

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.12.01

## В ПОИСКАХ НОВЫХ СЕМЕЙСТВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ \*)

*Д. Клайн, А. Манн, К. Руббия*

*По крайней мере одна частица, безусловно не принадлежащая ни к одному из известных семейств элементарных частиц, была обнаружена в экспериментах с нейтрино высоких энергий. Эта новая частица, возможно, открывает неизвестные до сих пор свойства материи.*

В современной физике экспериментальные открытия и теоретические построения всегда что-то дают друг другу и что-то заимствуют друг у друга. В этом смысле сейчас наступило счастливое стечеие обстоятельств. Совсем недавно в строй вступили новые ускорители, на которых порождаются элементарные частицы, появились новые приборы и новая техника обнаружения частиц. В то же самое время развитие теории привело к предсказанию того, что на новых ускорителях можно обнаружить новые, доселе неизвестные состояния вещества. Такое удивительное сочетание предсказаний теории и возможностей эксперимента вдохновило на энергичные поиски новых семейств элементарных частиц. Одним из результатов этих поисков было открытие в 1974 г. сотрудниками Национальной брукхейвенской лаборатории и Стенфордского линейного ускорителя новой частицы, названной  $\bar{\nu}$  или  $\psi$  («пси»). По крайней мере еще одна частица с необычными свойствами была обнаружена в экспериментах, проведенных Национальной лабораторией ускорителей им. Э. Ферми. Пока неясно, есть ли прямая связь между этими двумя типами частиц.

Частица, которую наблюдали в Лаборатории Ферми, обладает массой и временем жизни, попадающими в такой интервал спектра элементарных частиц, который по существу совершенно не исследован. Частица в Лаборатории Ферми возникла в результате взаимодействия интенсивного пучка нейтрино высоких энергий, а ее присутствие было установлено косвенным путем по нейтрино, возникавшим среди других продуктов ее распада. Эксперимент весьма критически зависит от характерных особенностей нейтрино, и его невозможно было провести до тех пор, пока не стали доступны соответствующие приборы и разработана необходимая техника обнаружения этих трудно уловимых частиц.

\*) David C. Cline, Alfred K. Mann, Carlo Rubbia, The Search for New Families of Elementary Particles, Scientific American 234 (1), 44 (January 1976). Перевод В. А. Угарова.

Д. Клайн — профессор физики Университета штата Висконсин, А. Манн — профессор физики Университета штата Пенсильвания, К. Руббия — профессор физики Гарвардского университета, США.

Новая частица не просто пополняет одно из многочисленных семейств элементарных частиц, известных к настоящему времени; значение ее открытия состоит в том, что она является первым представителем совершенно нового семейства. Обнаружение нового семейства частиц в свою очередь означает, что существует до сих пор неизвестное свойство вещества, которое отличает частицы этого нового семейства от частиц, составляющих уже знакомые нам семейства.

	Сильные взаимодействия	Электромагнитное взаимодействие	Слабые взаимодействия
Мезоны	Фотон( $\gamma$ )		$W^+, W^-, W^0$
140 МэВ и выше	Нуль		больше 20 ГэВ
Масса промежуточных частиц			
Радиус действия, см	$10^{-13}$	бесконечен	$10^{-15}$
Бременской масштаб, сек	$10^{-23}$	$10^{-21}$	$10^{-10}$
Энергия	Сохраняется	Сохраняется	Сохраняется
Импульс	Сохраняется	Сохраняется	Сохраняется
Электрический заряд	Сохраняется	Сохраняется	Сохраняется
Лептонное число ( $L_e, L_\mu$ )	Не определено	Сохраняется	Сохраняется
Странность	Сохраняется	Сохраняется	Не сохраняется
Чарм	Сохраняется	Сохраняется	Не сохраняется
Адроны	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Протон (<math>p</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Бароны</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Нейтрон (<math>n</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Ламбда (<math>\Lambda</math>)</div> </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Пион (<math>\pi^\pm</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Мезоны</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Пион (<math>\pi^0</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Каон (<math>K^\pm</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Каон (<math>K^0</math>)</div> </div> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Делонtron (<math>e^\pm</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Лептоны</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Мюон (<math>\mu^\pm</math>)</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Нейтрино (<math>\nu_e, \nu_\mu</math>)</div> </div> </div>		

Рис. 1 Фундаментальные силы или взаимодействия частиц, как сейчас считают, переносятся промежуточными частицами.

Временная шкала взаимодействия является мерой его силы, а радиус взаимодействия обратно пропорционален массе промежуточной частицы. Некоторые характеристики частиц, такие, например, как энергия, импульс и электрический заряд, сохраняются во всех взаимодействиях; некоторые другие, описываемые такими квантовыми числами, как странность, не всегда сохраняются при слабых взаимодействиях. Чарм — гипотетическое квантовое число, аналогичное странности. Сильные взаимодействия распространяются только на частицы одного класса; эти частицы называются адронами и подразделяются на бароны и мезоны. Электромагнитное взаимодействие распространяется на все частицы, обладающие электрическим зарядом. Слабое взаимодействие «ощущают» все частицы, за исключением фотона.

собой посредством одной из указанных сил, действие реализуется обменом некоторой промежуточной частицей, особой для каждого типа взаимодействия. Интенсивность взаимодействия зависит от времени, необходимого для обмена промежуточной частицей, и от расстояния, на котором такой обмен может осуществляться. Время и расстояние в свою очередь связаны со свойствами промежуточной частицы, ответственной за взаимодействие.

Сильное взаимодействие обычно осуществляется за время около  $10^{-23}$  сек, и его возникновение обусловлено именно тем, что обмен промежуточной частицей происходит в столь короткое время. Электромагнитное взаимодействие происходит за время, в 137 большее, т. е., грубо говоря,

относительно означает, что существует до сих пор неизвестное свойство вещества, которое отличает частицы этого нового семейства от частиц, составляющих уже знакомые нам семейства. Пока природа этого нового свойства остается загадочной, и в интерпретации экспериментов, проведенных в Лаборатории Ферми, больше неопределенности, чем ясности. Однако специалисты в области элементарных частиц взволнованы сегодня так, как этого еще ни разу не было за последние десятилетия.

Физики знают четыре основных типа взаимодействия вещества, или — говоря несколько иными словами — четыре вида фундаментальных сил (рис. 1). Эти взаимодействия называются сильными, электромагнитными, слабыми и гравитационными. Если принять «сильное» взаимодействие за единицу, интенсивность электромагнитного взаимодействия составит 1/137 или очень грубо  $10^{-2}$ ; интенсивность «слабых» сил  $10^{-13}$ , а гравитационных  $10^{-39}$ . Когда две частицы взаимодействуют между собой посредством одной из указанных сил, считается, что взаимодействие реализуется обменом некоторой промежуточной частицей, особой для каждого типа взаимодействия. Интенсивность взаимодействия зависит от времени, необходимого для обмена промежуточной частицей, и от расстояния, на котором такой обмен может осуществляться. Время и расстояние в свою очередь связаны со свойствами промежуточной частицы, ответственной за взаимодействие.

за  $10^{-21}$  сек. Время, необходимое для реализации слабого взаимодействия, существенно зависит от энергии взаимодействия; оно может доходить до  $10^{-18}$  сек, с одной стороны, и до 15 мин — с другой.

Радиус действия фундаментального взаимодействия считается обратно пропорциональным массе промежуточной частицы, которой обмениваются взаимодействующие частицы. Для электромагнитного взаимодействия это соотношение безусловно верно: электромагнитное взаимодействие осуществляется фотонами; масса фотона равна нулю, а радиус действия электромагнитных сил бесконечен. Частица, которой приписывают перенос гравитационного взаимодействия — гравитон, — тоже должен иметь массу, равную нулю, чтобы соответствовать бесконечному радиусу действия сил тяготения; однако гравитоны до сих пор не обнаружены. Сильные взаимодействия переносятся частицами, называемыми мезонами. Они имеют конечную массу, и, как следствие этого, радиус действия «сильного взаимодействия» ограничен. Наименее «тяжелый» из мезонов —  $\pi$ -мезон (пион) — обладает массой около 140 Мэв. Радиус действия сильного взаимодействия составляет около  $10^{-13}$  см, что примерно соответствует размеру частиц, образующих атомные ядра.

Слабые взаимодействия обладают чрезвычайно коротким радиусом действия; когда это взаимодействие было впервые введено Э. Ферми в 1934 г., полагали даже, что этот радиус равен нулю. Но тогда промежуточная частица должна была бы иметь бесконечно большую массу. В более современном варианте теории предполагается, что слабое взаимодействие обладает конечным радиусом, хотя этот радиус чрезвычайно мал; он меньше чем  $10^{-15}$  см, т. е. на два порядка меньше, чем у сильного взаимодействия. Промежуточная частица, участвующая в обмене при слабых взаимодействиях, должна быть, следовательно, очень массивной; измерения, проведенные в лаборатории Ферми, указывают, что ее масса может иметь, как минимум, значение 20 Гэв. Такие частицы еще не обнаружены, но они уже получили название; вот уже много лет их называют  $W$ -частицами.

