрино ν , антинейтрино $\bar{\nu}$ и фотон γ массой покоя не обладают, поэтому они не могут распасться, так как нет частиц, более легких, чем они сами. Так же просто объясняется причина стабильности e^\pm : это самые легкие из заряженных частиц. Поскольку при распаде заряд не может ни увеличиваться, ни уменьшаться, они как бы «скреплены» своими зарядами и поэтому не могут распасться. Но в рамках подобного объяснения стабильность \bar{p} и p остается необоснованной. Например, почему протон не распадается на позитрон и фотон:

$$p \rightarrow e^+ + \gamma?$$

Ответ на этот вопрос еще не получен. Однако чтобы описать причину этой стабильности феноменологически, физики приписали каждой частице по аналогии с электрическим зарядом номер N . При этом было принято, что суммарное значение N некоторого количества частиц равно числу протонов p и нейтронов n минус число антипротонов \bar{p} и антинейтронов \bar{n} . Далее было предположе-

но, что в ядерных реакциях или актах распада элементарных частиц число N сохраняется так же, как сохраняется электрический заряд. Поэтому число N назвали нуклонным зарядом. Тогда причина стабильности p и \bar{p} полностью аналогична со случаем e^\pm : p и \bar{p} являются легчайшими частицами, несущими нуклонный заряд. Они «скреплены» своим нуклонным зарядом и не могут распасться.

Общая картина положения в мире элементарных частиц к 1947 году, изображенная на рис. 14, была еще не очень сложна, так как нейтроны, протоны, электроны и фотоны были хорошо известны. Вновь найденные π -мезоны тоже получили свое объяснение как обменные частицы, создающие ядерные силы.

С учетом концепции существования античастиц единственными элементарными частицами в этой таблице, открытие которых было неожиданным, были μ -мезоны и нейтрино.

Однако эта сравнительно простая картина в области физики элементарных частиц просуществовала недолго. Действительно, в том же 1947 году в Манчестере среди большого числа фотоснимков проникающих частиц изливней космических лучей с камеры Вильсона Дж. Д. Ро-

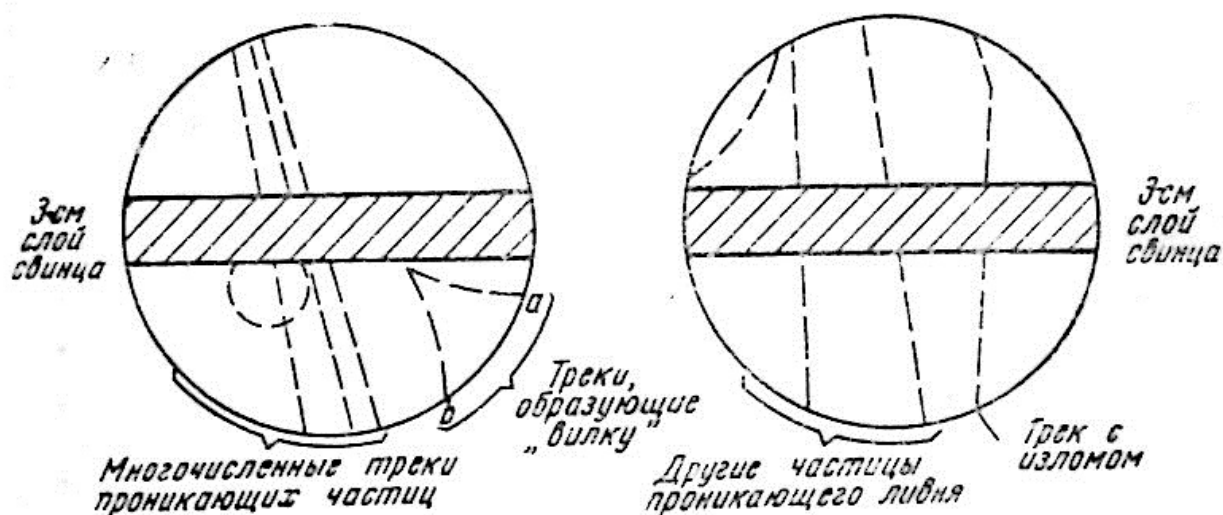


Рис. 15.

честер и К. С. Батлер обнаружили два снимка, показанные схематически на рис. 15. Они идентифицировали треки a и b , изображенные в левой части рис. 15, как оставленные заряженными частицами, образовавшимися от распада нейтральной частицы с массой, приблизительно

но в 1000 раз большей электронной массы, что отличалось от массы всех частиц, известных до этого времени. Они получили также фотоснимок, приведенный в правой части рис. 15, на котором трек с изломом в верхней части оставлен, как они установили, заряженной частицей с массой около 1000 электронных масс, распавшейся в точке излома на нейтральную и какую-то другую заряженную частицы.

Двумя годами позже Пауэлл и его сотрудники с помощью новой эмульсионной техники обнаружили в фотоэмульсии, экспонированной в космических лучах, событие, изображенное на рис. 16. Они описали его как остановку и распад в точке A на три π -мезона (Aa , Ab и AB) частицы K , вошедшей в фотоэмульсию сверху. Последний из этих вторичных π -мезонов вызвал расщепление ядра в точке B . Вид распада и масса первичной частицы не могли принадлежать ни одной из известных к тому времени частиц. Пауэлл и его группа назвали эту новую частицу τ -мезоном.

Эти три снимка представляли собой как бы первое проявление сложного мира множества новых частиц. Так как открытие этих частиц было совершенно неожиданным, им было дано общее название «странные частицы». Эти частицы образуются в ядерных реакциях, когда энергия первичных частиц больше гигаэлектронвольт. В 1948—1953 годах единственным источником частиц таких энергий были космические лучи. Поэтому были начаты многочисленные исследования по обнаружению новых странных частиц в космических лучах. Но космические лучи не являются контролируемым источником частиц высоких энергий, и частота прохождения частиц высоких энергий из этих лучей через приборы сколь угодно разумных размеров очень мала. Однако благодаря быстрому развитию техники и появлению опыта конструирования ускорителей высоких энергий к этому времени, к счастью, стало возможным создание машин с энергией ускоренных частиц в интервале порядка несколько гигаэлектронвольт. Когда первый такой ускоритель, названный его создателями космотроном, вступил в действие в 1953 году в Брукгейвенской национальной лаборатории на Лонг-Исланде, появилась возможность получать странные частицы в лабораторных условиях.

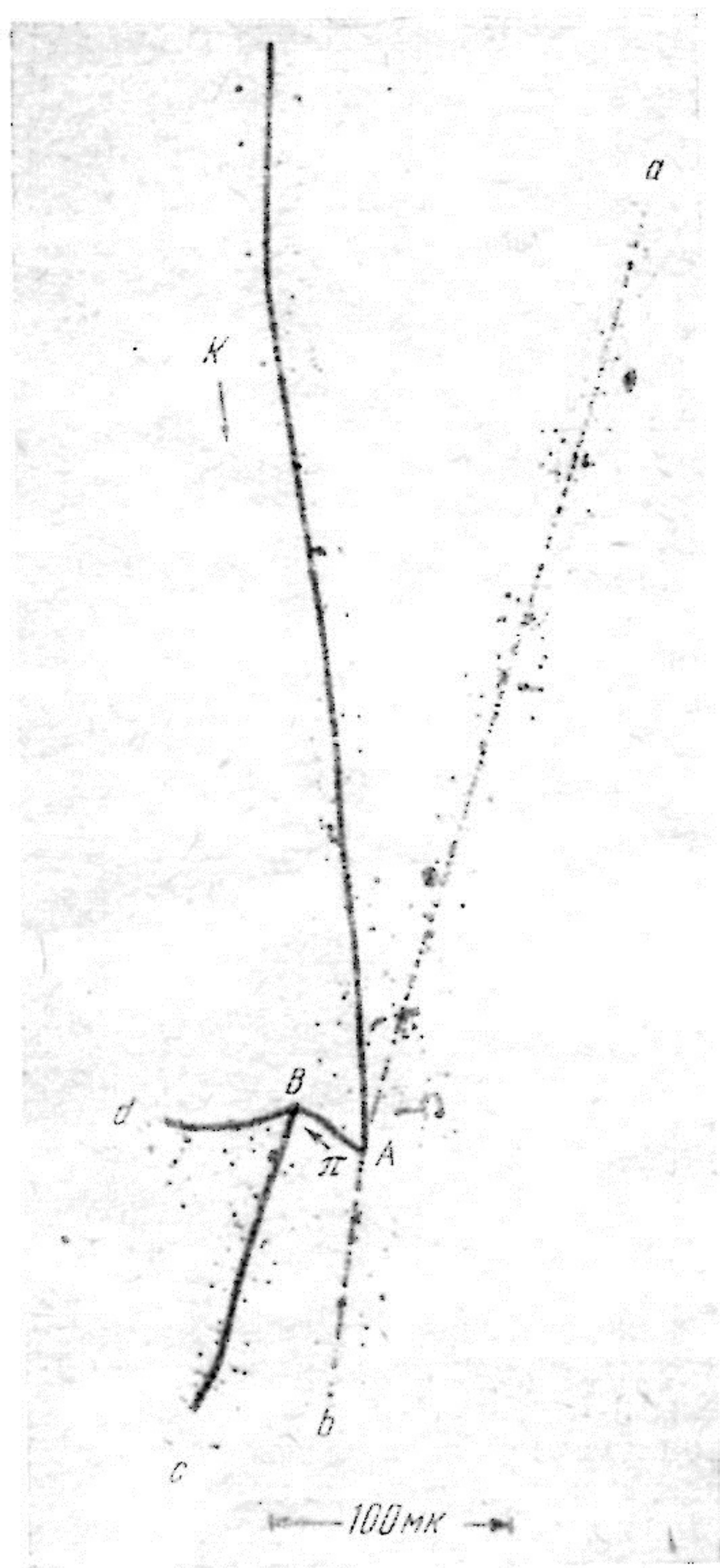


Рис. 16.

Диаграмма частиц, которые были открыты, наименованы и изучены в работах с космическими лучами и на ускорителях, вместе с описанными выше приведена на рис. 17. Теперь этих частиц насчитывается уже около тридцати.

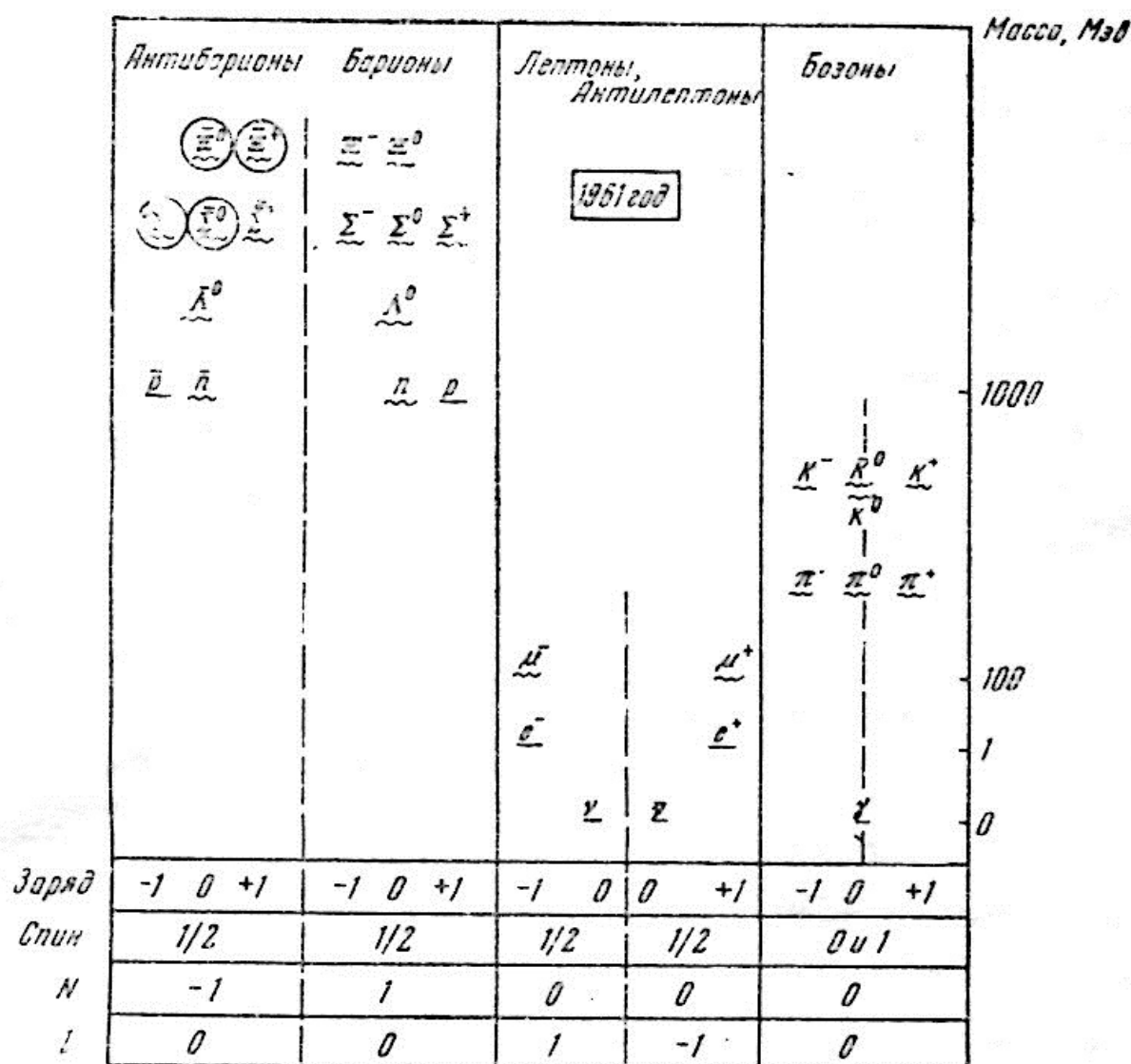
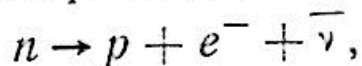


Рис. 17.

