
ЛЕКЦИЯ 13

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Мы рассматривали микрофизику. Атом — квантование системы в кулоновском поле. Молекула — квантование колебаний. В колебательном спектре эквидистантные уровни. Квантовые свойства квантово отличаются в зависимости от потенциала. В ядре потенциал вообще другой. Если в атоме потенциал задан, то в ядре он формируется из тех самых частиц, из которых оно состоит.

Теперь мы перейдем к изучению элементарных частиц, то есть тех, которые раздробить больше нельзя. Из космоса прилетают протоны огромных энергий, и первые источники для ядерных реакция были именно из космоса.

Рассмотрим расположение элементарных частиц на диаграмме (см. рис. 13.1).

Внизу — фотон, нейтрино и гравитон, затем электрон с энергией покоя 0,5 МэВ. Далее — мезоны (106 МэВ), пионы, каоны с энергией 498 МэВ. Протон и нейтрон с энергией 938 МэВ, лямбда-частица Λ_0 . Время жизни такой частицы 10^{-10} с.

На самом деле все эти времена очень большие, т. к. сравнивать надо со временем, необходимым на пролет ядра со скоростью света, а оно равно 10^{-22} с.

Удивляет, что среди частиц есть одиночки, есть двойки, есть тройки. С чем это связано? Сейчас имеется уже 2000 элементарных частиц.

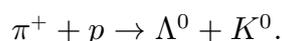
То, что находится от нейтрона и выше — барионы, частицы с полуцелым спином.

Пионы и каоны (целочисленный спин) — мезоны.

Пионы, каоны и все что выше — это адроны (см. рис. 13.2).

А то, что раньше называлось мюоны — теперь мюоны. Мюоны и электроны являются лептонами (потому что легкие).

По мере того, как изучались частицы, обнаружили, что есть два класса взаимодействий.



Время этой реакции $\tau \sim 10^{-23}$ с. Оно ничтожно, значит ничтожно взаимодействие между пионами и протонами.

А вот $\Lambda^0 \rightarrow p^+ + \pi^-$ живет $3 * 10^{-10}$ секунды, то есть очень долго. Значит, взаимодействие слабое.

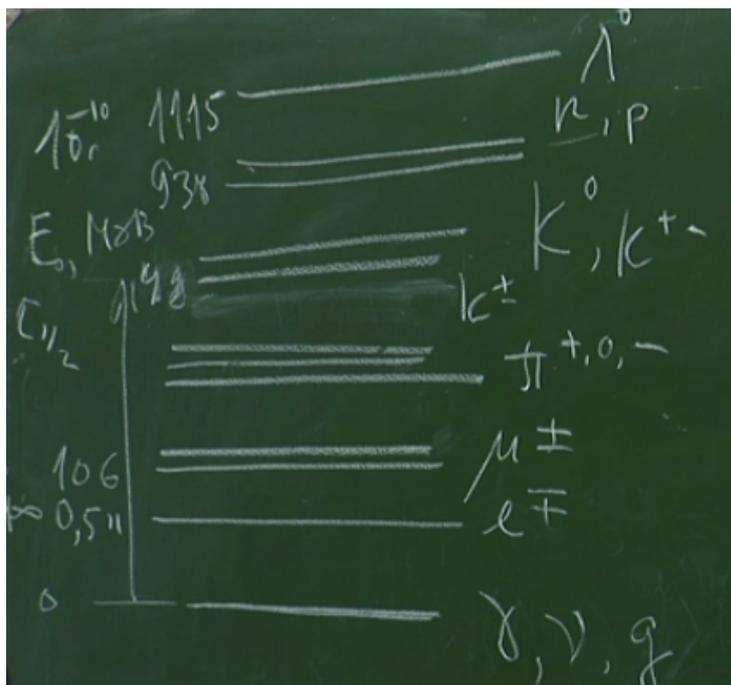


Рис. 13.1

Поэтому реакции поделились на сильное взаимодействие и слабое.

Получилось 4 вида взаимодействий: сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное.

Во всех теориях поля есть переносчики взаимодействия.

