

ЛЕКЦИЯ 13

Квантовая физика

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 реакций были именно из космоса.

Рассмотрим расположение элементарных частиц на диаграмме.

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.

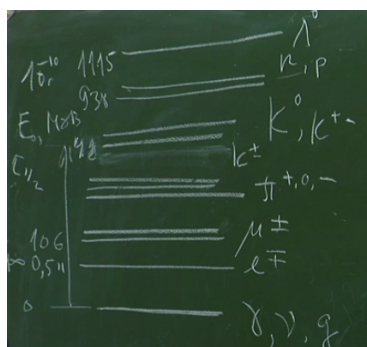


Рис. 13.1.

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.

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

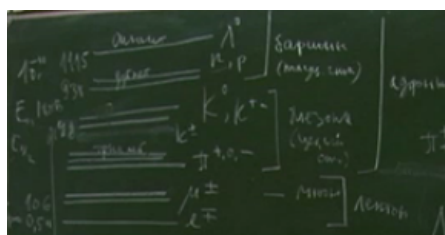
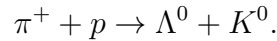


Рис. 13.2.

Лекция 13. Квантовая физика

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 $3 \cdot 10^{-10}$ секунды, то есть очень долго. Значит, взаимодействие слабое.

Поэтому реакции поделились на сильное взаимодействие и слабое.

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

Во всех теориях поля есть переносчики взаимодействия.

Таблица 13.1.

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

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:

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

Гравитационное взаимодействие опишем с помощью формального введения гравитационного заряда.

$$g_{\text{гр}} = \frac{\gamma M_N^2}{r} = \frac{q^2}{r};$$

$q_{\text{гр}} = \gamma M_N^2$, 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:

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

Лекция 13. Квантовая физика

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 .

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.

$$\Psi_N = \alpha\psi_p + \beta\psi_n,$$

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

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.

Лекция 13. Квантовая физика

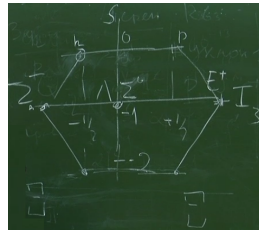


Рис. 13.3.

Таблица 13.2.

	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	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$

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

Образуются барионный мультиплет.

Такое ощущение, что это одна частица. Если нарисовать энергии этих частиц, сложится впечатление, будто энергия расщепилась.

Оно возможно из-за спонтанного нарушения устойчивости.

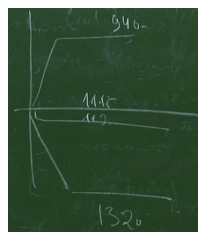


Рис. 13.4.

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: $n = \{udd\}$, $Q=0$, $I_s = -\frac{1}{2}$.

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

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

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.

$$V_0(r) = \frac{a}{r} + br.$$

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

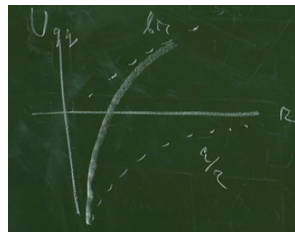


Рис. 13.5.

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

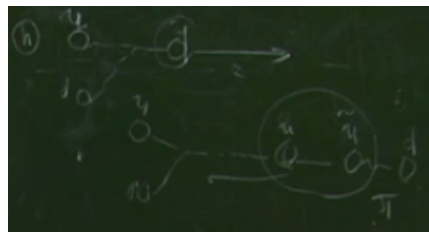


Рис. 13.6.

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

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: $\mu_n = -1,91\mu_{\text{яВ}}$; для протона — $\mu_p = 2,79\mu_{\text{яВ}}$.

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

Лекция 13. Квантовая физика

Как описать взаимодействие нуклонов?

Возьмем два взаимодействия. Первое:

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

т. к.

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

Второе:

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

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.

Таблица 13.3. Лептонные пары

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

Таблица 13.4. Кварковые пары

u	c	t
d	s	b

Симметрия заключается вот в чем:

Таблица 13.5.

			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

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

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.