

# *Сильные взаимодействия*

**В.В. Брагута**

*Институт Физики Высоких Энергий,  
г. Протвино*

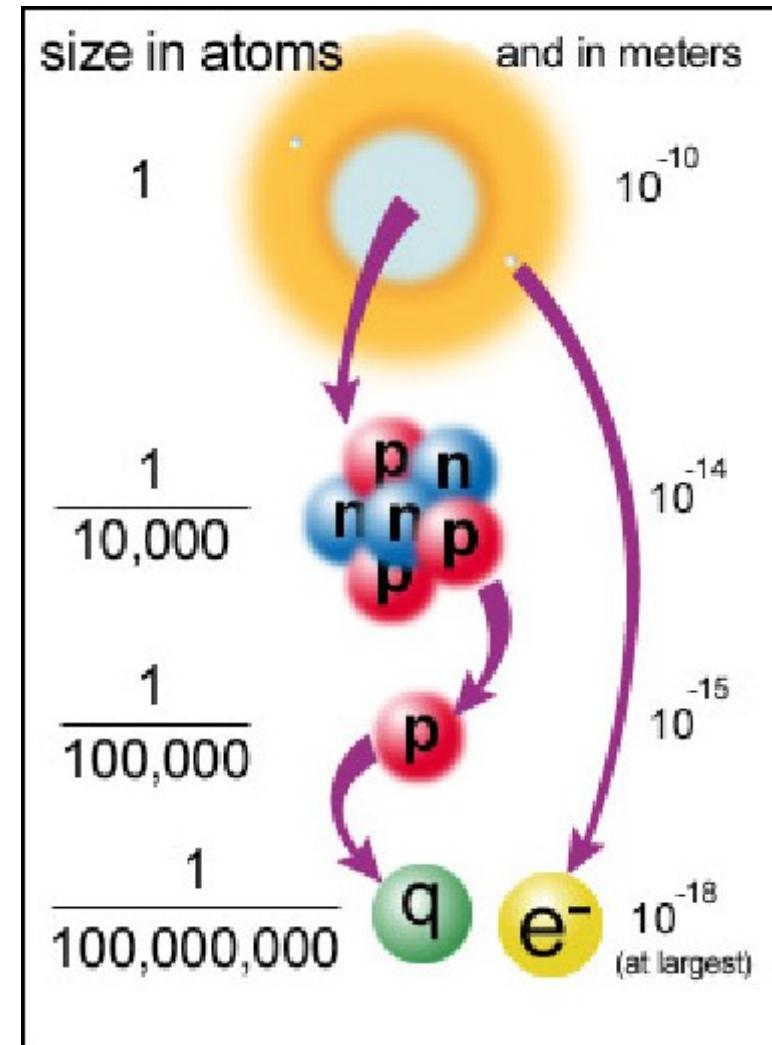
# План доклада

- *Введение*
- *Становление теории сильных взаимодействий*
- *Квантовая хромодинамика*
- *Заключение*