Изображенные на нем частицы подразделены на три основных семейства: барионы и антибарионы, лептоны и антилептоны и бозоны. В каждом семействе частица и античастица являются зеркальными отображениями друг друга относительно вертикальных пунктирных линий, проведенных на рисунке. По ординате отложена масса частиц, уровень нулевой массы проходит через $\nu, \bar{\nu}$ и γ . Абсцисса внутри каждого семейства соответствует электрическому заряду частиц. Кружками обведены частицы,

экспериментально еще не обнаруженные, но существование которых предсказано теоретически¹.

На диаграмме рис. 17 введен еще ряд чисел, обозначенный l . Приведенные в этом ряду числа называют лептонными зарядами; связанная с ними концепция была развита в последнее десятилетие. В ядерных реакциях или распадах число l сохраняется так же, как сохраняется полный электрический заряд или полный нуклонный заряд N . Иллюстрацией сохранения лептонного заряда может служить распад нейтрона



в котором $l=0$ до и после процесса распада.

Довольно эффектный случай можно увидеть на рис. 18. На нем приведен снимок с пузырьковой жидководородной камеры, в которой снизу вверх проходит пучок антипротонов \bar{p} . Принцип работы пузырьковой камеры будет изложен несколько позже. Пока же достаточно упомянуть, что она во многом похожа на камеру Вильсона. Интерпретация случая, изображенного на рис. 18, основана на измерениях кривизны треков, что позволяет произвести количественную проверку балансов импульсов и энергии. Происшедшие в камере взаимодействия изображены графически в правом верхнем углу рис. 18. Мы видим следующие события: в точке A — $\bar{p} + p \rightarrow \Lambda^0 + \bar{\Lambda}^0$ (рождение пары $\Lambda^0, \bar{\Lambda}^0$ при столкновении \bar{p} с ядром водорода в камере); в точке B — $\Lambda^0 \rightarrow \pi^{-} + p$ (распад); в точке C — $\Lambda^0 \rightarrow \pi^{+} + p$ (распад); в точке D — $p + p \rightarrow \pi^{+} + \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^{-}$ (столкновение p от распада Λ^0 с ядром водорода в камере).

Легко проверить, что в каждом из этих случаев реакций или распадов сохраняются полный заряд N , полный заряд l и полный электрический заряд.

¹ В настоящее время существование всех приведенных на диаграмме частиц подтверждено экспериментально. $\bar{\Sigma}^{-}$ -гиперон был впервые обнаружен в 1960 году в лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, СССР). В настоящее время появились экспериментальные данные, свидетельствующие о существовании новых видов нестабильных частиц со временами жизни, сравнимыми с единицей «ядерного масштаба времени» (10^{-22} сек), которые распадаются на уже известные частицы. — Прим. перев.

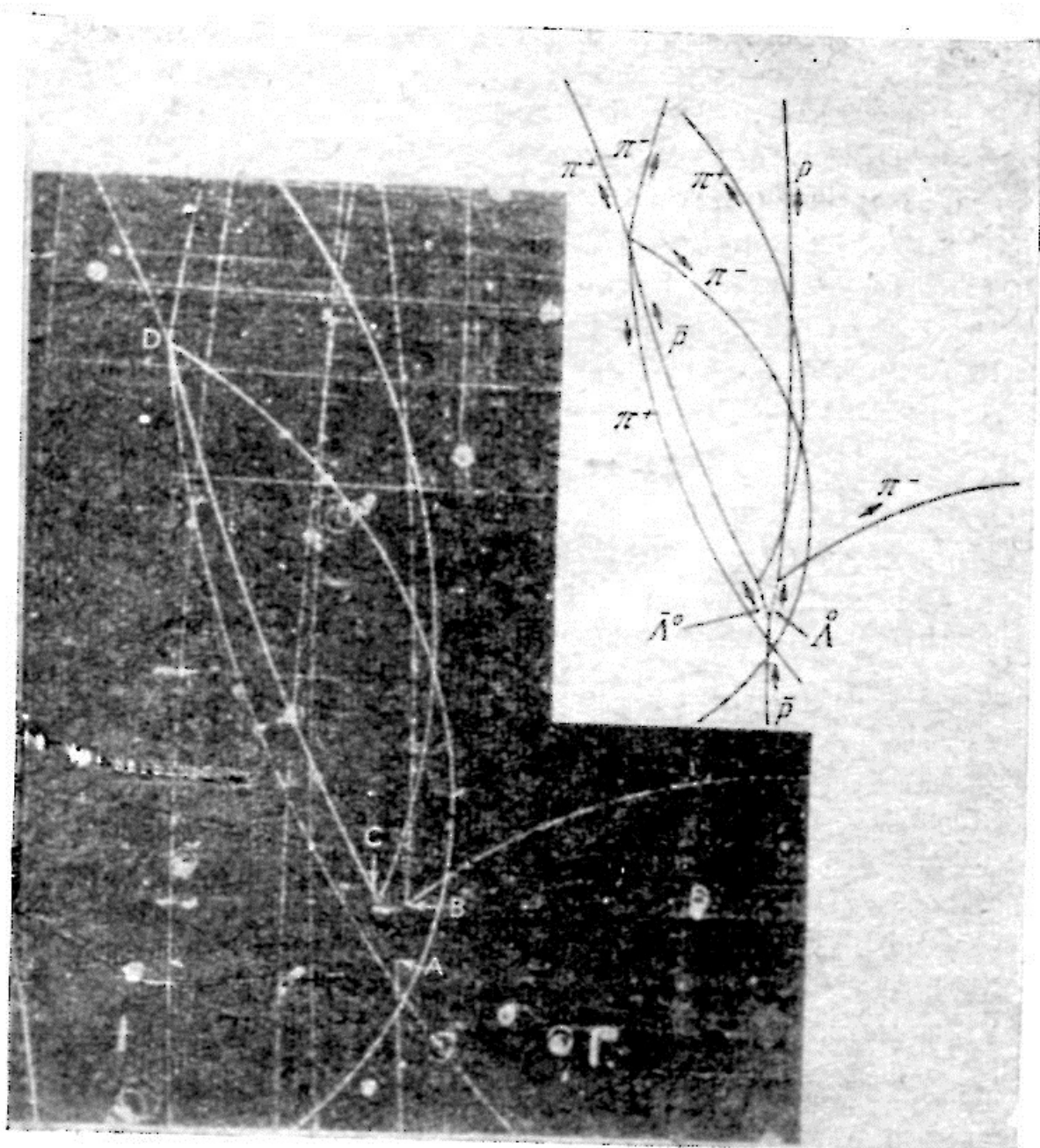


Рис. 18.

Несколько слов нужно сказать о названиях элементарных частиц. Обычно частицу впервые открывают при весьма сложных обстоятельствах, и информация о ней бывает очень скудной. Хотя название дают частицам для их классификации, иногда несколько частиц, позже оказавшихся различными, называли сначала одинаково, а одну и ту же частицу называли различно, потому что в разных экспериментах она проявлялась в различных формах. Значительное количество работ по изучению элементарных частиц было посвящено поискам, подразделению, обозначению и, если так можно выразиться, их каталогизированию. На рис. 17 приведены обозначения частиц, общепринятые в настоящее время.

Открытый в 1949 году группой Пауэлла τ -мезон теперь называют K -мезоном. Мы вернемся к этому специфическому вопросу в следующей главе.

π -Мезон и μ -мезон часто сокращенно называют пион и мюон. Иногда можно встретить сокращенное название каон для K -мезона. Но перспектива появления лямбдаонов и сигмаонов может заставить содрогнуться каждого.

Прежде чем рассмотреть все трудности и загадки, надежды и неудачи, возникавшие при исследовании элементарных частиц за последнее десятилетие, уместно дать краткое описание современных экспериментальных возможностей, в частности возможности генерации элементарных частиц в пучках ускорителей высоких энергий. Эти ускорители впервые появились в то же время (1932—1933 годы), когда начал резко возрастать интерес к изучению ядерной физики. Поистине удивителен тот факт, что за эти два года были созданы первый ускоритель Ван-де-Граафа, первый ускоритель Кокрофта — Уолтона и первый циклотрон. Это были сравнительно небольшие, но весьма остроумно созданные установки для ускорения частиц до нескольких миллионов электронвольт. Они проложили путь принципам конструирования гигантских ускорителей наших дней.

Как уже упоминалось, ускорители высоких энергий необходимы для изучения взаимодействий на малых расстояниях. Может возникнуть вопрос: почему же ускорители высоких энергий должны иметь такие большие размеры? Ответ прост: чтобы ускорять частицы до все более и более высоких энергий, необходимо воздействовать на них в течение все большего и большего периода времени. За большие периоды времени частица проходит большие расстояния. Если пытаться ограничиться малой областью пространства, так, чтобы частицы оставались во время цикла ускорения на постоянной орбите, то орбита должна быть большой, так как трудно отклонить частицы высокой энергии. Кроме того, «жесткость» траектории частицы увеличивается с увеличением ее энергии, поэтому попытки изучить все меньшие и меньшие расстояния взаимодействия приводят к необходимости создания ускорителей частиц все больших и больших размеров.

На рис. 19 показан общий вид космотрона Брукхейвенской национальной лаборатории, который может ускорять частицы до трех гигаэлектронвольт.

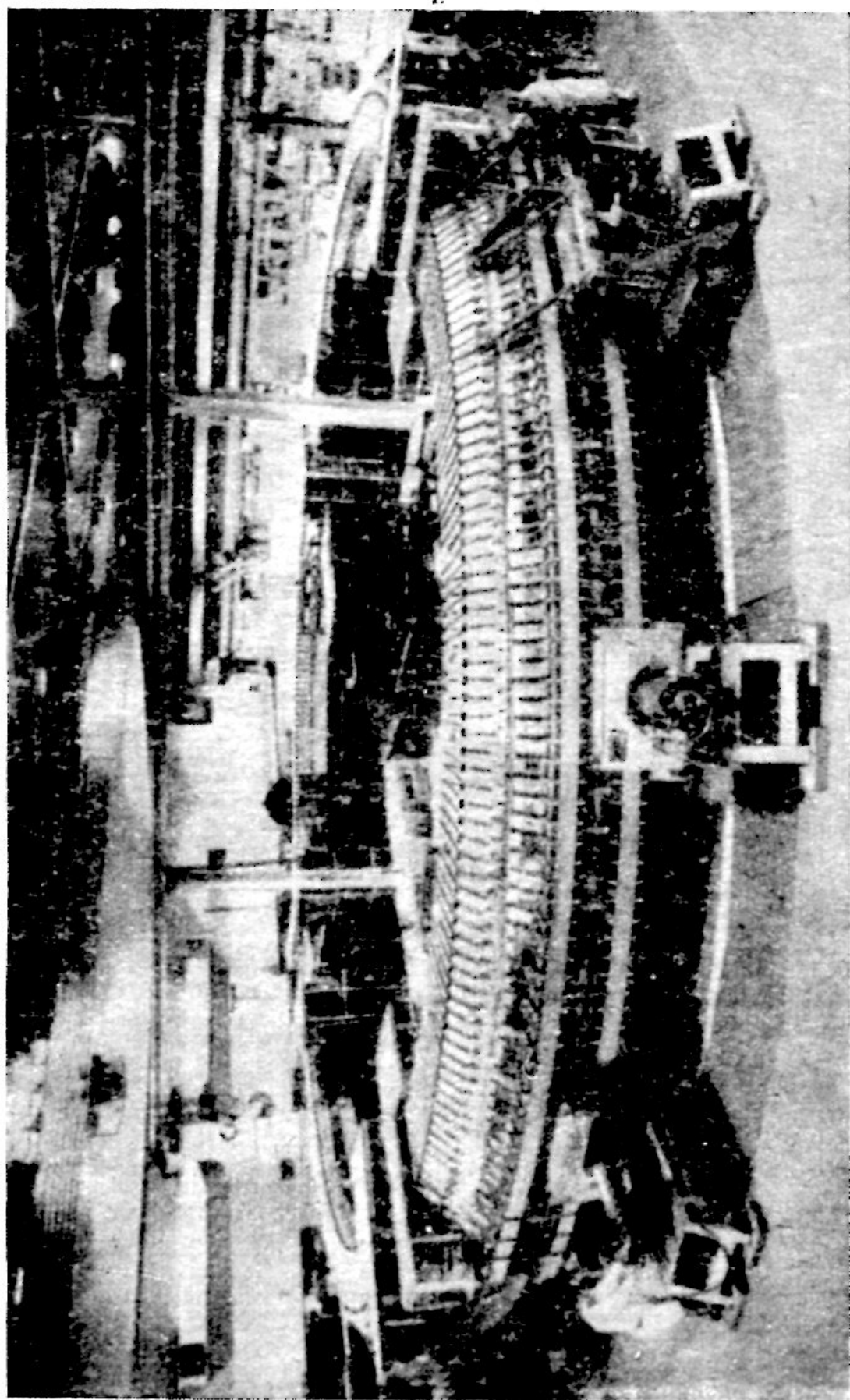


Рис. 19.

Протоны инжектируются в кольцеобразный ускоритель из горизонтального цилиндрического ускорителя Ван-де-Граафа, расположенного приблизительно в середине рисунка, за космотроном. Протоны движутся по круговой траектории примерно в течение 1 сек. При этом их периодически «подгоняют» в направлении движения, ускоряя до энергии три гигаэлектронвольта. Затем протоны «сбрасывают» на мишень, помещенную внутри ускорителя.

Частицы, родившиеся при соударении протонов с мишенью, направляют для столкновения со вторичными мишенями или непосредственно изучают с помощью детекторов различных типов.

На рис. 20 приведен аэрофотоснимок ускорителя на 30 Гэв, построенного также в Брукхейвенской национальной лаборатории. На снимке виден кольцевой тоннель ускорителя со зданием для инжектора у нижней части кольца и экспериментальным павильоном в верхней части. Создание ускорителя было завершено летом 1960 года.

Ускоритель почти такого же типа был пущен на полгода раньше в Женеве (Швейцария).

Кроме этих машин, имеются три ускорителя с энергией в области несколько гигаэлектронвольт: синхрофазотрон на 10 Гэв в Дубне под Москвой, бэватрон на 6 Гэв в Беркли (США) и ускоритель на 3 Гэв в Сакле под Парижем. Ускоритель на 3 Гэв с высокой интенсивностью пучка ускоренных частиц создается в Принстоне (США); он вступит в строй через год или два¹.

