

## Составные модели частиц

Такой подход был впервые предложен Э. Ферми и Ч. Янгом еще в 1949 г. В своей работе они предложили рассматривать пион как связанную систему нуклона и антинуклона и указали на сходство свойств такой системы и  $\pi$ -мезона теории Юкавы. «Как недвусмысленно указано в статье, мы не питали никаких иллюзий на счет соответствия наших предположений действительности, — вспоминал потом Ч. Янг, — я вообще был склонен похоронить работу в черновиках и не публиковать ее. Ферми, однако, сказал, что решают задачи студенты, а научные работники ставят вопросы, и что он считает вопрос, поставленный нами, заслуживающим публикации». Б. М. Понтекорво отмечал, что когда эта работа появилась, «ряд физиков-теоретиков, даже очень почтенных, были, мягко говоря, удивлены, что великий Ферми решился опубликовать такую «неудовлетворительную и бессодержательную» статью».

Наиболее серьезно к идее Ферми и Янга отнеслись в СССР. Ферми и Янг рассматривали  $\pi^+$ -мезон как связанное состояние протона и антинейтрона ( $p\bar{n}$ ), а  $\pi^-$ -мезон как  $p\bar{n}$ ; с той же позиции можно рассматривать нейтральный мезон  $\pi^0$  как суперпозицию  $p\bar{p}$  с вероятностью 50 % и  $n\bar{n}$  с такой же вероятностью. Отсюда следует объяснение разности масс \*)  $m_{\pi^0}$  и  $m_{\pi^+} = m_{\pi^-}$ . В теории сильного взаимодействия все три массы равны, но добавочный учет кулоновского притяжения  $p\bar{p}$  уменьшает массу  $\pi^0$ . Само существование  $\pi^0$  было предсказано еще до войны. Тогда же отмечался и основной канал его распада на два фотона. На основе теории Ферми — Янга стало ясно, что должен иметь место и  $\beta$ -распад  $\pi^+$ -мезона  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ . Это предсказание было сделано и проверено на опыте в СССР. Еще раньше явилась идея возможности существования других связанных состояний нуклона и антинуклона. Были проанализированы возможные пути их распада. Ожидаемое время жизни оказывалось столь коротким, что нельзя было рассчитывать на наблюдение трека (следа) частицы в камере Виль-

\*) Это объяснение остается в силе и в современной теории кварков.

сона, фотоэмульсии или пузырьковой камере. Был предложен способ обнаружения таких частиц по «недостающей массе» при столкновении (неупругом рассеянии) пары хорошо наблюдаемых частиц, например, двух протонов.

Еще раньше Ферми открыл и начал исследование нового класса частиц — *резонансов* — с особо малым временем жизни. Понимание природы этих частиц как составных пришло только значительно позже с точки зрения кварков. Составные модели стали развиваться. В них включали и странные частицы, предполагая, например, что  $K^+$ -мезон — это связанное состояние протона и анти- $\Lambda$ -гиперона.

Выбрав за составляющие протон, нейтрон и  $\Lambda$ -гиперон, можно было построить из них и их античастиц все мезоны. Однако уверены ли мы в том, что сами протон, нейтрон и  $\Lambda$ -гиперон элементарны? Этот вопрос возник позже, была инерция мышления после успешной расшифровки состава ядра как системы из  $Z$  протонов и  $(A - Z)$  нейтронов. Оказалось, что сами протон, нейтрон и  $\Lambda$ -гиперон нельзя было рассматривать как элементарные.

Успех идеи о составной природе мезонов, о том, что они состоят из пары: частица со спином  $1/2$  — античастица со спином  $1/2$ , был не полным, поскольку выбор составляющих был не совсем удачен. Известные частицы  $p$ ,  $n$ ,  $\Lambda$  не могли в полной мере претендовать на роль строительного материала для всех сильно взаимодействующих частиц — *адронов* \*).

Но может быть, дело просто в том, что никакая известная частица не годится на роль строительного материала для адронов?

Чтобы подойти к идее истинных составляющих адронов, рассмотрим нуклон (протон  $p$  и нейтрон  $n$ ) и 4 частицы-резонансы в системе пиона и нуклона ( $\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$ ). Спин нуклонов равен  $1/2$ , спин  $\Delta$ -резонансов  $3/2$ . Нуклон в ядре стабилен, а  $\Delta$ -резонансы за  $10^{-23}$  с распадаются на нуклон и пион. Если поверить, что  $\pi^+$ -мезон — это связанная система  $p\bar{p}$ , то  $\Delta$ -резонансы должны иметь еще более сложную структуру, например,  $\Delta^{++}$ , состоящий из  $p\bar{p}^+$ , должен иметь  $p\bar{p}$ , и т. п. Между тем разница между

\*) Название «адрон» происходит от латинского «адрес» — твердый, тяжелый.

$\Delta$  и  $p$  не так велика. Сегодня мы описываем и  $\Delta$ , и нуклоны единообразно и полагаем, что это все — комбинации трех кварков (частиц с дробным зарядом и спином, равным  $1/2$ , см. следующий пункт).

