

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 30а

Карпинская Н.П., Сарычева Л.И., Смирнова Л.Н., Тихонова Л.А.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ (интерактивный задачник на персональном компьютере)

Содержание

1. Частицы и взаимодействия (занятие 1).
2. Кварковая структура адронов (занятие 2).

Аннотация

Настоящее учебное пособие вместе с прилагаемой программой для персонального компьютера (ПК) предлагается в качестве задачника по физике элементарных частиц и их взаимодействиях. Наибольшее внимание уделено кварковой структуре адронов. Содержание соответствует общему курсу лекций для студентов старших курсов физического факультета МГУ.

Новым элементом является интерактивный процесс обучения, в котором студент осваивает новые понятия и закономерности, работая индивидуально за компьютером и отвечая на поставленные вопросы. Программа на ПК контролирует правильность ответов. Такой способ является дополнением к лекционному способу обучения и позволяет более эффективно усваивать новые понятия.

Прилагаемая визуальная программа может помочь в организации демонстрации материала на лекциях и семинарах.

Фундаментальные частицы и взаимодействия

1.0. Предисловие

Это занятие является введением в курс лекций «Частицы и ядра». Оно знакомит читателя с фундаментальными принципами физики Микромира.

Основными объектами физики микромира являются атомные ядра, кварки, лептоны, калибровочные бозоны, а также взаимодействия между частицами.

Частицы микромира

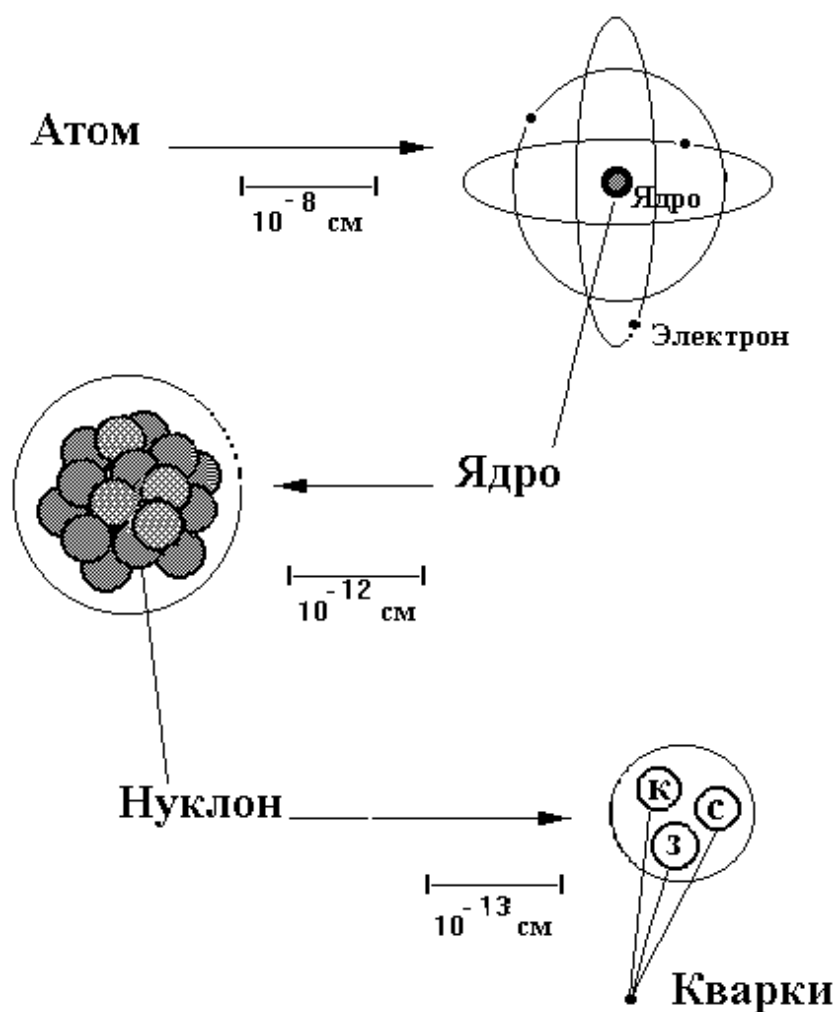


Рис. 1. Микромир.