Так как размеры ускорителей подобного типа все увеличиваются и их стоимость непрерывно возрастает, возникает вопрос: где же предел²?

¹ В 1961 году в Советском Союзе в Институте теоретической и экспериментальной физики (Москва) введен в строй ускоритель протонов с максимальной энергией ускоренных частиц 7 Гэв. В Кембридже (США) недавно начал функционировать электронный кольцевой ускоритель с энергией пучка 6 Гэв. По данным на середину 1963 года ускоритель в Принстоне (США) к числу действующих еще не относится. — Прим. перев.

² В настоящее время в Советском Союзе строится ускоритель протонов на энергию 60—70 Гэв. Существуют проекты ускорителей на 300 и 1000 Гэв. — Прим. перев.

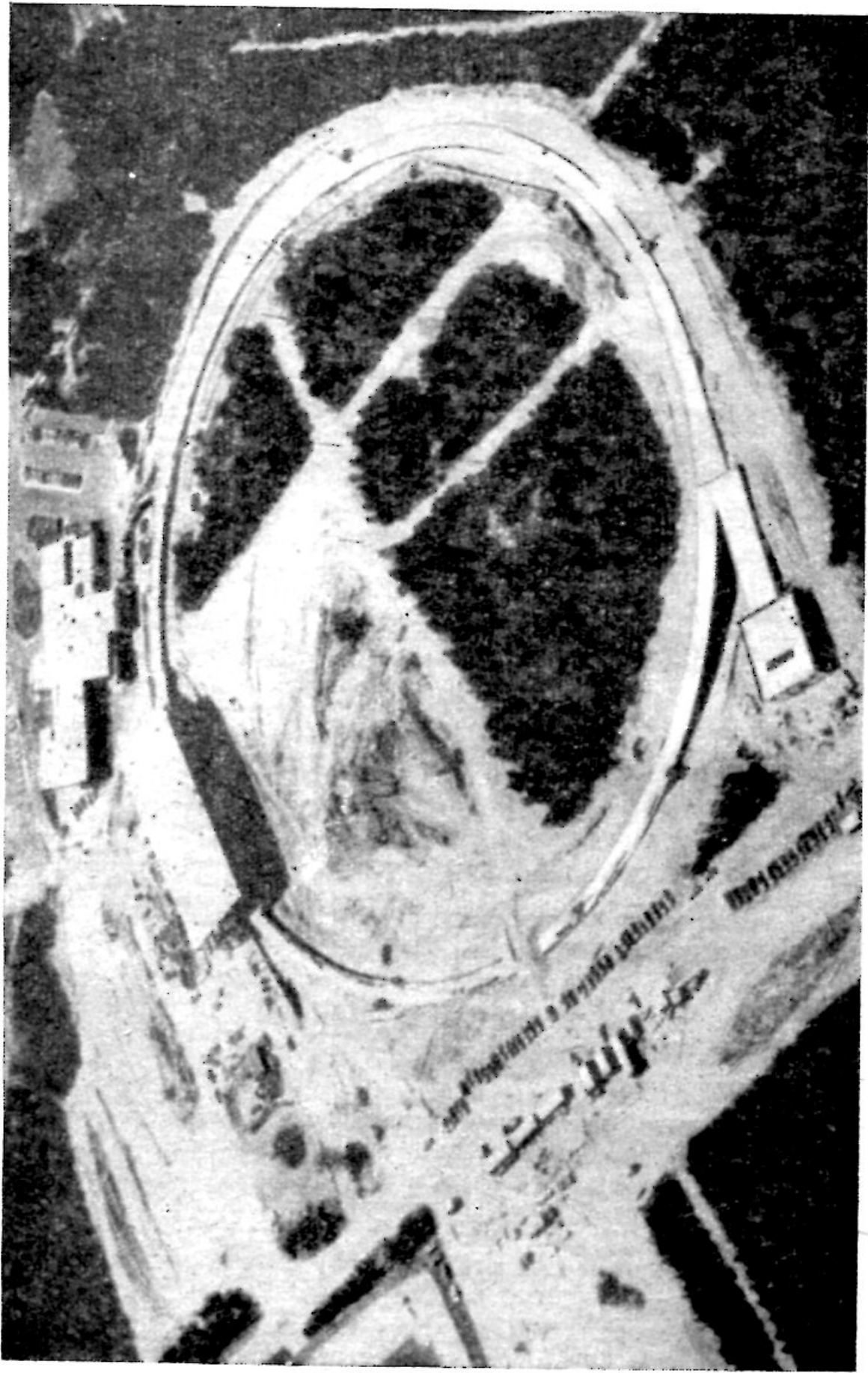


Рис. 20.

На рис. 21 приведен график роста энергий ускорителей за прошедшие годы. Экстраполяция данных этого графика в будущее является еще вопросом, подлежащим изучению.

Перейдем теперь к рассмотрению детекторов — приборов, с помощью которых регистрируются и анализируются события, вызываемые частицами высоких энергий. В ядерной физике используются три основных типа детекторов:

- 1) ионизационная камера, гейгеровский счетчик, сцинтилляционный счетчик, черенковский счетчик и др.;
- 2) камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера;
- 3) ядерные фотоэмульсии.

Мы уже видели, как выглядят треки заряженных частиц в фотоэмульсиях и камере Вильсона. Случай рождения антиламбда-частицы в пучке антипротонов (см. рис. 18) был зарегистрирован в пузырьковой камере. Аппаратура Чедвика, с помощью которой был обнаружен нейтрон, включала счетчик, который принадлежит к первому типу детекторов.

Методика регистрации элементарных частиц постоянно развивается и совершенствуется, и, как мы уже подчеркивали ранее, этот прогресс привел к новым открытиям и позволил углубить наше понимание природы элементарных частиц. Однако, к сожалению, размеры и цена детекторов, так же как и ускорителей, имеют тенденцию к увеличению. На рис. 22, например, изображена пультовая большой пузырьковой камеры в Беркли. Сравнение этого рисунка с простым детектором Чедвика (см. рис. 6) вызывает смешанное чувство восхищения технологическим прогрессом и скептицизма

ввиду перспективы быстрого роста размеров и сложности оборудования.

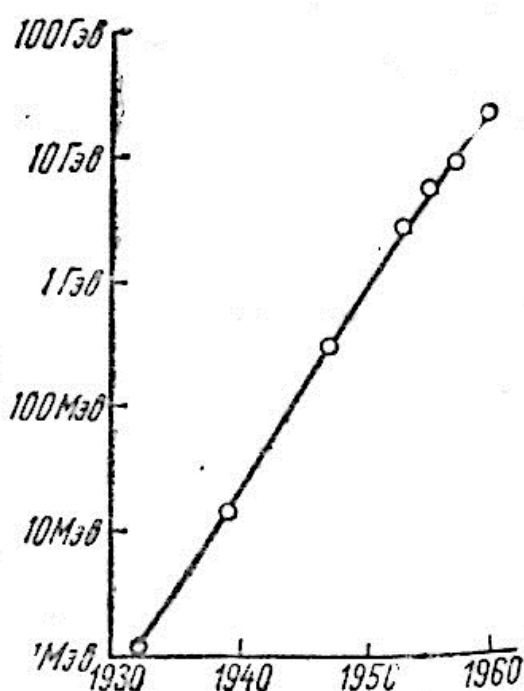


Рис. 21.

Эксплуатация огромных ускорителей и громоздких детекторов требует большого штата обслуживающего персонала. Следствием этого мы имеем случаи появления статей такого количества соавторов, как, например, приведенный на рис. 23. Неизбежная тенденция к увеличению размеров аппаратуры неблагоприятна еще и в том отношении, что она препятствует проявлению свободной индивидуальной инициативы. Это делает процесс исследования менее индивидуальным, менее захватывающим и контролируемым. Однако все это приходится принимать как неизбежный факт.

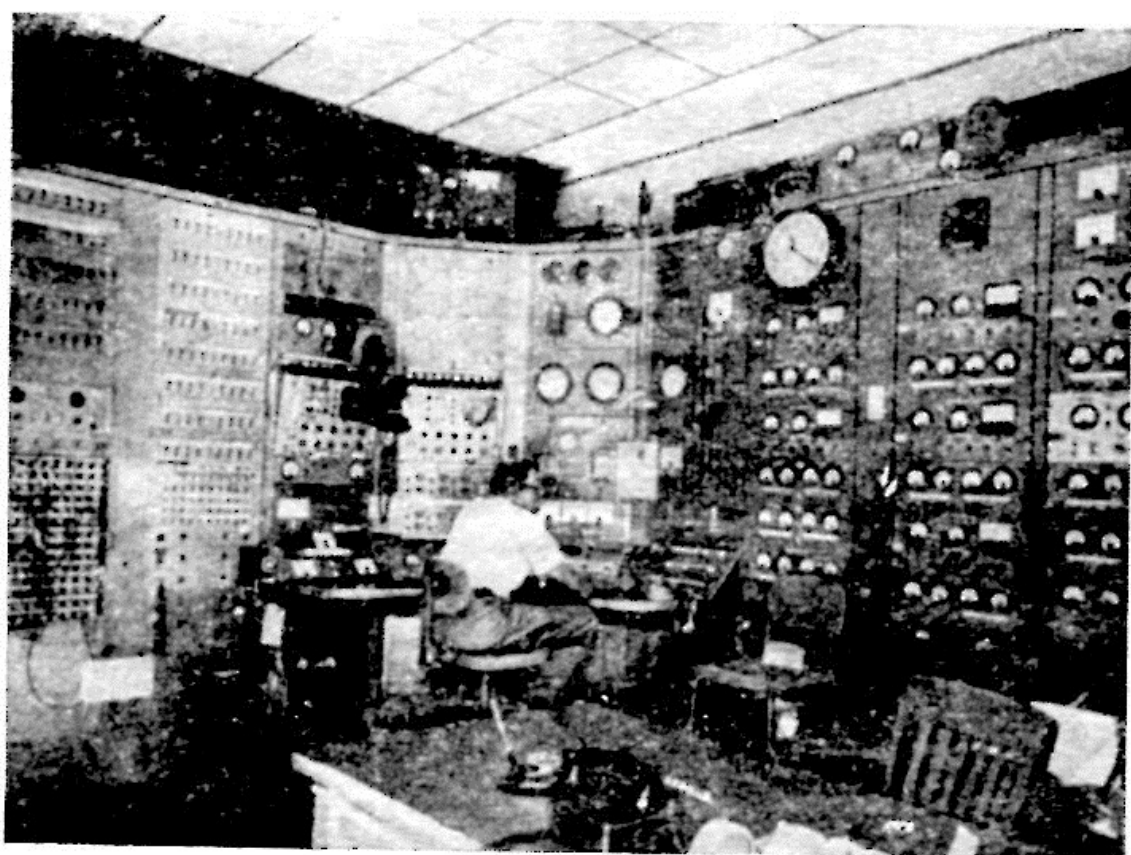


Рис. 22.

Будем же черпать мужество из сознания того, что, несмотря на свои размеры, ускорители, детекторы и, в конечном счете, сами эксперименты все же еще основываются на идеях, которые обладают той стройностью и контролируемостью, которые всегда делали исследования столь захватывающими и вдохновляющими. Прекрасной иллюстрацией сказанного является сама пузырьковая камера, которая обрела теперь гигантские размеры. Это хорошо можно себе представить уже по сложности пультной, изображенной на рис. 22.

On the Masses and Modes of Decay of Heavy Mesons
Produced by Cosmic Radiation.

(G-Stack Collaboration)

J. H. DAVIES, D. EVANS, P. E. FRANCOIS, M. W. FRIEDLANDER, R. HILLIER,
P. IRDALE, D. KREFF, M. C. K. MENON, D. H. PERKINS and C. F. POWELL

H. H. Wills Physical Laboratory - Bristol (Br)

J. BOGGILD, N. BRENE, P. H. FOWLER, J. HUGGER, W. C. G. GODDARD
and M. SCHARFF

Institut for Teoretisk Fysik - Aarhusen (Ko)

L. CRANE, R. H. W. JOHNSON and C. O'CALLAGHAN

Institut for Advanced Studies - Dublin (Dub)

F. ANDERSON, G. LAWLER and T. L. NEVIN

University College - Dublin (DUBL)

G. ALVANI, A. BONETTI, M. DI CORAYO, C. DEWORTH, R. LEVI SETTI,
A. MILONETTI, G. OCCIALINI (*), L. SCARSI and G. TOMASINI (**)

(*) *Istituto di Fisica dell'Università - Genova*

Istituto di Scienze Fisiche dell'Università - Milano (Mi)

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Milano

(**) *Institut International de Physique Nucléaire - Université Libre - Bruxelles*

M. CEPARELLI, M. GRILLI, M. MARLISI, G. SALANDIN and B. SECHI

Istituto di Fisica dell'Università - Padova

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Padova (Pd)

Received 2 October 1962

Принцип, на котором основана работа пузырьковой камеры, во многом подобен принципу работы камеры

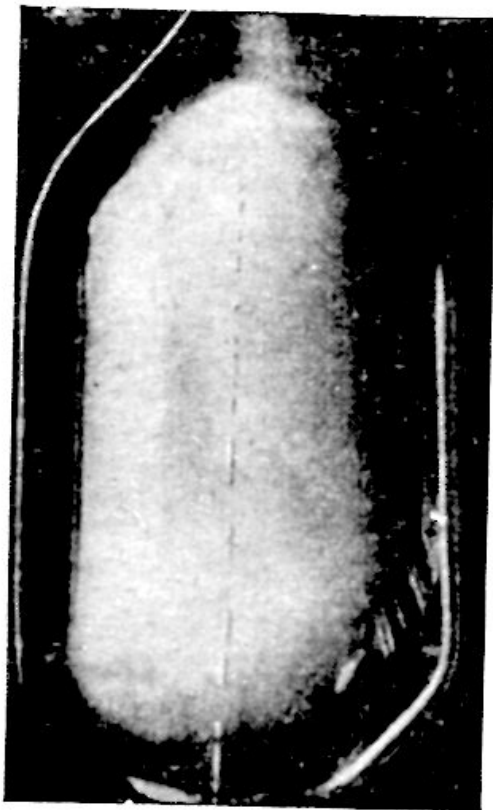


Рис. 24.

