

т. е. обнаружилось явное нарушение закона сохранения четности, который около 30 лет всеми физиками признавался верным для всех процессов.

В 1957—1959 гг. в разных странах был проведен ряд экспериментов, доказавших, что в различных процессах, обусловленных слабым взаимодействием (при распаде пионов, мюонов, Λ^0 -гиперона), четность не сохраняется.

В связи с этим в настоящее время оживленно обсуждаются возможные пути уточнения теории.

§ 112. Ядерные силы

Многочисленный ряд фактов с несомненностью свидетельствует, что силы взаимодействия внутриядерных частиц имеют совершенно иную природу, чем электрические или магнитные силы.

1) Эти особые, ядерные силы отличаются *зарядовой независимостью*: они связывают лишенный электрического заряда нейтрон с другими нуклонами ядра, причем взаимное притяжение нейтрона к нейтрону, нейтрона к протону и протона к протону (если отделить учесть кулоновское отталкивание протонов) оказывается одинаковым. Стало быть, ядерные силы создаются не электрическими зарядами, а как-то иначе.

2) Ядерные силы обладают свойством насыщения: энергия связи нуклонов в ядре составляет в среднем около 8 Мэв на каждый нуклон. Это в сотни раз больше той энергии связи, которая могла бы быть следствием взаимодействия магнитных моментов нуклонов.

3) Ядерные силы между нуклонами являются короткодействующими и сказываются на расстояниях порядка 10^{-13} см. При небольшом увеличении расстояния между нуклонами ядерные силы чрезвычайно быстро убывают — не по закону кулоновского взаимодействия или взаимодействия магнитных диполей, а несравненно резче.

Электрические и магнитные силы проявляются не только в микропроцессах, но и между телами макроскопических размеров, когда эти тела наэлектризованы или намагничены. Исторически последнее обстоятельство имело для физики большое значение, поскольку прямые и несложные измерения позволили установить точные законы электрических и магнитных взаимодействий. Выяснение природы молекулярных и химических сил в значительной мере было основано на экстраполяции этих законов. О ядерных же силах приходится судить только по итоговому эффектам их проявления, которые всегда могут быть истолкованы неоднозначно. Поэтому не удивительно, что, несмотря на выдающиеся экспериментальные и практические достижения ядерной физики, в разработке ее главной теоретической проблемы — раскрытия природы ядерных сил — успехи поныне невелики. По справедливому замечанию Ферми, «в области ядерной физики мы фактически больше умеем, чем знаем».

В связи с тем, что ядерные силы являются *короткодействующими* (на расстоянии более $3 \cdot 10^{-13}$ см они почти не сказываются) и что взаимодействие нуклонов приводит как бы к *насыщению ядерных связей*, все современные теории ядерных сил в некоторой степени повторяют теорию химической связи между нейтральными атомами (ковалентной связи). В квантовой механике ковалентную связь трактуют как следствие виртуального междуатомного обмена электронами, тогда как взаимодействие нуклонов рассматривают как следствие виртуального обмена π -мезонами (см. п. 3 предыдущего параграфа). Когда в этом процессе участвуют два нуклона, то испущенный мезон можно с равным правом считать принадлежащим каждому из них. Связь между разнородными нуклонами (нейтрон — протон) может осуществляться отрицательными, положительными и нейтральными мезонами. Взаимодействие между однородными нуклонами (протон — протон и нейтрон — нейтрон) соответствует обмену нейтральными мезонами.

При испускании мезона, имеющего собственную энергию $m_{\pi}c^2$, нуклон заимствует эту энергию у своего *поля ядерных сил* (*мезонного поля*); при обратном поглощении мезона энергия возвращается полю. По принципам квантовой механики возможная (вернее, в среднем вероятная) длительность t такого «займа энергии» определяется уравнением (§ 73, 98)

$$tE = \frac{h}{2\pi},$$

где h — постоянная Планка. Следовательно, $t = \frac{h}{2\pi m_{\pi}c^2}$. За это время t мезон даже при скорости, сравнимой со скоростью света c , не может отойти от нуклона на расстояние больше $ct = a$, где

$$a = \frac{h}{2\pi m_{\pi}c}. \quad (24)$$

Очевидно, что это расстояние a должно соответствовать *радиусу действия ядерных сил*. Основываясь на подобных соображениях и принимая, что a должно быть равно примерно $1,5 \cdot 10^{-13}$ см, Юкава до экспериментального обнаружения мезонов предсказал, что они должны обладать массой покоя порядка $200 m_e$. При $m_{\pi} = 273 m_e$ характерный радиус действия ядерных сил $a = 1,4 \cdot 10^{-13}$ см.