Взаимодействие	Переносчик	$R_{\text{вз}}$
сильное	π	10^{-13}
слабое	W^\pm, Z^0	10^{-16}
электромагнитное	γ	∞
гравитационное	g	∞

Таблица 13.1

Для гравитационного взаимодействия переносчик — гравитон, но его пока не нашли. Нужен взрыв какой-то звезды.

Все остальные переносчики были обнаружены.

Для того, чтобы сравнивать взаимодействия, была введена силовая константа g , характеризующая вероятность распада. Она определяется так:

$$g = \frac{\text{Энергия взаимодействия на элементарной длине}}{\text{Характерная энергия}}$$

Рассмотрим электромагнитное взаимодействие:

$$g_{\text{эл}} = \frac{e^2/\Lambda_e}{m_e c^2} = \frac{e^2 m c}{\hbar m c^2} = \frac{e^2}{\hbar c} = \alpha = \frac{1}{137}$$

! Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на lectoriy.mipt.ru.

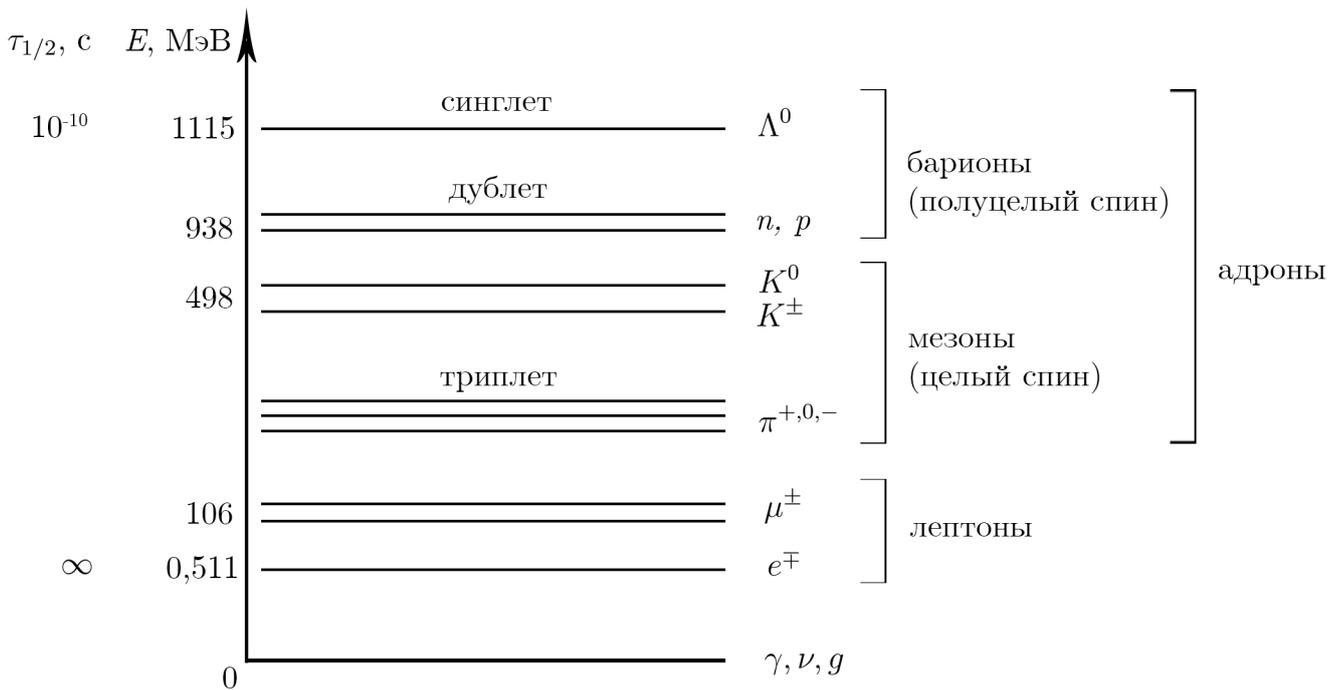


Рис. 13.2

Гравитационное взаимодействие опишем с помощью формального введения гравитационного заряда.

$$g_{\text{гр}} = \frac{\gamma M_N^2}{[\hbar]} = \frac{q^2}{[\hbar]};$$

$g_{\text{гр}} = \gamma M_N^2$, как и в случае с электромагнитным:

$$g_{\text{гр}} = \frac{q_{\text{гр}}^2}{\hbar c} = 10^{-39}.$$

Конечно, это взаимодействие ничтожно по сравнению с электромагнитным.