Вильсона. Жидкость, наполняющая рабочий объем пузырьковой камеры, перегревается и становится способной к вскипанию. При этом пузырьки образуются в основном вдоль пути, пройденного заряженной частицей в местах сильной ионизации. На рис. 24 приведена фотография первой пузырьковой камеры, сделанной Д. А. Глезером, в которой виден состоящий из цепочки пузырьков трек космического μ -мезона. Длина этой камеры была всего несколько сантиметров. Существует легенда, что мысль о пузырьковой камере впервые зародилась у Глезера, когда он наблюдал рост

пузырьков газа на неровностях стенок пивной бутылки. Хотя эта легенда может быть и неверна, она все же хорошо иллюстрирует нашу точку зрения.





Глава 3

Исследования, выполненные во многих лабораториях мира, позволили получить много интересных данных о свойствах элементарных частиц.

Во всех областях исследований при столкновении с проблемами, которые совершенно не связаны со сферой привычных понятий, часто оказывается трудным сформулировать саму постановку вопроса. Для всякого продвижения вперед требуются, конечно, большие творческие способности и высокая научная подготовка. Но что еще более важно, кроме всего этого необходима самостоятельность суждений, которая может вырасти только из уверенного использования существующих знаний и настойчивости и смелости в поисках нового. Последнего достигнуть не легко, — мы не должны ожидать этого, как разумеющегося.

В статье, посвященной семидесятилетию Эйнштейна, Филипп Франк описывает, как он однажды рассказал Эйнштейну об одном физике, исследовательская работа которого протекала с весьма малым успехом. Этот физик упорно занимался проблемами, разрешение которых оказывалось связано с огромными трудностями. Он всесторонне анализировал их, но это приводило его только к все большему и большему трудностям; многие из его коллег были об этом физике не очень высокого мнения. Эйнштейн, как пишет Франк, ответил: «Я восхищаюсь такими людьми. Я не могу терпеть ученых, которые берут деревянную доску, находят в ней самое тонкое место и просверливают большое количество дыр там, где сверлить легче всего».

Действительно, в большинстве случаев упорная работа в совершенно новых областях исследований приводит только к выявлению еще больших трудностей или вооб-

ше заходит в тупик. Рассмотрим, однако, внимательнее один из этих тупиков, а именно идеи Томсона о строении атома, о которых теперь мы можем судить с объективностью, даваемой шестьюдесятью годами их позднейшего развития.

Напомним, что после открытия электрона Томсон высказал предположение, что атом построен по схеме, изображенной на рис. 3. Электроны занимают положения равновесия *A*, *B* и *C*, около которых они колеблются в случае возмущения. Измерения рассеяния рентгеновских лучей различными элементами позволили Томсону рассчитать число электронов в атомах различных химических элементов и сделать удивительно правильный вывод. Томсон увидел, что электронная структура атома дает огромные возможности объяснения химических свойств элементов.

Затем Томсон задался вопросом: какова же должна быть структура атома с одним электроном, с двумя электронами, с тремя электронами и т. д.? На рис. 3 показано, что три электрона должны быть расположены в вершинах равностороннего треугольника внутри однородно распределенного по сфере электрического заряда. Интуитивно чувствуется, что для четырех электронов положения равновесия — это вершины правильного четырехугольника. Однако при рассмотрении атомов с большим числом электронов оказывается, что задача по нахождению положения равновесия электронов, хотя и ставится математически точно, становится трудно разрешимой. Томсон поэтому прибег к помощи следующего экспериментального устройства, которое могло служить механической аналогией структуры его модели атома. Некоторое количество намагниченных стрелок укрепляли на пробках и пускали плавать в воду, как изображено на рис. 25. Оси этих магнитных стрелок были параллельны и их полюса располагались так, что между стрелками действовали силы отталкивания, которые были фактически обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, как и силы отталкивания между электронами атома. Чтобы искусственно воспроизвести влияние однородного положительного заряда атома, который удерживает электроны в их положениях равновесия, Томсон с помощью электромагнита, расположенного высоко над поверхностью воды, создал в этой области

магнитное поле. Легко показать, что горизонтальная компонента силы, с которой магнитное поле электромагнита действует на каждую стрелку, приблизительно пропорциональна расстоянию от стрелки до точки поверхности, расположенной прямо под магнитом.

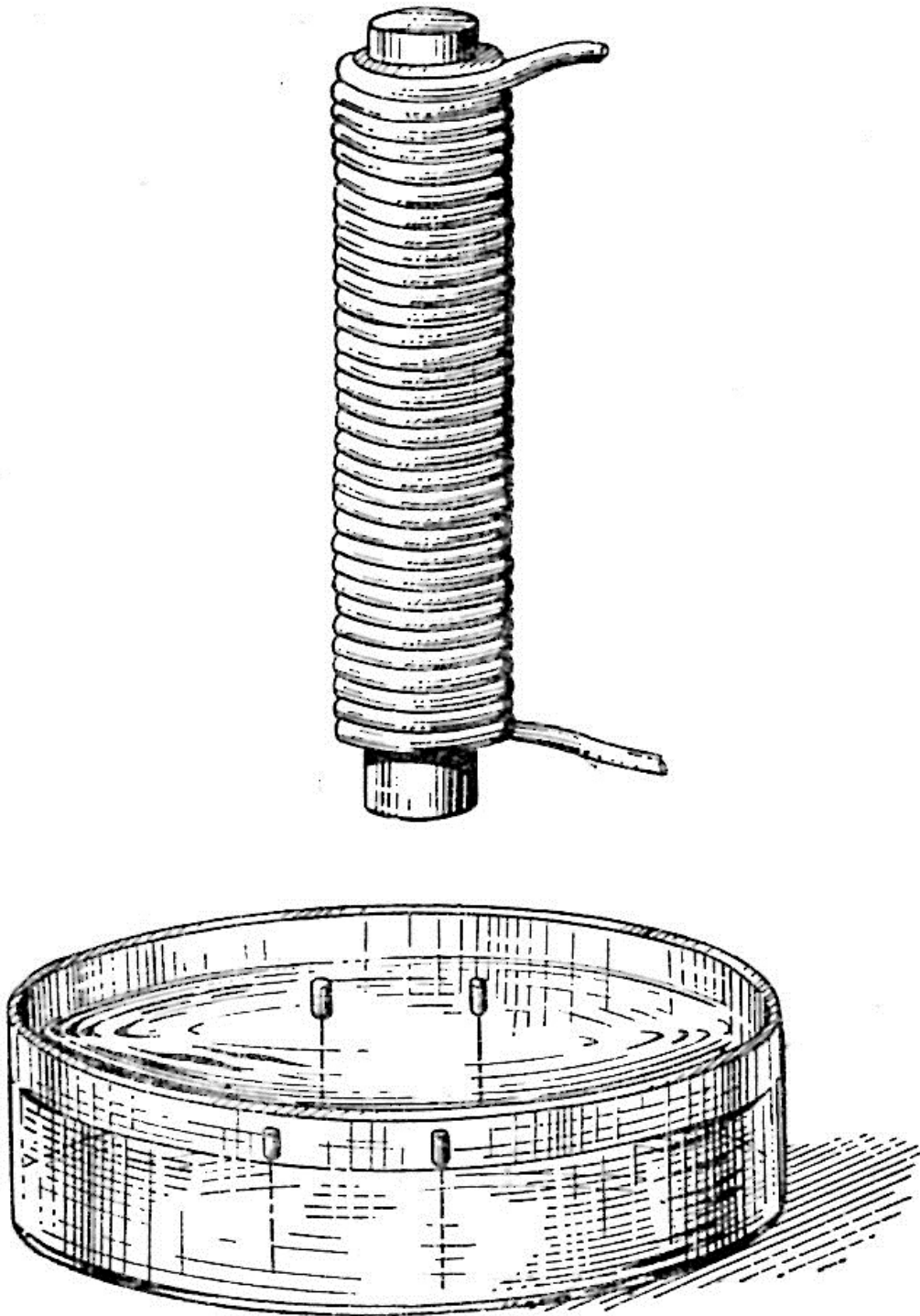


Рис. 25.

В модели атома Томсона сила действия положительного равномерно распределенного заряда на электроны подчиняется такому же закону. Равновесная конфигурация, образованная магнитными стрелками, яв-

ляется поэтому приблизительным подобием электронной конфигурации в модели атома Томсона для двумерного случая. На рис. 26 приведены найденные Томсоном конфигурации из магнитных стрелок.

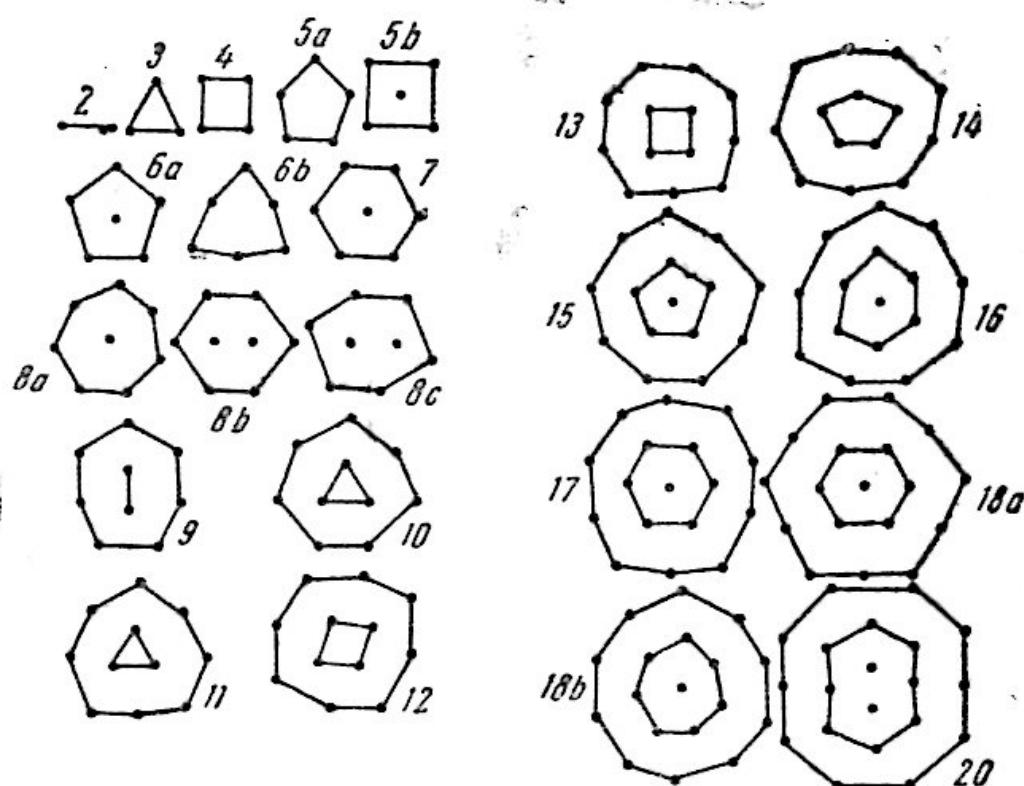


Рис. 26.

Интересно отметить, что при наличии большого количества стрелок они образуют конфигурации в виде колец. В табл. 2 представлено протабулированное Томсоном число стрелок в каждом кольце. Само собой напрашивается сравнение этой таблицы с уже известной тогда периодической таблицей элементов Д. И. Менделеева, что привело Томсона и его студентов к многочисленным исследованиям таких конфигураций и частот колебания электронов, размещенных в равновесных положениях. Известно, что эти исследования велись в ложном направлении. Но мы знаем также, что они не были напрасны: как уже отмечалось, именно из подобных рассмотрений выросло в конечном счете правильное представление об атоме.

Из числа проблем, возникших в связи с изучением элементарных частиц в последнее десятилетие, постараемся подробнее рассмотреть следующие четыре. Первая из них касается некоторых экспериментальных данных, полученных в 1951—1952 годах и очень озадачивших тогда ученых. К этому времени было уже известно,

Таблица 2

1-е кольцо	2-е кольцо	3-е кольцо	4-е кольцо	5-е кольцо
1; 5	2; 6	3; 7	4; 8	5; 9
1; 6	2; 7	3; 8	4; 9	—
1; 7	—	—	—	—
1; 5; 9	2; 7; 10	3; 7; 10	4; 8; 12	5; 9; 12
1; 6; 9	2; 8; 10	3; 7; 11	4; 8; 13	5; 9; 13
1; 6; 10	2; 7; 11	3; 8; 10	4; 9; 12	—
1; 6; 11	—	3; 8; 11	4; 9; 13	—
—	—	3; 8; 12	—	—
—	—	3; 8; 13	—	—
1; 5; 9; 12	2; 7; 10; 15	3; 7; 12; 13	4; 9; 13; 14	—
1; 5; 9; 13	2; 7; 12; 14	3; 7; 12; 14	4; 9; 13; 15	—
1; 6; 9; 12	—	3; 7; 13; 14	4; 9; 14; 15	—
1; 6; 10; 12	—	3; 7; 13; 15	—	—
1; 6; 10; 13	—	—	—	—
1; 6; 11; 12	—	—	—	—
1; 6; 11; 13	—	—	—	—
1; 6; 11; 14	—	—	—	—
1; 6; 11; 15	—	—	—	—

что так называемые странные частицы¹ в большом количестве рождаются при столкновениях частиц высоких энергий. Так как элементарные частицы имеют размеры порядка 10^{-13} см, а относительная скорость частиц высоких энергий близка к скорости света, а именно $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, время их взаимодействия должно быть порядка 10^{-23} сек. Величина 10^{-23} сек во многих отноше-

¹ Странными частицами был назван ряд тяжелых нестабильных частиц, открытых за последние 15 лет (см. стр. 30, 54). К ним относятся Σ^- -гипероны, Σ^{+0} -гипероны, Λ -гиперон, K^{+0} -мезоны и соответствующие им античастицы. Некоторые свойства их рождения и распадов были объяснены феноменологически с помощью нового квантового числа — «странность» (см. табл. 4). Это название отражает степень понимания физиками данного явления. — Прим. перев.

