Доклады Академии наук СССР
1955. Том 101, № 6

ФИЗИКА

Я. П. ТЕРЛЕЦКИЙ

ИЗОТОПИЧЕСКИЙ СПИН И ГИПОТЕЗА НЕЙТРОННОГО ЗАРЯДА

(Представлено академиком Д. В. Скобельцыным 26 X 1954)

Согласно гипотезе зарядовой независимости в применении к системам нуклонов и π-мезонов имеет место сохранение полного изотопического спина T и его проекции T_3, если рассматривать протоны и нейтроны как частицы с $T = {}^1/_2$ и с проекциями $T_3 = +{}^1/_2$ для протонов и $T_3 = -{}^1/_2$ для нейтронов, а π^+-, π^0-, π^--мезоны как частицы с $T = 1$ и с проекциями $T_3 = 1$, $T_3 = 0$, $T_3 = -1$, соответственно (см., например, ([1],[2])). Для реакций, в которых принимают участие также другие частицы, например электроны, позитроны и фотоны, представление о наличии у этих частиц определенного полного изотопического спина T не совместимо с положением о его сохранении, однако всем этим частицам возможно приписать определенную проекцию T_3 и постулировать сохранение общей проекции T_3. Таким образом, сохранение T_3 может иметь более глубокие физические основания, чем сохранение T, которое может рассматриваться как постулирование определенных свойств симметрии гамильтониана системы, приближенно выполняющихся для нуклонов и π-мезонов. Покажем, что сохранение T_3 может иметь иную физическую интерпретацию.

Рассмотрим полную проекцию T_3 для системы нуклонов и π-мезонов. Если через Σp, Σn, $\Sigma\pi^+$, $\Sigma\pi^0$, $\Sigma\pi^-$ обозначить полное число протонов, нейтронов, π^+-мезонов, π^0-мезонов и π^--мезонов, соответственно, то, очевидно, полная проекция изотопического спина есть

$$T_3 = {}^1/_2\,\Sigma p - {}^1/_2\,\Sigma n + \Sigma\pi^+ - \Sigma\pi^-. \qquad (1)$$

С другой стороны, полный электрический заряд рассматриваемой системы выразится как

$$E = \Sigma p + \Sigma\pi^+ - \Sigma\pi^-, \qquad (2)$$

если заряд протона считать равным единице.

Если постоянство T_3, так же как и постоянство E, выражает некоторый фундаментальный закон сохранения, то этот закон может быть выражен посредством постоянства любой линейной комбинации выражений (1) и (2). Существуют лишь две линейные комбинации (1) и (2), состоящие, подобно (2), из сумм или разностей чисел частиц различного рода. Такими комбинациями являются:

$$E - 2T_3 = \Sigma n - \Sigma\pi^+ + \Sigma\pi^- = \varepsilon, \qquad (3)$$

$$2E - 2T_3 = \Sigma p + \Sigma n = -N^*. \qquad (4)$$

* Знаки при целых числах ε и N, очевидно, могут быть выбраны произвольно.

Очевидно, как ε, так и N сохраняются, причем сохранение N выражает хорошо известный закон сохранения числа нуклонов, который, более обще, может быть сформулирован как закон сохранения ядерного заряда ([3–5]). Сохранение же ε может рассматриваться как аналогичный закону сохранения электрического заряда E новый закон сохранения «нейтронного» заряда ε, введенного нами ранее в связи с гипотезой элементарных поляр ([6]), независимо от гипотезы зарядовой независимости.

Таким образом, если нейтрону приписать положительный единичный нейтронный заряд, а π^+- и π^--мезонам — соответственно, отрицательный и положительный единичные нейтронные заряды, то общий нейтронный заряд системы, равный алгебраической сумме всех нейтронных зарядов, сохраняется в силу сохранения проекции изотопического спина системы.

Если положить в основу законы сохранения электрического и нейтронного зарядов, то сохранение N и сохранение T_3 можно рассматривать как следствия этих законов, причем в силу (2) и (3) N и T_3 определяются как:

$$2T_3 = E - \varepsilon, \tag{5}$$

$$-N = E + \varepsilon. \tag{6}$$

Последние определения остаются, очевидно, в силе, если система содержит также антинуклоны. В этом случае, однако, вместо (3) и (4) необходимо написать

$$\varepsilon = \Sigma n - \Sigma\tilde{n} - \Sigma\pi^+ + \Sigma\pi^-, \tag{7}$$

$$-N = \Sigma p - \Sigma\tilde{p} + \Sigma n - \Sigma\tilde{n}, \tag{8}$$

где $\Sigma\tilde{p}$ и $\Sigma\tilde{n}$ — число антипротонов и антинейтронов, соответственно.

