



### 1.23. Фундаментальные взаимодействия микрочастиц. Адроны и лептоны, барионы и мезоны

**В** настоящее время в микромире различают четыре типа основных взаимодействий между микрочастицами: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.

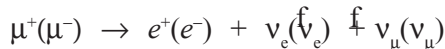
1. *Сильное* взаимодействие приводит к самой сильной связи микрочастиц. Впервые с ним мы встретились в атомных ядрах. Именно там нуклоны (протоны и нейтроны) связаны по типу сильных взаимодействий. Эти связи осуществляются путем процессов обмена между протоном и протоном, между нейтроном и нейтроном нейтральным пионом  $\pi^0$  и, наконец, между протоном и нейтроном заряженными пионами  $\pi^+$  и  $\pi^-$ . Сильное взаимодействие является ярко выраженным короткодействующим типом связи: радиус его действия очень мал, он порядка типичных ядерных размеров ( $10^{-13}$  см). Сильная связь между нуклонами обеспечивает большую устойчивость макротел в природе. Энергия связи, приходящаяся на один нуклон в атомных ядрах химических элементов со средними атомными весами, оказывается довольно большой величиной – порядка 8 МэВ на нуклон.

2. *Электромагнитное* взаимодействие более слабое, чем сильная связь. Оно осуществляет связь электронов атомной оболочки с положительным электрическим зарядом атомного ядра. Этот тип фундаментальных связей происходит путем обмена между электрически заряженными микрочастицами с помощью фотонов. В отличие от сильной связи он является далекодействующим, поэтому атомные расстояния в десятки тысяч раз превышают размеры атомных ядер и составляют по порядку величины  $10^{-8}$  см. Еще одно характерное отличие электромагнитных сил состоит в том, что из-за существования двух типов электрических зарядов – положительного и отрицательного – они могут быть как силами притяжения (между разноименными зарядами), так и силами отталкивания (между одноименными зарядами). В основном такой тип фундаментальных взаимодействий ответственен за структуру электронной оболочки всех атомов химических элементов.

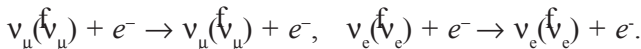


3. *Слабое* взаимодействие обуславливает связь между микрочастицами в очень медленно протекающих процессах в микромире. Свидетельством его слабости может, например, служить то, что нейтрино и антинейтрино, для которых этот тип связи является практически единственным, могут свободно проникать через всю толщу Земли и Солнца. Данный тип сил играет главенствующую роль при радиоактивном процессе бета-распада и К-захвата. Он также обеспечивает относительно большие времена жизни для так называемых *квазистабильных* микрочастиц, времена жизни которых достигают величин порядка  $10^8$ – $10^{10}$  с, тогда как для сильного взаимодействия соответствующие времена жизни близки по порядкам величины  $10^{-20}$ – $10^{-24}$  с. Слабые взаимодействия обуславливают все процессы, происходящие с участием нейтрино и антинейтрино, ибо последние подчиняются только этому типу связи и гравитации. Они также играют заметную роль в процессе эволюции звезд.

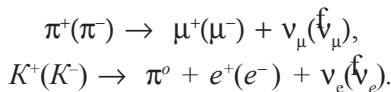
Укажем на универсальность слабого взаимодействия, т.к. оно присуще всем микрочастицам, кроме фотона, – как адронам, так и лептонам. Процессы слабой связи, в которых принимают участие только лептоны, именуют *чисто лептонными*. Типичными примерами таких процессов являются распад мюонов на электроны или позитроны и нейтрино или антинейтрино:



или упругое рассеяние нейтрино или антинейтрино на электронах и позитронах:



Процессы слабой связи с одновременным участием адронов и лептонов называются *полулептонными*. К ним относится бета-распад, а также распады электрически заряженных пионов и каонов:



Наконец, процессы слабого взаимодействия, которые идут только между адронами, называются *нелептонными*. В качестве примера приведем распады электрически заряженных каонов и нейтрального лямбда гиперона:



$$K^+(K^-) \rightarrow \pi^+(\pi^-) + \pi^+(\pi^-) + \pi^-(\pi^+)$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^- \text{ или } \Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0.$$

Последние два типа процессов, т.е. полуплептонные и нелептонные, объясняются сложной составной кварковой структурой адронов. Заметим, что слабое взаимодействие обладает очень малым радиусом действия – меньшим, чем  $10^{-15}$  см.