1.1. Масштабы времени, пространства и плотностей

Ниже представлена таблица типичных значений времени t , расстояний и размеров l , плотностей ρ физических объектов и сил, определяющих взаимодействие этих объектов.

Таблица 1. Масштабы физических величин.

Объект	Силы	t (сек)	l (м)	ρ (г/см ³)	Примечания
Вселенная		10^{-44}		10^{90}	Начало Вселенной. t и ρ в момент Большого Взрыва
Лептоны	слабые	10^{-26}	10^{-18}		t – время взаимодействия
Кварки	сильные слабые и электро- магнитные		10^{-16}		t – время взаимодействия l – размер ρ – плотность газа или твердого тела
Протоны			10^{-15}		
Ядра		10^{-23}	10^{-14}	10^{14}	
Атом	электро- магнитные	10^{-19}	10^{-10}		t – время взаимодействия
Молекула			10^{-8}	10^{-1}	
Твердое тело				$\cong 10^1$	
Земля	гравита- ционные		10^7	$\cong 10^1$	
Солнце					
Солнечная система			10^{12}		
Галактика			10^{21}		
Вселенная		10^{17}	10^{26}	10^{-17}	

Настоящее учебное пособие посвящено области физики, охватывающей шкалу расстояний $10^{-19} \div 10^{-14}$ м и изучающей такие объекты физики как кварки, лептоны и ядра. В XX веке в этой области физики были сделаны замечательные открытия и достигнуто глубокое понимание субъядерной структуры.

Систематизация нескольких сотен элементарных частиц и анализ их распадов и взаимодействий между ними позволили установить некоторые первичные составляющие: кварки, лептоны и калибровочные бозоны (см. раздел 1.2). Они представляют собой «периодическую» таблицу самых элементарных частиц. В аналогичной ситуации Д.И.Менделеевым была создана периодическая система элементов на уровне атомов.

Поразительные успехи были достигнуты в теории. Электромагнитные и слабые взаимодействия объединены в единую теорию электрослабых взаимодействий. Создана и продолжает развиваться теория сильных взаимодействий – квантовая хромодинамика (КХД). Она описывает взаимодействие кварков, имеющих цветовой заряд. Характеристики фундаментальных взаимодействий представлены в разделе 1.3.

В настоящее время физики пытаются объединить электрослабую теорию и КХД в единую теорию, а ее – с теорией гравитации и создать так называемую теорию «Великого Объединения».

Константы

Время:	$1 \text{ сек} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ лет}$
Расстояние:	$1 \text{ м} = 10^2 \text{ см} = 10^3 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ км},$ $1 \text{ фм} = 10^{-13} \text{ см}, \quad 1 \text{ световой год} = 10^{15} \text{ м}$
Плотность:	$1 \text{ г/м}^3 = 10^3 \text{ кг/см}^3$
Масса и энергия:	$1 \text{ ГэВ} = 10^3 \text{ МэВ} = 10^9 \text{ эВ},$ $1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$
$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$	$\alpha = 1/137$
$\hbar c = 0.2 \text{ ГэВ} \cdot \text{фм}$	$\hbar = 6.6 \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{сек}$

Контрольные вопросы

1. Во сколько раз ядерная плотность больше, чем плотность Земли?

10^0 ?
 10^7 ?
 10^{14} ?

2. Каково время жизни Вселенной в годах?

10^6 лет ?
 10^{10} лет ?
 10^{12} лет ?

3. Каков размер Галактики?

10^0 световых лет ?

10^5 световых лет ?

10^{10} световых лет ?

4. Определите плотность протона в г/см^3 и сравните ее с плотностью Земли.

10^0 г/см^3 ?

10^{10} г/см^3 ?

10^{14} г/см^3 ?

Необходимая информация содержится в табл. 1.

1.2. Частицы

Фундаментальные частицы делятся на 2 группы:

фундаментальные фермионы (спин S – полуцелый)

ЛЕПТОНЫ И КВАРКИ

фундаментальные бозоны (спин S – целый)

ФОТОН, ВЕКТОРЫЕ СЛАБЫЕ БОЗОНЫ, ГЛЮОНЫ, ГРАВИТОН

Здесь приведена таблица элементарных составляющих.

