

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

### 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 взаимодействиям. 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

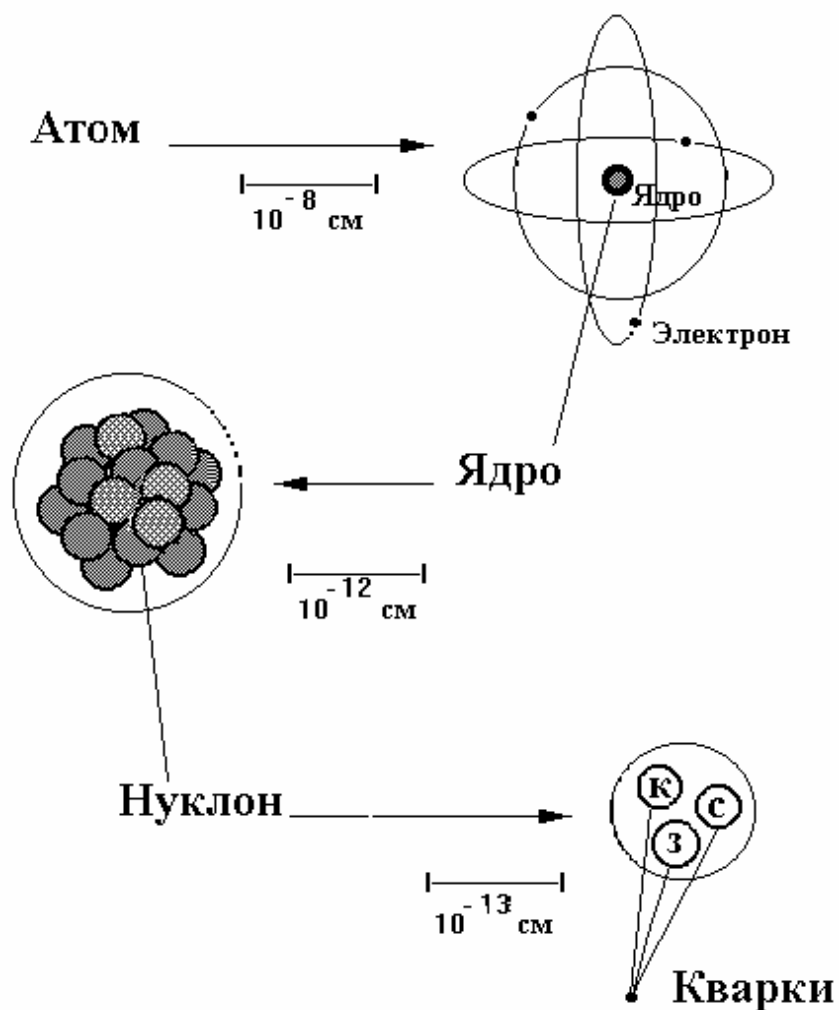


Рис. 1. Микромир.

## 1.1. Масштабы времени, пространства и плотностей

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

Таблица 1. Масштабы физических величин.

Объект	Силы	$t$ (сек)	$l$ (м)	$\rho$ (г/см <sup>3</sup> )	Примечания
Вселенная		$10^{-44}$		$10^{90}$	Начало Вселенной. $t$ и $\rho$ 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 $\rho$ – 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				$\approx 10^1$	
Земля	гравита- ционные		$10^7$	$\approx 10^1$	
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 ?

3. Каков размер Галактики?

$10^0$  световых лет ?

$10^5$  световых лет ?

$10^{10}$  световых лет ?

4. Определите плотность протона в  $\text{г/см}^3$  и сравните ее с плотностью Земли.

$10^0$   $\text{г/см}^3$  ?

$10^{10}$   $\text{г/см}^3$  ?

$10^{14}$   $\text{г/см}^3$  ?

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	$\nu_e$	$e$	$d$	$u$
	Название	электронное нейтрино	электрон	$d$ -кварк	$u$ -кварк
	Масса (МэВ)	$< 0.000018$	0.511	$\cong 330$	$\cong 300$
ВТОРОЕ ПОКОЛЕНИЕ	Символ	$\nu_\mu$	$\mu$	$s$	$c$
	Название	мюонное нейтрино	мюон	$s$ -кварк	$c$ -кварк
	Масса (МэВ)	$< 0.250$	105.7	$\cong 510$	$\cong 1500$
ТРЕТЬЕ ПОКОЛЕНИЕ	Символ	$\nu_\tau$	$\tau$	$b$	$t$
	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  $\nu_e$ .