Из-за того, что имеется три типа нейтрино и антинейтрино, во всех слабых процессах у каждого заряженного лептона –  $e^+$  и  $e^-$ ,  $\mu^+$  и  $\mu^-$ ,  $\tau^+$  и  $\tau^-$  – имеется своя «тень», свои нейтрино и антинейтрино:  $\nu_e$  и  $\bar{\nu}_e$ ,  $\nu_\mu$  и  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\nu_\tau$  и  $\bar{\nu}_\tau$ . Для выяснения того, какие процессы слабого взаимодействия возможны, а какие нет, вводятся особые квантовые числа – три лептонных заряда:  $L_e, L_\mu, L_\tau$ . Они имеют такие значения:

$$L_e = \begin{cases} +1 \text{ для } e^- \text{ и } \bar{\nu}_e, \\ -1 \text{ для } e^+ \text{ и } \nu_e, \\ 0 \text{ для всех других микрочастиц.} \end{cases}$$

$$L_\mu = \begin{cases} +1 \text{ для } \mu^- \text{ и } \bar{\nu}_\mu, \\ -1 \text{ для } \mu^+ \text{ и } \nu_\mu, \\ 0 \text{ для всех других микрочастиц.} \end{cases}$$

$$L_\tau = \begin{cases} +1 \text{ для } \tau^- \text{ и } \bar{\nu}_\tau, \\ -1 \text{ для } \tau^+ \text{ и } \nu_\tau, \\ 0 \text{ для всех других микрочастиц.} \end{cases}$$

Алгебраическая сумма лептонных зарядов сохраняется во всех процессах слабого взаимодействия, что и определяет, какие процессы могут происходить, а какие запрещены. С учетом сохранения всех трех типов лептонных зарядов все возможные реакции с участием лептонов выглядят так:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad \pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e,$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e, \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e,$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_e, \quad n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e.$$

Можно проверить, что во всех этих реакциях справа и слева алгебраическая сумма лептонных зарядов одна и та же. Такие реакции, как, например,

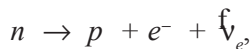
$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\tau + \bar{\nu}_e \text{ и т.п.}$$



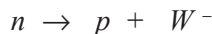
оказываются запрещенными законом сохранения лептонных зарядов.

Электрический заряд и магнитный момент всех нейтрино и антинейтрино равны нулю, но нейтрино и антинейтрино при этом не являются истинно нейтральными частицами, поскольку у них различные лептонные заряды и различные спиральности. Спиральность – одна из квантово-механических характеристик состояния микрочастиц, определяемая как проекция спина частицы на направление её импульса. Спиральность обозначают символом  $\lambda$ . Если  $\lambda > 0$ , т.е. спин и импульс параллельны, то мы имеем правовинтовую или правую спиральность. Если же  $\lambda < 0$ , спин и импульс антипараллельны, то спиральность левовинтовая или левая. Спин у всех этих частиц равен  $1/2$ , т.е. они являются фермионами, а вопрос об их массе покоя пока остается до конца не решенным.

