

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

## ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ \*)

М. Гелл-Манн и Е. Розенбаум

«Не существует совершенной красоты,  
которая не содержала бы в себе некоторую  
долю странности».

Ф. БЭКОН

Этот афоризм, принадлежащий Бэкону, вне всякого сомнения, справедлив как для науки, так и для искусства. Но не является ли неизбежным для красоты изобилие странности? Годами странность омрачала одну из основных областей деятельности физиков—исследование природы вещества. Когда физик обращался к рассмотрению вещества в малых масштабах, то оно оказывалось беспорядочным набором элементарных частиц. Никаких простых и закономерных взаимоотношений между этими частицами не обнаруживалось. Лишь теперь картина стала чуть-чуть проясняться. Само слово странность успело войти в лексикон физиков, но «доля» странности уменьшилась до такой степени, что через странность уже начинает проступать красота порядка.

Новые закономерности лучше всего могут быть оценены, если начать с того хаотического положения, при котором они возникли. Для того чтобы начать наш рассказ, мы должны вернуться на тридцать лет назад, к одному из наиболее триумфальных периодов в истории науки. Теория атома в основном была завершена: почти все свойства нормального вещества могли быть получены математически рассмотрением движения отрицательно заряженных электронов вокруг положительно заряженных ядер. Большинство проблем, которые физика и химия пытались разрешить в течение предыдущих веков, было, по крайней мере в принципе, разрешено. Но в это же самое время физики приступили к серьезным попыткам проникновения в недра атомных ядер.

Здесь-то и начались их неприятности. Весьма скоро обнаружилось, что ядра состоят из протонов и нейтронов, но что объяснить ядерные свойства только через поведение этих составляющих невозможно. Фактически мы до сих пор не знаем, что представляет собой их движение. Далее выяснилось, что при разрушении атомов возникают совершенно новые типы вещества—озадачивающее многообразие частиц с весьма малым временем жизни; эти частицы, очевидно, не содержатся в обычном материале, образующем атом. Некоторые из этих частиц могли иметь разумное объяснение уже в тот момент, когда они были обнаружены, но остальные только теперь включены в общую картину природы. Эти последние частицы получили название «странных частиц».

\*) M. Gell-Mann and E. Rosenbaum, Scientific American 197, 72 (1957). В оригинале подзаголовок: «Обзор абстрактных теоретических идей, используемых физиками для объяснения окружающего нас мира. Эти идеи помогают обнаружить некоторый порядок среди многочисленных субатомных частиц».

## Первые частицы

Однако мы забежали вперед. Нам следует начать примерно с 1932 г., когда в атомной драме действующих лиц было только четверо: электрон, протон, нейтрон и фотон. Первые три частицы являются кирпичиками

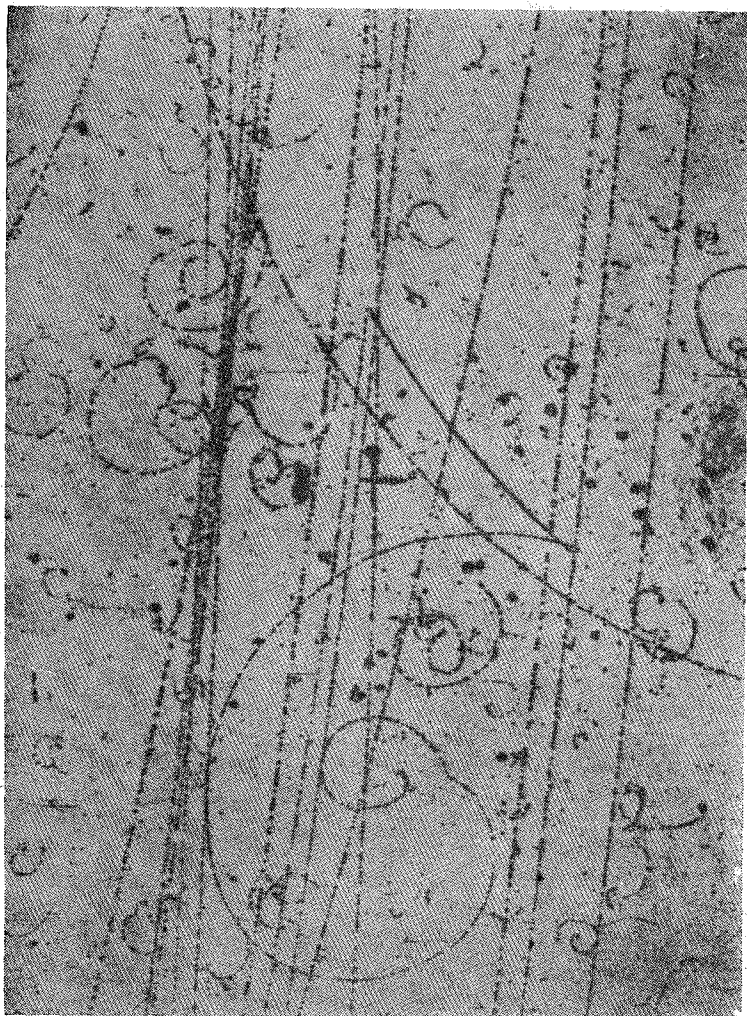


Рис. 1а. Событие, схематически изображенное на рис. 1б, запечатлено на этой фотографии в виде ряда пузырьков, образованных заряженными частицами в пузырьковой камере с жидким пропаном. Положительный пион распадается на мюон и нейтрино, которое не оставляет следа из пузырьков. Наконец, мюон распадается на позитрон и два невидимых нейтрино. По предположению, вместе с  $K$ -частицей образуется нейтральная лямбда-частица, но если это так, то она покидает камеру, не успев распасться на заряженные частицы и поэтому не оставив никаких следов. Первичный пион был получен на космотроне Брукхейвенской Национальной лаборатории.

атомов—протоны и нейтроны в ядрах, электроны в пространстве около ядер. Фотон является квантовой единицей излучения, иными словами, строительным кирпичиком электромагнитного поля.

Фотон всегда движется со скоростью света (обозначаемой обычно буквой «с»); фотон не может находиться в покое. Вследствие движения фотон обладает энергией и, следовательно, обладает также массой согласно знаменитому соотношению  $E=mc^2$ . Но масса фотона существует только благодаря движению. Электрон, протон и нейтрон, напротив, могут находиться в покое. Каждая из этих частиц обладает массой покоя и соответствующей энергией покоя. (Находясь в движении они, конечно, приобретают дополнительные энергию и массу.)

Электрон обладает наименьшей массой покоя, т. е. является самой легкой частицей; масса электрона является основной единицей массы в физике субатомных частиц. Величина отрицательного заряда электрона точно так же является основной единицей электрического заряда. В этих единицах масса протона равна 1836,1, а заряд равен плюс единице. Нейтрон имеет массу около 1838,6 и заряд, равный нулю (т. е. он не заряжен). Фотон, как мы уже указывали, не имеет массы покоя; он не обладает также зарядом, хотя и является носителем электромагнитной энергии.

Все эти частицы вращаются вокруг своих осей, и те из них, которые заряжены, в силу этого вращения становятся крошечными магнитиками. Согласно законам квантовой механики вращение имеет определенную величину, характеризующую частицу. В системе единиц, принятых в квантовой теории, характеристическое вращение (спин) электрона, протона и нейтрона равно  $\frac{1}{2}$ ; принято говорить, что их спин равен  $\frac{1}{2}$ . Спин фотона равен единице.

Однако есть и еще ограничения, касающиеся вращательного движения этих частиц. Если эти частицы являются магнитиками, то на них оказывают действие внешние магнитные поля. Согласно квантовой механике ось вращения каждой частицы может принимать только несколько определенных направлений относительно приложенного внешнего поля. Частица со спином  $\frac{1}{2}$  может принимать только два положения: ось вращения может быть направлена по полю или против него. Частица со спином единица может принимать только три положения: ось вращения может быть направлена по полю, перпендикулярно ему или направлено против поля (см. рис. 5 на стр. 408).

Другим важным свойством частиц, связанным со спином, является их «статистика». Электроны, протоны и нейтроны (и все другие частицы, обладающие спином  $\frac{1}{2}$ ) подчиняются знаменитому принципу запрета, который говорит о том, что только одна частица данного сорта может занимать определенное квантовое «состояние». Так, например, может быть только один электрон, вращающийся в определенном направлении и в то же самое время совершающий обращение вокруг ядра по заданной орбите. Частицы, удовлетворяющие правилу запрета, как говорят, подчиняются статистике Ферми—Дирака; они соответственно называются фермионами. Частицы, подобные фотону (и все другие частицы, обладающие целочисленным спином), не удовлетворяют принципу запрета. Они подчиняются статистике Бозе—Эйнштейна и называются бозонами.

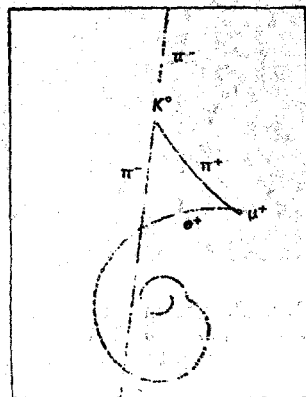


Рис. 16. Нейтральная  $K$ -частица, образованная при столкновении отрицательного пиона с протоном, распадается на пару пионов противоположных знаков. Схема выполнена по фотографии, воспроизведенной на рис. 1а.

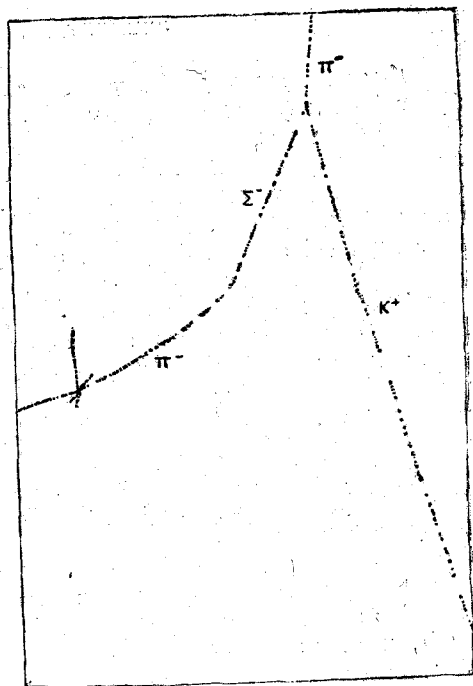
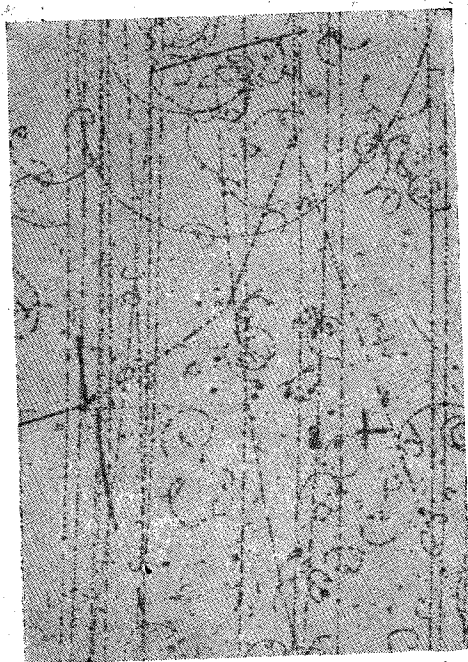


Рис. 2. Сигма- и К-частицы образуются совместно после удара пиона о протон в пузырьковой камере. Сигма-частица распадается на пион и невидимый нейтрон. Далее пион ударяет в ядро углерода и образует «звезду».