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

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

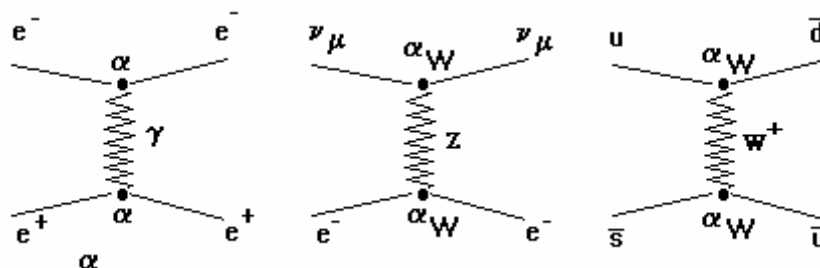
Сумма электрических зарядов всех частиц одного поколения равна нулю, с учетом числа различных цветных кварков

$$\sum_i Q_i = 0.$$

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  $\gamma$  или векторными бозонами  $Z, W^\pm$



Кварки взаимодействуют посредством сильных взаимодействий и обмениваются глюоном  $g$ .

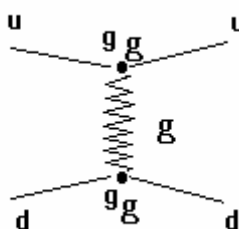


Таблица 3. Фундаментальные калибровочные бозоны (спин целый).

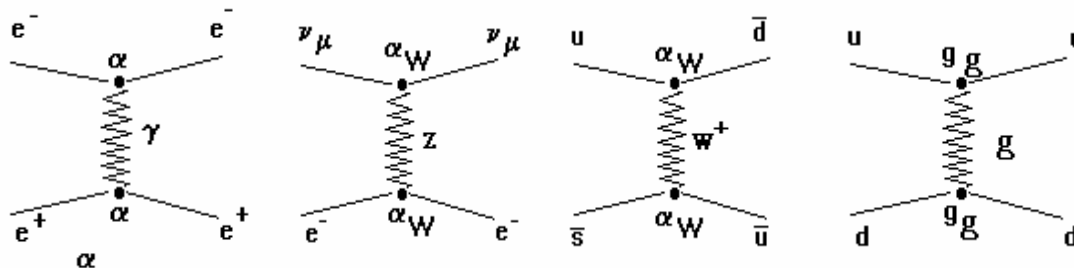
Название	Символ	Спин	Масса (ГэВ/c <sup>2</sup> )	Электрический заряд
ГРАВИТОН	$G$	2	0	0
ФОТОН	$\gamma$	1	0	0
ЗАРЯЖЕННЫЙ СЛАБЫЙ БОЗОН	$W^\pm$	1	81.0	$\pm 1$
НЕЙТРАЛЬНЫЙ СЛАБЫЙ БОЗОН	$Z$	1	92.4	0
ГЛЮОН	$g$	1	0	0

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

Таблица 3а.

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

Примеры:



### Контрольные вопросы

1. Определите номер поколения следующих фермионов:

$$\begin{array}{cccc}
 \nu_\mu & \mu & s & c \\
 \nu_{\bar{e}} & \bar{e} & \bar{d} & \bar{u} \\
 \nu_\tau & \tau & b & t
 \end{array}$$

2. Каково соотношение между массами кварков?

$$\begin{array}{cccc}
 d & s & >? & <? & \cong? \\
 b & u & >? & <? & \cong? \\
 d & u & >? & <? & \cong? \\
 t & b & >? & <? & \cong?
 \end{array}$$

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

<i>105.7</i>	<i>1784.</i>	<i>0.511</i>	
<i>e</i>	<i>μ</i>	<i>τ</i>	<i>?</i>
<i>μ</i>	<i>τ</i>	<i>e</i>	<i>?</i>
<i>τ</i>	<i>e</i>	<i>μ</i>	<i>?</i>

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

$$\begin{array}{r}
 \nu_{\mu} + \mu + s_k + s_c + s_z + c_k + c_c + c_z \\
 - 2/3 \quad ? \\
 0 \quad ? \\
 1 \quad ?
 \end{array}$$

