

Член-корреспондент АН СССР Я. Б. ЗЕЛЬДОВИЧ

К ТЕОРИИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

СОХРАНЕНИЕ ЯДЕРНОГО ЗАРЯДА И ВОЗМОЖНЫЙ НОВЫЙ ТИП V -ЧАСТИЦ

За последние годы достоверно установлено существование нейтральных частиц, распадающихся на протон и π -мезон, так называемых V -частиц; возможно, что при распаде V -частиц вылетает также третья незаряженная частица (¹⁻³).

V -частица является первой частицей такого рода, дающей при распаде нуклон. Закон сохранения числа нуклонов должен быть обобщен с учетом существования V -частиц.

Как известно, из спина $1/2$ нуклонов — протона и нейтрона — следует существование антипротона и антинейтрона, способных аннигилировать с обычными нуклонами.

Непосредственно свободные антинуклоны до сих пор еще не были наблюдаемы, однако косвенным подтверждением их существования является согласие с опытом теоретических предсказаний о распаде нейтрального π -мезона на два кванта: эти предсказания и вычисление вероятности распада были основаны на представлении об образовании виртуальных пар протон-антипротон.

Из симметрии всех законов природы относительно частиц и античастиц следует, что наряду с V -частицами должны существовать и анти- V -частицы, дающие при распаде антипротон. Вывод этот не зависит от того, как спин, целый или полуцелый, имеет V -частица. Ниже более подробно изложены соображения, которые приводят к этому выводу, рассмотрен вопрос о возможном отличии свойств V и анти- V и даны весьма грубые соображения об отношении числа V и анти- V , образующихся под действием космических лучей *.

Отвлечемся на некоторое время от образования и распада V -частиц. Во всех других наблюдаемых до сего времени ядерных процессах происходит рождение π -, μ -мезонов, электронов и позитронов, нейтрино и гамма-квант и превращение нейтронов в протоны или протонов в нейтроны, причем, однако, сумма числа протонов p и нейтронов n остается постоянной

$$p + n = \text{const} = Y.$$

Целесообразно, по аналогии с электрическим зарядом, ввести понятие о «ядерном заряде» и приписать протону и нейтрону одинаковый ядерный заряд $+u$. Ядерный заряд π -, μ -мезонов, электронов, нейтрино и квант равен нулю. Тот факт, что происходит только пре-

* Шифф (⁵) недавно пришел к сходным выводам. Так как в его заметке не рассматривается вопрос о спине V -частиц и нет соображений о возможности существования античастиц при спине равно нулю, мы считаем целесообразным дать здесь подробное рассмотрение вопроса.

вращение протонов в нейтроны и обратно, без изменения их числа формулируется как «закон сохранения ядерного заряда». Другие законы сохранения (энергии, спина, электрического заряда) не запрещают K -захвата электрона протоном с полной аннигиляцией атома водорода и образованием двух квант или превращения протона в позитрон или нейтрона в нейтрино с испусканием гамма-квант, не запрещают также процессов, где нет специальных причин ожидать малой вероятности: аннигиляцию двух нейтронов с образованием двух квант или двух π -мезонов. Между тем самый тривиальный факт всей ядерной физики заключается в том, что в ядрах нейтроны неограниченно долго существуют, не аннигилируя. В терминах ядерного заряда такая аннигиляция невозможна, потому что ядерный заряд атома водорода равен $+u$, ядерный заряд пары нейтронов равен $+2u$.

При образовании пар протон-антипротон (число протонов p , число антипротонов \bar{p}), нейтрон-антинейтрон (n, \bar{n}), как известно, сохраняется величина $p - \bar{p} + n - \bar{n} = \text{const}$. Для того чтобы приравнять ее ядерному заряду Y , необходимо приписать антинуклонам отрицательный единичный ядерный заряд, $-u$. Приписывая каждой частице как стабильной, так и спонтанно распадающейся или аннигилирующей с другими ядерными частицами, определенный ядерный заряд, мы обеспечим невозможность спонтанной аннигиляции пары нейтронов в каком бы то ни было процессе, с любыми виртуальными частицами.

Поскольку весь опыт показывает, что такой процесс абсолютно запрещен, закон сохранения ядерного заряда является точным законом, так же, как закон сохранения электрического заряда, а не приближенным законом типа сохранения изотопического спина. Очевидно, что все высказанные выше соображения не содержат по существу ничего нового и приведены лишь как удобная форма записи общеизвестных фактов.

Обратимся к V -частицам и рассмотрим их в свете симметрии частиц и античастиц. Не пользуясь понятием ядерного заряда, мы могли бы предположить, что нейтральная V -частица может одинаково часто распадаться на протон и антипротон.

$$V = p + \pi^-; V = \bar{p} + \pi^+.$$

Однако в таком случае можно было бы через виртуальные V -частицы построить процесс аннигиляции двух нейтронов

$$n + n = p + \pi^- + n = V + n = \bar{p} + \pi^+ + n = \bar{p} + p = 2\gamma$$

или $2\pi^0$ или $\pi^+ + \pi^-$. Поскольку такой процесс не наблюдается, очевидно, что надо запретить распад V на $\bar{p} + \pi^+$. Такой запрет получится автоматически, если на основании первой реакции распада V на $p + \pi^-$ приписать V положительный ядерный заряд* $+u$. Из симметрии частиц и античастиц следует, что наряду с нейтральной V -частицей с ядерным зарядом $+u$ должна существовать и нейтральная анти- V -частица, \bar{V} , с ядерным зарядом $-u$, распадающаяся по уравнению

$$\bar{V} = \bar{p} + \pi^+.$$

Если действительно V имеет полуцелый спин**, то существова-

* При этом, как и должно быть, разрешен распад V на нейтрон и нейтральный мезон, но запрещен распад V на несколько π -мезонов и более легкие частицы.