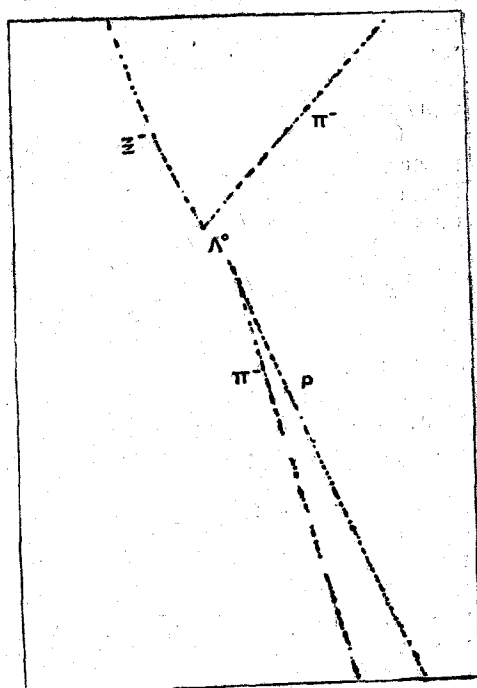
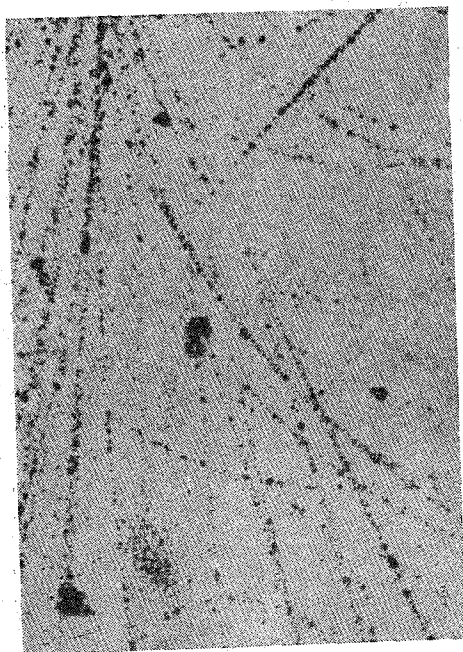


Рис. 3. Отрицательная кси-частица распадается на нейтральную лямбда-частицу и отрицательный пион. Впоследствии лямбда-частица распадается на протон и второй отрицательный пион. Кси-частица была получена при столкновении космических лучей высокой энергии с ядром в свинцовой пластинке. Фотография воспроизводит треки в камере Вильсона, расположенной ниже пластинки.

## Взаимодействия

До сих пор мы говорили главным образом об изолированных частицах. Но, как это оказывается с нарастающей очевидностью, все частицы «связаны» между собой: когда они сближаются достаточно тесно, то начинают взаимодействовать различными способами. Первая такая связь была установлена и изучена для случая электрона и фотона. Именно эта взаимосвязь, рассмотренная квантовой электродинамикой, является венцом атомной теории. В развитии этой теории принимали наибольшее участие П.А.М. Дирак (Англия), В. Гейзенберг (Германия) и В. Паули (в настоящее время в Швейцарии). Теория дает объяснение поведению электронов в электромагнитном поле, допуская, что каждый электрон непрерывно испускает и поглощает фотоны. Такие пульсации являются «процессом жизнедеятельности» электрона и служат тем способом, посредством которого поле и электроны оказывают силовое действие друг на друга.

Мы хотели бы подчеркнуть в этом месте, что все, что здесь было сказано, это, пожалуй, не более, чем наименование теории. В квантовой механике теория представляет собой систему математических уравнений, которые, при заданных взаимодействующих частицах и связях между ними, позволяют предсказать со всеми подробностями поведение этих частиц, определяя вероятность любой возможной реакции между этими частицами. Иногда, в частности, когда связь между частицами очень велика, математический аппарат оказывается весьма сложным. В этом случае теория дает очень немного. Но, во всяком случае, в квантовой электродинамике математический аппарат вполне доступен, и эта чрезвычайно красивая теория успешно предсказала результаты всех фундаментальных атомных экспериментов, по крайней мере с такой же точностью, с какой эти эксперименты могли быть проведены.

Основная «реакция» квантовой электродинамики, реакция, в которой электрон испускает и поглощает фотон, служит примером того, что называют виртуальным процессом. Это представление, которое используется по отношению ко всем элементарным частицам, характерно для квантовой теории. Оно подразумевает очевидное нарушение закона сохранения энергии. Чтобы понять это, нужно помнить, что фотон тоже обладает энергией; таким образом, когда электрон спонтанно испускает фотон, то кажется, что полная энергия системы неожиданно возрастает. Квантовая теория дает разъяснение этому обстоятельству, которое сводится к тому, что фотон испускается и вновь поглощается столь быстро, что этот выигрыш в энергии не может быть никак обнаружен, даже в принципе. Вот почему такие процессы носят название виртуальных. Если такой фотон не может быть обнаружен, то закон сохранения энергии фактически не нарушается, потому что, согласно основным положениям квантовой механики, ее законы приложимы только к наблюдаемым величинам. Если сообщить достаточную энергию извне, то фотоны могут быть превращены из частиц виртуальных в частицы настоящие.

Виртуальные фотоны участвуют во всех взаимодействиях между заряженными телами и электромагнитным полем. Считается, что положительные протоны также испускают и поглощают виртуальные фотоны. В этом случае, однако, теория уже не столь успешна: ее предсказания для протонов не столь точны, как для электронов.

В некотором важном смысле только что описанная схема была законченной и удовлетворительной. Внутри этой схемы существование электрона и фотона было достаточно для объяснения всех внешних свойств атома; протон и нейтрон могли объяснить наблюдаемые заряды атомных ядер и, хотя и не очень точно, наблюдаемые массы. Совершенно верно.

что эти теории не содержали ничего такого, что объясняло бы, почему природа выбирает именно эти частицы в качестве своих элементарных строительных кирпичиков; однако, если считать, что природа имеет их как нечто данное, то можно сказать, что они дают почти все то, что нам нужно.

### А н т и ч а с т и ц ы

Однако они не дают нам всего того, что нам нужно. Прежде всего, теория электрона Дирака предсказывает некоторые дополнительные частицы (см. столбец II таблицы I). Хорошо известно, что согласно квантовой теории всякая материальная частица обладает волновыми свойствами. Когда было решено волновое уравнение Дирака для электрона, то из решения получились как положительные, так и отрицательные частоты. Поскольку частоты в квантовой механике пропорциональны энергии, то трудно было сразу сказать, что означает этот отрицательный ответ. Дирак смог доказать, что эти частоты должны иметь физический смысл и что они соответствуют электрону с положительным зарядом. Далее, согласно теории, если положительный электрон сталкивается с отрицательным электроном, они взаимно уничтожают друг друга—как говорят, происходит аннигиляция частиц—и их масса превращается в фотоны, обладающие эквивалентным количеством энергии. Обратно, если удастся сконцентрировать достаточное количество энергии в малом объеме, как это бывает, например, при столкновении двух частиц, обладающих большими скоростями,—то возможно образование пары, состоящей из положительного и отрицательного электронов.

Эти замечательные предсказания фактически сделаны не были (хотя они содержались в теории) до тех пор, пока К. Андерсон из Калифорнийского Технологического института не обнаружил позитрон. Позитрон обладал массой электрона, а его заряд был равен плюс единице; когда он сталкивался с отрицательным электроном, оба они аннигилировали. Но он мог быть создан совместно с отрицательным электроном при энергичных столкновениях. Позитрон был назван античастицей электрона, поскольку он аннигилирует с обычным электроном.

Для протона и нейтрона имеются аналогичные уравнения, так что каждый из них имеет свою античастицу. Эти античастицы были обнаружены только за последние два года. Даже фотон имеет в определенном математическом смысле свою античастицу. Однако в этом случае два решения уравнения могут быть интерпретированы совершенно идентичным образом, так что фотон и антифотон неразличимы. Выражаясь иначе, сам фотон является собственной античастицей.