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

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

	$\gamma$	$Z, W^{\pm}$	$g$
<i>кварки</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>нейтрино</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>электроны и нейтрино</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>
<i>кварки и электроны</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	<i>?</i>

(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. Барiony (B = 1)

	СПИН 1/2		СПИН 3/2	
	СИМВОЛ	$m$ (ГэВ/ $c^2$ )	СИМВОЛ	$m$ (ГэВ/ $c^2$ )
$uuu$			$\Delta^{++}$	1.232
$uud$	$p$	0.938	$\Delta^+$	1.232
$udd$	$n$	0.940	$\Delta^0$	1.232
$ddd$			$\Delta^-$	1.232
$uus$	$\Sigma^+$	1.189	$\Sigma^+$ (1385)	1.383
$uds$	$\Sigma^0$	1.193	$\Sigma^0$ (1385)	1.387
$uds$	$\Lambda$	1.116		
$dds$	$\Sigma^-$	1.197	$\Sigma^-$ (1385)	1.387
$uss$	$\Xi^0$	1.315	$\Xi^0$ (1530)	1.532
$dss$	$\Xi^-$	1.321	$\Xi^-$ (1530)	1.535
$sss$			$\Omega^-$	1.672

Таблица 4б. Мезоны (B = 0)

	СПИН 0		СПИН 1	
	СИМВОЛ	$m$ (ГэВ/ $c^2$ )	СИМВОЛ	$m$ (ГэВ/ $c^2$ )
$u\bar{d}, d\bar{u}$	$\pi^\pm$	0.140	$\rho^\pm$	0.770
$(u\bar{u} - d\bar{d}) / \sqrt{2}$	$\pi^0$	0.135	$\rho^0$	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
$(u\bar{u} + d\bar{d}) / \sqrt{2}$	$\eta$	0.549	$\omega$	0.782
$s\bar{s}$	$\eta'$	0.958	$\phi$	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
$c\bar{c}$	$\eta_c$	2.980	$J/\psi$	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
$s\bar{b}, b\bar{s}$	$B_s^0, \bar{B}_s^0$	?	$B_s^{*0}, \bar{B}_s^{*0}$	?
$b\bar{b}$	$\eta_b$	?	$\Upsilon$	9.460

## Контрольные вопросы

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

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

2. Какой электрический заряд имеют следующие мезоны?

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

### 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

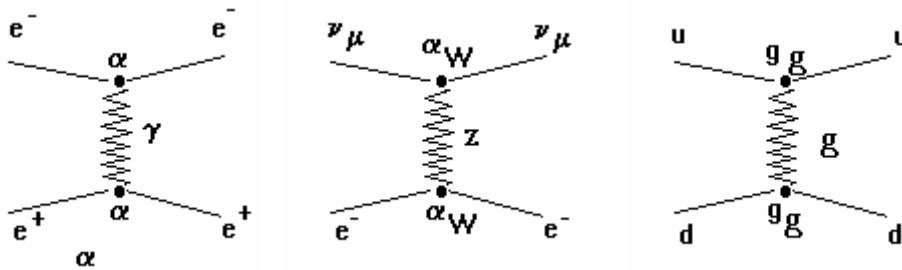
$$\alpha_G = \frac{G_N m^2}{\hbar c} = \frac{|V(R_{\text{int}})|}{mc^2}$$

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

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

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}, \quad \alpha_W = \frac{g_W^2}{\hbar c}, \quad \alpha_S = \frac{g_S^2}{\hbar c}.$$

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	$V(r)$	$R_{\text{int}}$ (м)	$\tau_{\text{int}}$ (сек)	Взаимодействующие частицы
Гравитационное	$\alpha_G \cong 10^{-40}$ при $m \cong m_p$	Тензор энергии-импульса	$\sim 1/r$	$\infty$	$\infty$	Все частицы с массой и фотон
Электромагнитное	$\alpha = 1/137$	Электрический заряд	$1/r$	$\infty$	$10^{-20}$	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  $R_{\text{int}}$  и типичное время взаимодействия  $\tau_{\text{int}}$ .

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»

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

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  $\alpha_s$ ?*  
*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>