Для сильного:

$$\frac{q_{\text{яд}}^2}{\hbar c} = g_{\text{сильн}} = \frac{E_{\text{я}} R_{\text{я}}}{\hbar c} \sim 1$$

Для слабого:

$$M_W \sim 100 \text{ ГэВ} \rightarrow g_{\text{сл}} = 10^{-13}.$$

То есть, когда мы рассматриваем сильное взаимодействие, то можно откинуть все другие. Если рассматриваем электромагнитное, то не учитываем гравитационное и слабое.

В результате изучения ядерных реакций оказалось, что частицам нужно приписывать внутренние квантовые числа, которые сохраняются.

Сохраняются:

1. Заряд $Q = \sum q_i$;
2. Проекция момента импульса и импульс I_z, p, J .

! Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на pulsar@phystech.edu



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на lectoriy.mipt.ru.

Помимо этого сохраняются:

1. b — красота (beauty)
2. B — барионный заряд
3. L — лептонный заряд
4. S — странность (strange)
5. C — очарование (charm)
6. T — правдивость (true)

Например, есть протон, который может распасться:

$$p^+ \rightarrow e^+ + \gamma.$$

Энергетически это возможно, но процесс не идет. Барионный заряд протона равен единице, а справа — ноль. Из-за этого и нет реакции.

$$p^+ \not\rightarrow e^+ + \gamma.$$

Вся эта теория восходит к 1930-ым годам, когда Гейзенберг обнаружил, что массы протона и нейтрона почти одинаковы ($m_n \gtrsim m_p$). Поэтому он назвал это нуклоном, который может быть в двух состояниях. Такое разделение похоже на зеемановское расщепление уровней.

Тогда есть какое-то изотопическое пространство, где

$$\left. \begin{array}{l} \text{Протон, } I_3^p = +\frac{1}{2} \\ \text{Нейтрон, } I_3^n = -\frac{1}{2} \end{array} \right\} \text{изотопический дуплет}$$

Тогда волновую функцию нуклона можно представить в виде суммы волновой функции протона и нейтрона.

$$\begin{aligned} \Psi_N &= \alpha\psi_p + \beta\psi_n, \\ |\alpha|^2 + |\beta|^2 &= 1. \end{aligned}$$

Но помимо дуплета, оказалось, что есть еще и триплет.

$$\left. \begin{array}{l} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{array} \right\} \text{изотопический триплет}$$

Тогда спин равен единице $I = 1$, а проекции $I_s = \pm 1, 0$.

Симметрия в изотопическом пространстве — это законы сохранения вращения в изотопическом пространстве от преобразования.

Но когда частиц стало много, то обнаружили более сложные мультиплеты.

Образуется барионный мультиплет (см. рис. 13.3).