### Н е й т р и н о

Второе необходимое дополнение к списку частиц возникает из особенностей поведения нейтрона. Внутри ядра нейтрон может существовать неопределенно долго. Однако вне ядра нейтрон оказывается нестабильной частицей. В среднем в течение 18 минут он спонтанно испускает  $\beta$ -частицу (это означает то же самое, что и электрон) и превращается в протон. Протон и электрон, вместе взятые, обладают массой примерно на 1,5 электронных масс меньше, чем масса нейтрона, так что это количество массы при распаде теряется; такая потеря массы эквивалентна 780 000 электрон-вольт энергии, которая должна проявиться в виде кинетической энергии продуктов распада, но на деле протон и электрон очень редко обладают таким большим количеством кинетической энергии. Для объяснения такого расхождения Паули предположил, что в распаде возникает еще

Таблица I

Элементарные частицы							Частицы
I	II	III	IV	V	VI		
					$\Xi^0$ $\Xi^-$ $\Sigma^-$ $\Sigma^0$ $\Sigma^+$ $\Lambda^0$	$\Xi^+$ $\Xi^0$ $\Sigma^+$ $\Sigma^0$ $\Sigma^-$ $\Lambda^+$	Кси Сигма Лямбда
$p^+$ $n^0$	$p^+$ $n^0$ $\bar{p}^-$ $\bar{n}^-$	$p^+$ $n^0$ $\bar{p}^-$ $\bar{n}^-$	$p^+$ $n^0$ $\bar{p}^-$ $\bar{n}^-$	$p^+$ $n^0$ $\bar{p}^-$ $\bar{n}^-$	$p^+$ $n^0$	$\bar{p}^-$ $\bar{n}^-$	Нуклон (протон, нейтрон)
					$K^+$ $K^0$ $\bar{K}^0$ $\bar{K}^-$	$\bar{K}^0$ $\bar{K}^-$	К
		$\pi^-$ $\pi^0$ $\pi^+$	$\pi^-$ $\pi^0$ $\pi^+$	$\pi^-$ $\pi^0$ $\pi^+$	$\pi^-$ $\pi^0$ $\pi^+$	$\pi^-$ $\pi^0$ $\pi^+$	Пион
$e^-$	$e^-$ $e^+$	$e^-$ $e^+$	$e^-$ $e^+$	$\mu^-$ $\mu^+$ $e^-$ $e^+$	$\mu^-$ $\mu^+$ $e^-$ $e^+$	$\mu^-$ $\mu^+$ $e^-$ $e^+$	Мюон Электрон
$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\gamma$	$\nu^0$ $\bar{\nu}^0$	$\nu^0$ $\bar{\nu}^0$	$\nu^0$ $\bar{\nu}^0$	Нейтрино
							Фотон

Таблица частиц иллюстрирует возрастание их в течение последних 25 лет. Частицы, добавляемые в столбцах II—IV, были сначала предсказаны теоретически. Частицы, добавляемые в столбцах V и VI, были обнаружены экспериментально. «Обычные» частицы изображены белыми кружками, античастицы — черными. Нейтральный пион и фотон являются своими античастицами. Верхняя группа включает в себя тяжелые частицы, под ней расположена группа мезонов. Следует особо отметить сильное взаимодействие частиц этих обеих групп. Двойная полоса между группами означает, что тяжелые частицы сохраняются. Третья, нижняя группа охватывает легкие частицы. Черта над символом частицы указывает на античастицу, но это условие не выдерживается для пиона, мюона и электрона. За разъяснением символов  $K_1^0$  и  $K_2^0$  следует обратиться к стр. 231.

одна частица, с нулевой массой покоя и почти необнаружимая, которая и уносит с собой всю недостающую энергию. Энрико Ферми, который развил эту идею, назвал эту невидимую частицу нейтрино. Исходя в своих рассуждениях из прямой аналогии с дираковскими процессами для электронов и фотонов, Ферми построил законченную теорию бета-распада. В этой теории фундаментальным процессом является непрерывная потеря и приобретение нейтроном через виртуальную эмиссию и абсорбцию двух частиц—электрона и нейтрино (строго говоря, «нейтрино», о котором идет речь, является антинейтрино). Хотя реакция Ферми была указана как виртуальный процесс, эмиссия (процесс распада) могла оказаться реальной и без добавления энергии извне, поскольку потеря в массе при распаде может обеспечить необходимую энергию.

## П и о н

Последняя частица, которую следует добавить в наш список, была предсказана на основе другой аналогии с дираковскими процессами. Задача состояла в описании сил, связывающих протоны и нейтроны (которые иногда называют совместно нуклонами) в ядре. Так как электромагнитные силы были успешно объяснены с помощью фотонов (или квантов поля), было логично попытаться подойти к проблеме ядерных сил аналогичным образом. Такой шаг был сделан японским физиком Хидеки Юкава. Он предположил, что нуклоны испускают и поглощают кванты ядерного поля, называемые мезонами, подобно тому, как электроны испускают и поглощают фотоны. Из известных свойств ядерных сил Юкава смог получить некоторые характеристики мезонов. Тот факт, что ядерные силы являются короткодействующими, означал, что мезон, в отличие от лишнего массы покоя фотона, должен иметь некоторую конечную массу покоя. Имелись также различные доводы в пользу того, что должны существовать как заряженные, так и нейтральные мезоны.

Догадка Юкавы была полностью подтверждена, но это произошло только десять лет спустя. Частица, которую он предсказал, была обнаружена и носит теперь название  $\pi$ -мезона или пиона. Ее масса составляет около 270 масс электрона; частица обнаружена в трех видах: положительная, отрицательная и нейтральная.

Эмиссия пионов нуклонами должна быть, разумеется, виртуальной, так как пионы обладают энергией, включая сюда энергию в форме массы покоя. Согласно теории, «сила» поля ядерных сил определяется числом квантов вне испускающей их частицы. Ядерные силы настолько велики, что нуклоны должны испускать пионы очень часто; в одно и то же время вне нуклона должно быть больше одной частицы. И действительно, современное представление о протонах и нейтронах состоит в том, что они состоят из некой сердцевинки, окруженной пульсирующим облаком пионов. Так же как и в случае фотонов, если пионы получают достаточное количество энергии, они могут превратиться в реальные частицы. Поскольку массы пионов эквивалентны 135 миллионам электрон-вольт ( $Mev$ ) энергии, требуется по меньшей мере такое же количество энергии, чтобы создать один реальный пион.

Мы подошли к концу первой части нашего рассказа. Мы уже имеем в запасе довольно большое количество «элементарных» частиц, причем все они в какой-то мере могут быть объяснены. Фактически большинство из них было предсказано теоретически, прежде чем они были открыты экспериментально. Как уже было указано ранее, нейтрино имеет свою античастицу. Отрицательный пион является античастицей положительного пиона и *vice versa*; нейтральный пион подобно фотону является



Таблица II

## Свойства частиц

Частица	Спин	Масса покоя (электронные массы)	Среднее время жизни (секунды)	Продукты распада
кси $\Xi^-$	$\frac{1}{2}$	2585	от $10^{-10}$ до $10^{-9}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
$\Xi^0$	$\frac{1}{2}$	не обнаружена		
сигма $\Sigma^+$	$\frac{1}{2}$	2325	$7 \times 10^{-10}$	$p + \pi^0, n + \pi^+$
$\Sigma^-$	$\frac{1}{2}$	2341	$1,5 \times 10^{-10}$	$n + \pi^-$
$\Sigma^0$	$\frac{1}{2}$	2324	не измерено	$\Lambda^0 + \gamma$
лямбда $\Lambda^0$	$\frac{1}{2}$	2182	$2,7 \times 10^{-10}$	$p + \pi^-, n + \pi^0$
протон $p$	$\frac{1}{2}$	1836,1	стабилен	
нейтрон $n$	$\frac{1}{2}$	1838,6	около 1000	$p + e^- + \bar{\nu}$
$K$ -мезон $K^+$	0	966,5	$1,2 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu, \pi^+ + \pi^0, \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ $\pi^+ + \pi^0 + \pi^0, \mu^+ + \nu + \pi^0, e^+ + \nu + \pi^0$
$K^-$	0	966,5	$1,2 \times 10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}, \pi^- + \pi^0, \pi^- + \pi^- + \pi^+$ $\pi^- + \pi^0 + \pi^0, \mu^- + \bar{\nu} + \pi^0, e^- + \bar{\nu} + \pi^0$
$K_1^0$	0	965	$1 \times 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^-, \pi^0 + \pi^0$
$K_2^0$	0	965	от $3 \times 10^{-8}$ до $10^{-6}$	$\pi^+ + e^- + \bar{\nu}, \pi^- + e^+ + \nu, \pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}$ $\pi^- + \mu^+ + \nu, \pi^+ + \pi^- + \pi^0, \pi^0 + \pi^0 + \pi^0$
пион $\pi^+$	0	273,2	$2,6 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$
$\pi^-$	0	273,2	$2,6 \times 10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}$
$\pi^0$	0	264,2	от $10^{-16}$ до $10^{-15}$	$\gamma + \gamma$
мюон $\mu^-$	$\frac{1}{2}$	206,7	$2,2 \times 10^{-6}$	$e^- + \nu + \bar{\nu}$
электрон $e^-$	$\frac{1}{2}$	1	стабилен	
нейтрино $\nu$	$\frac{1}{2}$	0	стабильно	
фотон $\gamma$	1	0	стабилен	

Свойства частиц определяются со все возрастающей точностью. В таблице собраны последние экспериментальные данные. Значения спина  $K$ -мезонов и тяжелых странных частиц до сих пор еще сомнительны. Для нестабильных частиц, имеющих более чем один способ распада, приведены известные в настоящее время продукты распада. Со временем могут быть обнаружены и другие продукты распада.

собственной античастицей. Наконец, реальные пионы, так же как и нейтрон, оказываются нестабильными. Спустя короткое время они распадаются, превращаясь в другие частицы (см. таблицу II на стр. 399).

### Двенадцать [частиц]

Мы можем коротко назвать идеи, изложенные выше, теорией строения вещества из двенадцати частиц (см. столбец IV в таблице I на стр. 397). Как уже указывалось, эта теория достаточно точна для объяснения свойств атомов. Но она оказывается весьма грубой, когда с ее помощью пытаются разобраться во внутренних процессах в ядре, хотя в общих чертах она позволяет дать им некоторое объяснение. В каждом частном явлении теория получает подтверждение для каждой из частиц. Все эти частицы играют в природе хорошо определенную роль и довольно естественно следуют из современных теоретических представлений.

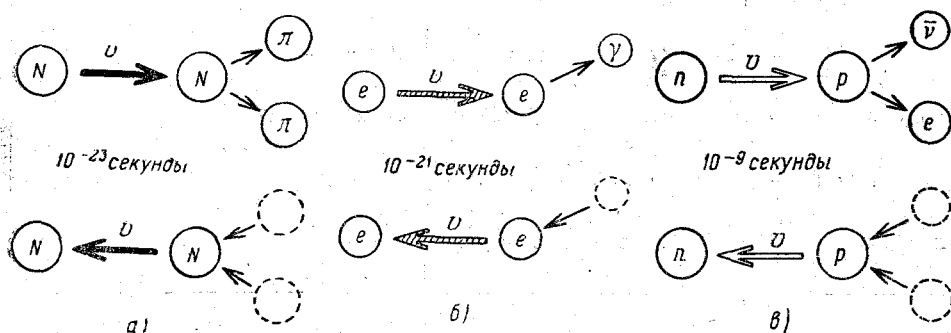


Рис. 4. Схематическое представление основных процессов.

а) При сильном взаимодействии типа Юкавы нуклон «виртуально» испускает пионы (верх) и затем поглощает их (низ). Шкала времени для процесса указана между схемами этих двух реакций. б) При электромагнитном взаимодействии электрон (или другая заряженная частица) виртуально испускает и поглощает фотон. в) В слабом и значительно более медленном ферми-взаимодействии нейтрон виртуально испускает и поглощает электрон и антинейтрино.