ниях является единицей временного масштаба явлений подобного рода. В то время было уже известно, что странные частицы нестабильны и распадаются на частицы других видов. Среднее время жизни странной частицы может быть измерено с помощью различных мето-

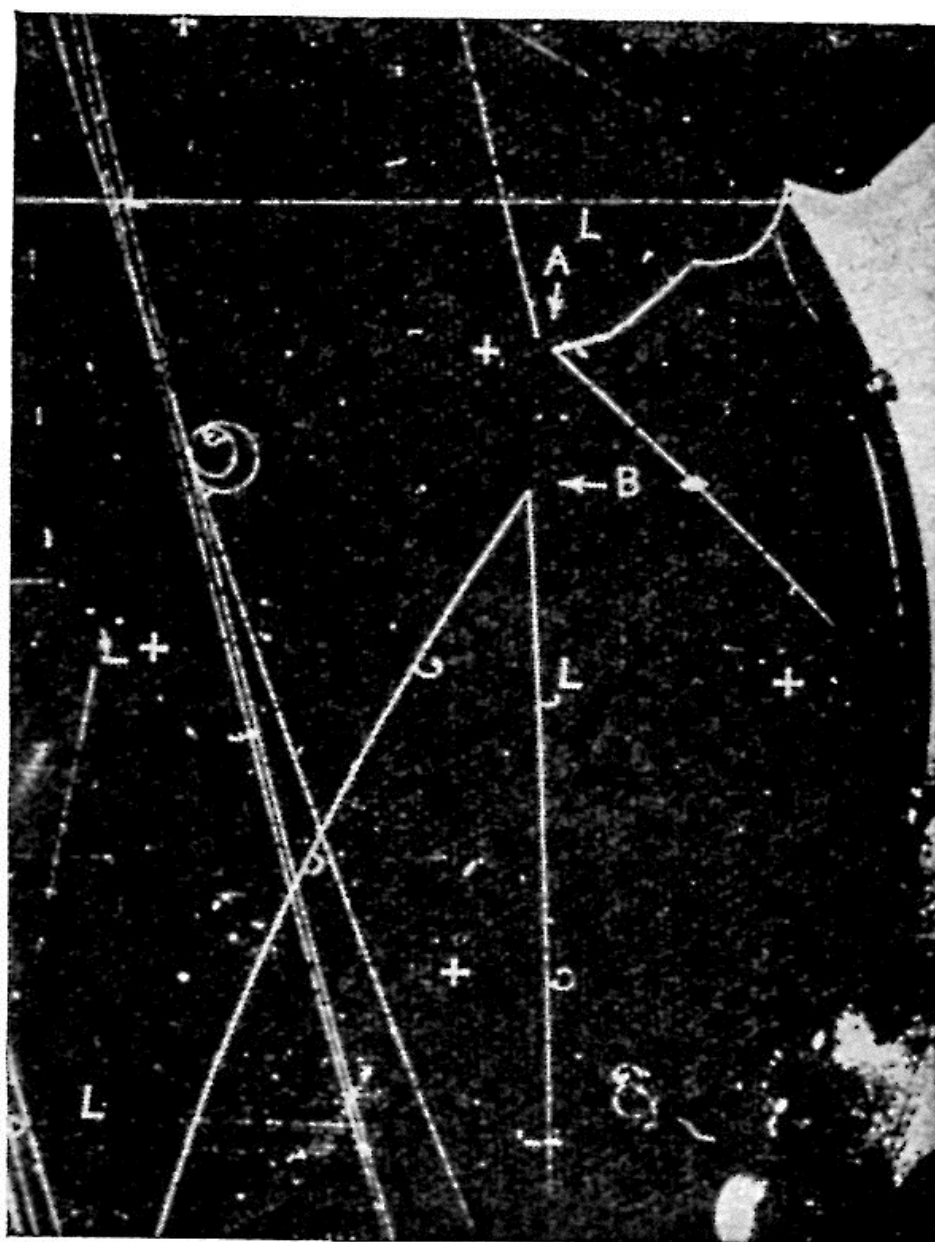


Рис. 27.

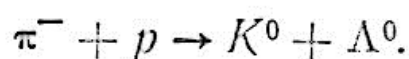
дов. Например, на рис. 27 приведен случай рождения Λ -частицы в точке A . Эта частица нейтральна, и поэтому в камере она не оставляет видимого следа; о ней можно узнать только по ее распаду в точке B на протон p и π^- -мезон. Расстояние между точками рождения и распада Λ -частицы легко измерить. Скорость Λ -частицы можно рассчитать, исходя из скоростей продуктов ее рас-

пада, которые, в свою очередь, можно легко определить по кривизне их треков. После этого время жизни Λ -частицы элементарно находится по длине AB и скорости этой частицы. Время жизни Λ -частицы, усредненное по многим таким измерениям, было найдено равным 10^{-10} сек. Это очень короткое время с обычной точки зрения, но оно чрезвычайно велико, если исходить из масштабной единицы 10^{-23} сек, о которой говорилось ранее.

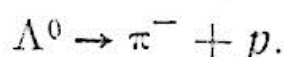
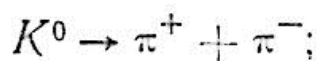
Таким образом, странные частицы рождаются за время порядка 10^{-23} сек и распадаются через 10^{-10} сек, т. е. за время, большее единицы ядерного масштаба времени в 10^{13} раз. Иными словами, процесс рождения явно обусловлен силами, в 10^{13} раз большими, чем силы процесса распада. Так как оба процесса, казалось бы, включают одинаковые частицы, такая исключительная разница скоростей или силы процессов была загадочной.

Эту загадку решили А. Пайс и И. Намбу, которые предположили, что странные частицы рождаются группами, а не одиночно, и при этом они сильно взаимодействуют друг с другом и с остальными частицами, участвующими в этом процессе. Но в процессах с одной только странной частицей, например в процессе распада, частицы взаимодействуют слабо. Эта идея процессов «ассоциативного рождения» в дальнейшем получила детальное экспериментальное подтверждение.

На рис. 28 изображен один из первых случаев ассоциативного рождения странных частиц, полученных в лабораторных условиях. Последовательность взаимодействий, запечатленных на двух стереоснимках рис. 28, такова: вошедший π^- -мезон, оставивший след AB , столкнулся с протоном в точке B , в результате чего образовались две странные частицы — K^0 -мезон и Λ^0 -частица (сильный процесс):



Затем K^0 -мезон и Λ^0 -частица распались соответственно в точках C и D (слабые процессы):



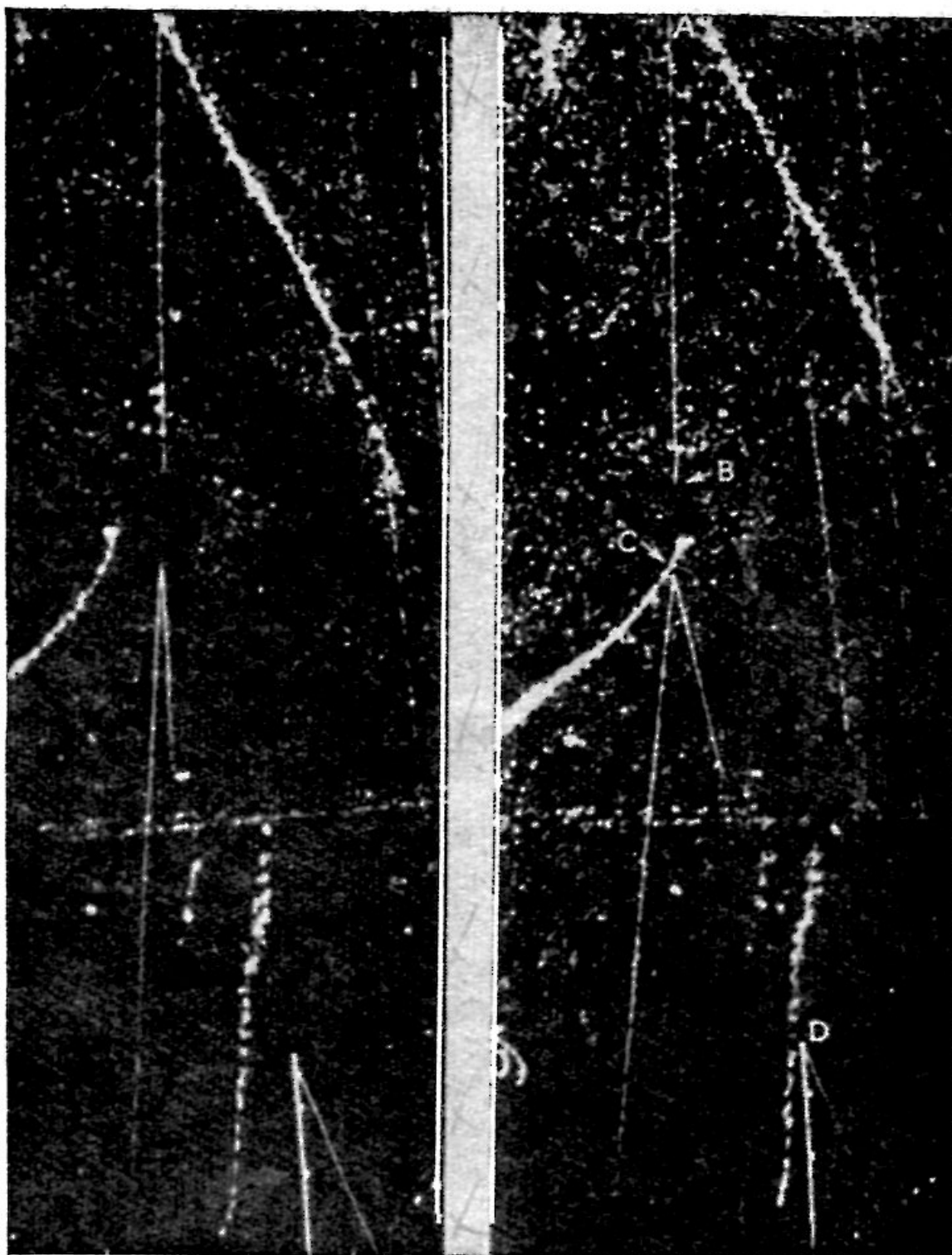


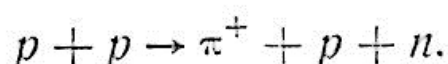
Рис. 28.

Теперь мы подошли ко второй проблеме — проблеме классификации сил взаимодействий. Мы уже видели, что ассоциативное рождение странных частиц вызывается сильными взаимодействиями, а распад этих частиц — слабыми взаимодействиями. Такая классификация взаимодействий на сильные и слабые впервые дискутировалась в 1948—1949 годах и, как стало известно теперь, применима ко всем известным случаям взаимодействий. Окончательная классификация взаимодействий может быть представлена в табл. 3.

Таблица 3

Взаимодействия	Сила
сильные (ядерные взаимодействия)	1
электромагнитные	10^{-2}
слабые (взаимодействия распада)	10^{-13}
гравитационные	10^{-38}

В этой таблице к сильным взаимодействиям отнесены все взаимодействия, приводящие к ассоциативному рождению странных частиц, вызывающие силы, связывающие вместе частицы в атомных ядрах и ответственные за различные реакции с участием π -мезонов, такие, как



Взаимодействия, приведенные в третьей строке таблицы, вызывают распады нестабильных частиц, протабулированные в табл. 4. Отношение силы взаимодействий первого и третьего видов равно 10^{13} , как уже указывалось ранее, и приведено в колонке «Сила».

Описывая открытие процесса распада $\pi \rightarrow \mu$, мы упоминали, что до этого открытия в оценках сил взаимодействия мезонов с веществом существовало значительное расхождение, примерно на коэффициент 10^{13} . Это и был как раз тот коэффициент 10^{13} , который отличает сильные взаимодействия от слабых. π -Мезоны сильно взаимодействуют с атомными ядрами, тогда как μ -мезоны, обнаруженные в экспериментах Конверси, Панчини и Пицциони, взаимодействуют с атомными ядрами слабо.

В двух последних строках табл. 3 приведены более знакомые нам виды взаимодействий. Наиболее понятны

Элементарные частицы и их свойства

Частица (обозначение и название)	Электрический заряд	Масса, $M_{\text{эв}}$	Спин	Странность	Среднее время жизни, сек	Обычные продукты распада	Античастицы
Барions							
E^- (кси-минус)	$-e$	1319	1/2	-2	2×10^{-10}	$\pi^- + \Delta$	\bar{E}^+ (антикси-плюс)
E^0 (кси-нуль)	0	~ 1311	1/2	-2	2×10^{10}	$\pi^0 + \Delta$	\bar{E}^0 (антикси-нуль)
Σ^- (сигма-минус)	$-e$	1196	1/2	-1	$1,6 \times 10^{-10}$	$\pi^- + n$	$\bar{\Sigma}^+$ (антисигма-плюс)
Σ^0 (сигма-нуль)	0	1192	1/2	-1	$\sim 10^{-20}$	$\gamma + \Delta$	$\bar{\Sigma}^0$ (антисигма-нуль)
Σ^+ (сигма-плюс)	$+e$	1190	1/2	-1	$0,8 \times 10^{-10}$	$\left\{ \begin{array}{l} \pi^+ + n \text{ или} \\ \pi^0 + p \end{array} \right.$	$\bar{\Sigma}^-$ (антисигма-минус)
Δ (лямбда)	0	1115	1/2	-1	$2,5 \times 10^{-10}$	$\left\{ \begin{array}{l} \pi^- + p \text{ или} \\ \pi^0 + n \end{array} \right.$	$\bar{\Delta}$ (антилямбда)
n (нейтрон)	0	940	1/2	0	$1,0 \times 10^3$	$e^- + \bar{\nu} + p$	\bar{n} (антинейтрон)
p (протон)	$+e$	938	1/2	0	Стабильна		\bar{p} (антипротон)
Бозоны							
K^0 (К-нуль)	0	498	0	+1	(См. примечание 4)	(См. примечание 4)	\bar{K}^0 (анти-К-нуль)

K^+ (K-плюс)	$+e$	494	0	$+1$	$1,2 \times 10^{-8}$	$\left\{ \begin{array}{l} \mu^+ + \nu, \\ \pi^+ + \pi^0 \text{ или} \\ \text{другие.} \end{array} \right.$	K^- (K-минус)
π^+ (пи-плюс)	$+e$	140	0	0	$2,6 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$	π^- (пи-минус)
π^0 (пи-нуль)	0	135	0	0	$< 10^{-15}$	$\gamma + \bar{\gamma}$	Идентична частице
γ (фотон)	0	0	1	0	Стабильна		То же
Лептоны							
μ^- (мю-минус)	$-e$	106	$1/2$	Неопределенна	$2,26 \times 10^{-6}$	$e^- + \nu + \bar{\nu}$	μ^+ (мю-плюс)
e^- (электрон)	$-e$	0,511	$1/2$	»	Стабильна		e^+ (позитрон)
ν (нейтрино)	0	0	$1/2$	»	»		$\bar{\nu}$ (антинейтрино)

1 $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$ электростатических единиц электричества.