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на pulsar@phystech.edu

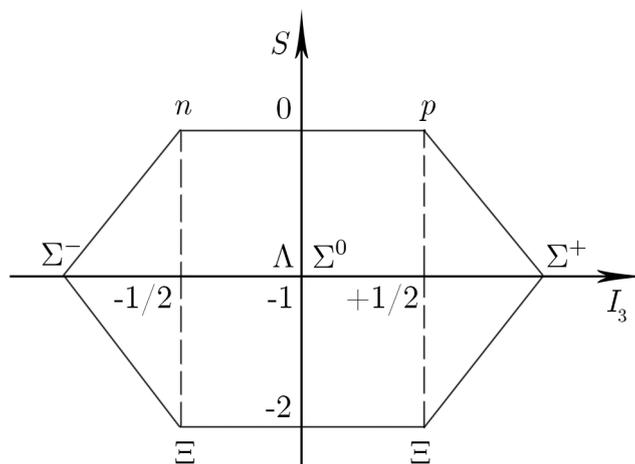


Рис. 13.3

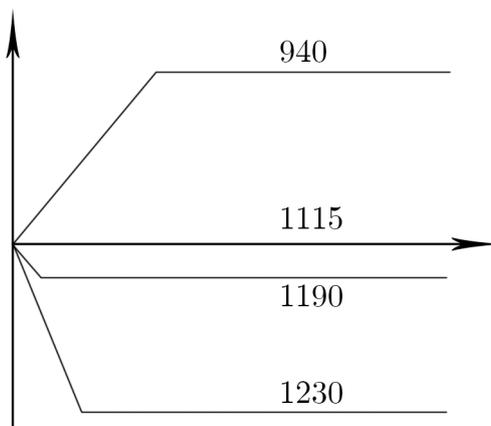


Рис. 13.4

Такое ощущение, что это одна частица. Если нарисовать энергии этих частиц, сложится впечатление, будто энергия расщепилась (см. рис. 13.4).

Оно возможно из-за спонтанного нарушения устойчивости.

При вращении частицы переходят одна в другую. Гелл–Манн и Цвейг нашли пространство, при вращении в котором, сохраняются мультиплеты. Оно называется пространство унитарной симметрии. Предположили, что все эти барионы и мезоны — не элементарные частицы, а сложные, состоящие из фундаментальных частиц. Их назвали кварки. Должно быть три кварка.

Кварки бывают «up-down», «strange-charm», «beauty-truth».

Утверждали, что бозон состоит из трех кварков: $B = \{q_i, q_j, q_k\}$, а мезоны из двух, причем кварка и антикварка.

$$M = \{q_m, \tilde{q}_m\}.$$

Они предполагали, что протон имеет такую структуру: $p = \{uud\}$, заряд $Q = 1$, барионный заряд $B = 1$, изоспин $I_s = \frac{1}{2}$. Нейтрон: $n = \{udd\}$, $Q=0$, $I_s = -\frac{1}{2}$.

$$\pi^+ = \{u\tilde{d}\}.$$

$$K^+ = \{u, \tilde{s}\}.$$



Конспект не проходил проф. редактуру, создан студентами и, возможно, содержит смысловые ошибки. Следите за обновлениями на lectoriy.mipt.ru.

	Mq	Q	b
u	336	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
d	338	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
s	540	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
c	1500	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$
b	g	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
t	γ	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$

Таблица 13.2

После развития этой теории экспериментаторы стали искать частицу с нецелым спином. Например, делали, с помощью опыта Миликена. Но точность, с которой делали эксперименты, не соответствовала нужной. Но кварки так и не нашли. То есть свободных кварков не существует. Они не вылетают из протона, потому что есть пленение кварков.

Есть частица: $\Delta^{++} = \{uuu\}$, но по принципу Паули две одинаковые частицы не могут находиться в одном и том же месте. Поэтому ввели еще одно квантовое число — цвет кварка. Он может быть синий, красный, желтый. Наука, рассматривающая кварковые образования, называется квантовой хромодинамикой.

Почему же кварки не существуют в свободном виде? Если есть один кварк и другой, мы никак не можем вывести их в свободное состояние. Вводится кварк-кварковый потенциал (см. рис. 13.5).

$$V_0(r) = \left[\frac{a}{r} \right] + br.$$

При $r \simeq 10^{-13}$ см $V_{qq} = 1$ ГэВ;
при $r \simeq 10^{-12}$ см $V_{qq} = 10$ ГэВ.

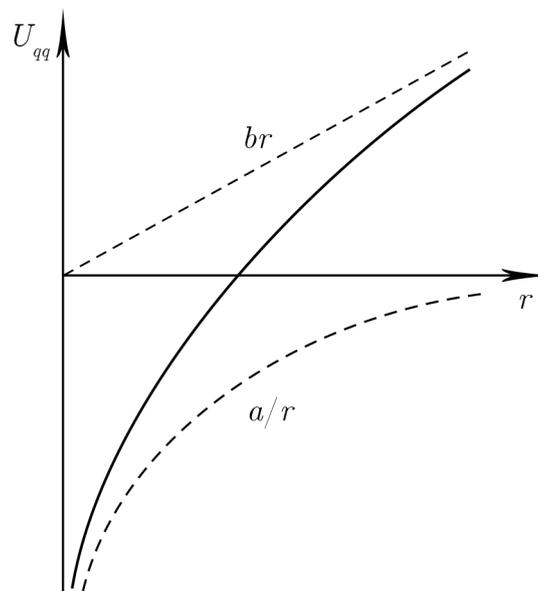


Рис. 13.5

Попробуем разъединить кварки. Возьмем нейтрон. В нем кварки связаны. Теперь



Для подготовки к экзаменам пользуйтесь учебной литературой. Об обнаруженных неточностях и замечаниях просьба писать на pulsar@phystech.edu