В связи с проблемой слабого взаимодействия надо еще раз упомянуть об открытии так называемых *промежуточных бозонов* –  $W^+$  и  $W^-$ , а также  $Z^0$ , которые, согласно идее Юкавы, должны переносить слабое взаимодействие. Его идея получила свое полное развитие только после создания единой теории электрослабого взаимодействия, предложенной в 1967 году С. Вайнбергом и А. Саламом (за нее в 1979 году Глешоу, Саламу и Вайнбергу была присуждена Нобелевская премия). Не останавливаясь на математическом аппарате этой теории, мы только отметим, что теория электрослабого взаимодействия в целом сохранила основные положения теории Ферми для бета-распада, но внесла еще три новых промежуточных тяжелых бозона: первый – положительно заряженный  $W^+$ , второй – отрицательно заряженный  $W^-$ , оба со спином 1, и третий – нейтральный бозон  $Z^0$ . Именно эти бозоны и являются переносчиками электрослабого взаимодействия. Так, например, в теории электрослабой связи схема бета-распада, которая нами ранее принималась как



теперь заменяется двухступенчатым процессом распада. Сначала нейтрон превращается в протон с испусканием  $W^-$  бозона, т.е.





с последующим распадом на электрон и антинейтрино:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e.$$

В теории электрослабого взаимодействия также предполагается существование нейтрального промежуточного бозона, уже упомянутого  $Z^0$ , со спином, равным 1, который обеспечивает процессы без изменения знаков электрических зарядов. Продукты распада всех трех бозонов выглядят так:

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e, \quad W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e, \quad W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

$$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-, \quad Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-.$$

Эти промежуточные бозоны были открыты на ускорителях с протонно-антипротонными встречными пучками. Для масс покоя промежуточных бозонов получены следующие значения:

$$M(Z^0) = (95,6 \pm 1,4) \text{ ГэВ},$$

$$M(W^+ + W^-) = (80,9 \pm 1,5) \text{ ГэВ},$$

т.е. их массы покоя во много раз больше массы покоя протона, которая равна 0,9383 ГэВ.

Наблюдение промежуточных заряженных бозонов проще всего осуществить с помощью исследования их лептонных распадов, приведенных во второй строке указанных только что выше схем распада. Заряженные промежуточные бозоны были открыты 20 января 1983 года, а нейтральный промежуточный бозон – в июне 1983 года в ЦЕРНе в Женеве, в Европейском центре атомных и субатомных исследований.

4. *Гравитационное* взаимодействие хорошо известно по своему макропроявлению в Космосе в явлении тяготения. Благодаря тому, что в гравитации имеет место только притяжение, в макромире из-за суммирования всех сил гравитации наблюдаются очень большие гравитационные эффекты, которые определяют все движения небесных тел. Но в случае микрочастиц, в силу чрезвычайной малости их масс покоя, действие гравитации очень слабое по сравнению с другими тремя типами фундаментальных взаимодействий и на характерных атомных и субатомных расстояниях  $10^{-8}$ – $10^{-13}$  см его эффект почти незаметен. Однако при длинах порядка



планковской, т.е. на расстояниях порядка  $10^{-33}$  см, гравитационные эффекты могут быть очень существенны и в микроявлениях.

Гравитационную силу характеризует ньютоновская гравитационная постоянная  $G$ , которая входит в закон всемирного тяготения. Величина ее равна:

$$G = 6,6720 \times 10^{-8} \text{ см}^3 \text{ г}^{-1} \text{ с}^{-2}.$$

Переменное гравитационное поле от ускоренно движущихся тел должно вызывать гравитационные волны, но пока нет окончательных экспериментов прямого их обнаружения, поскольку, по-видимому, в существующих приборах не хватает чувствительности. Предполагаемый квант гравитационного поля называется гравитоном. Теория дает, что его масса покоя равна нулю, а спин равен 2, т.е. он является бозоном.

Вопрос об обнаружении гравитационных волн дебатруется в астрономии и в космологии, особенно в связи с изучением недавно открытых космических объектов – пульсаров или нейтронных звезд.

Рассмотрим некоторые общие вопросы фундаментальных взаимодействий. Различные типы четырех основных связей в микромире характеризуются так называемыми константами связи, или, иначе, постоянными взаимодействий. Сильное взаимодействие характеризуется безразмерным параметром, который имеет вид:

$$2\pi g^2/hc = 14,$$

(здесь  $g$  – константа сильного взаимодействия, равная  $g = 2 \times 10^{-8} \text{ г см}^3 \text{ с}^{-2}$ ).