Если обозначить через E^+ и E^-, ε^+ и ε^-, N^+ и N^-, соответственно, положительные и отрицательные электрические, нейтронные и ядерные заряды, то нуклоны, антинуклоны и π^+-мезоны надо считать частицами, обладающими парами зарядов различного рода согласно схеме:

$$\begin{aligned} &p \div (N^- E^+), \quad n \div (N^- \varepsilon^+), \quad \pi^+ \div (E^+ \varepsilon^-), \\ &\tilde{p} \div (N^+ E^-), \quad \tilde{n} \div (N^+ \varepsilon^-), \quad \pi^- \div (E^- \varepsilon^+). \end{aligned} \tag{9}$$

В соответствии с ([6]) выражения, стоящие в скобках, условно можно называть «структурами» соответствующих элементарных частиц.

Для систем, состоящих из нуклонов, сохранение полного изотопического спина T, очевидно, эквивалентно предположению об антисимметрии волновой функции системы по отношению к перестановкам как координат и спиновых переменных, так и зарядов E и ε (см., например, ([2])).

Некоторые заключения о связи полного изотопического спина с E- и ε-зарядами могут быть сделаны, исходя из известного неравенства

$$T_3 \leqslant T \leqslant {}^1/_2\,\Sigma p + {}^1/_2\,\Sigma n + \Sigma\pi^+ + \Sigma\pi^- + \Sigma\pi^0, \tag{10}$$

которое для нуклонов и π^+-мезонов может быть переписано в виде:

$$\Sigma E^+ - \Sigma E^- - (\Sigma\varepsilon^+ - \Sigma\varepsilon^-) \leqslant 2T \leqslant \Sigma E^+ + \Sigma E^- + \Sigma\varepsilon^+ + \Sigma\varepsilon^-. \tag{11}$$

Это неравенство может быть распространено и на π^0-мезоны, если последним приписать пару зарядов одного рода, но различных знаков, т. е. положить:

$$\pi^0 \div (E^+ E^-) \quad \text{или} \quad \pi^0 \div (\varepsilon^+ \varepsilon^-). \tag{12}$$

Повидимому, сохранение полного изотопического спина для систем, содержащих π-мезоны, может быть отождествлено, так же как и в случае нуклонов, с требованием антисимметрии волновой функции системы относительно перестановок E- и ε-зарядов.

В соответствии с (5) и (12) возможно допустить существование электрически заряженых π-мезонов с проекцией изотопического спина $T_3 = 0$. Такими π-мезонами могут быть частицы, содержащие E- и ε-заряды одного знака, т. е.

$$\pi_1^+ \div (E^+\varepsilon^+), \quad \pi_1^- \div (E^-\varepsilon^-). \tag{13}$$

Таким образом, гипотеза нейтронного заряда представляет больше теоретических возможностей, чем формальная гипотеза изотопического спина.

Если, как мы допускаем, сохранение нейтронного заряда имеет столь же фундаментальный характер, как и сохранение электрического заряда, то некоторым легким частицам также необходимо приписать нейтронные заряды. На основании реакций $\pi^\pm \to \mu^\pm + \nu$, $\mu^\pm \to e^\pm + 2\nu$ либо электроны—позитроны и μ-мезоны, либо нейтрино должны обладать нейтронным зарядом. В первом случае, в соответствии с (5), все указанные частицы должны обладать целочисленным (0 или 1) изотопическим спином. Во втором же случае μ-мезоны, электроны, позитроны и нейтрино обладают полуцелыми изотопическими спинами.

Наиболее последовательно гипотеза изотопического спина была распространена на легкие частицы Чини и Гамба ([7]). В этой работе было показано, что μ-мезонам, электронам, позитронам и нейтрино возможно и естественно приписать полуцелый изотопический спин. При этом оказывается необходимым допустить существование двух родов нейтрино и антинейтрино (μ^0, $\tilde{\mu}^0$, ν, $\tilde{\nu}$) или, иначе говоря, существование аналогов нейтронов и антинейтронов как у μ-мезонов, так и у электронов — позитронов.

В нашей схеме результаты ([7]) получаются, если выбрать второй из рассмотренных вариантов, т. е. положить, что нейтринным зарядом обладают нейтрино, а электроны, позитроны и μ-мезоны имеют только электрический заряд. Существование же двух родов нейтрино и антинейтрино может быть оправдано, если принять гипотезу нейтринного заряда, выдвинутую Я. Б. Зельдовичем ([8]), как обобщение некоторых экспериментальных фактов, и приписать рассматриваемым легким частицам нейтринные заряды $\nu^\pm$ согласно схеме:

$$\begin{aligned}
&\mu^+ \div (E^+\nu^+), \quad \tilde{\nu}_2 = \mu^0 \div (\varepsilon^+\nu^+),\\
&\mu^- \div (E^-\nu^-), \quad \nu_1 = \tilde{\mu}^0 \div (\varepsilon^-\nu^-),\\
&e^+ \div (E^+\nu^-), \quad \nu \div (\varepsilon^+\nu^-),\\
&e^- \div (E^-\nu^+), \quad \tilde{\nu} \div (\varepsilon^-\nu^+).
\end{aligned} \tag{14}$$