удалим один d -кварк. Когда мы будем растягивать, то родится пара «кварк-антикварк». И тогда d -кварк вернется в нейтрон, а другие два образуют пион (см. рис. 13.6).

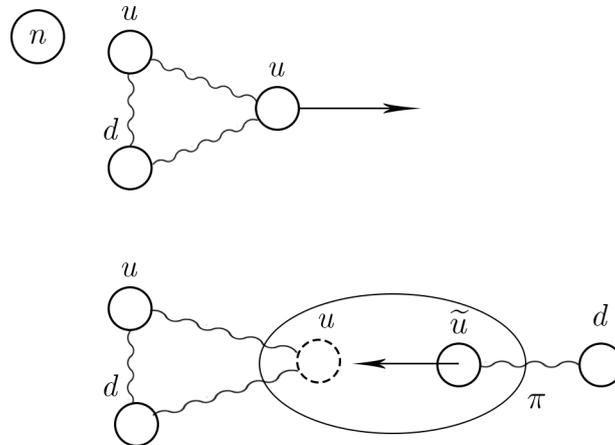


Рис. 13.6

Кварк-кварковый потенциал удалось получить с помощью исследования чармония $\{c\bar{c}\}$ и боттомония $\{b\bar{b}\}$.

Существуют два экспериментальных факта, которые могут быть объяснены только с помощью кварка.

Один из них — это объяснение магнитных моментов нуклонов.

У нейтральной частицы не может быть магнитного момента. Спин есть, но тока нет. Когда же стали измерять магнитный момент нейтрона, оказалось: $\mu_n = -1,91\mu_{\text{яБ}}$; для протона — $\mu_p = 2,79\mu_{\text{яБ}}$.

С точки зрения кваркового рассмотрения, надо взять отдельные кварки и сложить их магнитные моменты.

Как описать взаимодействие нуклонов?

Возьмем два взаимодействия. Первое:

$$p(uid) + p(uid) \Rightarrow 3 * 3 = 9 \text{ вариантов столкновений,}$$

т. к.

$$\sigma_{uu} = \sigma_{ud} = \sigma_{dd}.$$

Второе:

$$\pi^+(u\bar{d}) + p(uid) \Rightarrow 3 * 2 = 6 \text{ вариантов столкновений.}$$

Тогда:

$$\frac{\sigma_{pp}}{\sigma_{\pi p}} = \frac{3}{2},$$

что отлично подтверждается.

Все кварки экспериментально найдены на ускорителях, а их массы измерены.

Самым последним был обнаружен t -кварк, но теоретики всегда считали, что он есть.

Симметрия заключается вот в чем:

Нуклоны состоят только из u -кварков и d -кварков. Это наш современный мир. Также, как и e , ν_e .

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

Таблица 13.3: Лептонные пары

u	c	t
d	s	b

Таблица 13.4: Кварковые пары

			Q	ΔQ
ν_e	ν_μ	ν_τ	0	
e	μ	τ	-1	-1
			Q	ΔQ
u	c	t	$\frac{2}{3}$	
d	s	b	$-\frac{1}{3}$	-1

Таблица 13.5

u и d — это первое поколение кварков. Сначала было третье поколение, которое затем, преобразовалось во второе, а оно — в первое. При этом не сохраняются квантовые числа. А в бета-распаде не сохраняется четность. В слабых взаимодействиях она не сохраняется.

Эксперимент Ву был следующим: виток с током, внутри радиоактивное ядро ^{60}Co . Под действием поля спины выстроятся. Тогда должна быть полная симметрия относительно плоскости. Но оказалось, что в одну сторону идет больше частиц, а в другую меньше.

На основании этого было сделано предположение о существовании слабого изоспина. Все это описание — в рамках Стандартной модели.