Для слабого взаимодействия соответствующая безразмерная константа равна:

$$8\pi^3 G_\phi M^2 c/h^3 = 10^{-5},$$

(здесь  $G_\phi$  – константа фермиевского взаимодействия, равная  $G_\phi = 10^{-49} \text{ эрг см}^3$ ,  $M$  – масса покоя нуклона).

Электромагнитное взаимодействие имеет константу связи, равную  $\alpha$ . Мы уже знакомы с этой величиной, она определяет тонкую структуру спектральных линий:

$$\alpha = e^2/\mathcal{S}c = 1/137 = 0,00679,$$

где  $e$  – заряд электрона, который играет роль постоянной электромагнитного взаимодействия,  $e = 4 \times 10^{-10} \text{ г}^{1/2} \text{ см с}^{-1}$ . Для



### 1.23. Фундаментальные взаимодействия микрочастиц...

гравитационного взаимодействия безразмерный параметр равен:

$$2\pi GM^2/hc = 3,5 \times 10^{-12},$$

а гравитационная постоянная  $G$  уже была приведена выше.

Итак, параметры фундаментальных взаимодействий, соответственно сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного, относятся при экстраполяции на нулевые расстояния между микрочастицами как:

$$1 : 10^{-3} : 10^{-5} : 10^{-39}.$$

Приведем классификацию элементарных микрочастиц, вспомнив о всех квантовых числах и о типах связи. Первое разделение микрочастиц идет по участию или неучастию их в сильном взаимодействии. Те микрочастицы, которые участвуют в этой связи, называют *адронами*, а те, которые не участвуют в ней, – *лептонами*.

Далее, займемся разделением адронов на два класса в связи со значением барионного квантового числа. Оно может принимать три значения:  $+1$ ,  $-1$  и  $0$ . Микрочастицы-адроны с барионным числом  $B = +1$  называются *барионными* частицами, микрочастицы, которые имеют  $B = -1$  – барионные античастицы, а микрочастицы с  $B = 0$  называют *мезонами*. Во всех трех типах связи: сильном, электромагнитном и слабом, – барионные числа строго сохраняются. Поэтому во всех процессах, обусловленных данными связями, сохраняется разность между числом барионов и антибарионов. Таким образом, рождение бариона при превращении должно всегда сопровождаться появлением антибариона. Группа барионов состоит из тяжелых частиц с массой покоя не меньше массы покоя протона, они все имеют спин, равный  $1/2$ , т.е. являются фермионами. К барионам относятся и оба нуклона – протон и нейтрон, гипероны и барионные резонансы.

Предсказывается также существование микрочастиц с квантовыми числами «очарованием» и «прелестью», а возможно, и другими.

Единственным стабильным барионом является протон (с его временем жизни в  $10^{30}$  лет). Все остальные барионы нестабильные, и путем последовательных процессов распада они превращаются в протон и легкие микрочастицы. Нейтрон в свободном состоянии нестабилен, хотя по временным масштабам микромира его время жизни 17 минут (это огромная

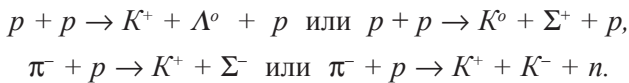


продолжительность), а в атомных ядрах нейтроны из-за действия ядерных сил становятся стабильными. Барионы, как уже отмечалось, участвуют во всех четырех типах фундаментальных взаимодействий.

Вторая группа адронов (*мезоны*) – тоже нестабильные микрочастицы, обладающие целым спином, т.е. являющиеся бозонами. Все они имеют нулевое значение барионного квантового числа:  $B = 0$ . Их название происходит от греческого слова «мезос», т.е. средний или промежуточный, т.к. предполагалось вначале, что их массы покоя действительно лежат между протоном и электроном, как, например, для пионов. Но теперь, когда появились мезоны с массами покоя, большими массы покоя протона, такое название сохранилось по традиции.