2 $Mэв$ — миллион электронвольт, $1 Mэв = 1,6 \cdot 10^{-6}$ эрг.

3 Спин — угловой момент в единицах \hbar ($\hbar = 1,05 \times 10^{-27}$ эрг·сек).

4 K^0 и \bar{K}^0 распадаются на те же самые частицы, т.е. на $\pi^+ + \pi^-$; $\pi^0 + \pi^0$; $\pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}$. Оба они имеют два средних времени жизни: $1 \cdot 10^{-10}$ и $6 \cdot 10^{-8}$ сек. Все остальные приведенные в таблице частицы имеют только одно среднее время жизни.

5 Частица и ее античастица имеют одинаковые массы, спины и время жизни. Они имеют равные, но противоположные по знаку заряды, странности. Продукты распада античастицы являются античастицами продуктов распада частицы. Например, $\Xi^+ \rightarrow \pi^+ + \bar{\Lambda}^0$. Сравните, однако, это со сноской 4.

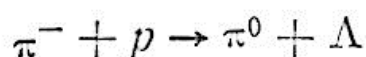
нам, благодаря теориям Фарадея и Максвелла, электромагнитные взаимодействия. Гравитационные взаимодействия, хотя они и очень важны при взаимодействии огромных тел, таких, как Солнце, Земля, в случае элементарных частиц чрезвычайно слабы (см. табл. 3). Поэтому гравитационные взаимодействия пока не являлись предметом изучения теории элементарных частиц, хотя некоторые физики высказывают соображения, что для создания единой картины строения материи необходимо учесть именно эти взаимодействия.

Следует подчеркнуть, что изложенная классификация взаимодействий дает очень важную общую ориентацию при изучении элементарных частиц. Она позволяет всегда четко отделить эти четыре вида взаимодействий, несмотря на всю сложность их проявлений. Глубокий и трудный вопрос о природе такого четкого разделения и, в особенности, о причинах приблизительного равенства силы многих совершенно несвязанных слабых взаимодействий остается еще нерешенным.

Третья проблема касается явлений, объединяемых понятием симметрии по изотопическому спину. Не вдаваясь в подробные объяснения смысла этой симметрии, обратимся снова к рис. 17, на котором изображены все элементарные частицы. Можно заметить, что частицы весьма примечательным образом группируются в «мультиплеты», или группы с различными зарядами, но с почти одинаковой массой. Из этих мультиплетов прежде всего стал известным мультиплет, образованный нейтроном и протоном. Тот факт, что нейтрон и протон, за исключением электрического заряда, во всем подобны, проявляет себя уже в тенденции ядер иметь одинаковое количество нейтронов и протонов. Этот факт был замечен в начале 30-х годов, и с течением времени он получил детальное экспериментальное подтверждение. В том числе было обнаружено, что и вновь открытые частицы также группируются в мультиплеты. Выяснение внутренних причин этой симметрии является другой поразительной и интригующей проблемой, все попытки разрешить которую были до сих пор неудачны.

Явления ассоциативного рождения и симметрии по изотопическому спину оказались связанными, как это было указано в 1953 году независимо Гелл-Маном и К. Нишижимой. Они нашли, что центр заряда мультиплета

странных частиц может быть смещен относительно центра заряда обычных частиц, например, Λ -частица смещена на половину единицы заряда влево относительно центра заряда мультиплета нейтрон — протон. Была введена новая величина, названная странностью, значения которой равны такому удвоенному смещению. В табл. 4 приведены значения странностей всех элементарных частиц. Можно показать, что симметрия по изотопическому спину подразумевает сохранение в сильных взаимодействиях суммы странностей частиц. Это правило названо законом сохранения странности. Оно стало одной из самых плодотворных концепций в области физики элементарных частиц. Например, в процессе



полная сумма странностей частиц до реакции равна 0 (согласно данным табл. 4). Полная же сумма странностей частиц после реакции равна 1. Согласно закону сохранения странности, этот процесс не может быть сильным взаимодействием, что находится в полном согласии с экспериментом. С другой стороны, в процессе $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$, изображенном на рис. 28, странность сохраняется. Закон сохранения странности предсказывает, что этот процесс сильный, и это опять находится в согласии с экспериментальными результатами.

Четвертая проблема, которую мы хотим обсудить в заключение, касается общих принципов симметрии, частным случаем которых является рассмотренная выше симметрия по изотопическому спину. Слово «симметрия» часто используется в повседневном языке. Герман Вейль в своих Вэнаксемских лекциях в 1951 году дал прекрасное описание понятия симметрии в искусстве, природе и математике. Рис. 29 и 30, являющиеся примерами искусственной и природной симметрии, взяты из иллюстраций к книге Г. Вейля «Симметрия», в основу которой положен курс его лекций. На рис. 29 изображен решетчатый орнамент китайского окна, а на рис. 30 приведены примеры симметрии в царстве живых организмов.

Концепция симметрии в физике проистекает непосредственно из наших повседневных представлений. Уже в классической физике установление симметрий в динамических проблемах позволяет сделать важные заключения. Например, круговая орбита электронов в атоме во-

дорода является следствием симметрии кулоновских сил взаимодействия электрона с ядром. Симметрия в этом случае означает, что силы имеют одинаковую величину по всем направлениям. Принципы симметрии, подобные этому, играют существенную роль в классической физике, но в квантовой механике сфера их применения значительно расширяется и значение сильно возрастает. Например, при отыскании симметрий существенными становятся не только круговые, но и эллиптические орбиты.

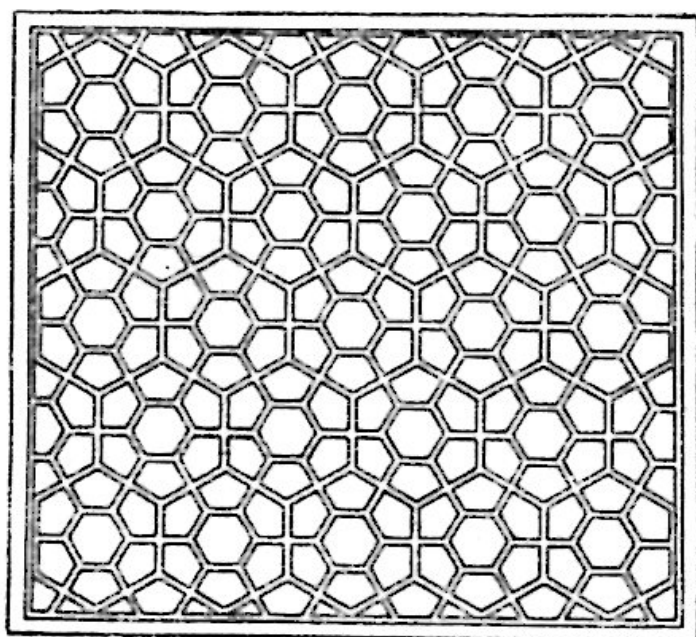


Рис. 29.

На самом деле едва ли возможно переоценить важность принципов симметрии в квантовой механике. Приведем хотя бы два следующих примера: общая структура периодической таблицы элементов является по существу прямым и красивым следствием упомянутой выше симметрии, а именно изотропии кулоновских сил; существование античастиц, как уже отмечалось, было предсказано Дираком в его теории, основанной на принципе релятивистской симметрии. В обоих этих случаях, как и в других примерах, природа, кажется, воспользовалась простым математическим представлением законов симметрии. Внутренняя стройность и удивительное совершенство математических обоснований, с одной стороны, и глубина и сложность физических следствий, с другой, всегда весьма обнадеживают физиков. Это позволяет надеяться, что природа следует законам, которые можно познать.

Один из принципов симметрии, а именно симметрия между правым и левым, дискутировался с древних времен. Вопрос о том, обладает ли природа подобной симметрией, был предметом длительных дебатов философов прошлого. В повседневной жизни правое и левое, конеч-

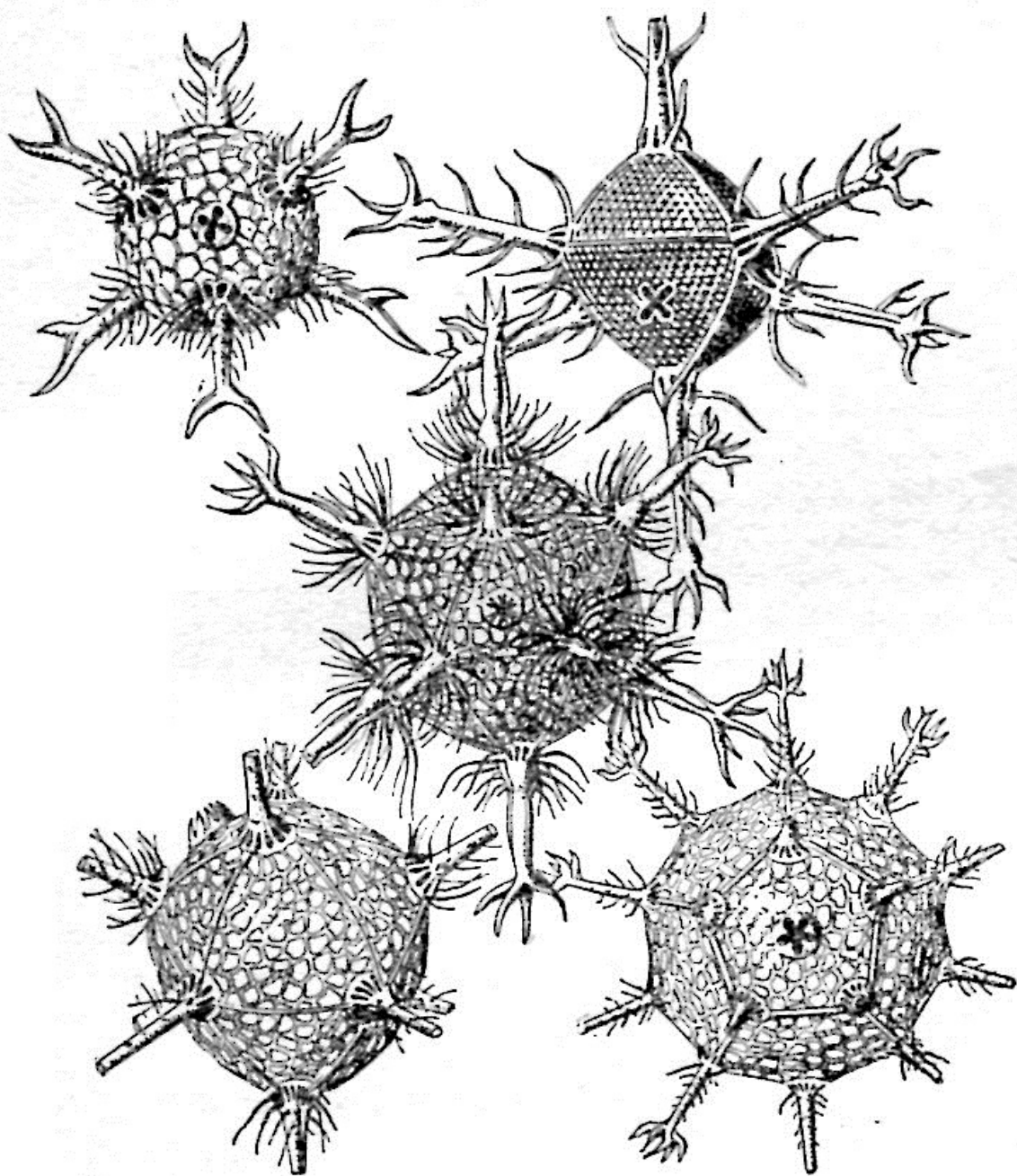


Рис. 30.

но, различны. В биологических явлениях, как это стало известно в результате работы Пастера в 1848 году, органические соединения часто возникают только в форме одного из двух видов, причем оба эти вида образуются в неорганических процессах и являются взаимными зеркальными отображениями. В течение некоторого времени Пастер развивал идею, что способность производить

только одну из двух этих форм присуща исключительно живой материи [9].

Законы физики, однако, всегда показывали полную симметрию правого и левого. Эта симметрия в квантовой механике может быть сформулирована как закон сохранения, названный законом сохранения четности, который полностью идентичен принципу симметрии право—лево.

Первая формулировка концепции четности была высказана Е. Вигнером. Она быстро стала очень полезной при анализе атомного спектра. Эта концепция была позднее перенесена на явления ядерной физики и физики мезонов и странных частиц.

Идея четности в ядерной физике скоро стала так же привычна, как и в атомной физике; к настоящему времени уже рассмотрена и определена экспериментально также и четность мезонов.

Подобное развитие понятия четности и закона сохранения четности повсеместно оказалось чрезвычайно плодотворным, и этот успех, в свою очередь, рассматривался как подтверждение существования симметрии право—лево в физических законах.

Однако в 1954—1956 годах проявился парадокс, названный проблемой θ — τ -мезонов. Теперь известно, что θ - и τ -мезон — это одна и та же частица, называемая обычно K -мезоном. Но в те годы было лишь известно, что существуют частицы, распадающиеся на два π -мезона, и частицы, распадающиеся на три π -мезона. Они были названы соответственно θ - и τ -мезонами, причем название τ -мезон дал Пауэлл в 1949 году. С течением времени эксперименты становились все более и более точными и все яснее вырисовывалось одно загадочное явление.