Таблица 2. Фундаментальные фермионы ($S = 1/2$).

		ЛЕПТОНЫ		КВАРКИ	
Электрический заряд (Q/e):		0	- 1	- 1/3	+ 2/3
ПЕРВОЕ ПОКОЛЕНИЕ	Символ	ν_e	e	d	u
	Название	электронное нейтрино	электрон	d -кварк	u -кварк
	Масса (МэВ)	< 0.000018	0.511	$\cong 330$	$\cong 300$
ВТОРОЕ ПОКОЛЕНИЕ	Символ	ν_μ	μ	s	c
	Название	мюонное нейтрино	мюон	s -кварк	c -кварк
	Масса (МэВ)	< 0.250	105.7	$\cong 510$	$\cong 1500$
ТРЕТЬЕ ПОКОЛЕНИЕ	Символ	ν_τ	τ	b	t
	Название	таонное нейтрино	таон	b -кварк	t -кварк
	Масса (МэВ)	$< 35.$	1784	$\cong 4900$	$\cong 174000$

Массы кварков соответствуют так называемым массам составляющих кварков. Заряды даны в единицах заряда электрона, $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кулона.

Окружающее нас вещество состоит из фермионов первого поколения: d, u, e и ν_e .

Каждый кварк имеет цветовой заряд – красный, синий и зеленый.

$$d_k d_c d_3 \quad u_k u_c u_3 \quad \text{и т.д.}$$

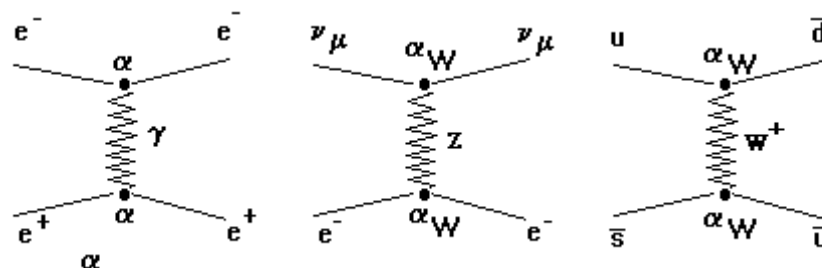
Сумма электрических зарядов всех частиц одного поколения равна нулю, с учетом числа различных цветных кварков

$$\sum_i Q_i = 0.$$

Каждый фермион имеет свой собственный антифермион с противоположными квантовыми числами.

$$\nu_e - \bar{\nu}_e, \quad e^- - e^+, \quad d - \bar{d}, \quad u - \bar{u} \quad \text{и т.д.}$$

Лептоны взаимодействуют через электрослабое взаимодействие и обмениваются фотоном γ или векторными бозонами Z, W^\pm



Кварки взаимодействуют посредством сильных взаимодействий и обмениваются глюоном g .

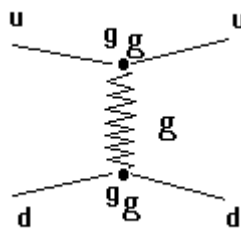


Таблица 3. Фундаментальные калибровочные бозоны (спин целый).

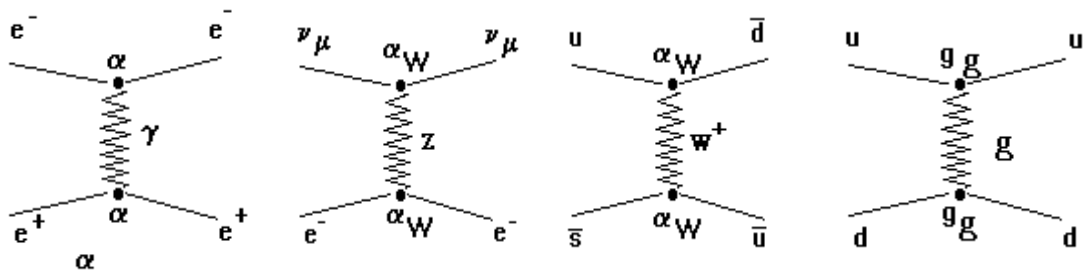
Название	Символ	Спин	Масса (ГэВ/c ²)	Электрический заряд
ГРАВИТОН	G	2	0	0
ФОТОН	γ	1	0	0
ЗАРЯЖЕННЫЙ СЛАБЫЙ БОЗОН	W^\pm	1	81.0	± 1
НЕЙТРАЛЬНЫЙ СЛАБЫЙ БОЗОН	Z	1	92.4	0
ГЛЮОН	g	1	0	0