** Полученный спин получится при распаде на $p + \pi^-$ или при распаде на $p + \pi^- + \pi^0$.

ние двух различных нейтральных частиц V и \bar{V} вполне естественно; хорошо известный пример есть нейтральная пара нейтрон и антинейтрон; по аналогии можно ожидать, например, что V имеет магнитный момент, причем V и \bar{V} отличаются знаком магнитного момента.

Предположим теперь, что V -частица распадается с вылетом нейтрино

$$V = p + \pi^- + \nu,$$

так что V может иметь спин 0. И в этом случае следует ожидать существование двух различных частиц, V и \bar{V} , с уравнениями распада

$$V = p + \pi^- + \nu, \quad \bar{V} = \bar{p} + \pi^+ + \bar{\nu}.$$

Основным содержанием настоящей заметки и является указание на то, что имеется кроме массы, спина, электрического заряда, магнитного момента четности, еще одна внутренняя координата частицы — ее ядерный заряд; благодаря наличию такой координаты возможно существование двух частиц с одинаковой массой, с равным нулю спином, электрическим зарядом, магнитным моментом, и все же сильнейшим образом различных, отличающихся знаком ядерного заряда, т. е. отличающихся по своим продуктам распада.

Из уравнений распада V и \bar{V} в сделанном предположении о вылете нейтрино следует также и одинаковая четность их: действительно, и теория и опыт показывают, что π^+ и π^- имеют одинаковую четность (псевдоскалярны). Между тем в случае спина $1/2$ (уравнение Дирака) частицы и анти-частицы (p и \bar{p} , ν и $\bar{\nu}$) имеют противоположную четность, что впервые было показано Берестецким (4) на примере позитрона — электрона.

Принципиальную возможность существования двух частиц, отличающихся только знаком ядерного заряда, можно подтвердить рассмотрением сложных (составных) частиц. Рассмотрим атом водорода H (состоящий из p и e^-) в S -состоянии с полным моментом $F=0$ и аналогичное образование \bar{H} из антипротона и позитрона, в таком же состоянии; для принципиальной стороны дела не существенно, что энергия связи H или \bar{H} весьма мала (13,5 эв) или что еще на много порядков более слабое воздействие (сверхтонкая структура!) переведет H и \bar{H} в состояние $F=1$, где они будут отличаться магнитным моментом. Не существует строгих критериев для различия составной частицы и элементарной частицы. Рассматриваемые как элементарные частицы, H и \bar{H} в S -состоянии с $F=0$ имеют одинаковую четность, одинаковую массу, одинаковые, равные нулю, электрический заряд, спин, магнитный момент; однако, очевидно, они различны: в в соприкосновении с обычной материей H стабилен, а \bar{H} — аннигилирует, выделяя около $2 \cdot 10^9$ эв.

Сравним энергию, необходимую для образования V и \bar{V} при столкновении двух нуклонов. В первом случае по реакции

$$n + p = V + p$$

минимальная потребная энергия в системе центра тяжести равна $M_\nu c^2 - M_n c^2 = (2200 - 1836) mc^2 = 364 mc^2$ во втором случае, по реакции $n + p = \bar{V} + p + 2n$ $M_\nu c^2 + M_n c^2 = (2200 + 1836) mc^2 = 4036 mc^2$. Число нейтронов в правой части равенства, описывающего образование \bar{V} , определяется условием сохранения ядерного заряда. Переходя к лабораторной системе координат, в которой один из нуклонов покоится, найдем порог образования (кинетическую энергию падаю-

щего нуклона) $760 mc^2 = 390$ мэв для V и $12550 mc^2 = 6400$ мэв для \bar{V} .

При этом число \bar{V} , образующихся в космических лучах, должно быть меньше числа V не только потому, что выше порог и меньше первичных частиц, способных создавать \bar{V} , но и потому, что при большой энергии соударения, превышающей порог образования \bar{V} , с образованием \bar{V} весьма сильно конкурируют статистически более выгодные процессы множественного образования π -мезонов.

Соотношение между числом V и \bar{V} будет несколько ближе к 1, если эти частицы не являются первичными, а образуются при распаде каких-то весьма короткоживущих, еще более тяжелых первичных частиц.

Выводы

1. Предложено понятие «ядерного заряда», позволяющее удобно сформулировать известный принцип невозможности аннигиляции нуклонов.

2. Наряду с известной нейтральной V -частицей, распадающейся с образованием протона, должна существовать анти- V -частица, распадающаяся с образованием антипротона, притом независимо от полуцелого или целого спина V -частицы.

Примечание при корректуре. Паис (A. Pais, Phys. Rev., 86, 663, 1952) приводит замечание И. Р. Оппенгеймера о необходимости обобщения закона сохранения числа нуклонов на нуклоны и тяжелые V -частицы.

Однако в дальнейшем Паис полагает, что тяжелые V -частицы суть фермионы и не рассматривает отмеченной нами возможности существования античастиц у нейтральных бозе-частиц.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступило
14 VII 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ W. B. Fretter, Phys. Rev., 85, 773 (1952). ² W. B. Fretter, *ibid.*, 83, 1053 (1951). ³ R. Armenteros, K. H. Barker et al., Phil. Mag., 42, 1113 (1951). ⁴ В. Б. Берестецкий, ЖЭТФ, 21, 93 (1951). ⁵ L. I. Schiff, Phys. Rev., 85, 374 (1952).