Как известно, потенциал V электрического поля неподвижных зарядов определяется уравнением Лапласа [т. II, § 76, формула (32)]

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0,$$

а потенциал электрического поля движущихся зарядов — волновым уравнением Даламбера (§ 2):

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = 0.$$

В теории мезонного поля эти уравнения обобщают, вводя в них член $\frac{1}{a^2}V$, который учитывает отличие массы покоя мезонов от нуля и приводит к потенциалу короткодействующих сил:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{1}{a^2} V; \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \frac{1}{a^2} V. \quad (26)$$

Уравнение (26) называют *уравнением Клейна — Гордона*. Так как источниками электрического поля являются элементарные электрические заряды e , которые иногда называют *константами электромагнитного взаимодействия*, то и в теории мезонного поля по аналогии считают, что мезонное поле создается зарядами особого вида g — *мезонными зарядами нуклонов или*, как их называют также, *квазизарядами* (не путать их с обычными электрическими зарядами мезонов!).

Считают, что мезонный заряд g одинаков по величине и знаку как у протонов, так и у нейтронов. Он является такой же универсальной константой, как заряд электронов, и хотя, очевидно, имеет совершенно иную природу, но численно, как константа ядерного взаимодействия, может быть сопоставлен с зарядом электрона, как константой электромагнитного взаимодействия (что и сделано ниже).

Нуклон, обладающий мезонным зарядом g в поле ядерных сил с потенциалом V , будет иметь потенциальную энергию $U = gV$.

Потенциал V мезонного поля, образованного нуклонами, определяется уравнением (25). Поскольку в рассматриваемом случае стационарного поля V зависит только от расстояния r точки до полюса, где сосредоточен заряд g , то левая часть уравнения (25) равна $\frac{1}{r} \frac{\partial^2 (rV)}{\partial r^2}$ и, следовательно, (25) сводится к уравнению

$$\frac{\partial^2 (rV)}{\partial r^2} = \frac{1}{a^2} rV. \quad (25')$$

Интегрируя это уравнение (или же простой подстановкой), нетрудно убедиться, что *потенциал мезонного поля нуклона определяется формулой Юкавы*:

$$V = -\frac{g}{r} e^{-\frac{r}{a}}, \quad (27)$$

где g — константа ядерного взаимодействия (мезонный заряд нуклона) и a — константа, характеризующая радиус действия ядерных

сил, которая, как было пояснено выше, определяется соотношением¹⁾

$$a = \frac{h}{2\pi m_{\pi} c} \approx 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ см.}$$

В соответствии с указанным выражением ядерного потенциала энергия взаимодействия двух нуклонов равна

$$U = gV = -\frac{g^2}{r} e^{-\frac{r}{a}}. \quad (27')$$

Энергия связи нуклона в ядре около 8 Мэв. Но нуклоны в ядре имеют значительную кинетическую энергию; а так как под энергией связи подразумевается работа, которую нужно затратить, чтобы, дополняя кинетическую энергию нуклона, извлечь его из ядра, то ясно, что потенциальная энергия взаимодействия нуклона с ядром существенно превышает энергию связи нуклона (§ 94). Чтобы оценить величину мезонного заряда g , примем, что при $r \approx a$ потенциальная энергия взаимодействия двух нуклонов будет $U \approx -15$ Мэв. Тогда из приведенного выше выражения для U по Юкава получаем:

$$g^2 \approx 15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4 \cdot 10^{-13} \cdot 2,7 \approx 9 \cdot 10^{-18},$$

или

$$g \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^{3/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}.$$

Следовательно, по этой приближительной оценке мезонный заряд нуклона численно примерно в 6,3 раза превышает электрический заряд электрона. Заметим, что часто пользуются другим обозначением мезонного заряда $e_2 = g\sqrt{4\pi}$; из только что приведенного значения для g получается $e_2 \approx 10^{-8} \text{ см}^{3/2} \cdot \text{э}^{1/2} \cdot \text{сек}^{-1}$, т. е. e_2 численно в 22 раза больше заряда электрона.