Калибровочные бозоны являются переносчиками следующих взаимодействий (табл. 3а):

Таблица 3а.

Гравитационное	G
Электрослабое	γ
Слабое	Z, W^\pm
Сильное	g

Примеры:



Контрольные вопросы

1. Определите номер поколения следующих фермионов:

ν_μ	μ	s	c
$\nu_{\bar{e}}$	\bar{e}	\bar{d}	\bar{u}
ν_τ	τ	b	t

2. Каково соотношение между массами кварков?

d	s	$>?$	$<?$	$\cong?$
b	u	$>?$	$<?$	$\cong?$
d	u	$>?$	$<?$	$\cong?$
t	b	$>?$	$<?$	$\cong?$

3. Укажите строку, в которой лептоны соответствуют приведенным в первой строке массам (в МэВ).

105.7	1784.	0.511	
e	μ	τ	?
μ	τ	e	?
τ	e	μ	?

4. Вычислите и укажите правильную сумму электрических зарядов приведенных здесь фермионов.

$$\begin{aligned}
 & \nu_{\mu} + \mu + s_{\kappa} + s_c + s_3 + c_{\kappa} + c_c + c_3 \\
 & \quad - 2/3 \quad ? \\
 & \quad 0 \quad ? \\
 & \quad 1 \quad ?
 \end{aligned}$$

(См. табл. 2. «Фундаментальные фермионы».)

5. Каким бозоном обмениваются частицы (в столбце слева) при взаимодействии между собой?

	γ	Z, W^{\pm}	g
кварки	?	?	?
нейтрино	?	?	?
электроны и нейтрино	?	?	?
кварки и электроны	?	?	?

(См. табл. 3а.)

Кварки и антикварки образуют частицы **АДРОНЫ**.

Адроны – многочисленное семейство частиц, наблюдаемое в эксперименте. Адроны – сильновзаимодействующие частицы. Имея электрический заряд, они взаимодействуют также посредством электромагнитного взаимодействия. Часть из них представлена в табл. 4а и 4б. Подробнее о структуре адронов можно узнать, полностью ознакомившись с данным занятием. Имеется две группы адронов: барионы с барионным зарядом $B = 1$ и мезоны с $B = 0$.

Таблица 4а. Барионы ($B = 1$)

	СПИН 1/2		СПИН 3/2	
	СИМВОЛ	m (ГэВ/ c^2)	СИМВОЛ	m (ГэВ/ c^2)
uuu			Δ^{++}	1.232
uud	p	0.938	Δ^+	1.232
udd	n	0.940	Δ^0	1.232
ddd			Δ^-	1.232
uus	Σ^+	1.189	Σ^+ (1385)	1.383
uds	Σ^0	1.193	Σ^0 (1385)	1.387
uds	Λ	1.116		
dds	Σ^-	1.197	Σ^- (1385)	1.387
uss	Ξ^0	1.315	Ξ^0 (1530)	1.532
dss	Ξ^-	1.321	Ξ^- (1530)	1.535
sss			Ω^-	1.672

Таблица 4б. Мезоны ($B = 0$)