Следует отметить, что все эти двенадцать частиц могут быть разбиты на четыре группы, отчетливо разделяющиеся между собой: 1) тяжелые частицы, включающие в себя нуклоны (протон и нейтрон) вместе с их античастицами; 2) мезоны или частицы промежуточной массы; 3) легкие частицы, включающие в себя электрон, нейтрино и их античастицы; 4) фотон, который сам по себе образует группу.

Мы можем также отметить, что тяжелые и легкие частицы, которые являются «обычными» составляющими вещества, имеют спин  $1/2$  и являются фермионами (см. табл. на стр. 399). Мезоны и фотоны, которые играют роль квантов полей, имеют целочисленный спин и являются бозонами. Эти группы имеют между собой внутреннюю связь, определяемую тремя основными реакциями. Процесс Юкавы связывает тяжелые частицы с мезонами. Процесс Дирака связывает легкие частицы с фотонами, а процесс Ферми связывает тяжелые частицы с легкими (см. рис. 4).

Конечно, поведение частиц подчиняется также всем общим законам физики. Частицы подчиняются закону сохранения энергии, импульса и момента импульса. Они удовлетворяют также закону сохранения заряда. По современным данным полное количество электрического заряда во вселенной остается неизменным. Когда мы создаем заряженные частицы за счет энергии, то они создаются только в паре частица—античастица,

так что каждый новый положительный заряд компенсируется новым отрицательным. И в каждой реакции с участием частиц суммарный электрический заряд тел, вступающих в реакцию, должен равняться суммарному электрическому заряду продуктов реакции.

Другой закон сохранения вытекает из очевидной устойчивости ядерного вещества. Все экспериментальные данные указывают на то, что ядерное вещество никогда не создается и не уничтожается; другими словами, общее число нуклонов должно оставаться неизменным, так что если протон и может быть создан за счет энергии, то только одновременно с антипротоном. Две такие частицы взаимно уничтожают друг друга как в формально математическом смысле, так и физически, когда они сталкиваются.

### Реакции между частицами

Мы должны отметить две другие особенности реакций между частицами, которые, по-видимому, следует принять в виде общих законов. Первая особенность—реакции обратимы. Если некоторая частица распадается на две другие, следует ожидать, что эта пара частиц может в свою очередь образовывать исходную частицу. Вторая особенность—испускание частицы связано с поглощением соответствующей античастицы: если мы знаем «сечение» или вероятность испускания одной частицы, то тем самым мы можем уже подсчитать вероятность поглощения другой частицы. Для примера рассмотрим процесс бета-распада (см. реакции 1—3 в таблице III). Так как нейтрон превращается в протон, испуская электрон и антинейтрино, мы должны ожидать обратную реакцию, в которой протон поглощает электрон и антинейтрино, превращаясь в нейтрон (реакция 2). Далее, поскольку поглощение электрона соответствует испусканию позитрона, т. е. позитрона, мы должны также обнаружить реакцию, в которой протон поглощает антинейтрино и испускает позитрон, опять-таки превращаясь в нейтрон (реакция 3). Эта последняя реакция на самом деле оказалась одной из тех, на которых нейтрино было в конце концов обнаружено экспериментально.

Таким образом, эти правила устанавливают определенную «алгебру», с помощью которой мы можем «решать» задачи в физике частиц. Посмотрим, как пользоваться этой алгеброй на простом примере—распаде пиона. Было обнаружено экспериментально, что нейтральный пион распадается на пару фотонов за весьма малый промежуток времени, порядка  $10^{-15}$  сек. Мы хотим пояснить, почему должно быть именно так (реакции 4—8). Мы начнем с основной реакции, происходящей с пионами—реакции Юкавы, в которой нуклон—для определенности, скажем, протон—испускает виртуальный пион. Нас интересует, что будет происходить с пионом дальше; нам удобнее иметь уравнение, которое начинается с нейтрального пиона. Обращая уравнение 5 и совершая при этом переход от частиц к античастицам (мы будем называть этот процесс *т р а н с п о з и ц и е й* частиц), мы приходим к нужному нам уравнению (реакция 6), которое указывает нам на то, что пион превращается (виртуально) в пару протон—антипротон. Эта пара аннигилирует, в результате чего должна образоваться пара фотонов. Тем самым мы приходим к окончательному результату, который как раз нам и нужен: нейтральный пион распадается на два фотона.

Тому, кто впервые сталкивается с подобными рассуждениями, эта последовательность выводов может показаться тривиальной перетасовкой символов. Но каждая такая перетасовка суммирует более подробные (и зачастую весьма трудные) вычисления вероятностей, так что в конце концов мы получаем достаточно точные предсказания того, что должно произойти.

## Реакции между частицами

1. $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$	Ферми-процесс. Нейтрон распадается на протон, электрон и антинейтрино.
2. $p + e^- + \bar{\nu} \rightarrow n$	Обратная реакция. Протон, электрон и антинейтрино соединяются в нейтрон.
3. $p + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + n$	Транспозиция электрона в античастицу. Протон взаимодействует с антинейтрино, в результате чего образуются позитрон и нейтрон.
4. $p \xrightarrow{\nu} p + \pi^0$	Процесс Юкавы. Протон расщепляется (виртуально) на протон и нейтральный пион.
5. $p + \pi^0 \xrightarrow{\nu} p$	Обратная реакция. Протон и пион соединяются в протон.
6. $\pi^0 \xrightarrow{\nu} p + \bar{p}$	Транспозиция протона в антипротон. Пион расщепляется на протон и антипротон.
7. $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$	Протон и антипротон аннигилируют, образуя фотоны.
8. $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	Конечный результат. Нейтральный пион распадается на фотоны.
9. $p \xrightarrow{\nu} n + \pi^+$	Процесс Юкавы. Протон расщепляется (виртуально) на нейтрон и положительный пион.
10. $n + \pi^+ \rightarrow p$	Обратная реакция. Нейтрон и пион соединяются в протон.
11. $\pi^+ \xrightarrow{\nu} p + \bar{n}$	Транспозиция нейтрона в антинейтрон. Пион распадается на протон и антинейтрон.
12. $p + \bar{\nu} \rightarrow e^+ + n$	Ферми-процесс. Протон взаимодействует с антинейтрино, образуя позитрон и нейтрон.
13. $p + \bar{n} \rightarrow e^+ + \nu$	Транспозиция антинейтрино и нейтрона в их античастицы. Протон, взаимодействуя с антинейтроном, образует позитрон и нейтрино.
XIV. $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu$	Конечный результат. Положительный пион распадается на позитрон и нейтрино.
15. $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$	Гипотетический процесс. Отрицательный пион и протон взаимодействуют, образуя лямбда-частицу и нейтральный пион.
16. $\Lambda^0 + \pi^0 \rightarrow \pi^- + p$	Обратная реакция. Нейтральный пион взаимодействует с лямбда-частицей, образуя отрицательный пион и протон.
17. $\Lambda^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^- + p$	Транспозиция нейтрального пиона (являющегося собственной античастицей). Лямбда-частица распадается (виртуально) на нейтральный пион, отрицательный пион и протон.
18. $p + \pi^0 \rightarrow p$	Процесс Юкавы. Протон поглощает нейтральный пион.
XIX. $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$	Конечный результат. Лямбда-частица быстро распадается на протон и отрицательный пион.
20. $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$	Гипотетический процесс. Пион и протон взаимодействуют, образуя лямбда-частицу и нейтральную K-частицу.
21. $\Lambda^0 + K^0 \rightarrow \pi^- + p$	Обратная реакция. Лямбда- и K-частица взаимодействуют и образуют пион и протон.

22. $\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p + \bar{K}^0$	Транспозиция $K$ -частицы в античастицу. Лямбда-частица распадается (виртуально) на пион, протон и анти- $K$ -частицу.
23. $p + \pi^- \rightarrow n$	Процесс Юкавы. Протон поглощает пион, превращаясь в нейтрон.
XXIV. $\Lambda^0 \rightarrow n + \bar{K}^0$	Конечный результат. Лямбда-частица распадается на нейтрон и анти- $K$ -частицу.
Уравнения для частиц суммируют отдельные подробные рассуждения, приведенные в тексте статьи. Некоторые рассуждения оказываются ошибочными; это делается очевидным из того факта, что предсказываемые ими реакции не имеют места. Такие реакции отмечены римскими цифрами.	

как долго это будет продолжаться и так далее. С другой стороны, наши сведения о всех процессах в целом все же настолько неполны, что даже безукоризненная цепь рассуждений может привести к совершенно ошибочным выводам.

### М ю о н

Трудно найти лучшую иллюстрацию для этого утверждения, чем распад заряженного пиона. Используя наши основные реакции и правила, мы могли бы «доказать», что положительный пион должен распадаться на позитрон и нейтрино (реакции 9—14). Но если даже эта реакция и происходит, она столь редка, что ее невозможно наблюдать. Но как же тогда на самом деле распадается положительный пион? Оказывается, что он выбрасывает нейтрино и совершенно новую частицу: мюон!

Здесь мы столкнулись с изысканным коварством природы. Она подкинула нам частицу, у которой с точки зрения теоретической физики не было никаких прав и которую использовать разумным способом не представлялось возможным. Мюон явился подкидышем, найденным на пороге дома. Ситуация еще более осложнилась благодаря неудачному историческому стечению обстоятельств, которые в течение долгого времени сделали невозможной даже классификацию мюона. Мюон был обнаружен раньше пиона, и все считали, что это и есть тот самый мезон, который предсказал Юкава. Но этой роли его свойства совсем не соответствовали. Совершенно явно он не испытывал сильного взаимодействия с нуклонами и поэтому не мог быть носителем поля ядерных сил. Таким образом, до открытия пиона мюон имел еще меньше смысла, чем он имеет сегодня.

Сегодня, когда мы знаем, чем мюон отнюдь не должен быть, мы можем по крайней мере принимать его за то, что он на самом деле есть. Мюон представлен как положительно, так и отрицательно заряженной частицей (отрицательный пион распадается на отрицательный мюон и антинейтрино). Его масса составляет около 207 электронных масс, а спин его равен  $\frac{1}{2}$  (он является, следовательно, фермионом). Время его жизни равно примерно  $10^{-6}$  сек, а в результате его распада возникают электрон, нейтрино и антинейтрино. Положительный мюон должен, конечно, производить положительный электрон, т. е. позитрон, а отрицательный мюон — отрицательный электрон. Оба эти мюона являются античастицами относительно друг друга.