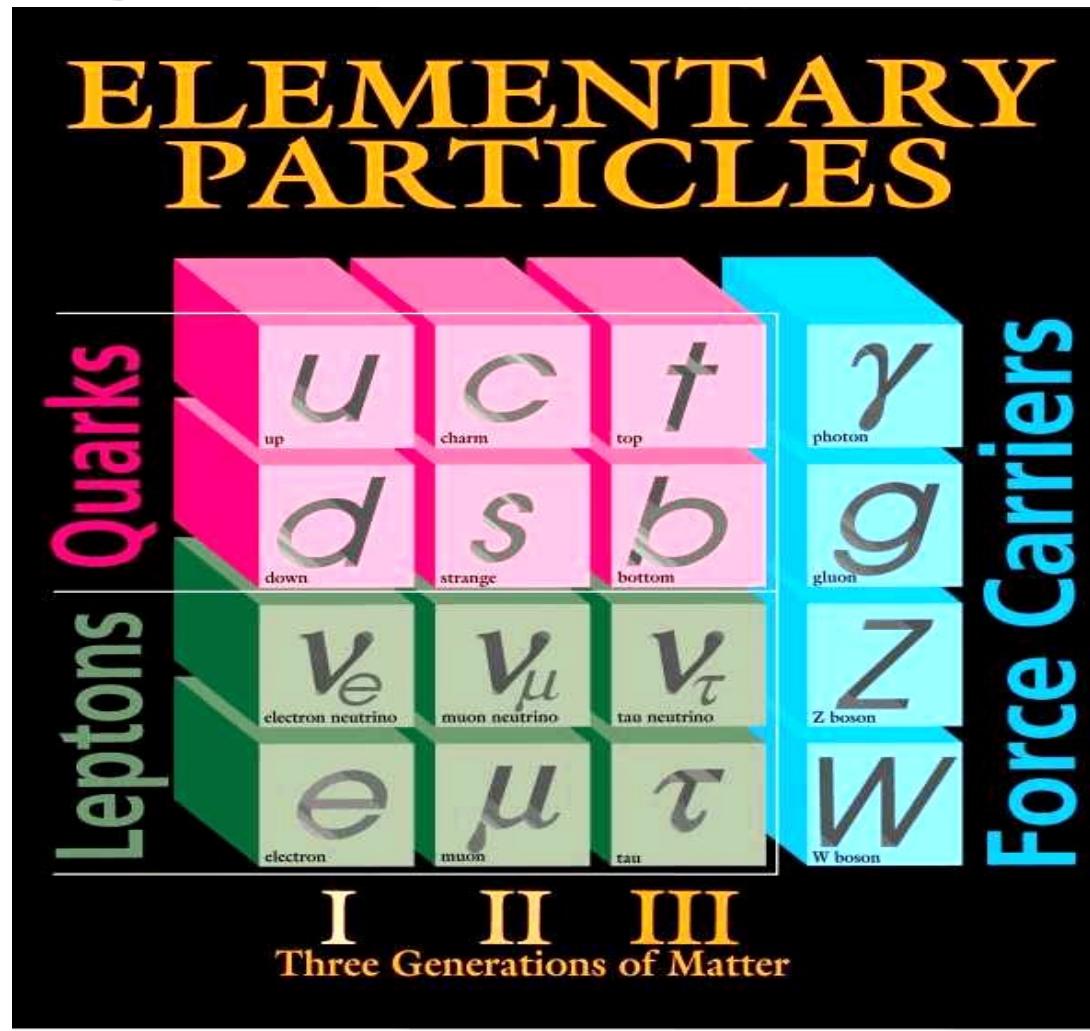
# Иерархия частиц

- Привычные нам объекты состоят из молекул
- Молекулы состоят из атомов
- Атомы состоят из электронов и ядер
- Ядра состоят из протонов и нейтронов
- Протоны и нейтроны состоят из кварков
- Кварки и электроны состоят из ???

*Кварки и электроны - элементарные частицы*



# Элементарные частицы



# Лептоны и кварки

Leptons    spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	<0.0002	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0
$\tau$ tau	1.7771	-1

Quarks    spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

# Переносчики взаимодействия

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
$W^-$	80.4	-1
$W^+$	80.4	+1
$Z^0$	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$g$ gluon	0	0



# *Становление теории сильных взаимодействий*

# Кварковая модель

## В экспериментах видят барионы и мезоны

Meson Summary Table

See also the table of suggested  $qq$  quark-model assignments in the Quark Model section.

• Indicates particles that appear in the preceding Meson Summary Table. We do not regard the other entries as being established.  
 † Indicates that the value of  $J$  given is preferred, but needs confirmation.