	СПИН 0		СПИН 1	
	СИМВОЛ	m (ГэВ/ c^2)	СИМВОЛ	m (ГэВ/ c^2)
$u\bar{d}, d\bar{u}$	π^\pm	0.140	ρ^\pm	0.770
$(u\bar{u} - d\bar{d}) / \sqrt{2}$	π^0	0.135	ρ^0	0.770
$u\bar{s}, s\bar{u}$	K^\pm	0.494	$K^{*\pm}$	0.892
$d\bar{s}, s\bar{d}$	K^0, \bar{K}^0	0.498	K^{*0}, \bar{K}^{*0}	0.892
$(u\bar{u} + d\bar{d}) / \sqrt{2}$	η	0.549	ω	0.782
$s\bar{s}$	η'	0.958	ϕ	1.019
$c\bar{d}, d\bar{c}$	D^\pm	1.869	$D^{*\pm}$	2.010
$c\bar{u}, u\bar{c}$	D^0, \bar{D}^0	1.865	D^{*0}, \bar{D}^{*0}	2.007
$c\bar{s}, s\bar{c}$	D_s^\pm	1.969	$D_s^{*\pm}$	2.113
$c\bar{c}$	η_c	2.980	J/ψ	3.097
$u\bar{b}, b\bar{u}$	B^\pm	5.279	$B^{*\pm}$	5.325
$d\bar{b}, b\bar{d}$	B^0, \bar{B}^0	5.279	B_s^0, \bar{B}_s^0	5.325
$s\bar{b}, b\bar{s}$	B_s^0, \bar{B}_s^0	?	B_s^{*0}, \bar{B}_s^{*0}	?
$b\bar{b}$	η_b	?	Υ	9.460

Контрольные вопросы

1. Какой электрический заряд имеют адроны в соответствии с указанной кварковой структурой?

	$Q =$	-1	0	1	2
$p = (uud)$?	?	?	?
$\bar{p} = (\bar{u}\bar{u}\bar{d})$?	?	?	?
$n = (udd)$?	?	?	?
$\bar{n} = (\bar{u}\bar{d}\bar{d})$?	?	?	?
$\Delta^{++} = (uuu)$?	?	?	?
$\Omega = (sss)$?	?	?	?
$\Delta^- = (ddd)$?	?	?	?

2. Какой электрический заряд имеют следующие мезоны?

	$Q =$	-1	0	1	2
$\pi = (d\bar{d} - u\bar{u})\sqrt{2}$?	?	?	?
$\rho = (u\bar{d})$?	?	?	?
$\pi = (d\bar{u})$?	?	?	?
$\varphi = (s\bar{c})$?	?	?	?
$D = (c\bar{d})$?	?	?	?
$\psi = (c\bar{c})$?	?	?	?
$\Upsilon = (b\bar{b})$?	?	?	?

1.3. Взаимодействия

Гравитационный потенциал двух частиц с массами m_1 и m_2 есть

$$V_G(r) = -\frac{G_N m_1 m_2}{r}.$$

Здесь r – расстояние между частицами и G_N – гравитационная константа.

Безразмерная гравитационная константа взаимодействия

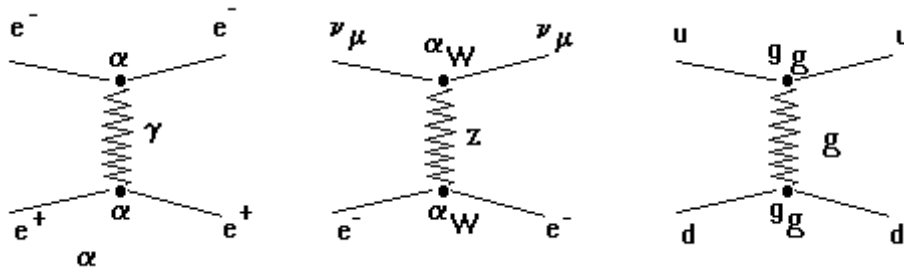
$$\alpha_G = \frac{G_N m^2}{\hbar c} = \frac{|V(R_{\text{int}})|}{mc^2}$$

имеет смысл энергии взаимодействия частиц с $m = m_1 = m_2$ на расстоянии $R_{int} = \hbar/mc$.

Безразмерная константа взаимодействия для электромагнитного, слабого и сильного взаимодействия определяются аналогичными соотношениями

$$\alpha = \frac{e^2}{\eta c}, \quad \alpha_w = \frac{g_w^2}{\eta c}, \quad \alpha_s = \frac{g_s^2}{\eta c}.$$

Эти константы определяют интенсивность процессов и распадов. Приведем некоторые примеры:



Значения констант взаимодействия представлены в табл. 5.