Хотя существование мюона ни в какой степени не следует из теории 12 частиц — более того, мюон показал, что эта теория неполна, а может быть, даже и неверна — он может быть связан с другими частицами. Для того чтобы обнаружить эту связь, мы должны вновь посмотреть на наши основные процессы — процесс Дирака в электромагнитном взаимодействии.

процесс Юкавы при ядерном взаимодействии и процесс Ферми при бета-распаде. Оказалось, что эти процессы резко различаются по своей «силе». Процесс Юкавы известен как процесс сильного взаимодействия; он ответствен за мощные силы, которые связывают нуклоны в единое ядро. Электромагнитные силы примерно в 137 раз слабее ядерных сил. Другим показателем «силы» является вероятность того, что некоторый процесс произойдет за определенное время, т. е. средняя скорость процесса. Сильные взаимодействия являются настолько быстрыми, насколько это вообще по нашим представлениям возможно. Испускание и поглощение пиона происходит за время примерно  $10^{-23}$  сек, что примерно равно времени, необходимому, чтобы световой луч прошел расстояние, равное диаметру нуклона. Электромагнитные процессы происходят, естественно, в 137 раз медленнее.

Но что можно сказать о ферми-взаимодействии? Оно несравненно слабее всех остальных. Соответствующий коэффициент равен около  $10^{-14}$ , т. е. оно слабее ядерного взаимодействия в это число раз. Далее все процессы, включающие в себя нейтрино—бета-распад, распад пионов и мюонов—имеют примерно одинаковую слабость. Таким образом, мюон принимает участие в одном из трех фундаментальных типов взаимодействия. (Имея заряд, он принимает, конечно, участие и в электромагнитном взаимодействии.) Далее, поскольку он является легким фермионом, представляется разумным сгруппировать его вместе с электроном и нейтрино. Но один только взгляд в таблицу II, где указаны времена жизни частиц, уже позволяет сказать, что распады, которые мы считали равными по слабости, имеют очень различные времена жизни. Однако мы исходили из того, что скорость распада является показателем силы. Ответ на возникающий в связи с этим вопрос состоит в том, что скорость распада определяется не только силой. Скорость зависит еще и от энергии, необходимой, чтобы вызвать реакцию. В случае нейтрона, среднее время жизни которого составляет около 18 минут, вероятность получить необходимое количество энергии невелика; разность между массой распадающейся частицы и массой продуктов распада немногим больше одной массы электрона. Для распада пиона и мюона область пригодных энергий расширяется; эти распады происходят значительно быстрее. Если ввести такие поправки на энергию в каждом отдельном случае, то выясняется, что природа «приусущей» всем слабым процессам скорости такова, что ее значение близко к  $10^{-9}$  сек, что в  $10^{14}$  раз медленнее, чем для сильных взаимодействий.

Разумеется, замечательно, что все слабые процессы имеют одинаковую силу; вместе с тем это обстоятельство, быть может, имеет очень глубокий смысл. Природа упорно стремится поведать нам что-то весьма важное, но до сих пор мы не в состоянии расшифровать ее сигналы.

### Странные частицы

Показав мюон, природа деликатно предупредила физиков о том, что они вовсе еще не разгадали ее сокровенных тайн. И около 1950 г. она довольно бесцеремонно представила целую процессию новых частиц. Они появились до крайней степени неожиданно и обладали такими свойствами, которые невозможно было объяснить на базе предшествующих представлений.

Новые пришельцы появились сначала в ливнях частиц, которые возникают, когда космические лучи высокой энергии внутри камеры Вильсона попадают в свинцовую пластинку. Среди треков в этих ливнях были найдены некоторые любопытные двудучевые или V-образные случаи, которые не удавалось объяснить ни одним из известных процессов,

происходящих с частицами. Физики были вынуждены сделать заключение, что некая неизвестная нейтральная частица (которая не оставляет следа в камере Вильсона) распадается на две заряженные частицы. Нейтральная частица, по предположению, возникала в свинцовой пластинке. Начав искать так называемые  $V$ -частицы, физики скоро обнаружили, что эти частицы отнюдь не редки.

По мере накопления и изучения  $V$ -следов становилось ясным, что в этом явлении участвуют по крайней мере две новые нейтральные частицы. Одна из них, распадающаяся на протон и отрицательный пион, была названа лямбда-частицей; другая, которая распадается на положительный и отрицательный пион, была названа  $K$ -частицей.

Оправившись от потрясения, физики стали пытаться как-то вставить новые частицы в общую схему физики. Из характера распада (на фермион и бозон) можно было установить, что лямбда-частица является фермионом, предположительно со спином  $1/2$ . Она подчиняется закону сохранения нуклонов. Поскольку при распаде возникает один нуклон, в процессе образования должен тоже участвовать один нуклон. Например, лямбда-частица может образоваться при столкновении между протоном и отрицательным пионом, что является обращением процесса распада. (При этом должны возникать некоторые другие частицы, такие, например, как нейтральный пион, чтобы уносить с собой избыток энергии.) Частота появления лямбда-частиц показывает, что они образуются в сильном процессе. Масса лямбда-частицы оказывается равной примерно 2181 массы электрона.

$K$ -частица должна быть бозоном, поскольку она распадается на два пиона, каждый из которых является бозоном. Ее спин должен быть целочисленным (скорее всего он равен нулю). Она не может быть создана из нуклонов, поскольку в продуктах ее распада нуклонов нет. Тем не менее она возникает довольно часто и, следовательно, в результате сильного процесса. Ее масса равна 965.

Из этих самых первых данных можно до известной степени классифицировать новые частицы. Лямбда-частица, очевидно, принадлежит к нуклонам или тяжелым частицам. Она может быть создана из нуклона и, подобно ему, является фермионом.  $K$ -частица, напротив, есть бозон; следовательно,  $K$ -частицу разумно поместить в мезонную группу вместе с пионами.

Но лямбда- и  $K$ -частицы были только началом. Вскоре было установлено существование других частиц. К той же самой категории, что и лямбда-частица, принадлежат сигма-частицы, заряженные и нейтральные и отрицательная кси-частица. К нейтральной  $K$ -частице присоединилась пара заряженных частиц примерно равной массы; частицы были названы положительной  $K$ -частицей и отрицательной  $K$ -частицей.

### Большие времена жизни

Само существование всех этих различных форм материи представляется сложной загадкой. Но если даже принять как факт то, что они существуют, их поведение ставит нас еще перед большими вопросами. Тревоги начинаются уже с распада новых частиц. Время их жизни заключено в пределах от  $10^{-8}$  до  $10^{-10}$  сек, что соответствует в ядерной шкале времени слабым взаимодействиям. Но частицы образуются, как мы видели, сильными взаимодействиями, временная шкала которых составляет примерно  $10^{-23}$  сек. Согласно одному из наших самых основных принципов—принципу обратимости,—частица, образуемая при сильных взаимодействиях, должна распадаться точно таким же путем.

Новые частицы, казалось бы, имеют широкие возможности распадаться в сильных процессах. Рассмотрим, к примеру, нейтральную

лямбда-частицу и позволим себе снова заняться перетасовкой наших уравнений (см. реакции 15—19 таблицы III на стр. 402). Используя два сильных процесса, один известный и другой гипотетический, но вполне допустимый, мы придем к утверждению, что лямбда-частица превращается в протон и отрицательный пион, что и является фактическим способом распада. Энергия, необходимая для процесса, найдется без труда: масса лямбда-частицы на 74 единицы больше, чем суммарная масса протона и пиона, что дает разность энергий порядка 37 *Мэв*. Таким образом, мы «доказали», что лямбда-частица должна распадаться с такой же скоростью, с какой она образуется. Аналогичные утверждения могут быть высказаны по отношению ко всем другим новым частицам. Единственное затруднение заключается в том, что живут они в  $10^{14}$  раз дольше, чем им положено жить! Именно это огромное расхождение между ожидаемым и наблюдаемым временами жизни и обусловило главным образом то наименование, которое эти частицы получили—странные частицы.

### Совместное рождение

После пристального изучения ситуации в течение пары лет некоторые теоретики, в частности А. Пайс, смогли высказать предположение, дающее решение парадокса. Их основная идея состояла в том, что странные частицы появляются только группами: по две или более одновременно. Это представление известно теперь под названием совместное рождение. Оно подразумевает, что сильное взаимодействие, которое порождает странные частицы, почему-то действует всегда на несколько частиц (более чем на одну частицу) одновременно. Выгода этой модели состоит в том, что сильные процессы такого рода не могут быть обратимыми из-за энергетических потерь.

Например, предположим, что лямбда- и *K*-частицы образуются при столкновении отрицательного пиона с протоном. Попробуем применить наши правила для реакций к этому процессу, для того чтобы предсказать судьбу лямбда-частицы (реакции 20—24). Мы приходим к выводу, что она «распадается» на нейтрон и анти-*K*. Но это, конечно, невозможно, потому что две дочерние частицы имеют суммарную массу, большую чем масса родителей. Строгий анализ показывает, что каждый возможный случай совместного рождения приводит к аналогичному результату для отдельного распада любой странной частицы, которая порождается. Возможный путь распада, как оказывается, требует слишком много энергии. Таким образом, двигаясь прочь друг от друга непосредственно после своего рождения, странные частицы уходят от своей гибели посредством сильного взаимодействия и живут до тех пор, пока значительно менее вероятный слабый процесс не покончит с ними.

На первых порах было мало или даже вовсе не было экспериментальных данных, касающихся совместного рождения. Однако, когда космострон в Брукхейвенской Национальной лаборатории начал систематически поставлять странные частицы, оказалось, что это правило фактически выполнялось всегда. И действительно, самая первая реакция, которая была обнаружена, было пион—протонное соударение, рассмотренное выше, ведущее к совместному рождению лямбда- и нейтральной *K*-частицы.

Теперь возникает вопрос: что означает совместное рождение? Можно ли связать его с какими-либо иными принципами? Совместное рождение указывает, что сильные реакции, в которых участвует одна частица, являются запрещенными. Когда природа исключает какое-либо явление, ее предписание часто принимает форму какого-нибудь закона сохранения. То-то и то-то не может происходить, потому что что-то должно сохра-



няться. Простой пример: никогда в природе не встречается распад частицы на такие продукты, суммарная масса которых больше массы распадающейся частицы. Это запрещается законом сохранения энергии.

Когда правило совместного рождения было установлено, было естественно задать вопрос, не скрывается ли за этим правилом какой-нибудь закон сохранения. Если бы такой закон был обнаружен, мы смогли бы узнать значительно больше о странных частицах. Принцип совместного рождения утверждает, что странные частицы образуются всегда в количестве не меньше двух одновременно. Но являются ли все сочетания странных частиц допустимыми или некоторые из них запрещены? И на этот вопрос мог бы ответить закон сохранения.