¹⁾ Оно получается также при подстановке в (26) уравнения волны, $V = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$, где согласно формуле де Бройля (§ 62) $\lambda = \frac{h}{p}$ (p — импульс мезона). Производные $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$ и $\frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$ пропорциональны V , поэтому из уравнения (26) после сокращения на V находим (умножив все члены на hc^2 и заменив $\frac{1}{T}$ на ν , а λ на $\frac{h}{p}$):

$$(h\nu)^2 = p^2 c^2 + \left(\frac{h}{2\pi a} \right)^2 c^2.$$

Сопоставляя это выражение с общей формулой для энергии быстро движущейся частицы — в данном случае мезона — как кванта ядерного поля [§ 79, формула (8)]:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_{\pi}^2 c^4,$$

убеждаемся, что

$$a = \frac{h}{2\pi m_{\pi} c}.$$

Потенциал Юкава весьма приблизительно характеризует свойства ядерных сил. Он дает слишком резкое возрастание этих сил при сближении частиц. Кроме того, в действительности потенциальная энергия взаимодействия нуклонов в сильной степени зависит не только от расстояния между ними, но также и от взаимной ориентации их спинов. Эта зависимость наиболее ярко проявляется в дейтоне, где спины протона и нейтрона параллельны. Вычисления, основанные на экспериментальных данных по рассеянию нейтронов, показывают, что при параллельных спинах потенциальная энергия взаимодействия нейтрона и протона почти в 2 раза больше, чем при антипараллельных (если взаимодействие нуклонов характеризовать глубиной прямоугольной потенциальной ямы, то для указанных двух случаев энергия взаимодействия получается равной 21,0 и 11,5 Мэв)

При антипараллельных спинах энергия взаимодействия протона и нейтрона недостаточна для образования связанного состояния.

Энергия взаимодействия нуклонов зависит также от скорости их относительного движения — резко уменьшается при неодинаковых орбитальных моментах количества движения.

Майоран, Гейзенберг, Вигнер и др. пытались усовершенствовать теорию ядерных сил, вводя различные предположения о свойствах мезонного потенциала. Однако достаточно точная теория еще не создана. На каждом этапе развития экспериментальных средств (когда появлялась возможность увеличить энергию бомбардирующих частиц сначала до 10 Мэв, потом до 50, 100, 400 Мэв и т. д.) применявшиеся вместо (27) уточненные формулы приходилось коренным образом изменять.

§ 113. Энергия связи ядер и средняя энергия связи нуклона

Внутренняя энергия ядра складывается из: 1) суммы собственных энергий нуклонов, которые они имели бы, находясь в покое и удалении друг от друга ($\sum m_0 c^2$, где m_0 — масса покоя изолированного нуклона); 2) энергии внутриядерного движения нуклонов $\sum E_{\text{кин}}$ и 3) отрицательной потенциальной энергии их взаимодействия в ядре U :

$$E = \sum m_0 c^2 + \sum E_{\text{кин}} + U. \quad (28)$$

По закону пропорциональности массы и энергии внутренняя энергия ядра в мегаэлектронвольтах определяется массой M покоя ядра, выраженной в атомных единицах (§ 86):

$$E = M \cdot 931,15 \text{ Мэв.}$$

Если из внутренней энергии ядра мы вычтем суммарную собственную энергию нуклонов, то получим сумму потенциальной и кинетической энергий нуклонов в ядре:

$$U + \sum E_{\text{кин}} = Mc^2 - \sum m_0 c^2.$$