LIGHT UNFLAVORED ( $S = C = B = 0$ )		STRANGE ( $S = \pm 1, C = B = 0$ )		BOTTOM ( $B = \pm 1$ )	
$\rho^G(J^P C)$	$\rho^G(J^P C)$	$\rho^G(J^P C)$	$\rho^G(J^P C)$	$\rho^G(J^P C)$	$\rho^G(J^P C)$
• $\pi^{\pm}$	$1^-(0^-)$	• $\pi_2(1670)$	$1^-(2^-)$	• $K^{\pm}$	$1/2(0^-)$
• $\pi^0$	$1^-(0^-)$	• $\phi(1680)$	$0^-(1^-)$	• $K^0$	$1/2(0^-)$
• $\eta$	$0^+(0^-)$	• $\rho_3(1690)$	$1^+(3^-)$	• $K_S^0$	$1/2(0^-)$
• $f_0(600)$	$0^+(0^-)$	• $\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	• $K_1^0$	$1/2(0^-)$
• $\rho(770)$	$1^+(1^-)$			• $K_2^0$	$1/2(0^-)$
• $\omega(782)$	$0^-(1^-)$	• $f_0(1710)$	$0^+(0^-)$	• $K_3^0$	$1/2(0^+)$
• $\eta'(958)$	$0^+(0^-)$			• $K_2'(892)$	$1/2(1^-)$
• $f_0(980)$	$0^+(0^-)$			• $K_1(1270)$	$1/2(1^+)$
• $a_0(980)$	$1^-(0^-)$	• $\pi(1800)$	$1^-(0^-)$	• $K_1(1400)$	$1/2(1^+)$
• $\phi(1020)$	$0^-(1^-)$			• $K_1'(1410)$	$1/2(1^-)$
• $h_1(1170)$	$0^-(1^-)$			• $K_1''(1410)$	$1/2(1^-)$
• $b_1(1235)$	$1^+(1^-)$	• $\phi_2(1850)$	$0^-(3^-)$	• $K_2(1430)$	$1/2(0^+)$
• $a_1(1260)$	$1^-(1^-)$			• $K_2'(1430)$	$1/2(2^+)$
• $f_1(1270)$	$0^+(2^-)$			• $K_1(1460)$	$1/2(0^-)$
• $f_1(1285)$	$0^+(1^-)$			• $K_2(1460)$	$1/2(2^-)$
• $\eta(1295)$	$0^+(0^-)$	• $\rho_3(1990)$	$1^+(3^-)$	• $K_3(1580)$	$1/2(2^-)$
• $\pi(1300)$	$1^-(0^-)$	• $f_2(2010)$	$0^+(2^-)$	• $K_3(1630)$	$1/2(2^?)$
• $a_2(1320)$	$1^-(2^-)$			• $f_2(1950)$	$0^+(2^-)$
• $f_0(1370)$	$0^+(0^-)$	• $\rho_0(2020)$	$0^+(0^-)$	• $K_1(1650)$	$1/2(1^+)$
• $h_1(1380)$	$1^-(1^-)$	• $a_2(2040)$	$1^-(4^-)$	• $K_1(1650)$	$1/2(0^-)$