Таблица 5. Фундаментальные взаимодействия.

Взаимодействие	Константа взаимодействия	Источник сил	$V(r)$	R_{int} (м)	τ_{int} (сек)	Взаимодействующие частицы
Гравитационное	$\alpha_G \cong 10^{-40}$ при $m \cong m_p$	Тензор энергии-импульса	$\sim 1/r$	∞	∞	Все частицы с массой и фотон
Электромагнитное	$\alpha = 1/137$	Электрический заряд	$1/r$	∞	10^{-20}	Все частицы с $Q \neq 0$ и фотон
Слабое	$\alpha_w \cong 10^{-5}$ при $m \cong m_p$	Заряд слабого взаимодействия	Короткодействующие силы	10^{-18}	10^{-8}	Лептоны и кварки
Сильное	$\alpha_s \cong 15$ при $r \cong r_p$	Обмен пионом.	$\sim r$ ($r > r_p$)	$< 10^{-15}$	10^{-23}	Кварки и глюоны
	$\alpha_s = \alpha_{g(r)}$ при $r \ll r_p$	Цветовой заряд (обмен глюоном)	$\sim 1/r$ ($r \ll r_p$)	$\ll 10^{-15}$		

Кроме того, в таблице указаны: источник сил, зависимость потенциала взаимодействия от расстояния r , область действия сил R_{int} и типичное время взаимодействия τ_{int} .

Из таблицы можно увидеть, что гравитационная константа очень мала. Поэтому гравитационные взаимодействия можно не учитывать в физике элементарных частиц.

Константа сильных взаимодействий имеет существенно разные значения в двух областях по r :

$$\alpha_s \cong 15 \quad \text{при } r \cong r_p$$

$$\alpha_s = \alpha_{g(r)} \quad \text{при } r \ll r_p$$

Сильные взаимодействия имеют существенно разную зависимость от расстояния r между кварками:

$$V_s(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(r)}{r} + \lambda r$$

В области взаимодействия $r \cong r_p$, где $r_p = 10^{-15}$ м (радиус протона), сила взаимодействия постоянна (потенциал линейно растет с r). Это приводит к удержанию кварков в объеме радиуса

$$R_c = \hbar c / \Lambda_c$$

где

$$\Lambda_c \cong 0.2 \div 0.3 \text{ ГэВ}$$

типичная энергетическая шкала для сильных взаимодействий. Это свойство называется «Удержание кварков». На малых расстояниях ($r \ll r_p$) взаимодействие между цветными кварками похоже на кулоновское взаимодействие, но «константа»

$$\alpha_g = \frac{1}{\frac{b_0}{2\pi} \log\left(\frac{\eta c}{\Lambda_c r}\right)}$$

стремится к нулю при $r \rightarrow 0$. Сила притяжения между кварками уменьшается. Поэтому кварки в адронах ведут себя как свободные частицы.

Это свойство называется «Асимптотическая свобода». Остаточные силы цветового взаимодействия при $r > r_p$ связывают протоны и нейтроны в ядрах так же, как остаточные кулоновские силы связывают атомы в молекулах.

Контрольные вопросы

1. Какие частицы являются переносчиками взаимодействий?

$$\gamma, Z^0, W^\pm, g$$

Сильного ?

Слабого?

Электромагнитного?

2. Потенциалы взаимодействия каких сил уменьшаются с r как $1/r$?

Сильного ?

Слабого?

Электромагнитного?

Гравитационного?

3. Какие силы увеличиваются с ростом r ?

Сильные ?

Слабые?

Электромагнитные?

Гравитационные?

4. В чем причина уменьшения силы между кварками при малых r ?

Поведение потенциала как $V(r) \sim r$?

Уменьшение константы взаимодействия α_s ?

Компенсация цветовых зарядов?

5. Укажите строку с числами в последовательности увеличения времени взаимодействия между различными силами:

Сильное Слабое Электромагнитное Гравитационное

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>?</i>
<i>1</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>?</i>
<i>4</i>	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>2</i>	<i>?</i>
<i>3</i>	<i>2</i>	<i>1</i>	<i>4</i>	<i>?</i>