Тогда  $\Delta^{++}$  (электрический заряд  $+2$ ) можно составить из трех составляющих типа  $u$  ( $u$ -кварки), электрический заряд которых равен  $+2/3$ , а  $\Delta^-$  — из трех составляющих типа  $d$  ( $d$ -кварки), электрический заряд которых равен  $-1/3$ . Комбинации  $(2u, d)$  и  $(u, 2d)$  имеют электрический заряд, соответственно,  $+1$  и  $0$ . В этих трехкварковых комбинациях спины всех кварков могут быть ориентированы параллельно, что отвечает  $\Delta^+$  и  $\Delta^0$  со спином  $3/2$ , или спины двух кварков ориентированы в одном направлении, а третьего кварка — в противоположном, что отвечает нуклонам, спин которых равен  $1/2$ . Так, можно было прийти к идее кварков сразу после открытия нуклонных резонансов. Однако исторически такое понимание пришло с большим трудом. Для системы  $\Delta$  и  $p$  кварки были необязательны. Такой подход вызвал бы в то время много недоуменных вопросов и, главное, господствовавшие «принципы экономии» препятствовали появлению в теории таких экзотических объектов, как дробно-заряженные составляющие. Более приемлемыми казались составные модели с «чистыми» пранейтроном  $n$  и прапротоном  $p$ . В этих моделях реальный протон представляет собой комбинацию  $pp\bar{p}$ , реальный нейтрон — комбинацию  $p\bar{p}n$ ,  $\Delta^{++}$  — комбинацию  $2p\bar{p}$ , ...,  $\Delta^-$  — комбинацию  $2p\bar{n}$ .

Очевидно, что кварковая модель изящнее, но требует дробных зарядов составляющих. С другой стороны, простая модель с  $p$  и  $n$  составляющими со спином  $1/2$  несовместима с принципом Паули и принципом, чтобы все нижние состояния ( $\Delta$ ,  $p$ ,  $n$ ) не имели орбитальных моментов. Но та же проблема возникала и в кварковой модели при описании, например,  $\Delta^{++}$  ( $3u$ -кварка) в дополнение к проблеме отсутствия свободных кварков. Это были трудности, из которых теория вышла окрепшей:

«Так тяжкий млат,  
Дробя стекло,  
Кует булат».

(А. С. Пушкин)

Возможно, *только* через открытие странности и следующих «ароматов» частиц можно было *доказать* кварковую модель. Но видно, что *изобрести* (пусть ненадежную) кварковую модель можно было и раньше. Сковывали инертность, страх перед существенно новым.

## Кварки

В 1963 г. М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг предложили гипотезу о трех *кварках*, трех фундаментальных составляющих адронов. Они указали, что все наблюдаемые свойства симметрии адронов и их взаимопревращений можно очень просто объяснить предположением о том, что все адроны (в том числе и  $p$ ,  $n$  и  $\Lambda$ ) — составные и что существуют гипотетические частицы — кварки, составляющие все адроны.

Пусть имеется тройка частиц со спином  $1/2$  (в единицах  $\hbar$ ) и барионным зарядом  $1/3$ :  $u$ -кварк с электрическим зарядом  $+2/3$ ,  $d$ -кварк с зарядом  $-1/3$  и  $s$ -кварк с зарядом  $-1/3$ . У них имеются античастицы — антикварки с противоположным знаком барионного и электрического заряда. Кварки  $u$  и  $d$  рассматриваются как две изоспиновые компоненты одной и той же частицы. Отсюда и обозначения:  $u$  от английского  $up$  — вверх, это — состояние «изоспин вверх»,  $d$  — от английского  $down$  — вниз, это — состояние «изоспин вниз». Им приписывалась нулевая странность. Кварки  $u$  и  $d$  и их антикварки должны составлять нуклоны и антинуклоны,  $\pi$ -мезоны,  $\pi$ -мезон-нуклонные и  $\pi$ -мезон- $\pi$ -мезонные резонансы. Кварк  $s$  — это *странный кварк*. Это кварк, обладающий странностью, равной  $-1$ . Отсюда и обозначение  $s$ , от английского  $strange$  — странный. Кварк  $s$  входит в состав странных частиц. Тип ( $u$ ,  $d$  или  $s$ ) называют *ароматом* кварка.

В модели кварков мезоны — это связанные состояния кварк — антикварк. Например, в модели Ферми — Янга  $\pi^+$ -мезон рассматривался как связанная система протона  $p$  и антинейтрона  $\bar{n}$ . В модели кварков — это связанное состояние  $u$ - и  $\bar{d}$ -кварков. При этом все выводы, сделанные на основе модели Ферми — Янга для мезонов, оставались в силе. Добавились странные мезоны:  $K^+$ , состоящий из  $u$  и  $\bar{s}$ ,  $K^0$  ( $u\bar{s}$ ) и два ней-