Из четырех фундаментальных взаимодействий лишь гравитационное является универсальным. Слабые взаимодействия распространяются на все частицы, за единственным исключением; это исключение — фотоны. Электромагнитные силы оказывают влияние главным образом на частицы, обладающие электрическим зарядом. Сильное взаимодействие — самое селективное; оно служит основой для разбиения всех элементарных частиц на две обширные группы — группу адронов, которые «чувствуют» сильные взаимодействия, и группу лептонов, безразличных к этим взаимодействиям.

Внутри этих групп частицы классифицируются по разработанной системе квантовых чисел, приписываемых им на основе экспериментальных данных. Квантовые числа описывают свойства частиц в точности так же, как характерные черты лица могут описать конкретного человека. Полный набор квантовых чисел определяет частицу вполне однозначно; наряду с массой частицы этот набор квантовых чисел представляет нам все то, что вообще можно знать о частице.

□

Каждое квантовое число соответствует некоторому свойству, которое сохраняется при взаимодействии частиц; это значит, что сумма квантовых чисел для данного свойства не изменяется во время взаимодействия. Некоторые квантовые числа, такие, например, как спин и электрический заряд, сохраняются всегда; то же самое относится к энергии (или массе).

При сильных взаимодействиях все квантовые числа сохраняются без каких-либо исключений; при электромагнитных взаимодействиях также сохраняются все квантовые числа, но с одним исключением — речь идет о так называемом изотопическом спине. При слабых же взаимодействиях могут меняться в некоторых случаях даже несколько квантовых чисел. Квантовые числа, у которых отмечается нарушение сохранения, относятся исключительно к адронам; они включают в себя свойства, которые принято называть странностью, внутренней четностью и зарядовым сопряжением.

Для классификации частиц наиболее важным квантовым числом является спин. Измеренный в естественных единицах — постоянной Планка, деленной на  $2\pi$ , — он принимает лишь целые или полуцелые значения. Частицы с целым значением спина называются бозонами, поскольку они подчиняются так называемой статистике Бозе — Эйнштейна. Частицы, обладающие полуцелым спином, подчиняются статистике Ферми — Дирака и называются фермионами.

Все известные лептоны являются фермионами; фактически все они имеют одинаковый спин, равный половине. С другой стороны, среди адронов есть как бозоны, так и фермионы. Бозонами среди адронов являются мезоны (частицы, переносящие сильные взаимодействия); значения спина, которым они обладают, равны 0, 1, 2 или 3. Фермионы образуют отдельную группу; их называют барионами, а значения спина, которыми они обладают, равны  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$  и т. д. Внутри каждой из больших групп адронов частицы объединяются в семейства; эти семейства отличаются друг от друга значением спина.

Фотоны и  $W$ -частицы не принадлежат ни к адронам, ни к лептонам. Их спин равен единице, и они являются, таким образом, бозонами; их называют векторными бозонами, потому что квантовомеханическое уравнение, описывающее частицы со спином единица, по виду соответствует четырехмерному вектору. Гравитоны, имеющие спин 2, также принадлежат к бозонам; к бозонам принадлежат также мезоны, ответственные за перенос сильного взаимодействия. В итоге мы обнаруживаем, что все фундаментальные взаимодействия переносятся бозонами.

□

Барионы, обладающие наименьшей массой, имеют спин, равный половине. Таких барионов восемь: два нуклона ( $N$ ) со средней массой  $393\text{ }M\text{эв}$ , ламбда-частица ( $\Lambda$ ) с массой  $1,116\text{ }M\text{эв}$ , три сигма-частицы ( $\Sigma$ ) со средней массой  $1193\text{ }M\text{эв}$  и две каскадные частицы ( $\Xi$ ) со средней массой  $1,317\text{ }M\text{эв}$ . Как можно объяснить различие в значениях их масс? Обычно его относят на счет гипотетического пятого взаимодействия, иногда называемого «полусильным». Это «полусильное» взаимодействие не имеет ни теоретического обоснования, ни экспериментального подтверждения — какими обладают четыре фундаментальных взаимодействия — и вводится исключительно ради того, чтобы объяснить «расщепление масс» адронов. Если бы как-то удалось отключить полусильное взаимодействие, все барионы со спином половина приобрели бы одинаковую массу; они выродились бы в одно состояние. Полусильное взаимодействие расщепляет вырожденное состояние на частицы различной массы, и это расщепление сопровождается появлением двух новых квантовых чисел — изотопического спина и странности. Оба эти квантовых числа — «внутренние квантовые числа»; их влияние не обнаруживается непосредственно на поведении отдельной частицы; оно возникает лишь как характеристика семейства адронов.

За счет полусильных взаимодействий частицы с различными значениями странности или изотопического спина приобретают различные значения массы (рис. 2).  $\Lambda$ - и  $\Sigma$ -частицы, например, обе имеют странность, равную  $-1$ , но, поскольку значения изотопического спина у них разные (0 и 1 соответственно), они отличаются друг от друга по массе примерно на  $80$  Мэв. Каскадные частицы и нуклоны имеют одинаковые изотопические спины, но отличаются на две единицы по странности; как следствие этого, каскадные частицы имеют массу на  $375$  Мэв больше, чем нуклоны.

Таким же образом электромагнитное взаимодействие расщепляет каждое адронное состояние на частицы с различной массой и различным электрическим зарядом (и тем самым нарушает сохранение изотопического спина). Если бы стало возможным отключить электромагнитные взаимодействия, у обоих нуклонов, например, массы стали бы одинаковыми, а также стали бы одинаковыми и все остальные свойства. Но поскольку электромагнитные взаимодействия не отключаются, нуклоны расщепляются на два состояния — протон, имеющий электрический заряд  $+1$ , и нейтрон с электрическим зарядом 0. Поскольку электромагнитные взаимодействия куда слабее полусильных взаимодействий, расщепление масс протона и нейтрона составляет около  $1,3$  Мэв, примерно в  $136$  раз меньше, чем расщепление масс  $\Lambda$ -частицы и нуклона.

В точности так же возникает такого же порядка расщепление масс среди мезонов (рис. 3). Наименее массой обладают мезоны со спином 0; к ним относятся три пиона ( $\pi$ ), четыре каона, или иначе  $K$ -мезона ( $K$ ), эта- $(\eta)$  и эта-штрих-мезоны ( $\eta'$ ). Пион и  $K$ -состояния различаются как по изотопическому спину, так и по странности, и их расщепление по массе составляет  $350$  Мэв.  $\eta$ - и  $\eta'$ -мезоны являются примером особого случая — у них одинаковые значения изотопического спина и странности, и их отличие определяется различными значениями еще одного квантового числа — их расщепление по массе составляет около  $410$  Мэв. За счет электромагнитного взаимодействия пионы расщепляются на состояния с электрическими зарядами 0,  $+1$  и  $-1$ , причем различие масс в этом случае составляет около  $4$  Мэв. Расщепление масс за счет электромагнитного взаимодействия у каонов более сложно, так как каоны являются странными частицами. В добавок к состояниям с положительным и отрицательным зарядом, есть еще два нейтральных каона с противоположными значениями странности.

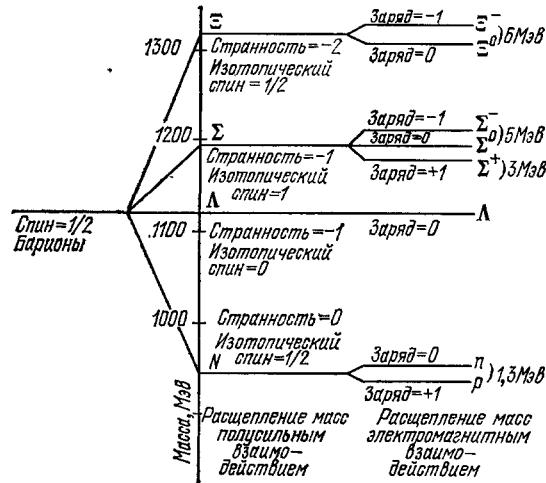


Рис. 2. Распределение масс барионов может быть объяснено, если постулировать, что единственное, гипотетическое, состояние «расщепляется» на частицы различной массы.

Барионы со спином  $1/2$  включают в себя частицы четырех сортов: нуклоны  $N$ ,  $\Lambda$ -частицы,  $\Sigma$ -частицы и каскад  $\Xi$ . Расщепление по массе происходит за счет гипотетического полусильного взаимодействия, в соответствии со значениями квантовых чисел странности и изотопического спина. Каждая из этих частиц расщепляется далее электромагнитным взаимодействием на состояния с различным электрическим зарядом. Нуклон, например, расщепляется на нейтрон и протон. Расщепление масс, происходящее за счет электромагнитного взаимодействия, значительно меньше, чем расщепление масс за счет полусильного взаимодействия (на рисунке указано без соблюдения масштаба).