### ИЗОТОПИЧЕСКИЙ СПИН

Такой закон был обнаружен; удалось установить некоторые правила, которым подчинены процессы возникновения странных частиц. Для того чтобы разобраться в том, что представляют собой эти принципы и правила, нам следует вернуться к нашим старым частицам и ввести понятие, о котором до сих пор вовсе не было речи. Мы имеем в виду понятие «изотопического спина».

Прежде всего, позволим себе взглянуть на обычный спин с несколько иной точки зрения. Представим себе, что у нас есть пара изолированных электронов, которых мы представляем в виде маленьких крупинок. Настолько, насколько мы сегодня знаем, можно с определенностью утверждать, что электроны тождественны. Мы верим в то, что они вращаются, но так как они очень малы, это движение различить мы не в состоянии. Поместим эти электроны в магнитное поле. Согласно законам квантовой механики спин электронов расположится либо по направлению магнитного поля, либо против него. Допустим, что один электрон расположился по полю, а второй—против. Теперь уже эти две частицы обладают различной энергией, и мы можем отличить одну из них от другой. Этот мысленный эксперимент подчеркивает то обстоятельство, что по отношению к магнитному полю электрон представляет собой «дублет». Он может находиться в одном из двух возможных энергетических состояний. Но без внешнего магнитного поля нет никакого способа, чтобы рассматривать эти состояния порознь; электроны «вырождаются» в состояние неразличимости.

В самом начале развития современной ядерной физики—вскоре после открытия нейтрона—возникла ситуация, которая заставила вспомнить об этом магнитном «вырождении». Эксперименты по отклонению движущихся протонов и нейтронов другими протонами и нейтронами обнаружили удивительное обстоятельство, что ядерные силы или сильное взаимодействие между нуклонами всегда одно и то же, независимо от того, какие комбинации нуклонов в нем участвуют. Силы, действующие между двумя протонами, двумя нейтронами, а также между протоном и нейтроном, являются равными. Это явление, называемое зарядовой независимостью, означает, что в той мере, в какой это касается сильных взаимодействий, протон и нейтрон ведут себя как одна и та же частица. Они могут быть отличены друг от друга только по их электромагнитному взаимодействию. Если допустить, что электромагнетизм мог бы быть «выключен», как, скажем, магнитное поле в лаборатории, то тогда бы протон и нейтрон «выродились» бы в состояние неразличимости. Следовательно, нуклон можно считать «зарядовым дублетом», одним из состояний которого является протон, а другим—нейтрон.

Эта идея возникла у Гейзенберга, который сумел представить ее в математической форме. Он придумал такое математическое описание

нуклона, которое содержит некоторую переменную, которая может принимать только два значения. Одно из этих значений соответствует протону, другое—нейтрону. Математический аппарат Гейзенберга очень похож на тот, который был использован Паули для описания спина электрона, поэтому Гейзенберг назвал эту переменную величину изотопическим спином. Слово «изотопический» подчеркивает тот факт, что в принципе протон и нейтрон— это изотопы: они имеют почти одинаковые массы, хотя и отличаются по заряду. Слово «спин», конечно, возникло из чистой аналогии и до известной степени путает дело. Оно просто отражает тождественность математической трактовки с трактовкой настоящего спина.

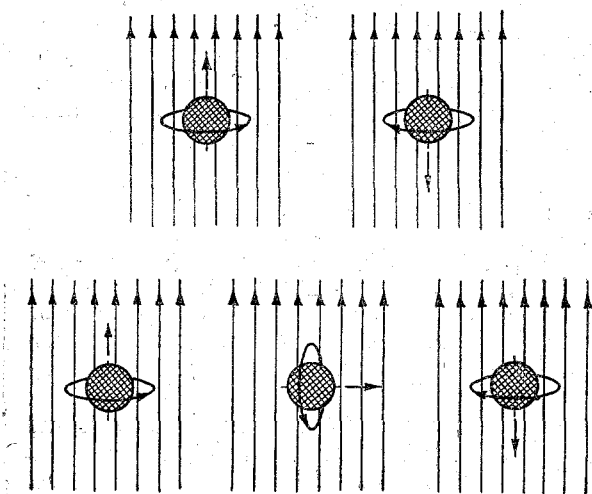


Рис. 5. Вращающаяся частица может занимать только вполне определенные положения по отношению к внешнему магнитному полю (стрелки). Частицы со спином  $1/2$  (вверху) могут располагать ось своего вращения по полю или против него. Частицы со спином 1 (внизу) могут располагать свою ось по полю, перпендикулярно к нему и против поля.

также равен половине. Как и настоящий спин, изотопический спин имеет компоненты плюс половина и минус половина по отношению к данному направлению, которое называется направлением отсчета. В квантовой электродинамике принято относить частицу к такой системе координат, в которой ось  $z$  совпадает с направлением внешнего магнитного поля. Следовательно, направление отсчета для изотопического спина также направлено вдоль оси  $z$ , а его проекции обозначаются через  $I_z$ . Условились, что значение  $I_z$ , равное плюс половине, относится к протону, а проекция  $I_z$ , равная минус половине, описывает нейтрон. В математической теории Гейзенберга зарядовая независимость превращается в закон сохранения. При взаимодействии нуклонов полный изотопический спин сохраняется. Как это может быть строго показано, из этого утверждения вытекает равенство сил между протоном и протоном, нейтроном и нейтроном, а также между протоном и нейтроном. Следует особо подчеркнуть, что до сих пор у нас идея об изотопическом спине является просто некоторым формализмом. Она ничего не прибавляет к представлению о зарядовой независимости и является просто другим, удобным способом ее представления в математической форме.

### Зарядовые мультиплеты

Когда Юкава объяснил возникновение ядерных сил, введя представление об испускании и поглощении пионов, изотопический спин приобрел несколько более широкий смысл. Английский физик Н. Кеммер (Эдинбург-

топическим спином. Слово «изотопический» подчеркивает тот факт, что в принципе протон и нейтрон— это изотопы: они имеют почти одинаковые массы, хотя и отличаются по заряду. Слово «спин», конечно, возникло из чистой аналогии и до известной степени путает дело. Оно просто отражает тождественность математической трактовки с трактовкой настоящего спина.

Изотопический спин, таким образом, является математическим приемом, позволяющим устанавливать различие между протоном и нейтроном; физически они различаются по различию во взаимодействии с электромагнитным полем. Аналогия с настоящим электронным спином весьма тесная: изотопический спин нуклона

ский университет) указал на то, что это представление может быть применено также и к пионам. Он рассуждал следующим образом: ядерные силы, включающие в себя виртуальный обмен пионами, являются зарядово-независимыми. Поэтому пионы должны быть тоже зарядово-независимыми, и тогда к ним можно применить представление об изотопическом спине.

Здесь уместно напомнить, что пионы обладают всеми тремя зарядовыми возможностями: они бывают положительные, отрицательные и нейтральные. Тем самым они образуют зарядовый «триплет», который, если бы было возможным изъять заряды, также вырождался бы в состояние неразличимости. В случае настоящего спина существование триплета означало бы, что спин частицы равен единице, поскольку в этом случае он может занимать три различных положения по отношению к направлению поля. Его  $z$ -компонентами являются плюс единица, ноль и минус единица. Логично приписать пиону изотопический спин, равный единице, и считать его компоненты по направлению отсчета (т. е. величины  $I_z$ ) равными плюс единице, нулю и минус единице.

Группировка частиц в зарядовые дублеты или триплеты (которые носят общее название мультиплетов) дает удобный стенографический способ для их описания. Если мы скажем, что пион является триплетом, причем его средний заряд равен нулю (см. таблицу IV), то отсюда сразу вытекает, что заряды пиона равны плюс единице, нулю и минус единице, изотопический спин равен единице и что его проекции на направление отсчета  $I_z$  равны плюс единице, нулю и минус единице. Аналогично, если мы скажем, что нуклон является дублетом со средним зарядом плюс половина, то это значит, что его заряды равны нулю и плюс единице, изотопический спин равен <sup>половине</sup> единице, а проекции спина  $I_z$  равны плюс половине и минус половине. Как это можно понять из таблицы IV, антинуклоны образуют другой дублет со средним зарядом минус половина. Его изотопический спин равен половине, а проекции изотопического спина  $I_z$  равны минус половине и плюс половине.

Отметим, что представления об изотопическом спине и зарядовых мультиплетах дают нам еще одно различие между нуклонами и пионами. Нуклоны образуют дублет со средним зарядом плюс половина тогда, когда средний заряд пионов равен нулю.

Вот теперь мы можем вернуться к странным частицам. Очевидно, что прежде всего возникает вопрос о том, является ли их взаимодействие также зарядово-независимым и удовлетворяющим закону сохранения изотопического спина. Можно ли считать, например, что положительные сигма-частицы совершенно подобны отрицательным и нейтральным сигма-частицам, если отвлечься от различия в электрических свойствах? Прямых экспериментальных данных по этому вопросу не имеется, но представляется разумным предположить, что принцип зарядовой независимости можно применить к сильным взаимодействиям новых частиц, подобно тому, как это оказалось возможным сделать по отношению к сильным взаимодействиям типа Юкавы. Но это уже означает, что странные частицы представляют собой зарядовые мультиплеты. А если это так, то можно сделать общее предположение, что они могут быть классифицированы точно так же, как нуклоны и пионы. Это означало бы, что тяжелые странные частицы, по-видимому, должны быть связаны с нуклонами; они возникают из нуклонов и распадаются снова на нуклоны. Поэтому стали предполагать, что тяжелые частицы являются дублетами, обладающими изотопическим спином плюс половина и средним зарядом плюс или минус половина.  $K$ -частица, напротив, очевидно, принадлежит к пионам, поэтому было предположено, что она является триплетом с изотопическим спином, равным единице, и средним зарядом, равным нулю.