Мезоны могут быть заряженными электрически (как положительно, так и отрицательно) и нейтральными. У них может быть нулевое значение странности (скажем, у пионов) и ненулевое (например, у каонов), а также нулевое и ненулевое значение очарования и т.п. Мы увидим позже, что по модели кварков мезоны состоят из соединения кварка и антикварка. Подчеркнем большое значение для микрофизики открытия в 1976–1977 годах ипсилон-частицы, т.е.  $\Upsilon$ -мезона с массой покоя около 10 ГэВ. Кроме нее были еще открыты три микрочастицы, а именно:  $\Upsilon'$  с массой покоя в 10,018 ГэВ,  $\Upsilon''$  с массой покоя 10,350 ГэВ,  $\Upsilon'''$  с массой покоя 10,573 ГэВ.

Полученные ипсилон-мезоны являются истинно нейтральными микрочастицами, как и нейтральный пион  $\pi^0$  и фотон. Напомним, что в группе мезонов существует группа метастабильных микрочастиц-каонов – два электрически заряженных  $K^+$  и  $K^-$  и два нейтральных  $K^0$  и  $\bar{K}^0$ . Два последних каона имеют нулевой спин и массу покоя, примерно в 970 раз большую электронной массы покоя. Каоны участвуют в сильном взаимодействии, т.е. являются адронами, и имеют отличные от нуля значения квантовых чисел странности:  $S = +1$  у  $K^+$  и  $K^0$ , а у  $K^-$  и  $\bar{K}^0$   $S = -1$ . Сильные взаимодействия могут вызвать процессы с участием каонов типа:

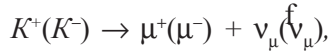


Кроме того, каоны принимают участие и в слабых взаимодействиях в виде, например, таких реакций распада:





### 1.23. Фундаментальные взаимодействия микрочастиц...



а также в других реакциях. Существуют и иные типы мезонов.

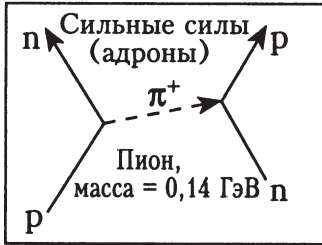
Подведем некоторые итоги нашего рассмотрения четырех фундаментальных взаимодействий, имеющих резко различные свойства. Прежде всего, их интенсивности отличаются от 1 до  $10^{-39}$ . Во-вторых, эти взаимодействия переносятся различными микрочастицами: пионами, фотонами, промежуточными бозонами и т.д., а переносчики взаимодействия обязательно являются бозонами, сами же взаимодействующие микрочастицы являются фермионами. Массы покоя переносчиков взаимодействия могут быть нулевыми, как, например, у фотона, и ненулевыми, как у пионов. Некоторые общие выводы сведены нами в *таблицу 11*. На *рис. 33* приведены так называемые фейнмановские графики для них, где прямые или волнистые линии показывают движение той или иной микрочастицы, а точки пересечения линий обозначают процесс столкновения частиц, приходящих в эту точку, и пути разбегающихся продуктов реакции.

На *рис. 34* показаны графики для зависимостей интенсивностей всех четырех типов фундаментальных взаимодействий от расстояния между микрочастицами.

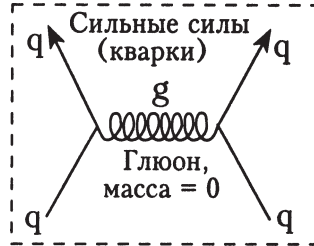


*Табл. 11. Таблица, в которой сведены некоторые данные о фундаментальных взаимодействиях.*