Расщепление масс наблюдается также и среди лептонов, но оно не получило до сих пор удовлетворительного объяснения. К настоящему времени в семейство лептонов входят всего лишь четыре частицы: электрон ( $e$ ), мюон ( $\mu$ ) и нейтрино двух сортов ( $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ ).

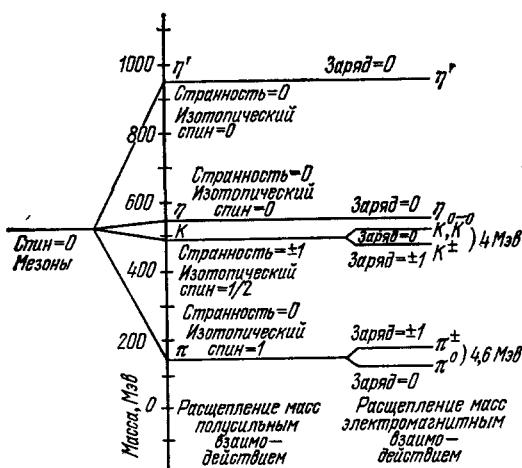
Электрон — чрезвычайно легкая частица, его масса составляет около  $0,51$  Мэв; мюон примерно в 200 раз тяжелее, его масса  $105,6$  Мэв. Сейчас мы не в состоянии указать какой-либо механизм, обусловливающий различие этих частиц по массам. Впрочем, и само существование мюона — наиболее трудная загадка в физике элементарных частиц.

Электрон и мюон обладают различными лептонными квантовыми числами, обозначаемыми через  $L_e$  и  $L_\mu$ . Эти квантовые числа сохраняются при всех взаимодействиях; лептонные квантовые числа переносятся нейтрино обоих сортов. У нейтрино нет электрического заряда и поэтому оно не испытывает воздействия со стороны электромагнитных сил; как лептоны, они не участвуют в сильных взаимодействиях. Их взаимодействие осуществляется исключительно путем слабых взаимодействий и в результате всех этих обстоятельств взаимодействие нейтрино с веществом оказывается почти неуловимым. Считается, что масса нейтрино равна нулю, но экспериментально этот факт еще не получил окончательного подтверждения.

Наибольшее расщепление масс предсказывается для векторных бозонов. Как мы уже сказали, различие в массах между фотоном (с нулевой массой) и  $W$ -частицей должно составлять по крайней мере  $20$  Гэв, а может оказаться и значительно больше. Бозоны  $W^+$  и  $W^-$ , обладающие электрическим зарядом, были введены Юкавой в 1935 г.; нейтральный  $W^0$ -бозон привился к семейству в 60-х годах и, как следствие его существования, было высказано предположение о существовании нейтральных слабых токов — тип взаимодействия, при котором слабые взаимодействия возникают без обмена электрическими зарядами. Слабые нейтральные токи недавно были обнаружены, однако из этого вовсе не следует, что  $W^0$  обязательно существует.

Последние подсчеты для масс бозонов  $W^+$  и  $W^-$  дают значения  $54$  Гэв, а масса  $W^0$ -бозона должна быть около  $80$  Гэв. Это грандиозное различие в массах постулировано весьма радикальными теориями\*), которые стремятся доказать, что слабые и электромагнитные взаимодействия, несмотря на их очевидные различия, являются на самом деле просто различными

\*.) См. статью С. Вайнберга «Единые теории взаимодействия элементарных частиц» (перевод), УФН 118, 505 (1976). (Прим. перев.).



сторонами одного и того же явления. Эти теории объясняют расщепление масс, исходя из предположения, что в некотором воображаемом начальном состоянии все четыре векторных бозона не имеют массы; из этих теорий вытекает, что три из этих четырех частиц приобретают столь значительные массы потому, что у четвертой частицы масса по-прежнему остается равной нулю.

Единые теории слабого и электромагнитного взаимодействия указывают также на то, что возможно существование дополнительных лептонов, обладающих большей массой, чем уже известные. Как тяжелые  $W$ -бозоны, так и дополнительные тяжелые лептоны играют в теории одну и ту же роль; они позволяют исключить некоторые математические выражения, обращающиеся в бесконечность; такие члены лишают теорию физического смысла и возможности каких-либо предсказаний.

Среди множества открытых элементарных частиц лишь немногие стабильны и входят в состав обычного вещества. Известно, что устойчив фотон; самые глубокие основы квантовой механики указывают на то, что он не должен распадаться. Предполагается также, что устойчивы протон и электрон и это предположение подтверждается экспериментальными данными, показывающими, что времена их жизни на много порядков величины больше, чем предполагаемый возраст Вселенной. Наконец, считается также, что устойчивы нейтрино, но экспериментальных данных недостаточно, чтобы сделать окончательный вывод.

Все другие частицы, стремясь перейти в состояния с наименьшей энергией, более или менее быстро распадаются и в конце концов достигают конечного состояния, образованного устойчивыми частицами. Некоторые адроны распадаются посредством сильных взаимодействий. Например,  $\eta'$ -мезон может распадаться, образуя  $\eta$ -мезон и два противоположно заряженных пиона; записанная в символах, эта реакция выглядит так:  $\eta' \rightarrow \eta + \pi^+ + \pi^-$ . Нетрудно проверить, что в этом взаимодействии масса сохраняется: масса  $\eta'$ -мезона составляет около 958  $M_{эв}$ , а сумма масс продуктов распада равна примерно 829  $M_{эв}$ ; избыток в 129  $M_{эв}$  проявляется в виде кинетической энергии продуктов распада. Электрический заряд также сохраняется:  $\eta'$ -мезон нейтрален, а заряды продуктов распада соответственно равны 0, +1, -1, так что суммарный заряд равен нулю. Аналогичным путем можно показать, что сохраняются также спин, странность и изотопический спин. Распад осуществляется в характерное для сильных взаимодействий время около  $10^{-23}$  сек.

Многие частицы не могут распадаться посредством сильных взаимодействий, потому что не существует такой комбинации частиц, которая имела бы меньшую массу и при этом обеспечивала бы сохранение всех квантовых чисел. Немногие адроны, такие, например, как нейтральный пион, распадаются через электромагнитные взаимодействия. Нейтральный пион имеет наименьшую массу среди всех адронов и не может распасться посредством сильных взаимодействий просто потому, что не существует сильно взаимодействующей частицы меньшей массы, в которую он мог бы перейти. Но зато он почти всегда распадается на два фотона. Этот процесс также обеспечивает сохранение массы, электрического заряда и всех других квантовых чисел. Он происходит за времена около  $10^{-16}$  сек.

Однако для многих частиц ни один из этих процессов не является допустимым; они могут распадаться только через слабые взаимодействия. Рассмотрим, например, распад  $\Lambda$ -частицы, которая — как указывалось выше — входит в семейство барионов, обладая спином  $1/2$ .  $\Lambda$ -частица чаще всего распадается на протон и отрицательный пион или же на нейтрон и нейтральный пион; эти реакции можно записать в виде  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$

и  $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$ . Поскольку все частицы, входящие в реакцию, являются адронами, могло бы показаться, что распад должен идти через сильные взаимодействия. Масса, электрический заряд и спин сохраняются. Однако распад через сильные взаимодействия запрещен, поскольку при сильных взаимодействиях должна сохраняться странность.  $\Lambda$ -частица обладает странностью  $-1$ ; странность протона, нейтрона и пиона равна нулю. В обоих способах распада странность не сохраняется, а изменяется на единицу. Поэтому распад должен осуществляться через слабые взаимодействия и время, необходимое для распада, значительно превосходит время, необходимое для других распадов; оно составляет около  $10^{-10}$  сек.

Имеется немало других адронов, которые должны распадаться через слабые взаимодействия, поскольку при их распаде нарушаются некоторые законы сохранения. Например, заряженные каоны, обладающие странностью  $\pm 1$ , могут распадаться на заряженный и нейтральный пионы или же на мюон и нейтрин. Поскольку странность не сохраняется, распад может осуществляться только посредством слабого взаимодействия и происходит за время около  $10^{-8}$  сек.

В нескольких немногочисленных случаях слабый распад является обязательным, несмотря на то, что все квантовые числа сохраняются. Рассмотрим распад нейтрона. Он не может вести к образованию протона и пиона, так как суммарная масса протона и пиона превышает массу нейтрона. Точно так же, он не может распасться через электромагнитное взаимодействие на протон и фотон, поскольку эта реакция нарушила бы закон сохранения электрического заряда. Единственный допустимый переход реализуется через слабое взаимодействие и ведет к образованию протона, электрона и антинейтрин. В символах эта реакция записывается так:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ . Этот процесс называется  $\beta$ -распадом; он представляет собой хорошо известную форму радиоактивности и существенный элемент ядерной химии звезд.