Пять лет назад один из авторов настоящей статьи (Гелл-Манн) и японский физик К. Нисидзима независимо пришли к мысли о том, что странные частицы могут вовсе и не следовать этой схеме. Более того, отступ

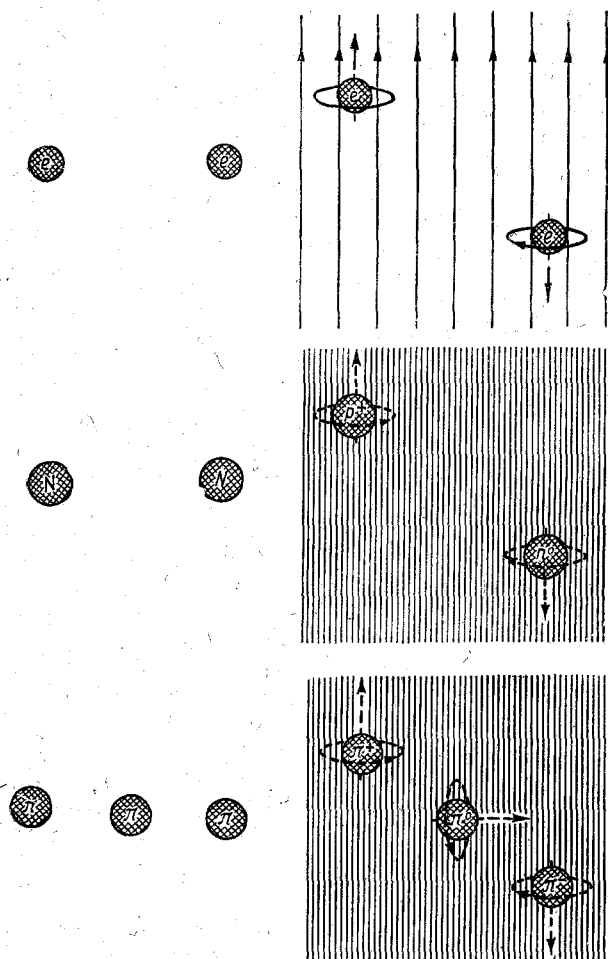


Рис. 6. Различные состояния частицы могут быть установлены только через определенные взаимодействия. Два электрона, имеющие противоположные направления спина (вверху), в отсутствие внешнего магнитного поля кажутся тождественными (левый чертеж). Когда накладывается магнитное поле, отмеченное стрелками, электроны разделяются, попадая в различные энергетические состояния (правый чертеж). Подобно этому при отсутствии электромагнитных взаимодействий все нуклоны (в середине) и все пионы (внизу) неразличимы. Когда такие взаимодействия принимаются во внимание (они отмечены стрелками, проведенными теснее, чем на верхнем чертеже), изотопический «спин», который изображен пунктиром, разделяет нуклоны на протоны и нейтроны, а пионы на три их различные зарядовые модификации.

ми с изотопическим спином единица или даже синглетами с изотопическим спином нуль. (Частица с нулевым изотопическим спином имеет только одно возможное состояние и является, таким образом, сингле-

тением от этой ожидаемой схемы как раз могут дать объяснение странному поведению этих частиц. Что касается автора настоящей статьи, то это открытие буквально сорвалось у него с языка. Однажды, обсуждая проблему тяжелых странных частиц, он сказал о них как о частицах, имеющих изотопический спин, равный единице, но затем быстро поправился, сказав: «Я подразумевал, конечно, половину».

Но чем больше он думал по поводу этой «ошибки», тем более неясным становилось для него, действительно ли это ошибка. Откуда мы знаем, что тяжелые частицы действительно являются дублетами с изотопическим спином половина? Конечно, по всей видимости частицы имеют отношение к нуклонам и ради порядка и простоты всякому хочется верить в то, что они действительно связаны с нуклонами. Но если бы тяжелые частицы были членами этой семьи, то они были бы в непосредственном смысле странными членами. Может быть, именно в изотопическом спине и заключается их странность? Допустим, что тяжелые частицы вместо того, чтобы быть дублетами с изотопическим спином половина, как это имеет место в случае нуклонов, являются триплетами

том.) Допустим, что  $K$ -частицы вместо того, чтобы быть триплетами, как пионы, являются дублетами. (В то время таблица странных частиц только еще заполнялась экспериментаторами. Не было еще даже известно, например, есть ли заряженные лямбда- и  $K$ -частицы.)

Поразмыслив некоторое время над этой идеей, автор начал понимать, что в ней может содержаться такой закон сохранения, в котором мы нуждаемся, чтобы объяснить совместное рождение и удивительно большое время жизни странных частиц. Сейчас мы должны попытаться показать в общих чертах, как это может получиться. Но сначала мы должны несколько развить сами эти идеи.

### Смещенные мультиплеты

Напомним, что простым способом описания группы частиц является указание ее среднего заряда, а также мультиплетности, т. е. того, дублетом или триплетом является частица. Нуклон—дублет со средним зарядом плюс половина; пион—триплет со средним зарядом нуль и так далее. Допустим теперь, что среди тяжелых частиц имеется синглет с зарядом нуль (см. таблицу IV). Может ли эта частица каким-либо образом оказаться нейтральной лямбда-частицей. Если да, то следует отметить, что средний заряд этого мультиплета (синглет тоже является мультиплетом, но с одним членом) равен нулю, что на половину единицы заряда меньше, чем средний заряд нуклонного дублета. Первоначально мы ожидали, что все тяжелые частицы должны иметь средний заряд мультиплета, равный плюс половине. Следовательно, лямбда-частица «смещена» на минус половину единицы заряда. Быть может, это смещение служит важной физической характеристикой частицы, которое может объяснить ее «странность». Допустим, что это так; введем тогда новую физическую характеристику и назовем ее странностью. По причине математического удобства мы определим странность как удвоенное значение смещения, так что странность нашей предполагаемой лямбда-частицы, определяемая как удвоенное значение смещения, равно минус половине, равна минус единице. (Странность нуклона, конечно, равна нулю. Среднее значение его заряда является той точкой, от которой отсчитывается смещение других тяжелых частиц.) Далее, мы можем заметить, что в нашей системе классификации мультиплетов антинуклоны образуют дублет, который является зеркальным изображением нуклонного дублета, относительно линии нулевого заряда (см. таблицу IV). Следовательно, все другие тяжелые частицы могли бы также иметь античастицы в соответствующих мультиплетах. Соответственно этому мы помещаем в нашу таблицу антилямбда-частицу, которая также расположена на нуле. Ее смещение равно плюс половине (от «нормального» среднего заряда антинуклона). Следовательно, ее странность равна плюс единице.

Теперь мы хотим попробовать что-нибудь другое—скажем, триплет со средним зарядом нуль. Его странность была бы равна минус единице. Если бы существовал такой триплет, то существовали бы три странные частицы—положительная, отрицательная и нейтральная, причем все они имели бы примерно одинаковые массы. Во время создания теории странных частиц такого триплета известно не было. В настоящее время он, очевидно, найден с открытием сигма-частицы ( $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$ ). И снова мы должны ожидать соответствующий мультиплет античастиц.

Еще одна возможность состоит в том, что дублет тяжелых частиц смещен на целую единицу заряда, от плюс половины к минус половине, т. е. обладает странностью, равной минус два. Это означает, что мы должны иметь пару частиц с зарядами минус единица и нуль. Мы теперь думаем,

что отрицательно заряженный член пары является кси-частицей ( $\Xi^-$ ). Нейтральный член ( $\Xi^0$ ) до сих пор еще не обнаружен, но успехи теории странных частиц в целом дают нам серьезные основания утверждать, что эта частица будет обнаружена.

$K$ -частицы относятся к категории дублетов, подобных нуклонам и антинуклонам. Это означает, что  $K^+$  и  $K^0$  образуют один дублет со средним зарядом, равным плюс половине. Так как эти частицы объединяются с пионами, для которых «естественный» средний заряд равен нулю, их смещение равно плюс половине, а странность плюс единице. В этом случае  $K^-$  является частью дублета, образуемого второй нейтральной  $K$ -частицей, являющейся античастицей относительно  $K^0$  (ее обозначение: анти-  $K^0$ ). Среднее значение заряда этого дублета равно минус половине, его смещение тоже минус половина, а следовательно, странность равна единице. Псион играет в мезонной группе ту же самую роль, какую играет нуклон в группе тяжелых частиц. Именно, его средний заряд является той точкой, от которой отсчитывается странность частиц, так что его собственная странность равна нулю.

### Сохранение странности

Теперь мы можем приписать определенную странность всем сильно взаимодействующим частицам. Но в чем же соль всей этой операции? Ответ на этот вопрос довольно прост. Оказывается возможным доказать,

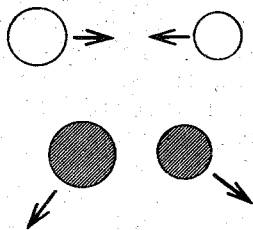


Рис. 7. Здесь иллюстрируется схема совместного рождения. Две нормальные частицы, сталкиваясь (верх), образуют пару странных частиц (низ), которые немедленно расходятся.

исходя из принципа зарядовой независимости, что во всех сильных и электромагнитных взаимодействиях странность должна сохраняться. Другими словами, во всякой реакции, принадлежащей к двум указанным типам, полная странность частиц, вступающих в реакцию, должна быть равна полной странности частиц, являющихся продуктами реакции. Мы покажем, что этот закон сохранения может объяснить наблюдаемое поведение странных частиц.

Во-первых, с его помощью делается очевидным «объяснение» совместного рождения. Странные частицы возникают при столкновениях между обычными частицами. Странность последних равна нулю. Поэтому полная странность продуктов реакции тоже должна равняться нулю. Это и означает, что должны образовываться одновременно по крайней мере две частицы, таким образом, чтобы их индивидуальные

странности компенсировали друг друга. Рассмотрим случай, о котором мы уже упоминали: образование лямбда-частицы и нейтральной  $K$ -частицы при столкновении пиона и протона. Лямбда-частица имеет странность минус единица, а  $K^0$  имеет странность плюс единица: суммарная странность равна нулю.

Как мы уже видели ранее, совместное рождение объясняет, почему странные частицы не распадаются путем сильного взаимодействия. Но они должны быть освобождены и от распада в электромагнитных процессах, так как время их жизни лежит на шкале времени слабых взаимодействий. Закон сохранения странности показывает, как странные частицы избегают распада как через электромагнитные, так и через сильные взаимодействия.