• $\pi_1(1400)$	$1^-(1^-)$			• $K_2(1770)$	$1/2(1^-)$
• $\eta(1405)$	$0^+(0^-)$	• $\pi_2(2100)$	$1^-(2^-)$	• $K_2(1770)$	$1/2(2^-)$
• $f_1(1420)$	$0^+(1^-)$			• $K_3(1780)$	$1/2(3^-)$
• $\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	• $f_2(2100)$	$0^+(0^-)$	• $K_3(1820)$	$1/2(2^-)$
• $f_1(1430)$	$0^+(2^-)$			• $f_4(2050)$	$0^+(4^-)$
• $a_0(1450)$	$1^-(0^-)$	• $f_2(2200)$	$0^+(2\text{ or }4^-)$	• $K_1(1830)$	$1/2(0^-)$
• $\rho(1450)$	$1^+(1^-)$			• $K_2(1830)$	$1/2(0^+)$
• $\eta(1475)$	$0^+(0^-)$	• $\rho_3(2250)$	$1^-(3^-)$	• $K_2(1830)$	$1/2(0^-)$
• $f_0(1500)$	$0^+(0^-)$			• $K_3(1830)$	$1/2(0^-)$
• $f_1(1510)$	$0^+(1^-)$	• $f_2(2300)$	$0^+(2^-)$	• $\eta_2(15)$	$0^+(0^-)$
• $f_1(1525)$	$0^+(2^-)$			• $J/\psi(15)$	$0^-(1^-)$
• $f_2(1565)$	$0^+(2^-)$	• $f_2(2340)$	$0^+(2^-)$	• $\chi_0(1P)$	$0^+(0^+)$
• $h_1(1595)$	$0^-(1^-)$			• $\chi_0(1P)$	$0^+(1^+)$
• $\pi_1(1600)$	$1^-(1^-)$	• $\rho_3(2350)$	$1^+(5^-)$	• $\chi_1(1P)$	$0^+(1^+)$
• $a_1(1640)$	$1^-(1^-)$			• $\chi_2(1P)$	$0^+(2^?)$
• $f_2(1640)$	$0^+(2^-)$	• $\rho_3(2450)$	$1^-(6^-)$	• $\eta_2(25)$	$0^+(0^-)$
• $\eta_2(1645)$	$0^+(2^-)$			• $\psi(25)$	$0^-(1^-)$
• $\omega(1650)$	$0^-(1^-)$	• $f_2(2510)$	$0^+(6^-)$	• $\psi(3770)$	$0^-(1^-)$
• $\omega_3(1670)$	$0^-(3^-)$			• $\chi_0(3772)$	$0^?(7^?)$
OTHER LIGHT					
Further States					
CHARMED ( $C = \pm 1$ )					
CHARMED, STRANGE ( $C = S = \pm 1$ )					
CHARMED, STRANGE ( $C = S = \pm 1$ )					
NON- $qq$ CANDIDATES					