При распаде нейтрона никакие законы сохранения не нарушаются. Энергия, заряд и спин, так же как и странность, остаются после распада такими же, какими они были и до распада. Тем не менее время, необходимое для распада, чрезвычайно велико,  $\sim 10^3$  сек или, грубо говоря, 15 мин. Весьма похожий распад  $\Lambda$ -бариона (в символах он записывается так:  $\Lambda \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ) происходит во много раз быстрее, хотя он нарушает сохранение странности. Почему же нейтронный распад замедляется?

Объяснение опирается на весьма важный принцип, приложимый к многим другим слабым распадам. Расщепление масс между  $\Lambda$  и нуклонными состояниями (вызванное наличием полусильных взаимодействий) составляет около 177 Мэв; эта цифра определяет энергию, способную форсировать процессы распада. С другой стороны, расщепление масс между нейтроном и протоном (обусловленное наличием электромагнитных взаимодействий) равно примерно 1,3 Мэв. Именно этот недостаток энергии замедляет процесс распада нейтрона; фактически он замедляет этот процесс куда значительнее, чем нарушение закона сохранения странности замедляет распад частицы.

Высказанный принцип показывает, что расщепление масс внутри семейства элементарных частиц очень тесно связано со скоростью слабого распада частиц. Если состояния частиц весьма близки по массам, то у них мало энергии для реализации их распадов и можно ожидать, что время их жизни будет относительно велико.

Допустим, что обнаружится новая группа адронов, у которой расщепление масс будет значительно большим, чем у известных сейчас семейств, таких, как, например, семейства барионов со спином 1/2. Частицы в такой группе будут обязательно иметь новое квантовое число, пото-

му что именно такое квантовое число определяет новую группу частиц и позволяет отличить члены нового семейства от уже известных частиц. Это новое квантовое число будет опять-таки внутренним, возможно, очень напоминающим странность.

В пределах новой группы одна частица может распадаться, превращаясь в другую посредством сильных взаимодействий, в точности так же, как одна странная частица может превращаться в другую странную частицу (меньшей массы) через сильные взаимодействия. Переходы же в другие состояния (например, распад на известные барионы и мезоны) могут осуществляться только через слабые взаимодействия, поскольку такие переходы нарушают сохранение нового квантового числа.

В силу значительного расщепления масс между новыми гипотетическими адронами слабые переходы не будут задерживаться из-за недостатка энергии. Можно предсказать поэтому, что отличительной особенностью этих новых адронов будет значительно меньшее время слабого распада, чем время такого же распада у хорошо известных частиц. Однако времена их жизни будут все еще значительно больше, чем  $10^{-23}$  сек, т. е. больше времени, характеризующего распад частиц за счет сильного взаимодействия.

Распады лептонов обязательно идут посредством слабого взаимодействия. Электрон и нейтрино не распадаются вообще; распад мюона, единственного лептона, способного переходить в нижнее энергетическое состояние, должен происходить не только с сохранением энергии и электрического заряда, но также и лептонных квантовых чисел  $L_e$  и  $L_\mu$ . Как следствие всех этих требований, мюон неизменно распадается на электрон, антинейтрино электронного типа и нейтрино мюонного типа. Этот процесс распада записывается в виде  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ . В начальном состоянии квантовое число  $L_\mu$  равно 1; таким же числом обладает мюонное нейтрино в конечном состоянии; поскольку квантовые числа  $L_e$  электрона и электронного антинейтрино в сумме дают нуль, лептонные квантовые числа сохраняются. Расщепление масс мюона и электрона составляет около  $105$  Мэв, и время, необходимое для распада, равно приблизительно  $10^{-6}$  сек.

Если существуют более тяжелые лептоны, они будут скорее всего распадаться на манер распада мюона, т. е. с испусканием нейтрино и антинейтрино. И снова, значительное расщепление масс будет ускорять процесс распада; следует ожидать, что тяжелые лептоны будут иметь меньшее время жизни, чем мюон.

Массивные промежуточные векторные бозоны должны также распадаться через слабые взаимодействия. Возможной модой распада для заряженной  $W$ -частицы будет распад на электрон или мюон и антинейтрино. Для отрицательного векторного мезона, к примеру, реакция выглядела бы так:  $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$  и  $W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$ . В обоих процессах электрический заряд и лептонные квантовые числа  $L_e$  и  $L_\mu$  сохраняются. Расщепление масс, отделяющее  $W$ -частицы от лептонов, чрезвычайно велико, и слабый распад поэтому будет соответственно быстрым. Время жизни  $W$ -частиц оценивается около  $10^{-18}$  сек.

□

Мы привели аргументы в пользу существования трех типов еще не обнаруженных частиц: новой группы адронов, тяжелых лептонов и массивных промежуточных векторных бозонов. Все три типа представляют значительный теоретический интерес. Обнаружение новой группы адронов интересно потому, что это позволило бы ввести новое квантовое число

и произвести выбор между различными теориями, описывающими строение адронов. Открытие и теоретическое объяснение свойств странных частиц 25 лет тому назад как раз привело к такому результату. Всякий новый член семейства лептонов — это уже событие, поскольку лептонов пока раз, два и обчелся. Мало того, есть основания предполагать, что лептоны — это простые точечные частицы, лишенные внутренней структуры, и сегодня мы не в состоянии объяснить, за счет чего возникает расщепление масс среди таких частиц, или же ответить на вопрос, почему для описания четырех частиц требуется два квантовых числа ( $L_e$  и  $L_\mu$ ). Обнаружив новые лептонные состояния и выяснив их свойства, мы могли бы рассчитывать получить ответы на эти вопросы. Наконец, существование  $W$ -частиц или тяжелых лептонов — или, лучше, и тех и других — весьма важно для обоснования единой теории слабого и электромагнитного взаимодействия. Если бы можно было обнаружить  $W$ -частицу, то это подтвердило бы весьма заманчивое предположение о том, что каждое фундаментальное взаимодействие переносится промежуточным бозоном, масса которого обратно пропорциональна радиусу действия сил.

Если допустить — чтобы обсудить все следствия этой возможности — что все три новых состояния действительно существуют в природе, то возникает вопрос, почему их до сих пор не наблюдали экспериментально? Одно из возможных объяснений состоит в том, что эти частицы просто слишком массивны и ни один из существующих ускорителей не имеет достаточной энергии, чтобы создать их. Если  $W$ -частицы обладают такой массой, какую приписывают им некоторые теории, они действительно находятся далеко за пределами возможностей современных ускорителей, но вместе с тем куда менее вероятно, что новые адроны и тяжелые лептоны обладают такими массами. Однако высокие энергии — это отнюдь не единственное ограничение экспериментальной аппаратуры. Необходимо не только породить частицу, но также обнаружить ее присутствие; для обнаружения частицы весьма существенно время ее жизни.

Стабильная частица, а также частицы с относительно большим временем жизни могут быть довольно легко обнаружены. Если у частицы есть электрический заряд, она оставляет след в пузырьковой камере или каком-либо другом аналогичном устройстве. Характеристики этих треков могут быть получены из измерений; в конце концов можно определить скорость, импульс и энергию частицы. Если частица электрически нейтральна, обнаружить ее труднее, но все же ее присутствие можно установить по другим частицам, испытавшим соударение с ней.

Но все эти методы обнаружения частиц годятся только для частиц с достаточно большим временем жизни, потому что все они опираются на то, что частица пройдет макроскопическое расстояние внутри детектора. Частицы высоких энергий движутся по большей части со скоростями, близкими к скорости света; если время жизни такой частицы составляет  $10^{-13}$ , она сместится за время от порождения до распада на расстояние менее одной десятой миллиметра. Этого расстояния совершенно недостаточно для большинства современных детекторов, которые в связи с этим могут отмечать частицы только со временем жизни, большим, чем  $10^{-13}$  сек.

Если у частицы время жизни совсем маленькое, то ее заметить в принципе возможно, но метод обнаружения уже менее прямой, а получаемые сведения о частице более скучные. Этот метод опирается на соотношение неопределенности Гейзенberга и состоит в поисках резкого увеличения вероятности взаимодействия между известными частицами при некотором значении энергии. Такое увеличение энергии называется резонансом. Одним из выражений принципа неопределенности является соотношение

между энергией, при которой наблюдается резонанс, и временем жизни возникающей частицы: чем меньше неопределенность в энергии, тем больше время жизни. Большинство адронов, распадающихся через сильные взаимодействия за  $10^{-23}$  сек, были обнаружены именно этим методом.  $j$ - или  $\psi$ -частицы были также найдены как резонансы. На Стенфордском линейном ускорителе наиболее массивная из этих частиц проявила себя как увеличение вероятности аннигиляции электрона и позитрона при энергии 3,1 Гэв. Неопределенность в определении этой энергии составила несколько тысяч электрон-вольт; соответственно этому время жизни частицы составляло около  $10^{-20}$  сек. Время жизни  $\eta$ -мезона, равное примерно  $10^{-19}$  сек, было измерено аналогичным образом.

В принципе любая частица может быть обнаружена в виде резонанса, но для частиц с временем жизни более чем  $10^{-18}$  сек этот метод практически неинтересен. Для долгоживущих частиц теоретическая неопределенность в резонансной энергии весьма мала и она полностью перекрывается ошибками, вносимыми экспериментальной аппаратурой.