Мы можем пояснить, как это делает закон сохранения странности, только в самых общих чертах. Можно показать, что закон сохранения странности математически эквивалентен сохранению  $z$ -компоненты изо-

Таблица IV

## Странные частицы

Частица	Изотопический спин	Странность	Заряд				
			-1	-1/2	0	+1/2	+1
Нуклон	1/2	0			$p^0$		$p^+$
Анти-нуклон	1/2	0	$\bar{p}^-$		$\bar{p}^0$		
Лямбда	0	-1			$\Lambda^0$		
Анти-лямбда	0	+1			$\bar{\Lambda}^0$		
Сигма	1	-1	$\Sigma^-$		$\Sigma^0$		$\Sigma^+$
Анти-сигма	1	+1	$\bar{\Sigma}^-$		$\bar{\Sigma}^0$		$\bar{\Sigma}^+$
Кси	1/2	-2	$\Xi^-$		$\Xi^0$		
Анти-кси	1/2	+2			$\bar{\Xi}^-$		$\bar{\Xi}^+$
Пион	1	0	$\pi^-$		$\pi^0$		$\pi^+$
К	1/2	+1		$K^0$ $K^0$	$K^0$		$K^+$
Анти-К	1/2	-1	$\bar{K}^-$		$\bar{K}^0$	$K^0$ $K^0$	

Странность иллюстрируется предлагаемой таблицей. Частицы (изображенные белыми кружками) и античастицы (изображенные черными кружками) сгруппированы в мультиплеты, причем их заряды отмечены вертикальными линиями. Сплошной треугольник указывает среднее значение заряда для каждого мультиплета; незакрашенный треугольник указывает «ожидаемое» положение среднего заряда ( $+1/2$  для тяжелых частиц и  $-1/2$  для тяжелых античастиц и нуль для мезонов). Горизонтальные стрелки показывают смещение каждого значения среднего заряда от ожидаемого положения. Странность определяется как удвоенное значение этого смещения.

топического спина  $I_z$ . Последняя величина является в значительной степени мерой заряда: для любого мультиплета чем больше  $I_z$ , тем больше заряд. (Например, нуклонный дублет имеет значения  $I_z$ , равные минус половине и плюс половине, соответствующие зарядам нуль и единица; для пионного триплета  $I_z$  принимает значения минус единица, нуль и плюс единица, что соответствует зарядам минус единица, нуль, плюс единица и т. д.)

Считается, что электромагнитные взаимодействия зависят только от величины заряда. Согласно общим положениям квантовой механики это означает, что такие взаимодействия должны оставлять неизменной величину  $I_z$  (которая является мерой заряда). Но сказать, что они сохраняют величину  $I_z$  — все равно, что сказать, что они сохраняют странность. Следовательно, отдельная частица, странность которой отлична от нуля, не может распадаться на частицы с нулевой странностью посредством электромагнитного процесса.

В конце концов, конечно, странные частицы распадутся на обычные, причем по шкале времени примерно такой же величины, какая имеет место для слабых взаимодействий, так что может показаться, что распад странных частиц принадлежит к этому обширному классу процессов.

Итак, слабые процессы не удовлетворяют сохранению странности. Совсем недавно было обнаружено, что они нарушают также еще один закон сохранения, именно, закон сохранения четности, который обусловливает наличие левой и правой симметрии в природе. Мы не знаем сейчас, есть ли какая-нибудь глубокая связь между двумя этими законами и их нарушением. Во всяком случае, совершенно ясно, что в слабых процессах природа скрывает свои многие важнейшие тайны и что одной из основных задач, которые стоят перед физиками, является выяснение законов, управляющих этими процессами.

### В ы б о р ч а с т и ц

Когда приступали к поискам закона сохранения для объяснения совместного рождения, то надеялись вместе с тем получить дополнительные сведения о рождении и смерти странных частиц. Эта надежда оправдалась. К примеру, правило совместного рождения допускает реакцию, в которой два нейтрона, соударяясь, образуют пару лямбда-частиц.

Фактически, эта реакция рассматривалась как одна из наиболее вероятных. Но эту реакцию никто никогда не наблюдал, а из закона сохранения странности следует, что практически ее никогда наблюдать и не удастся. Странность нейтрона равна нулю, а странность лямбда-частицы равна минус единице. Таким образом, в результате нейтронных столкновений, если они и могут порождать лямбда-частицы, должна также возникать еще одна частица со странностью плюс единица, такая, например, как нейтральная  $K$ -частица; т. е. возможна реакция вида

$$n + n \rightarrow \Lambda^0 + n + K^0.$$

Рассмотрим еще раз случай сигма- и  $K$ -частиц. Сигма-частица является триплетом со странностью минус единица,  $K$ -частица образует пару дублетов. Пара, включающая  $K^+$ , имеет странность, равную +1, а пара, включающая  $K^-$ , имеет странность —1. Следовательно, имеется возможность одновременно создать  $\Sigma^-$  частицу (ее странность —1) и  $K^+$ -частицу (со странностью +1), но не  $\Sigma^+$  и  $K^-$ , так как обе эти частицы имеют одну и ту же странность —1. Первая реакция была обнаружена при столкновениях пионов с протонами:

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

Если не учитывать принцип сохранения странности, то нет никаких видимых причин для того, чтобы реакция не могла идти и другим путем:

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

Однако такая реакция нигде обнаружена не была, и принцип сохранения странности поясняет нам, почему она не должна иметь места.



В качестве другого примера, показывающего мощь принципа сохранения странности, мы проведем исследование распада нейтральной сигма-частицы. Сигма-частица является триплетом с той же странностью ( $-1$ ), как и лямбда. Сигма-частица тяжелее лямбда-частицы на 150 электронных масс. Поэтому представляется возможным, как с точки зрения необходимой энергии, так и с точки зрения сохранения странности, распад сигма-частицы на лямбда-частицу. Если можно так выразиться, сигма-частица вовсе не должна поджидать слабый процесс, чтобы окончить свое существование. Однако в случае заряженной сигма-частицы должны возникнуть среди продуктов распада некоторые другие заряженные частицы, чтобы обеспечить сохранение заряда. Этой частицей может быть пион:

$$\Sigma^+ \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+.$$

Странность пиона равна нулю, так что сохранение странности здесь соблюдается. Но масса пиона равна 270, или примерно на 120 больше той, которая возможна энергетически. Следовательно, этот распад невозможен. Нейтральная сигма-частица, напротив, вовсе не нуждается в образовании какой-либо заряженной частицы. Избыток ее энергии может быть унесен фотоном:

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma.$$

Эта реакция действительно была обнаружена. Эта реакция является электромагнитным процессом (поскольку она включает в себя фотон) и поэтому происходит только немногим медленнее, чем сами сильные взаимодействия.

Итак, странность определяет как правила выбора возможных странных частиц, так и возможные способы их распада. Фактически случилось так, что несколько частиц были предсказаны, согласно правилу странности, до того, как они были экспериментально обнаружены. До сих пор еще не обнаружена нейтральная кси-частица.

### Нейтральная $K$ -частица

Прежде чем покинуть нашу «периодическую таблицу» странных частиц, следует сделать еще одно заключительное замечание. Рассматривая таблицу IV, нельзя не заметить, что  $K^0$  и ее античастица отмечены как разные пары частиц, названные  $K_1^0$  и  $K_2^0$ . Одним из наиболее ярких успехов теории странности было предсказание этой ситуации. Рассуждения, которые привели к этому предсказанию, слишком сложны для того, чтобы воспроизводить их здесь, но они указывают на замечательный процесс перетасовки, производимый природой. Частицы  $K^0$  и анти- $K^0$  возникают в различных процессах. Однажды возникнув, каждая из них может распадаться двумя различными путями, один из которых происходит несколько дольше, чем другой. Квантовая теория показывает, что только половина каждого сорта частиц может следовать одному из способов распада. Следовательно, мы имеем два различных способа рождения и два различных способа распада, причем между ними существует некая перетасовка. Природа разделяет нейтральные  $K$ -частицы по одному принципу при их рождении и совсем по другому принципу при их распаде. Она образует  $K^0$  и анти- $K^0$  частицы. После того, как они возникли, половина из них «превращается» в  $K_1^0$  и половина в  $K_2^0$ , что обнаруживается в способе их распада.

Теория странности дает нам средство для классификации странных частиц. Теория странности согласуется с фундаментальной идеей о четырех группах частиц и трех типах реакций. Таким образом, пока у нас

имеются только тяжелые частицы (некоторые из которых странные), мезоны (некоторые из которых странные), легкие частицы и фотоны. Взаимодействия между ними только: сильное, электромагнитное и, наконец, слабое.

Наш современный уровень знания примерно соответствует уровню знаний Менделеева, обнаружившего лишь то, что существуют определенные закономерности в свойствах элементов. То, к чему мы стремимся, это такое знание, которое было для элементов достигнуто Паули, обнаружившим принцип запрета, на основе которого можно понять, почему такие закономерности имеют место, а также знание, достигнутое создателями квантовой механики, которые сделали возможным делать детальные и точные предсказания, касающиеся атомных систем.

Мы хотели бы знать законы движения частиц; уметь предсказывать, среди прочих вещей, как будут взаимодействовать частицы, когда они сталкиваются и как в результате этих взаимодействий будет отклоняться одна частица, когда она сталкивается с другой. В то время, когда пишется эта статья, большое количество физиков упорно трудится над разработкой теорий, которые, как они надеются, смогут выявить эти закономерности. Судить о результатах будет время.

Однако имеются вопросы более фундаментального порядка, ответ на которые следует, по-видимому, ожидать в более отдаленном будущем. Являются ли все частицы, о которых шла речь, действительно элементарными или некоторые из них являются составляющими других частиц? Если последнее правильно, то какие частицы являются элементарными, а какие нет? Почему природа избрала именно этот набор частиц для построения материального мира? Почему заряды элементарных частиц ограничены только тремя возможностями  $+1$ ,  $-1$  и  $0$ ? Эти и многие другие загадки представляются совершенно выходящими за возможности наших современных теорий. Получим ли мы когда-нибудь ответы на эти вопросы? Каждый физик твердо убежден в том, что получим. Но, возможно, что это потребует совершенно новых идей. Очень многие теоретики убеждены по крайней мере в одной вещи, что современные представления совершенно неприложимы к чрезвычайно малым расстояниям — расстояниям порядка размеров самих частиц. Действительно, есть подозрения, что именно в этой области эти представления становятся противоречивыми.

И наверное пройдет немало времени, прежде чем физик, работающий в области элементарных частиц, обнаружит, что ему уже нечего больше делать.

Успехи физических наук, том LXIV, выпуск 2.

Редакторы Г. В. Розенберг и В. А. Угаров.

Техн. редактор С. С. Гаврилов.

Корректор Л. О. Сечейко.

Сдано в набор 30/XII 1957 г.

Подписано к печати 3/III 1958 г.

Бумага 70×108/16

Физ. печ. л. 13,75. Условн. печ. л. 18,83.

Уч.-изд. л. 18,40. Тираж 4400 экз. Т-02251.

Цена книги 12 руб. Заказ № 4.

Государственное издательство физико-математической литературы.

Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

16-я типография Московского городского Совнархоза. Москва, Трехпрудный пер., д. 9.