Baryon Summary Table

This short table gives the name, the quantum numbers (where known), and the status of baryons in the Review. Only the baryons with 3- or 4-star status are included in the main Baryon Summary Table. Due to insufficient data or uncertain interpretation, the other entries in the short table are not established as baryons. The names with masses are of baryons that decay strongly. For  $N$ ,  $\Delta$ , and  $\Xi$  resonances, the partial wave is indicated by the symbol  $L_{2J,2J}$ , where  $L$  is the orbital angular momentum ( $S, P, D, \dots$ ),  $I$  is the isospin, and  $J$  is the total angular momentum. For  $\Lambda$  and  $\Sigma$  resonances, the symbol is  $L_{1J}$ .

$p$	$P_{11}$	****	$\Delta(1232)$	$P_{33}$	****	$\Lambda$	$P_{01}$	****	$\Sigma^+$	$P_{11}$	****
$n$	$P_{11}$	****	$\Delta(1600)$	$P_{33}$	***	$A(1405)$	$S_{01}$	****	$\Sigma^0$	$P_{11}$	****
$N(1440)$	$P_{11}$	****	$\Delta(1620)$	$S_{31}$	****	$A(1520)$	$D_{03}$	****	$\Sigma^-$	$P_{11}$	****
$N(1520)$	$D_{13}$	****	$\Delta(1700)$	$D_{33}$	****	$A(1600)$	$P_{01}$	***	$\Sigma(1385)$	$P_{13}$	****
$N(1535)$	$S_{11}$	****	$\Delta(1750)$	$P_{31}$	*	$A(1670)$	$S_{01}$	****	$\Sigma(1480)$	*	$\Xi(1690)$
$N(1650)$	$S_{11}$	****	$\Delta(1900)$	$S_{31}$	*	$A(1690)$	$D_{03}$	****	$\Sigma(1560)$	*	$\Xi(1820)$
$N(1675)$	$D_{15}$	****	$\Delta(1905)$	$F_{35}$	****	$A(1800)$	$S_{01}$	***	$\Sigma(1580)$	$D_{13}$	*
$N(1680)$	$F_{15}$	****	$\Delta(1910)$	$P_{31}$	***	$A(1810)$	$P_{01}$	***	$\Sigma(1620)$	$S_{11}$	**
$N(1700)$	$D_{13}$	***	$\Delta(1920)$	$P_{33}$	***	$A(1820)$	$F_{05}$	***	$\Sigma(1660)$	$P_{11}$	***
$N(1710)$	$P_{11}$	***	$\Delta(1930)$	$D_{35}$	***	$A(1830)$	$D_{05}$	***	$\Sigma(1670)$	$D_{13}$	***
$N(1720)$	$P_{13}$	***	$\Delta(1940)$	$D_{33}$	*	$A(1890)$	$P_{03}$	***	$\Sigma(1690)$	*	$\Xi(2370)$
$N(1900)$	$P_{13}$	**	$\Delta(1950)$	$F_{37}$	****	$A(2000)$	*		$\Sigma(1750)$	$S_{11}$	***
$N(1990)$	$F_{17}$	**	$\Delta(2000)$	$F_{35}$	**	$A(2020)$	$F_{07}$	*	$\Sigma(1770)$	$P_{11}$	*
$N(2000)$	$F_{15}$	**	$\Delta(2150)$	$S_{31}$	*	$A(2100)$	$G_{07}$	****	$\Sigma(1775)$	$D_{15}$	****
$N(2080)$	$D_{13}$	**	$\Delta(2200)$	$G_{37}$	*	$A(2110)$	$F_{05}$	***	$\Sigma(1840)$	$P_{13}$	*
$N(2090)$	$S_{11}$	*	$\Delta(2300)$	$H_{39}$	*	$A(2325)$	$D_{03}$	*	$\Sigma(1880)$	$P_{11}$	**
$N(2100)$	$P_{11}$	*	$\Delta(2350)$	$D_{35}$	*	$A(2350)$	$H_{09}$	***	$\Sigma(1915)$	$F_{15}$	***
$N(2190)$	$G_{17}$	****	$\Delta(2390)$	$F_{37}$	*	$A(2585)$	*		$\Sigma(1940)$	$D_{13}$	***
$N(2200)$	$D_{15}$	**	$\Delta(2400)$	$G_{39}$	*	$A(2600)$	*		$\Sigma(2000)$	$S_{11}$	*
$N(2220)$	$H_{19}$	****	$\Delta(2420)$	$H_{31}$	****				$\Sigma(2030)$	$F_{17}$	****
$N(2250)$	$G_{19}$	****	$\Delta(2420)$	$I_{31}$	**				$\Sigma(2070)$	$F_{15}$	*
$N(2600)$	$I_{11}$	***	$\Delta(2750)$	$I_{33}$	**				$\Sigma(2080)$	$P_{13}$	*
$N(2700)$	$K_{1,13}$	**	$\Delta(2950)$	$K_{3,15}$	**				$\Sigma(2100)$	$G_{17}$	*
$\Theta(1540)^+$ *											
$\Theta(1540)^+$ *											
$\Xi_c(2455)$ **											
$\Sigma_c(2455)$ **											
$\Sigma_c(2620)$ **											
$\Xi_c(2620)$ **											
$\Xi_c(2800)$ ***											
$\Xi_c(2800)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2790)$ ***											
$\Xi_c(2790)$ ***											
$\Xi_c(2645)$ ***											
$\Xi_c(2645)$ ***											
$\Xi_c(2645)$ ***											
$\Xi_c(2645)$ ***											
$\Xi_c(2790)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(2815)$ ***											
$\Xi_c(28$											

# Кварковая модель: мезоны

## Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.  
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$\pi^+$	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$B^0$	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

# Кварковая модель: барионы

## Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.