В спектре времен жизни элементарных частиц имеется довольно большая щель, которую нетрудно заметить; она простирается от времен  $10^{-11}$  сек до  $10^{-18}$  сек (рис. 4). Эта область не совсем пустыня; как мы видели, в нее попадает нейтральный пион, время жизни которого составляет  $10^{-16}$  сек. Но за этим исключением, весь этот интервал

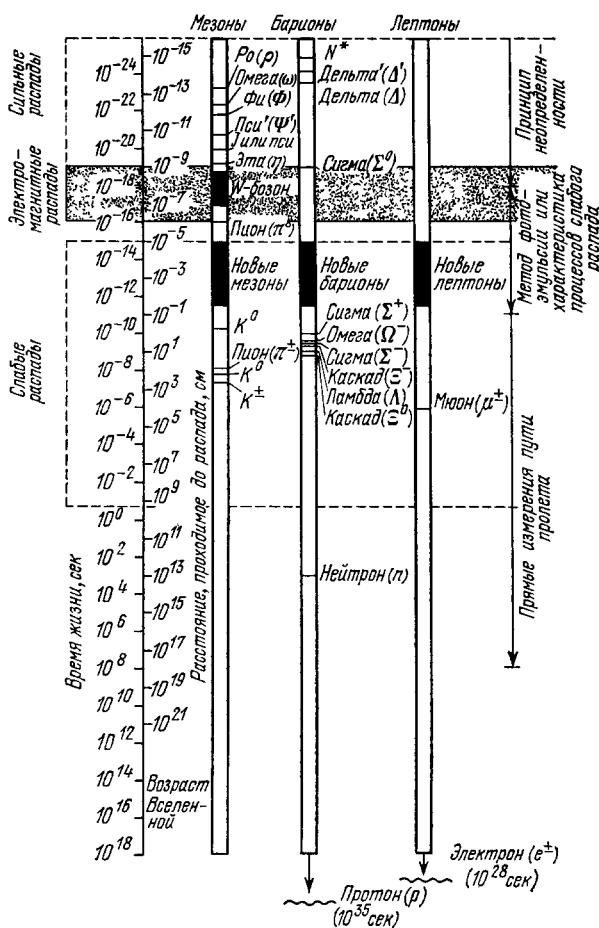


Рис. 4. Время жизни частицы определяется в первую очередь модой ее распада; в свою очередь время распада определяет те способы, которыми частица может быть обнаружена.

Многие частицы, распадающиеся исключительно через слабые взаимодействия, являются сравнительно долгоживущими и проходят значительные расстояния до своего распада. Времена жизни таких частиц могут быть измерены путем непосредственного замера длины их пути в детекторе частиц. Частицы, распадающиеся через сильные или электромагнитные взаимодействия, живут очень недолго, и пройденный ими путь слишком мал для того, чтобы его можно было измерить. Времена их жизни все же могут быть определены на основе принципа неопределенности Гейзенберга; согласно этому принципу время жизни обратно пропорционально неопределенности в определении энергии частицы (или ее массы). Для частиц со средним временем жизни, попадающих в интервал от  $10^{-18}$  до  $10^{-11}$  сек, ни один из этих методов не пригоден. Отдельные короткие треки частиц еще могут быть обнаружены в фотоэмulsionи, но большинство частиц с временем жизни, попадающими в этот интервал, обнаруживается косвенно по продуктам их распада. Предсказано, что в эту область должны попасть несколько групп частиц (темные полосы). Ожидается, что они будут распадаться через слабые взаимодействия, однако быстрее, чем другие частицы, также распадающиеся через слабое взаимодействие.

представляется совсем неисследованным. Если проводить систематические поиски частиц в этом интервале, потребуется применение новых методов детектирования.

□

Новые адроны, тяжелые лептоны и  $W$ -частицы, как ожидают, имеют времена жизни между  $10^{-12}$  и  $10^{-18}$  сек. Это предсказание опирается на расщепление масс частиц, находящихся в различных состояниях; предполагается, что это расщепление масс больше, чем у известных до сих пор частиц. Именно поэтому обычные методы детектирования частиц, по-видимому, не будут достаточно эффективны при поисках новых состояний.

Наиболее обещающим способом обнаружения новых частиц является исследование продуктов соответствующих взаимодействий для некоторых хорошо различимых мод распада. Как мы показали, новые адроны, тяжелые лептоны и  $W$ -частицы должны все без исключения распадаться через слабые взаимодействия. Адроны должны совершать переходы к более легким, обычным адронам с испусканием мюона или электрона и нейтрино. Как тяжелые лептоны, так и заряженные  $W$ -частицы должны, по-видимому, содержать среди продуктов их распада мюоны и нейтрино мюонного типа (с противоположными квантовыми числами  $L_\mu$ ). Таким образом, представляется весьма вероятным, что характерным признаком распада этих частиц может служить наличие по крайней мере одного нейтрино в конечном состоянии.

Но нейтрино непосредственно обнаружить нельзя; они пройдут через любой мыслимый прибор, не испытав при этом никакого взаимодействия. И все же они выдают свое присутствие благодаря строгому сохранению квантовых чисел  $L_e$  и  $L_\mu$ . Возникающие в процессе реакции нейтрино ускользают от прямой регистрации, но в результате их ухода остающаяся совокупность частиц обнаруживает очевидное нарушение закона сохранения лептонного заряда. Поскольку мы твердо уверены в том, что нарушение этого закона невозможно, это означает участие нейтрино в реакции.

Допустим, что слабое взаимодействие возникло при столкновении нейтрино мюонного типа с нейтроном. Если в реакции участвует заряженный ток (который значительно более вероятен, чем редкий нейтральный слабый ток), законы сохранения требуют, чтобы в конечном состоянии были мюон и по крайней мере один барион, например протон. В символах эта реакция выглядит так:  $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$ . Представим себе, что при взаимодействии возникает  $W^+$ -частица. Тогда электрический заряд сохраняется без превращения нейтрона в протон и реакцию можно записать в виде  $\nu_\mu + n \rightarrow n + W^+ + \mu^-$ . Частицу  $W^+$  непосредственно обнаружить нельзя, так как она мгновенно распадается (за промежуток времени около  $10^{-18}$  сек), но продукты ее распада — мюон и антинейтрино — составляют часть конечного состояния реакции. Таким образом, вся реакция в целом изобразится схемой  $\nu_\mu + n \rightarrow n + \mu^+ + \mu^- + \nu_\mu$ , где нейтрино мюонного типа и положительный мюон конечного состояния являются уже продуктами распада  $W^+$ .

Нейтрино, возникающие в только что описанной реакции, безусловно ускользнут от наблюдения; не так-то просто обнаружить и нейтроны конечного состояния; конечное состояние на первый взгляд будет образовано из положительного и отрицательного мюонов, каждый из которых сравнительно легко может быть обнаружен. Простой подсчет обнаруживает, что лептонное число  $L_\mu$  всех частиц, обнаруживаемых в конечном состоянии, равно либо  $-1$ , либо  $+1$ , либо  $0$ , тогда как  $L_\mu$  начального

состояния равно  $+1$ . Очевидное нарушение закона сохранения  $L_\mu$  указывает на присутствие нейтрино в реакции, а присутствие нейтрино — на возникновение новой элементарной частицы.

Если бы новой частицей оказался нейтральный тяжелый лептон, а не  $W^+$ -частица, конечное состояние было бы тем же самым. Если бы это был адрон, принадлежащий некоторой новой группе, конечное состояние по-прежнему включало бы в себя два мюона, хотя вовсе не обязательно, чтобы эти два мюона были с противоположными зарядами. В каждом из этих случаев на существование ускользающего нейтрино указывает явное нарушение сохранения лептонного заряда. Но чтобы различать между этими тремя гипотетическими возможностями, следует более внимательно остановиться на особенностях мюонов двух типов.

Взаимодействия такого типа известны под названием димюонных событий. В Лаборатории Ферми был проведен тщательный поиск таких событий; в нем приняли участие десять физиков из Гарвардского университета, Пенсильванского университета и Висконсинского университета. За последние два года нам удалось наблюдать события с теми самыми характеристиками, которые мы ожидали; наблюдение димюонных событий впоследствии было подтверждено другой группой физиков Калифорнийского технологического института и Лаборатории Ферми. Первое димюонное событие было найдено в апреле 1973 г., вскоре после того, как был запущен ускоритель в Лаборатории Ферми.

В принципе  $W$ -частицы или тяжелые лептоны могут появляться при самых разнообразных взаимодействиях, включая сюда взаимодействия между адронами. Члены новых адронных семейств могут порождаться также при соударениях обычных адронов, хотя в этом случае всегда должна появляться пара «частица — античастица» для соблюдения жестких законов сохранения, присущих сильным взаимодействиям. Соударения адронов высоких энергий представляют собой весьма сложные события; в этих событиях многие побочные процессы идут наряду с теми процессами, которые нам хотелось бы исследовать. Поэтому применялась иная техника: мы использовали бомбардировку нуклонов пучком нейтрино высоких энергий. В таких событиях участвует только слабое взаимодействие, в результате наблюдений можно интерпретировать сравнительно просто. Кроме того, новые адроны могут в этом случае порождаться поодиночке, поскольку слабое взаимодействие способно изменять внутренние квантовые числа адронов.