Сохранение полного нейтринного заряда ν и сохранение полного нейтронного заряда ε для легких частиц можно выразить как постоянство аналогичных (7) и (8) выражений

$$\varepsilon = \Sigma\mu^0 - \Sigma\tilde{\mu}^0 + \Sigma\nu - \Sigma\tilde{\nu}, \tag{15}$$

$$\nu = \Sigma\mu^0 - \Sigma\tilde{\mu}^0 - \Sigma\nu + \Sigma\tilde{\nu} + \Sigma\mu^+ - \Sigma\mu^- - \Sigma e^+ + \Sigma e^-. \tag{16}$$

Из сохранения ε и ν непосредственно вытекает, что реакции распада π^+- и μ^+-мезонов могут идти только как:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \tilde{\mu}^0, \quad \pi^- \to \mu^- + \mu^0, \quad \mu^+ \to e^+ + \mu^0 + \tilde{\nu}, \quad \mu^- \to e^- + \tilde{\mu}^0 + \nu,$$

что не противоречит ([7]). Таким образом, гипотеза нейтронного заряда находится в тесной связи с гипотезой изотопического спина в применении к легким частицам.

Исходя из представления о сохранении E-, ε-, N- и ν-зарядов и принимая приведенные в (9), (12) и (14) «структуры» рассмотренных элементарных частиц, можно сделать некоторые заключения о «структурах» и спинах других элементарных частиц. Можно сформулировать два простейших правила:

1. Все элементарные частицы, распадающиеся в конце концов на протоны, электроны и нейтрино или соответствующие античастицы, очевидно, в силу сохранения зарядов могут обладать лишь четным числом любого рода зарядов, поскольку продукты распада также имеют четное число зарядов и заряды могут рождаться и уничтожаться лишь парами.

2. Частицы, содержащие четное число зарядов E и ε, обладают целочисленным спином, а частицы, содержащие нечетное число зарядов E и ε и, соответственно, нечетное число зарядов N и ν, обладают полуцелым спином. Это правило справедливо для частиц, перечисленных в (9), (12) и (14). В силу сохранения зарядов и спинов это правило должно выполняться и для всех частиц, распадающихся на вышеперечисленные, поскольку четность числа зарядов каждого рода сохраняется, а системы с полуцелым общим спином не могут превратиться в системы с целым спином и наоборот.

Исходя из этих правил, тяжелым мезонам θ^0, $\tau^{\pm}$, $\chi^{\pm}$, $\varkappa^{\pm}$ можно сопоставить такие же «структуры», как π^0-, $\pi^{\pm}$-, $\pi_1^{\pm}$-мезонам, однако с единичным спином ([9]). Либо возможно, так же как в ([6]), считать тяжелые мезоны сложными частицами, состоящими из нуклонов и антинуклонов, в духе гипотезы Ферми — Янга ([10]).

Гипероны Λ^0, Λ^- можно либо считать сложными частицами либо отождествить их с частицами, обладающими структурами:

$$\Lambda^0 \div (N^-\varepsilon^+), \quad \Lambda^- \div (N^-E^-), \tag{17}$$

так, как это было предложено в ([6]). В этом случае, однако, приходится допустить, что Λ-частицы распадаются на нуклоны и π_1-мезоны.

Допустимо, что вообще не существует частиц со структурами, содержащими лишь N- и ν-заряды. В этом случае фотонам можно приписать одну из структур вида (12), например (E^+E^-), в отличие от статьи ([6]), где фотоны отождествлялись с $(\nu^+\nu^-)$.

Что касается гипотезы элементарных поляр, из которых, по предположению ([6]), состоят все элементарные частицы и которые являются носителями зарядов, то эта гипотеза не находится в противоречии со сделанными выше выводами из гипотезы изотопического спина и нейтронного заряда *.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило
16 X 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] И. С. Шапиро, Усп. физ. наук, 53, 7 (1954). [2] Г. И. Зельцер, там же, 53, 455 (1954). [3] E. P. Wigner, Proc. Nat. Acad. Sci., 38, 449 (1952). [4] Я. Б. Зельдович, ДАН, 86, 505 (1952). [5] S. Oneda, Progr. Theor. Phys., 9, 327 (1953). [6] Я. П. Терлецкий, ДАН, 94, 209 (1954). [7] M. Cini, A. Gamba, Nuovo Cimento, 10, 1040 (1953). [8] Я. Б. Зельдович, ДАН, 91, 1317 (1953). [9] И. С. Шапиро, ЖЭТФ, 27, 257 (1954). [10] E. Fermi, C. Jang, Phys. Rev., 76, 1739 (1949).

* Произвольно в ([6]) лишь утверждение, что сами поляры являются носителями спина и что спином $^1/_2$ обладают ν- и N-поляры, ибо, с равным успехом, полуцелый спин можно было бы приписать E и ε полярам.