There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
$p$	proton	$uud$	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
$n$	neutron	$udd$	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	$uds$	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	$sss$	-1	1.672	3/2

## Свойство сильных взаимодействий

Для составных объектов выполняется закон:

$$M \approx \sum_i m_i$$

Сильные взаимодействия:

$$\pi^+(\bar{u}\bar{d}) \quad M_\pi \approx 140 \text{ MeV} \gg m_u + m_d \approx 9 \text{ MeV}$$

$$p(\bar{u}\bar{u}\bar{d}) \quad M_p \approx 938 \text{ MeV} \gg m_u + m_u + m_d \approx 12 \text{ MeV}$$

$$n(\bar{u}\bar{d}\bar{d}) \quad M_n \approx 940 \text{ MeV} \gg m_u + m_d + m_d \approx 15 \text{ MeV}$$

Свободных кварков в  
экспериментах обнаружено  
не было

# Глубоко неупругое рассеяние

ep->eX

Опыт аналогичный Резерфордовскому рассеянию:

$$(d\sigma/d\Omega)_R \sim \alpha^2 / q^4 = \alpha^2 / p^4 \sin^4 \theta/2 \quad (d\Omega = 2\pi d\cos\theta)$$

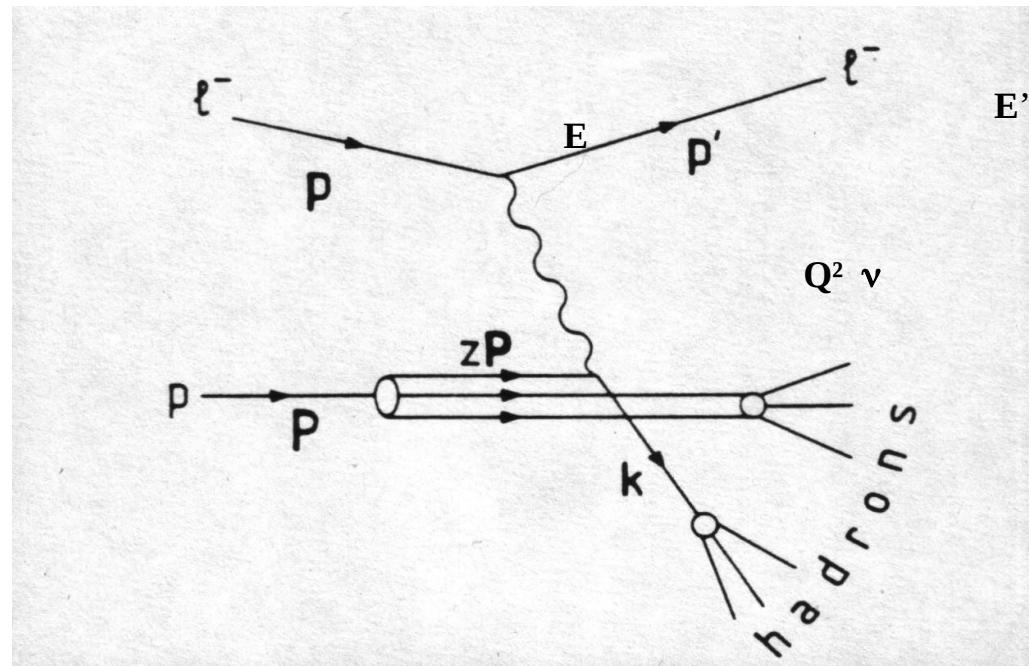
- $p$  – импульс электрона,  $\theta$  - азимутальный угол рассеяния
- $\alpha=1/137$

Если мишень имеет пространственное распределение

- $d\sigma/d\Omega = (d\sigma/d\Omega)_R G_E^2(q^2)$
- $G_E(q^2) = \int d^3\mathbf{r} \rho(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r})$
- $G_E(q^2) = 1$  для малых  $q^2$  и  $G_E(q^2) \rightarrow 0$  для больших  $q^2$