□

Первое требование, предъявляемое к этой новой технике, — наличие пучка нейтрино высоких энергий. В Лаборатории Ферми они получаются не прямым путем, а с помощью протонов, извлеченных из основного ускорителя лаборатории — протонного синхротрона на 400 Гэв. Протоны, соударяясь с металлической мишенью, порождают пучок вторичных адронов, образованный первоначально из пионов и каонов. Эти мезоны постепенно распадаются по мере их прохождения через вакуумную трубу длиной около 300 м. Как мы уже говорили, мезоны обоих типов распадаются преимущественно на мюоны, нейтрино и антинейтрино. На краю области, где происходит распад, мюоны и все сохранившиеся адроны отфильтровываются с помощью земляной насыпи длиной в 1 км. Пучок, проходящий через насыпь, состоит почти исключительно из нейтрино и антинейтрино (рис. 5).

Для того чтобы порождать частицы значительной массы, нейтрино должны обладать весьма высокой энергией. Не менее важно также, чтобы

пучок обладал высокой интенсивностью, другими словами, он должен обеспечивать значительное число частиц, проходящих за единицу времени через единичное сечение. Высокая интенсивность необходима потому, что вероятность взаимодействия отдельного нейтрино с нуклоном крайне

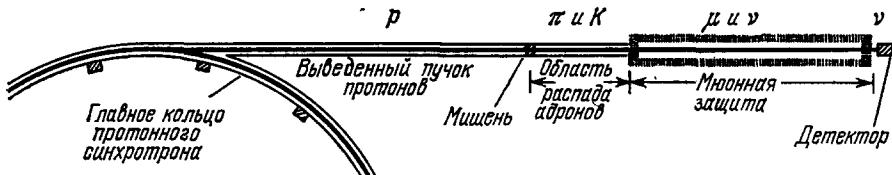


Рис. 5. Пучки нейтрино создаются многоступенчатым путем с помощью протонов, разгоняемых до 400 ГэВ на протонном синхротроне Национальной Лаборатории ускорителей им. Э. Ферми.

Протоны соударяются с металлической мишенью; при этом рождаются пионы и каоны. Затем эти мезоны распадаются, образуя главным образом мюоны, нейтрино и антинейтрино. Мюоны и еще нераспавшиеся адроны отфильтровываются при прохождении пучка через километровую земляную насыпь; когда пучок выходит из земляной насыпи, он состоит уже только из нейтрино и антинейтрино.

мала. Пучок в Лаборатории Ферми имел интенсивность около  $10^9$  нейтрино в секунду, но даже при такой интенсивности взаимодействовало с нуклоном всего лишь одно нейтрино в минуту. Все остальные проходили через установку как ни в чем не бывало.

В качестве детектора в димюонных экспериментах использовалось устройство, состоящее из нескольких компонент, последовательно расположенных вдоль оси падающего нейтринного пучка (рис. 6). Первая

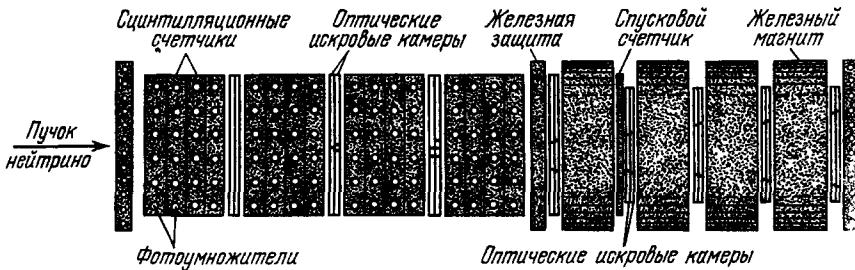


Рис. 6. Детектор, используемый в Лаборатории им. Ферми при поисках новых семейств частиц, реагирует на события с двумя мюонами в конечном состоянии (димюонные события).

Энергичные нейтроны вступают во взаимодействие с нуклонами в камерах, содержащих около 60 т сцинтиллирующей жидкости, т. е. жидкости, дающей световую вспышку, когда через нее проходит электрически заряженная частица; сцинтилляции регистрируются фотоумножителями. За сцинтилляционными счетчиками располагалась железная защита, которая отфильтровывала адроны и представляла собой дополнительную мишень для взаимодействия с нейтрино. Оптическая искровая камера записывала треки частиц, а магниты искривляли их путь, благодаря чему становилось возможным измерить их импульс. Частицы, наблюдаемые в последней искровой камере, должны быть скорее всего мюонами, поскольку мюоны — это единственные заряженные частицы, которые могут пройти через железную защиту и железные магниты. Наличие двух мюонов указывает на возникновение невидимого нейтрино; по крайней мере один из мюонов и нейтрино должны быть продуктами распада некоторых новых частиц, которые распадаются через слабые взаимодействия.

секция представляла собой комбинацию четырех камер, содержащих около 60 т сцинтиллирующей жидкости, которая испускала световые вспышки, когда через нее пролетала электрически заряженная частица. Колossalная масса жидкости обеспечивала эффективную мишень из нуклонов для нейтрино; в этой массе поглощалась также большая часть энергии, возникающей при взаимодействии. В каждой камере сцинтилляции фиксировались фотоумножителями; полное количество испущенного света служило мерилом энергии, оказавшейся в жидкости. Между контейнерами с жидкостью располагались оптические искровые камеры;

в этих камерах был непосредственно виден каскад частиц, порождаемых при каждом взаимодействии.

Сразу же за жидким сцинтиллятором ставили около 60 т железа. Это железо служило дополнительной мишенью для нейтринных взаимодействий и, кроме того, отфильтровывало посторонние частицы, возникающие в сцинтилляционном счетчике. За железной защитой располагались четыре цилиндрических железных электромагнита, каждый из которых имел 12 футов в диаметре и четыре фута длины. Магниты отклоняли заряженные частицы, проходящие внутри них, и по этому отклонению можно было определять импульс частиц. Траектории частиц фиксировались дополнительными искровыми камерами, помещенными между магнитами.

Детектор включался по достижении заряженной частицей спускового счетчика, стоящего непосредственно за первым электромагнитом. Такой частицей мог быть только мюон; ни электроны, ни адроны не могли пройти через железную мишень и железный магнит. Вместе с включением детектора начинал записываться электрический сигнал всех сцинтилляционных счетчиков, а к искровым камерам подавалось высокое напряжение. Возникающие в искровых камерах треки, которые были образованы ионизированным газом на пути прохождения электрически заряженной частицы, фиксировались на фотопластиниках. Поиск димюонных событий производился попросту просмотром каждого записанного события на предмет присутствия двух заряженных частиц, миновавших железные барьеры.

В нескольких сериях экспериментов, в которых использовались пучки с разнообразными смесями нейтрино и антинейтрино, было зафиксировано около 30 000 включений детектора. Среди них 82 включения удовлетворяли критериям, установленным нами для идентификации интересующих нас димюонных событий. Первым требованием к искомым событиям было, конечно, наличие двух мюонов в конечном состоянии. Требовалось также, чтобы оба мюона порождались в один и тот же момент и в одной и той же точке пространства; обязательным требованием было измерение импульсов обоих мюонов.

□

Для интерпретации димюонных событий можно предложить несколько объяснений, использующих уже известные процессы и частицы. Одним из самых простых объяснений является предположение о том, что второй мюон порождается при распаде заряженного пионов или каона, возникшего при начальном взаимодействии нейтрино. Следовало ожидать из-за различной плотности вещества мишеней, что мюоны, возникающие при распадах мезонов, примерно в четыре раза чаще появляются в жидким сцинтилляторе, чем в железе. Фактически и в железе, и в жидким сцинтилляторе наблюдалось равное количество димюонов. Такое соотношение наблюдаемых распадов полностью исключает пионный и каонный механизмы.

Однако возможно также, что кажущееся нарушение лептонного квантового числа  $L_\mu$  связано не с ускользающим нейтрино, а с третьим мюоном, который не был обнаружен. Фотографии, полученные в искровой камере, тщательно изучались с целью обнаружения событий с тремя мюонами в конечном состоянии. Но таких событий не нашли.

У нас сложилось убеждение, что все объяснения в рамках привычных предположений либо должны быть отвергнуты, либо им следует приписать ничтожную вероятность. Тогда останется лишь три правдоподобные интерпретации димюонных событий. Они должны включать в себя порождение

или распад одной из трех частиц, о которых речь шла выше: нового адрона, нейтрального тяжелого лептона или же заряженного промежуточного векторного бозона (рис. 7).