С одной стороны, было очевидно, что θ - и τ -частицы обладают почти одинаковыми массами с точностью до очень малых ошибок. Было также установлено, что они и ведут себя одинаково. Все выглядело так, словно θ и τ действительно одна частица, распадающаяся двумя различными способами. С другой стороны, более точные эксперименты показали, что θ - и τ -частицы имеют различную четность и поэтому не могут быть одной и той же частицей.

Решение загадки было найдено в изменении понятия симметрии лево—право. Летом 1956 года Т. Д. Ли и автор исследовали все существовавшие к тому времени экс-

периментальные обоснования этой концепции и пришли к заключению, что, вопреки общему убеждению, для слабых взаимодействий в действительности не существует экспериментальных доказательств симметрии лево—право. Если симметрия лево—право для слабых взаимодействий не соблюдается, концепция четности неприменима к механизму распада θ - и τ -частиц, и они могут быть одной и той же частицей. Как мы теперь знаем, так и есть в действительности.

Для подтверждения этого возможного способа разрешения проблемы θ — τ -мезонов необходимо было проверить экспериментально, нарушается ли симметрия лево—право при слабых взаимодействиях. Принцип проверки очень прост: создаются два экспериментальных не идентичных устройства, представляющих собой взаимно зеркальные отображения¹. В них должны происходить процессы, обусловленные слабыми взаимодействиями. Затем проверяется, одинаковы ли результаты слабых взаимодействий в этих двух установках. Если они не одинаковы, то это будет служить однозначным доказательством того, что в данном эксперименте симметрия лево—право нарушается. На рис. 31 приведена схема, поясняющая постановку первого такого эксперимента, выполненного С. Ву, Е. Эмблером, В. Хайвардом, Д. Хопсом и Р. Хадсенем в 1956 году. В этом эксперименте регистрировались продукты распада ядер кобальта, происходящего в результате слабых взаимодействий. Заметим, что очень существенными элементами эксперимента являются изображенные на схеме опыта кольца с током. Без этих токов два устройства по разные стороны зеркала были бы идентичны и всегда давали бы одинаковые результаты. Однако, чтобы ядра кобальта чувствовали влияние этих токов, необходимо уменьшить беспорядочное тепловое движение атомов кобальта. Поэтому эксперимент должен быть сделан при чрезвычайно низкой температуре — ниже $0,1^\circ$ абсолютной шкалы температур.

Основную трудность этого эксперимента представляла комбинация измерений β -распада с техникой низких температур. Оборудование, использованное в эксперименте

¹ Если два устройства идентичны, они всегда показывают одни и те же результаты, и эксперимент не может дать ответ, сохраняется ли симметрия лево—право.

по проверке сохранения четности, изображено на рис. 32. Образец кобальта содержится в сосуде Дьюара, видимом на переднем плане. Большой электромагнит на заднем плане являлся частью охлаждающего устройства.

В результате этого эксперимента была обнаружена значительная разница в отсчетах двух счетчиков, пока-

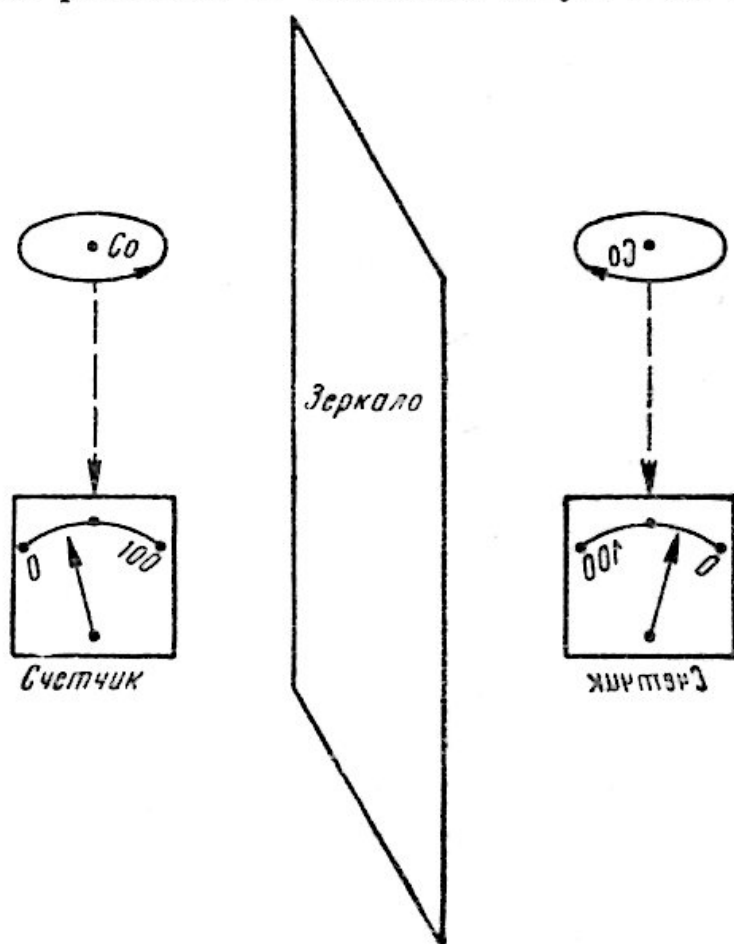


Рис. 31.

занных на рис. 31. Так как поведение остальных частей аппаратуры проявляло симметрию лево—право, асимметрия должна быть присуща процессу распада кобальта, который обусловлен слабыми взаимодействиями¹.

¹ На самом деле, эксперимент С. Ву и др. был выполнен с помощью одной экспериментальной установки, основной частью которой был образец Co^{60} , охлажденный до сверхнизких температур. В результате резкого уменьшения теплового движения ядра кобальта стали ориентированными, т. е. обладающими одинаковым направлением спина (на рис. 31 спины ядер символически изображены кольцами с током). Исследовалось испускание электронов от β -распада ядер Co^{60} по направлению ядерных спинов и против этого направления (что соответствует испусканию электронов в одном направлении в двух установках, являющихся взаимными зеркальными отображениями, как показано на рис. 31). Было найдено, что β -лучи испускаются преимущественно назад по отношению направления ядерных спинов. — Прим. перев.

Герман Вейль заметил в своих лекциях [10], о которых упоминалось выше, что в искусстве «асимметрия редко бывает просто отсутствием симметрии». Это, видимо, также справедливо и в физике, так как с открытием нарушения симметрии лево—право здесь возникли два новых аспекта, касающихся симметрии—асимметрии лево—право элементарных частиц и их взаимодействий.

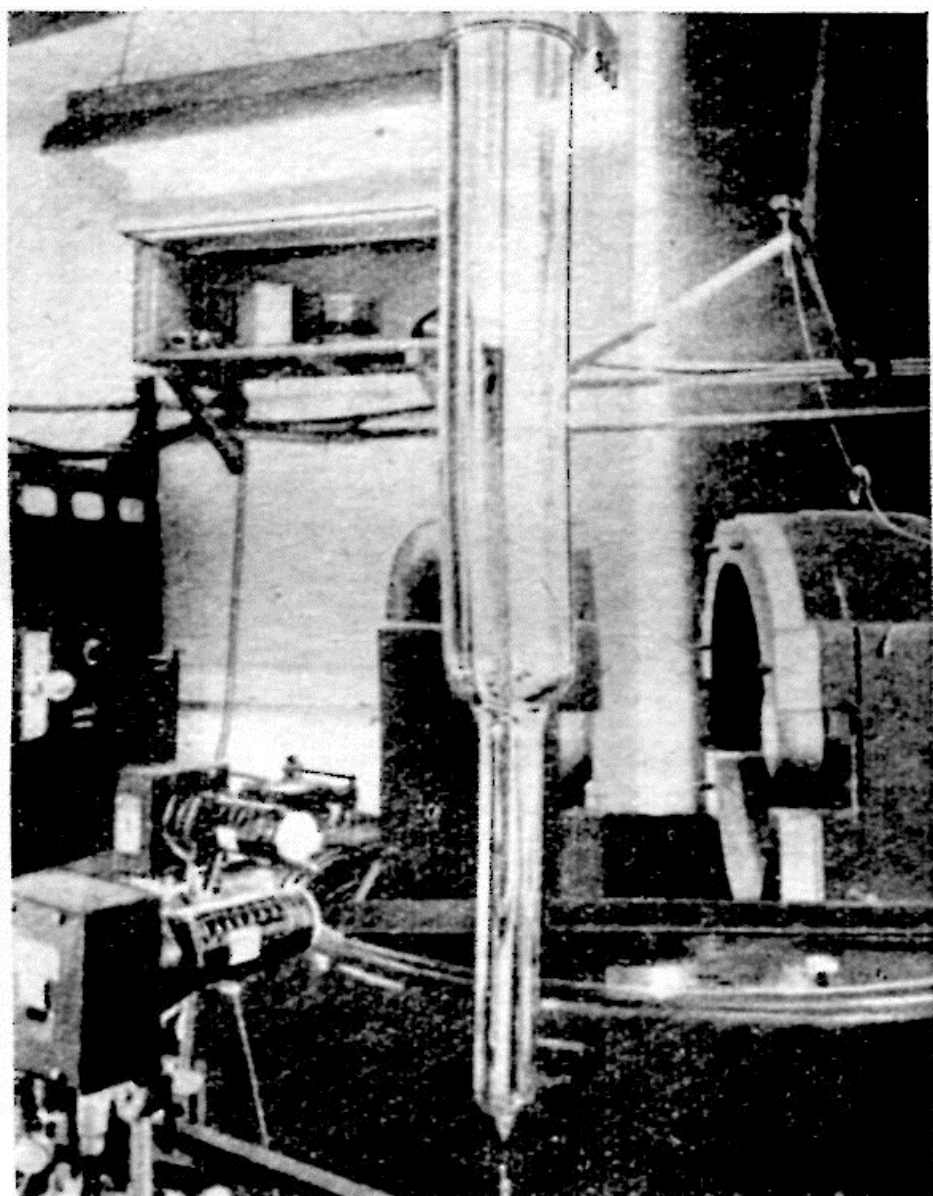


Рис. 32.

Первый аспект связан с проблемой структуры нейтрино и является очень интересным возрождением идеи, первоначально высказанной Вейлем в 1929 году. Она была, однако, отвергнута в прошлом, так как из нее не следовало сохранения симметрии лево—право. Так как нейтрино участвует только в слабых взаимодействиях, обна-

ружение несохранения симметрии лево—право в слабых взаимодействиях лишило основания эту причину отказа от идеи Вейля. Многие эксперименты, сделанные по выяснению природы нейтрино в 1957 году, подтвердили его предсказания. Уместно подчеркнуть, что предложения Вейля были основаны на требовании математической простоты и изящности. Едва ли может быть случайностью, что природа и в этом случае, как и во многих других, выдала свою склонность к красоте математических обоснований.

Второй аспект касается вопроса о том, можно ли считать симметрию лево—право действительно утраченной в свете последних исследований. Самым интересным оказалось то, что, если изменить определение зеркального отражения, симметрия относительно зеркального отражения может быть восстановлена. Чтобы пояснить это утверждение, обозначим показания счетчиков на левой и правой частях рис. 31 соответственно L и R , а количество отсчетов в таких же экспериментальных устройствах, но сделанных из антиматерии, соответственно \bar{L} и \bar{R} . До выполнения эксперимента С. Ву, Е. Эмблера, В. Хайварда, Д. Хопса и Р. Хадсена считалось на основании симметрии лево—право, что $L=R$ и $\bar{L}=\bar{R}$, полагалось также на основании симметрии материя—антиматерия, что $L=\bar{L}$, $R=\bar{R}$, следовательно, при этом $L=R=\bar{L}=\bar{R}$. Их эксперимент продемонстрировал ошибочность этого предположения, так как он ясно показал, что $L \neq R$.

Из количественных результатов этого эксперимента и из результатов последующих экспериментов, проведенных во многих лабораториях мира, следовало, что в действительности $L=\bar{R} \neq \bar{L}=R$. Таким образом, симметрия гораздо меньше, чем предполагалось ранее, но все же некоторая симметрия, заключенная в уравнениях $L=\bar{R}$ и $\bar{L}=R$, остается. Оба эти уравнения суммарно означают, что если произвести зеркальное отражение, а затем превратить материю в антиматерию, то физические законы останутся неизменными. Эту комбинированную трансформацию, оставляющую физические законы неизменными, можно, таким образом, определить как процесс истинного зеркального отражения. Тогда в свете этого определения симметрию зеркального отражения можно считать восстановленной.

Новое определение зеркального отражения проиллюстрировано на рис. 33, где антиматерия изображена на заштрихованной части рисунка. На этом рисунке левый счетчик делает L отсчетов, а правый \bar{R} . Эксперимент показывает, что эти два отсчета одинаковы. Естественно, остается неясным, почему для сохранения симметрии

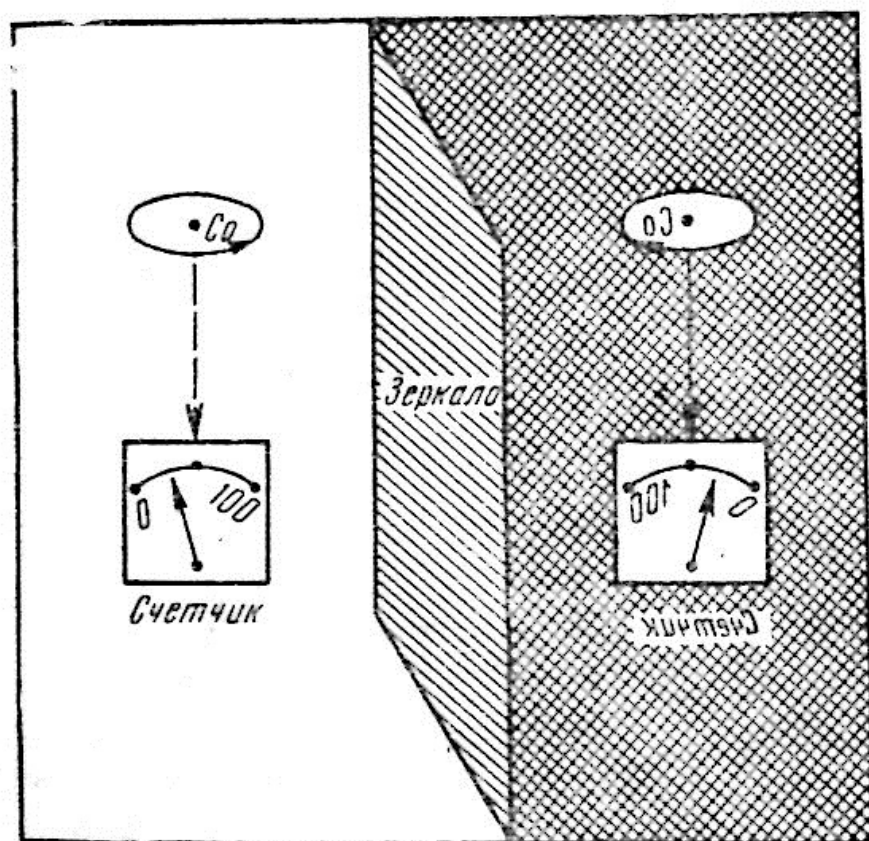


Рис. 33.