# Кинематика

- $Q^2 = (p - p')^2$  импульс переданный ядру
- $v = E - E'$  энергия переданная ядру
- $x = Q^2/2Mv$  безразмерная переменная
- $M$  масса ядра
- $Q^2 = 4E^2 \sin^2 \theta/2$



# Скейлинг

Сечение глубоко неупругого рассеяния зависит от угла  $\theta$  и от энергии улетающего электрона  $E'$ :

- $d^2\sigma/dE'd\Omega \sim (d\sigma/d\Omega)R[\cos^2\theta/2 F2(x, Q^2) + \sin^2\theta/2 (Q^2/xM^2) F1(x, Q^2)]/\nu$
- При больших  $Q^2$ :  $F1(x, Q^2) \rightarrow F1(x)$  и  $F2(x, Q^2) \rightarrow F2(x)$

*Скейлинг:*

- При больших  $Q^2$ :  $F_1(x, Q^2) \rightarrow F_1(x)$  и  $F_2(x, Q^2) \rightarrow F_2(x)$
- Рассеяние на точечных частицах (партоны)
- Переменная  $x$ -доля импульса ядра, которую несет parton

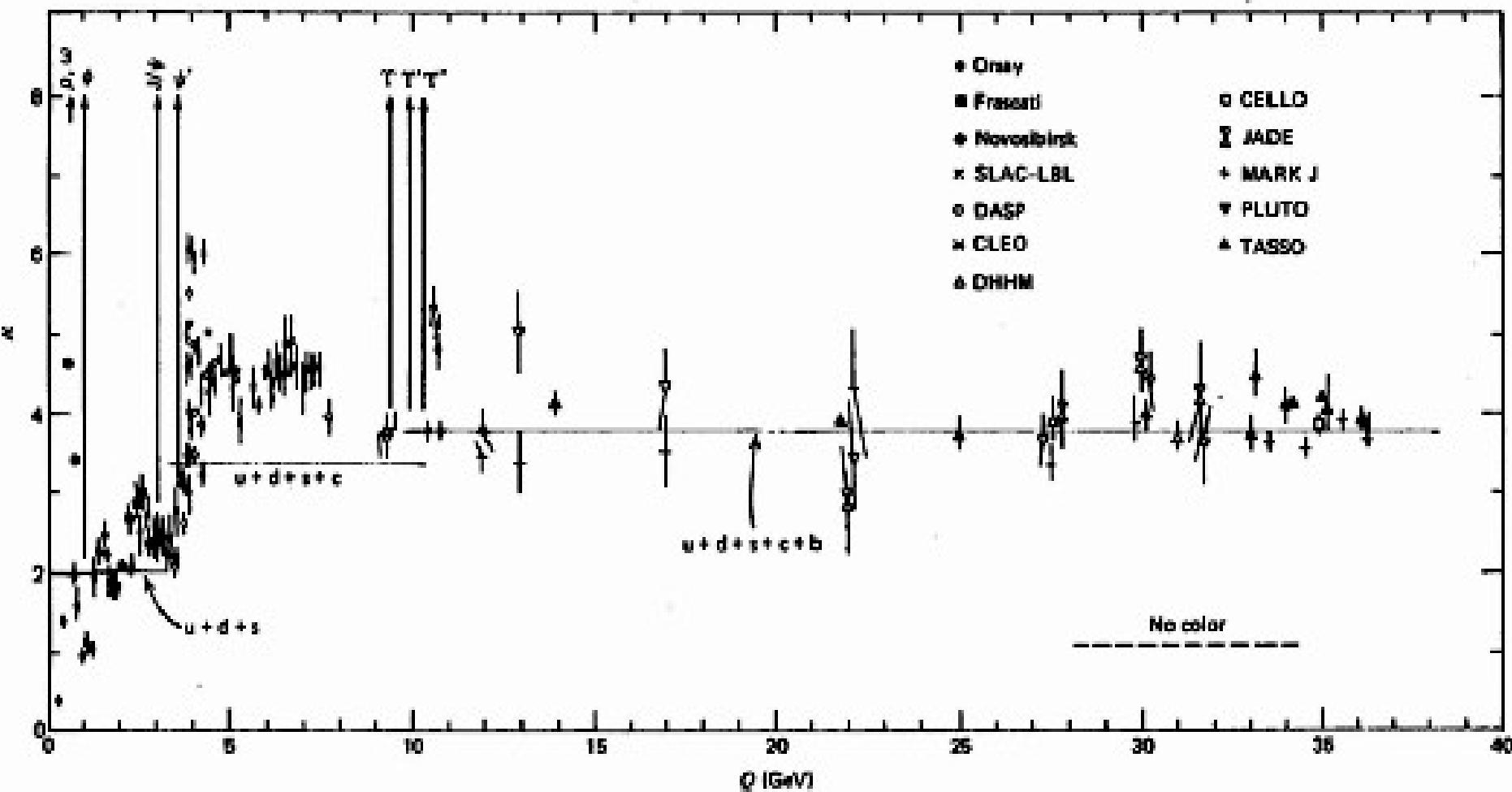
*Партоны:*

- Спин-0 партоны  $\Rightarrow F_1(x) = 0$ ;
- Спин-1/2 партоны  $\Rightarrow 2xF_1(x) = F_2(x)$
- Имеют дробный заряд
- Несут  $\sim 50\%$  импульса всего протона

## Бьеркиновский скейлинг (1969)

## $e^+e^-$ аннигиляция

$$R_\mu = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$



# $e^+e^-$ анигиляция

Для одного кварка:

$$R = \Omega^2$$

$$R = 3 \sum_i Q_i^2$$

Эксперимент

Energy	Ratio R
$\sqrt{s} > 2m_s \sim 1 \text{ GeV}$	$3(\frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9}) = 2$ u,d,s