Для того чтобы сделать выбор между этими тремя возможностями, необходимо рассмотреть свойства мюонных пар. Особенно существенны два из них. Первое: как следует из наших экспериментов, сопоставление импульсов двух мюонов не ведет к определенному результату. Напротив, для событий, вызываемых нейтрино, отрицательный мюон обычно имеет

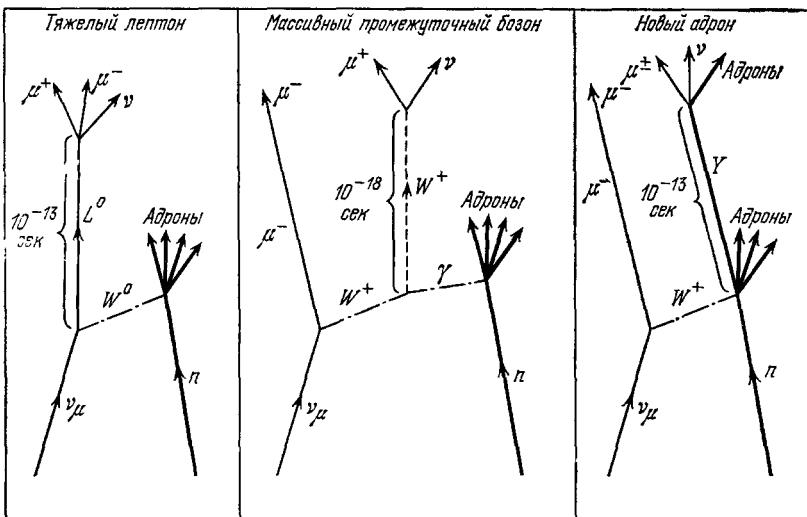


Рис. 7. Димюонные события могут возникать в результате трех возможных взаимодействий нейтрино мюонного типа с нейтроном; в каждом таком взаимодействии конечное состояние включает в себя два мюона и нейтрино.

В результате взаимодействия могут возникнуть нейтральный тяжелый лептон ( $L^0$ ), массивный промежуточный бозон ( $W^\pm$ ), один из носителей слабых взаимодействий, он же адрон ( $Y$ ), обладающий новым квантовым числом. Характеристики димюонов, зафиксированных в Лаборатории им. Ферми, указывают на то, что появление нового адрона является наиболее вероятной интерпретацией. На приводимых диаграммах лептоны изображаются тонкими линиями, адроны — толстыми линиями, а промежуточные бозоны — штриховыми. Виртуальные частицы, которых мы обнаружить не в состоянии, отмечены штрих-пунктиром.

больший импульс, чем мюон положительный. Второе: мюоны вовсе не всегда имеют противоположные электрические заряды; события, в которых мюоны имеют одинаковые заряды, составляют около 10 процентов от общего числа событий.

Ни одно из двух этих наблюдений не может быть согласовано с предположением о том, что димюоны порождаются тяжелым лептоном или же  $W$ -частицей. Появление мюонов с одинаковыми электрическими зарядами в особенности заставляет нас отказаться от рассмотрения этого механизма. Можно считать, что суммарное взаимодействие в детекторе разбивается на два этапа. На первом этапе нейтрино превращается в другие частицы; на втором — нуклон отдачи распадается на другие адроны. Наблюдения двух мезонов с одинаковыми электрическими зарядами не могут быть объяснены распадом частицы, возникшей на первом этапе; на втором этапе также должны вступать в игру адроны. Эти выводы получили обоснование при сравнении экспериментальных результатов с теоретическими расчетами, выполненными А. Пайсом и С. Трейманом.

Из этих соображений мы пришли к выводу, что наиболее вероятным объяснением димюонных событий, обнаруженных в Лаборатории Ферми, может быть предположение о порождении и распаде по крайней мере

одного члена из нового семейства адронов. Мы называем членов нового семейства  $Y$ -частицами. Эти  $Y$ -частицы обязательно обладают новым квантовым числом, сохраняющимся в сильных и электромагнитных взаимодействиях, но не сохраняющимся при слабых взаимодействиях.

Из других свойств димюонов можно оценить массу  $Y$ -частиц; она находится между 2 и 4 ГэВ (рис. 8). Время жизни этих частиц заметно меньше  $10^{-8}$  сек, причем не исключено, что оно даже меньше  $10^{-10}$  сек. Представляется вероятным, что продукты их распада являются лептонами только в 10—20 процентах случаев, в остальных случаях распад приводит к появлению адронов. Это обстоятельство наводит на мысль о том, что  $Y$ -частицы порождаются в событиях, связанных с нейтрино высоких энергий, куда более часто, чем с первого взгляда показывают ваши эксперименты.

Потребуются дальнейшие экспериментальные исследования, прежде чем природа и значение  $Y$ -частиц проясняются. Мы предположили, что существуют как  $Y$ -мезоны, так и  $Y$ -барионы, но утверждать это с полной достоверностью пока нельзя. Массы и времена жизни частиц требуется измерить достаточно точно, следует также определить моды их распада. Но несмотря на все эти неопределенности,  $Y$ -частицы дают нам в настоящее время наиболее прямое и вещественное доказательство того, что существуют адроны, обладающие новыми квантовыми числами.  $Y$ -частицы самым наглядным образом непосредственно обнаруживают эти новые квантовые числа, тогда как  $j$ - или  $\psi$ -частицы отражают наличие этих новых квантовых чисел только косвенно. До сих пор неизвестно, различаются ли оба эти состояния от остальных одними и теми же квантовыми числами.

Как  $Y$ -, так и  $j$ - или  $\psi$ -частицы могут быть интерпретированы с помощью весьма изощренной теоретической модели адронов, предложенной в 1969 г.

М. Гелл-Манном и Г. Цвейгом (рис. 9).

Согласно этой модели, все адроны считаются сложными структурами, образованными из простейших составляющих, называемых кварками. Барионы состоят из трех кварков, а мезоны из кварка и антикварка. В первоначальной форме этой модели было три типа кварков, обозначаемых буквами  $u$ ,  $d$  и  $s$ . Носителем единицы странности был кварк  $s$  и в состав всех странных частиц входил по крайней мере один  $s$ -кварк или  $s$ -антикварк.

В кварковой модели расщепление масс между адронами попросту отражает расщепление масс между кварками. Именно потому, что  $s$ -кварк

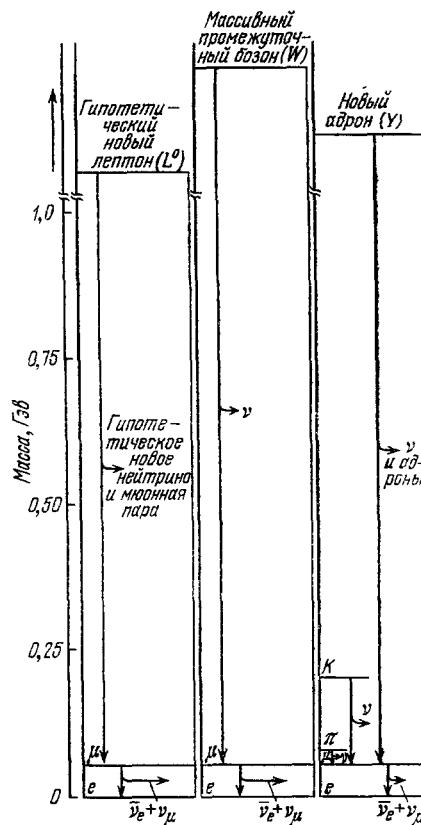


Рис. 8. Распад новых частиц всегда ведет к испусканию мюона и нейтрино. Для  $Y$ -адронов эта мода распада должна быть аналогичной распадам пиона и каона, однако  $Y$ -частицы должны распадаться значительно быстрее. Масса самой легкой из  $Y$ -частиц оценивается равной, если ее выразить в энергетическом эквиваленте, между 2 и 4 ГэВ;  $W$ -бозон должен иметь массу по крайней мере 20 ГэВ, о массах новых лептонов ничего определенного пока сказать нельзя.

значительно тяжелее остальных кварков, странные адроны тяжелее, чем адроны, не обладающие странностью.

Несколько позднее было предположено, что может существовать еще четвертый кварк, несущий новое квантовое число, сохраняющееся в сильных и электромагнитных взаимодействиях. Глэшоу и Бъеркен предложили назвать новое квантовое число чармом (charm — по-английски «очарование»); новый кварк обозначают буквой  $c$  и называют его чармированным кварком. Если чармированный кварк существует, он влечет за собой существование нового класса адронов, причем эти адроны должны распадаться на обычные адроны только посредством слабого взаимодействия. Кроме того, поскольку чармированный кварк оказывается более массивным, чем даже  $s$ -кварк, расщепление масс новых адронов будет большим, чем то, которое мы знаем среди уже известных адронов.