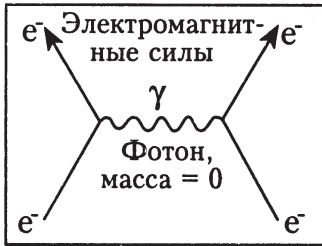
Тип связи	Интенсивность	Радиус действия	Тип микрочастиц, участвующих в связи	Микрочастицы-переносчики взаимодействия			Связь между одинаковыми частицами
				Тип	Масса покоя	Спин	
Гравитационная	$10^{-39}$	Большой – $1/r^2$	Все микрочастицы	Гравитон	0	2	Притяжение
Слабое	$10^{-5}$	Малый – $10^{-15}$ см	Лептоны и кварки и все другие, кроме фотона	Промежуточные бозоны,	$\sim 100$ МэВ	1	Отталкивание
				нейтрино и антинейтрино	0?	1/2	
Электромагнитное	$10^{-3}$	Большой – $1/r^2$	Все электрически заряженные частицы	Фотон	0	1	Притяжение и отталкивание
Сильное	1	Малый – $10^{-13}$ см	Нуклоны, кварки	Пионы и глюоны	140 МэВ	0	Притяжение
					0	1	



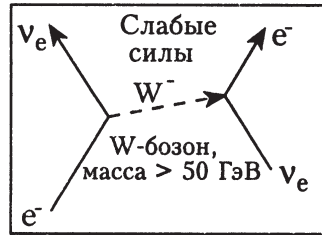
а



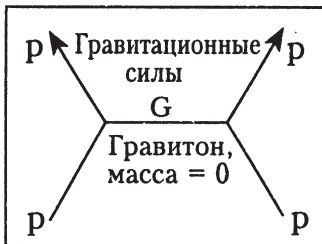
б



в

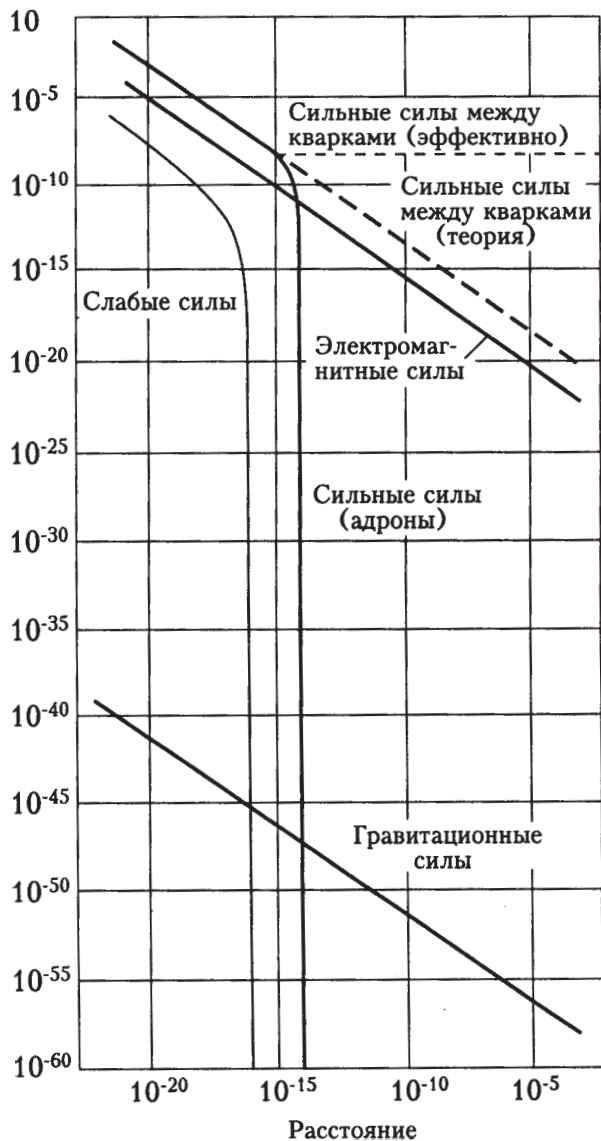


г



д

**Рис. 33.** Фейнмановские графики некоторых типичных фундаментальных процессов взаимодействия между микрочастицами: а) и б) – сильное взаимодействие, в) электромагнитное взаимодействие, г) слабое взаимодействие, д) гравитационное взаимодействие.



*Рис. 34. Зависимость интенсивности всех четырех типов фундаментальных взаимодействий от расстояний между микрочастицами.*