необходимо комбинировать операцию перехода от материи к антиматерии с зеркальным отражением. Ответ можно получить только при более глубоком понимании связи между материей и антиматерией. Сейчас такого понимания пока еще нет. Однако интересно и полезно рассказать о некоторых подобных проблемах, возникавших прежде, и о способах их окончательного разрешения. Обратимся опять к книге Вейля «Симметрия»:

«...Эрнст Мах рассказывал о том интеллектуальном шоке, который он получил, еще будучи подростком, когда узнал, что магнитная стрелка отклоняется определенным образом влево или вправо, если ее подвесить параллельно проводу, через который течет электрический ток. Так как в целом и геометрическая, и физическая конфигурации, в том числе электрический ток и южный и северный полюса магнитной стрелки, во всех отношениях

кажутся симметричными относительно плоскости, проходящей через провод и магнитную стрелку; стрелка, казалось бы, должна вести себя подобно буриданову ослу (Buridan ass), который попал между двумя одинаковыми пучками сена и не мог выбрать между правым и левым...» (рис. 34).

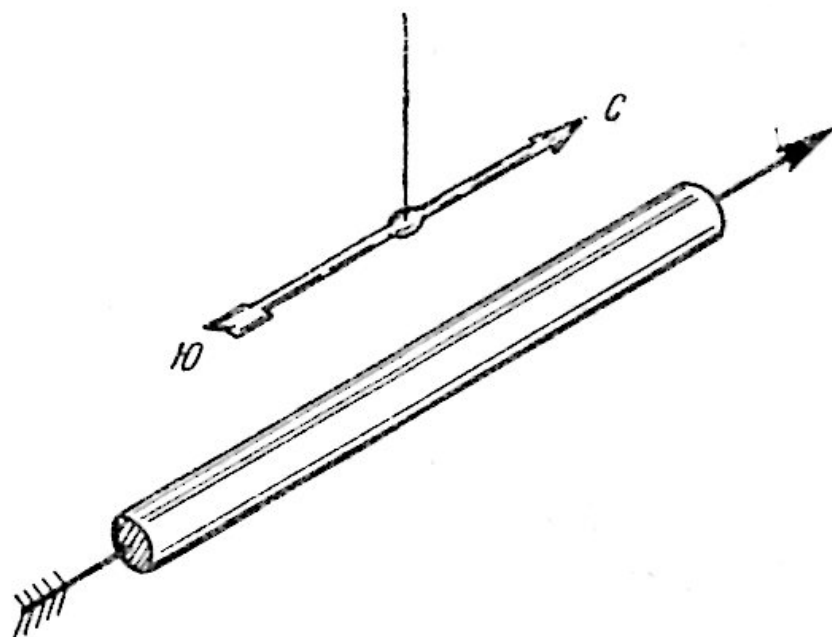


Рис. 34.

Трудность, с которой столкнулся Мах, состояла в кажущейся зеркальной симметрии относительно плоскости,

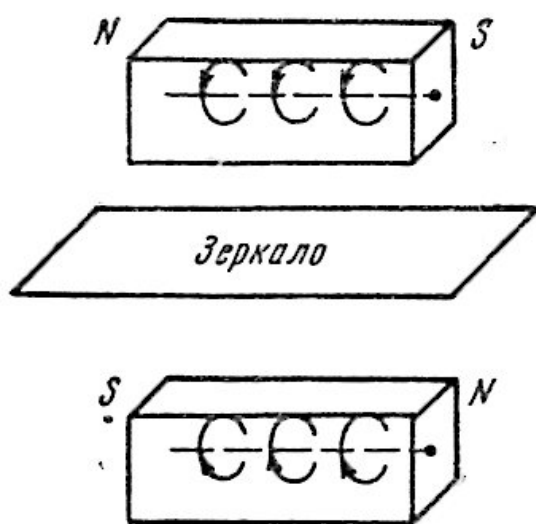


Рис 35.

содержащей проволоку и магнитную стрелку. Но более глубокое изучение магнетизма показывает, что это лишь кажущаяся симметрия. Магнит демонстрирует магнитные свойства потому, что его электроны совершают круговое движение в направлении, указанном на рис. 35. При отражении, как показано на этом рисунке, полярность магнита изменяется. Таким образом, на деле зеркальной симметрии

относительно плоскости нет, и затруднения, с которыми столкнулся Мах, устраняются.

Отметим для интереса, что симметрии, которые возникают при комбинированной трансформации, хорошо

известны в декоративном искусстве. На рис. 36 воспроизведена замечательная работа датского художника М. Эшера. Заметим, что эта картина не идентична свое-

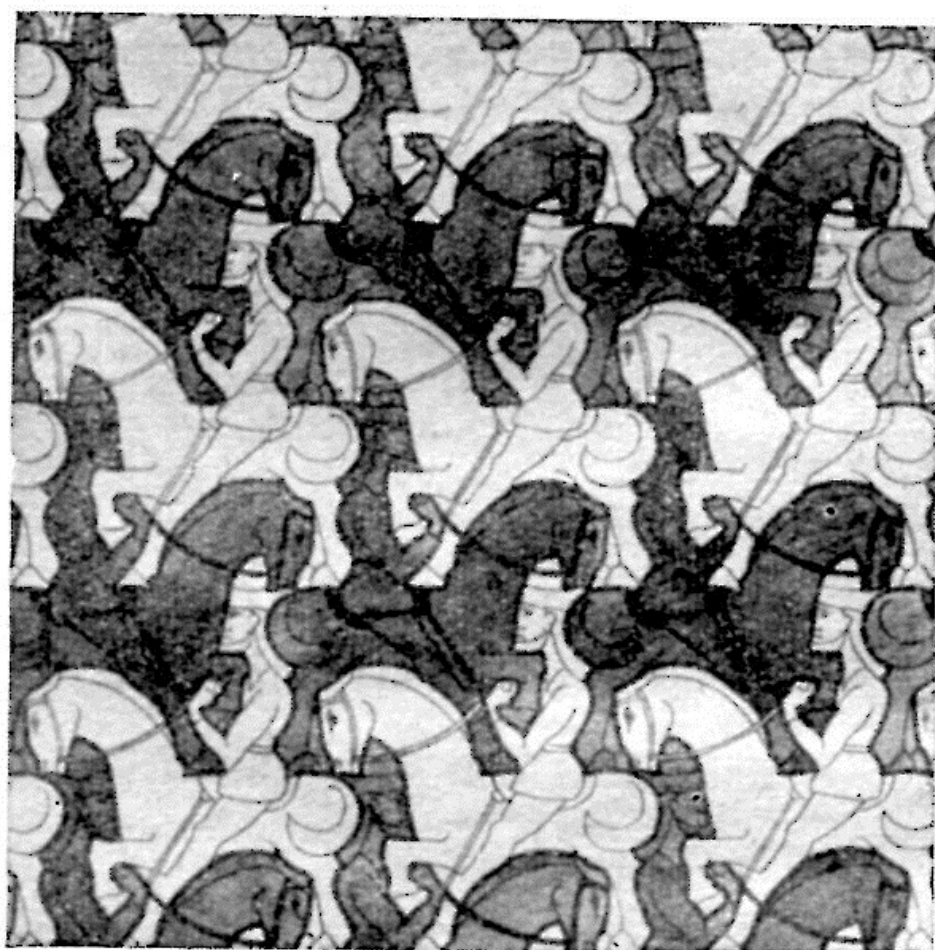


Рис. 36.

му зеркальному отображению. Но если на зеркальном отображении поменять еще светлую и темную окраски, идентичность восстановится.

Мы сделали короткий экскурс в область физики последних 60 лет, следуя в основном истории развития физики элементарных частиц. Автор не ставил перед собой задачи изложить вопрос с исчерпывающей полнотой. Многие открытия, имевшие поистине революционизирующее значение, не были даже упомянуты. В рассмотренных же случаях затрагивались только самые первые периоды развития новых идей, а отнюдь не их завершенная форма. На протяжении всего изложения обращалось особое внимание на опыт в каждый период, который был свидетелем эволюции различных идей, происходившей в результате неразрывного взаимодействия экспериментальной реальности с теоретическими концепциями. Все

аргументы и доказательства, приведенные в книге, носят по сути дела качественный иллюстративный характер, но это никак не означает, что новые частицы и новые концепции вошли в физику без детальных количественных обоснований. Физика — наука точная, и физики относятся очень серьезно к этой стороне вопроса.

Но что же все-таки является конечной целью физики? Какова мечта физиков? На этот вопрос, пожалуй, никто не может ответить более эрудированно и авторитетно, чем А. Эйнштейн. Он сказал, что цель этой науки состоит в создании концепций, на основании которых можно сформулировать исчерпывающую систему теоретической физики. Эта система должна быть по возможности простой и позволять вывести дедуктивным путем следствия, совпадающие с эмпирическим опытом. Эйнштейн писал [11]:

«Законченная система теоретической физики составляется из концепций и фундаментальных законов, на которых, как предполагается, эти концепции основаны; все следствия выводятся из этих концепций дедуктивным путем. Эти следствия должны соответствовать нашему индивидуальному опыту...

Структура системы является результатом логических обоснований; в следствиях этой теории должны присутствовать все эмпирические данные с их взаимной связью. В возможности подобных следствий заключена конечная ценность и оправдание всей системы, и в особенности концепций и фундаментальных принципов, лежащих в ее основе.

Эти фундаментальные концепции и постулаты, которые уже нельзя свести к меньшему числу более общих, составляют существенную часть теории, которая не может быть логически обоснована. Основная задача всех теорий — сделать такие неприводимые элементы наиболее простыми по содержанию и свести их к минимальному числу, не отказываясь, однако, от адекватного представления любого эмпирического содержания».

Касаясь вопроса достоверности этих основных законов, Эйнштейн отмечает: «...можем ли мы даже надеяться найти правильный путь? Более того, не существует ли этот правильный путь только в нашем воображении? Можем ли мы надеяться, что наш опыт ведет нас в нужном направлении, когда существуют теории (такие, как

классическая механика), которые в значительной мере оценивают наш опыт, не раскрывая существа дела? Я отвечаю без колебаний, что, на мой взгляд, такой правильный путь существует, и мы можем его найти. Более того, опыт убеждает нас, что в природе реализуются простейшие, формулируемые математически, идеи. Я убежден, что мы можем открыть с помощью чисто математических построений концепции и связывающие их законы, которые дадут нам ключ к пониманию законов природы».

Эта вера, так волнующе высказанная Эйнштейном, все еще поддерживает физиков наших дней.



ЛИТЕРАТУРА

1. Kelvin W. Nature, **LVI**, 84 (1897).
2. Thomson J. Recollections and Reflections. McMillan Co., 1937, p. 334.
3. Thomson J. Phyl. Mag., **44**, 293 (1897).
4. Bohr N. J. Chem. Soc., Feb., 349 (1932).
5. Oppenheimer R. Science and the Common Understanding. Simon and Schuster, 1953.
6. Wilson C. Le Prix Nobel, 1927.
7. Yukawa X. Collected Papers from Osaka University. II, 1935, p. 52.
8. Millikan R. Electrons, Protons, Photons, Neutrons, Mesotrons and Cosmic Rays. University of Chicago Press, 1947.
9. Jaeger F. The Principle of Symmetry. Amsterdam. Elsevier, 1920.
10. Weyl H. Symmetry. Princeton University Press, 1952.
11. Einstein A. Essays in Science. Philosophical Library, 1934, p. 14.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

- Данин Д. Нензбежность странного мира. М., «Молодая гвардия», 1962.
- Месси Г. Новая эра в физике. М., Госатомиздат, 1963.
- Новожиллов Ю. В. Элементарные частицы. М., «Знание», 1962.
- Парнов Е. Дальний поиск. М., Госатомиздат, 1963.
- Парнов Е., Глушченко Е. Окно в антимир. М., Госатомиздат, 1963.
- Смородинский Я. А. Элементарные частицы. М., «Знание», 1962.
- Щелкин К. И. Физика микромира, М., Госатомиздат, 1963.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию	3
Предисловие	4
Глава 1	5
Глава 2	21
Глава 3	43
Литература	67

Ч. Янг

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Редактор *Э. Д. Андреевко*

Художник *Ю. К. Королев*

Художественный редактор *А. С. Александров*

Техн. редактор *Н. А. Власова*

Корректор *Н. А. Смирнова*

Сдано в набор 7/VIII 1963 г.

Подписано в печать 11/XI 1963 г.

Бумага 84×108/32. Физич. печ. л. 2,12. Привед. п. л. 3,47. Уч.-изд. л. 3,18.

Заказ изд. 1037.

Тираж 13 300 экз.

Цена 22 коп.

Заказ тип. 3459.

Госатомиздат, Москва, Центр, ул. Кирова, 18.

Типография изд-ва «Московская правда»

Цена 22 коп.