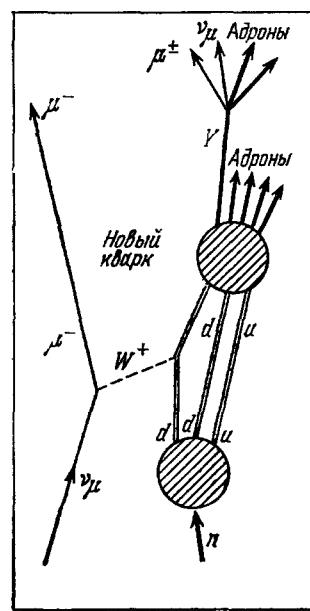


Рис. 9. Кварковая гипотеза может объяснить появление новых адронов при нейтрино-взаимодействиях.

В теории кварков все барионы образованы комбинациями трех кварков; нейтрон состоит из кварков, обозначаемых буквами  $d$ ,  $d$  и  $u$ . Посредством виртуального  $W^+$ -бозона нейтрино превращает один из  $d$ -кварков в кварк другого типа, обладающего новым квантовым числом. В результате взаимодействия кварков порождается целый спектр адронов, включающий в себя по крайней мере одну частицу  $Y$ , обладающую новым квантовым числом. Некоторые теоретики отождествляют это квантовое число с гипотетическим свойством, называемым чармом.

Наблюдение димюонных событий, вызванных нейтрино и антинейтрино, должно было привести к открытию нового квантового числа у адронов. Димюонные события разыскивались в течение многих лет как свидетельство того, что порождаются промежуточные векторные бозоны. Теперь, когда у нас есть данные о димюонных событиях, им придается совсем иной смысл, чем тот, на который мы рассчитывали.

Каковы перспективы обнаружения других новых частиц? Одно из предположений, которое в настоящее время, по-видимому, получило подтверждение, заключается в том, что масса  $W$ -частиц значительно больше, чем масса новых адронов; экспериментально доказано, что масса заряженных  $W$ -бозонов должна быть больше, чем 20 Гэв. Массу и другие свой-

если мы хотим ввести  $Y$ -частицы в рамки кварковой модели, то в связи с тем, что у них должно быть новое квантовое число, в их состав должен входить по крайней мере один новый кварк. Представляется вполне разумным принять за этот четвертый кварк чармированный кварк, предложенный Глэшоу и Бъеркеном, но такое отождествление этих кварков может быть оправдано лишь дальнейшими экспериментами. Гипотеза чармированных кварков опирается на веские теоретические аргументы, независимые от последних экспериментальных открытий; мало того, она дает объяснение существованию  $j$ - или  $\psi$ -состояний, а также  $Y$ -частиц. Как допускается,  $Y$ -состояния образованы из  $c$ -кварков в комбинации с другими кварками, тогда как  $j$ - или  $\psi$ -состояния представляют собой связанное состояние  $c$ -кварка и  $c$ -антикварка. Кажется, что теория и эксперимент все ближе и ближе подходят друг к другу — как это было с ними 25 лет назад — в том, что касается нового семейства адронов.

□

Весьма похоже на иронию судьбы то, что наблюдение димюонных событий, вызванных нейтрино и антинейтрино, должно было привести к открытию нового квантового числа у адронов. Димюонные события разыскивались в течение многих лет как свидетельство того, что порождаются промежуточные векторные бозоны. Теперь, когда у нас есть данные о димюонных событиях, им придается совсем иной смысл, чем тот, на который мы рассчитывали.

Каковы перспективы обнаружения других новых частиц? Одно из предположений, которое в настоящее время, по-видимому, получило подтверждение, заключается в том, что масса  $W$ -частиц значительно больше, чем масса новых адронов; экспериментально доказано, что масса заряженных  $W$ -бозонов должна быть больше, чем 20 Гэв. Массу и другие свой-

ства тяжелых лептонов предсказать значительно труднее. Они могут быть различных типов; некоторые из них будет весьма сложно создать и обнаружить. Например, могут существовать тяжелые лептоны с массой, меньшей, чем масса  $Y$ -адронов.  $Y$ -частицы должны были бы распадаться через эти лептоны на обычные лептоны и новую разновидность нейтрино; конечный результат наблюдался бы как димюонное событие. Таким образом, обе новые частицы порождались бы в одном и том же эксперименте. В настоящее время наши сведения слишком скучны, чтобы такая возможность была исключена.

Одно из простых заключений, которое можно было бы сделать из существования  $Y$ -мезонов с массой, ограниченной в пределах от 2 до 4 Гэв,

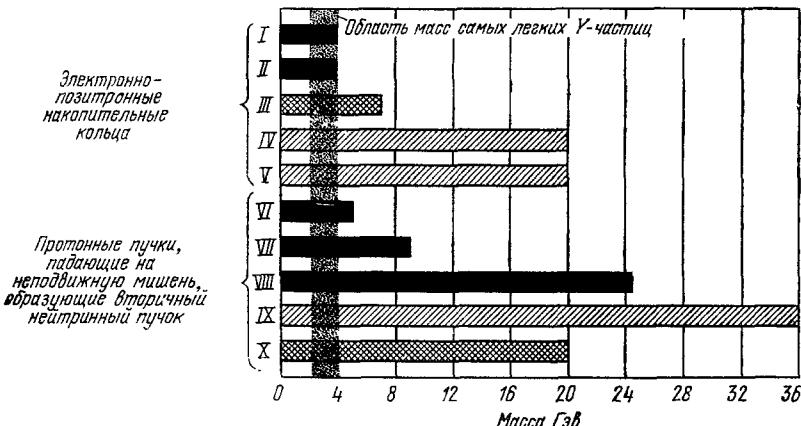


Рис. 10. Десять ускорителей частиц, способных исследовать частицы с массами, соответствующими значениям масс  $Y$ -частиц.

Эти ускорители будут действовать в ближайшем десятилетии. Пять из них уже работают (черные полосы); два — строятся (одинарная штиховка), остальные три находятся в стадии проектирования (двойная штиховка). В электронно-позитронных накопительных кольцах соударяются частицы, обладающие равными, но противоположно направленными скоростями. Во всех остальных ускорителях нейтрино соударяются с нейтронами и неподвижной мишенью. Приведены значения масс отражают не ту энергию, до которой может быть разогнана частица, скорее максимальную массу частицы, которую можно породить при взаимодействии ускоренных частиц в Лаборатории им. Ферми энергия протонного синхротрона будет удвоена за счет установки сверхпроводящих магнитов; тем самым энергия нейтриноизвездий будет увеличена на 50%. Некоторые ускорители будут способны к созданию тяжелых лептонов и  $W$ -бозонов наряду с новыми семействами адронов. I—SPEAR (США), II—DORIS (ФРГ), III—ЕЭПП IV (СССР), IV—PER (США), V—PETRA (ФРГ), VI—AGS (США) (синхротрон с переменным градиентом), VII—Серпухов (СССР), VIII—Лаборатория им. Ферми, (США) (существующий ускоритель), IX—тоже с удвоением энергии, X—SPS—(ЦЕРН) (первоначальный вариант).

состоит в том, что мезонные состояния с низшими значениями масс в каждой большой группе частиц имеют очень простое распределение: массы частиц должны отличаться более или менее закономерно. Как будто бы существует простое соотношение между массами  $\pi$ -мезона,  $K$ -мезона и  $Y$ -мезона наименьшей массы. Если наличие такого соотношения подтвердится, тогда может объявиться новый мезон, обладающий еще одним новым квантовым числом, с массой, лежащей в интервале между 8 и 15 Гэв. Поиски такого мезона по всей вероятности станут в ближайшие годы первоочередным занятием физиков-экспериментаторов, в особенности тех, кто ведет эксперименты с нейтрино высоких энергий.

Попытки обнаружить дополнительные мезонные состояния и другие частицы могут оказаться более успешными с введением в строй нескольких новых ускорителей и некоторых других машин.

Мы имеем в виду не только те из них, которые начали действовать недавно, но и те, которые находятся в процессе сооружения (рис. 10).

В Лаборатории Ферми главный протонный синхротрон модифицируется: в него вводятся сверхпроводящие магниты; это позволит удвоить его энергию. С новыми машинами такого типа становится возможным исследование областей еще больших масс; используя косвенные методы детектирования частиц, можно будет обнаруживать частицы из новых семейств и определять их свойства. Несмотря на озадачивающее увеличение числа частиц и квантовых чисел нас не покидает надежда, что в результате наших усилий природа предстанет перед нами простой и элегантной.

#### ЛИТЕРАТУРА

- D. H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Readind. Mass., Addison-Wesley, 1972.
- S. Weinberg, *Scientific American* 231(1), 50 (1974) (имеется перевод: УФН 118, 505 (1976)).
- D. B. Cline, A. K. Mann, C. Rubbia, *ibid.* 231 (6), 108 (1974) (перевод см. в данном номере УФН — стр. 97); *Phys. Today* 28(3), 23 (1975).
- См. также: Sh. L. Glashow, *Quarks with Color and Flavor*, *Scientific American* 273(4), 38(1975) (имеется перевод: УФН 119, 715 (1976)). (Приж. перев.)