$\sqrt{s} > 2m_c \sim 4 \text{ GeV}$	$3(\frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} + \frac{4}{9}) = 3\frac{1}{3}$ u,d,s,c
$\sqrt{s} > 2m_b \sim 10 \text{ GeV}$	$3(.. + \frac{1}{9}) = 3\frac{2}{3}$ u,d,s,c,b
$\sqrt{s} > 2m_t \sim 350 \text{ GeV}$	$3(.. + \frac{4}{9}) = 5$ u,d,s,c,b,t

Каждый кварк существует в 3-х экземплярах

# Цветные кварки

Цвет кварка-  
новое квантовое  
число

Кварки бывают:  
**Красные**  
**Зеленые**  
**Синие**

## ★ The existence of the $\Omega^-(sss)$

The  $\Omega^-(sss)$  is a ( $L=0$ ) spin- $\frac{3}{2}$  baryon consisting of 3 strange-quarks. The wave-function

$$\psi = s \uparrow s \uparrow s \uparrow$$

is SYMMETRIC under particle interchange.

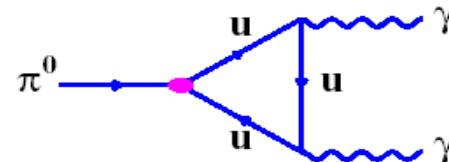
However quarks are FERMIONS, therefore require an ANTI-SYMMETRIC wave-function, *i.e.* need another degree of freedom, namely COLOUR.

$$\psi = (s \uparrow s \uparrow s \uparrow) \psi_{\text{colour}}$$

$$\psi_{\text{colour}} = \frac{1}{\sqrt{6}} (rgb + gbr + brg - grb - rbg - bgr)$$

## ★ $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ decay rate

Need colour to explain  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  decay rate.



$$\Gamma(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \propto N_{\text{colour}}^2$$

$$\text{EXPT : } N_{\text{colour}} = 2.99 \pm 0.12$$

# *Квантовая хромодинамика*

# Электродинамика (КЭД)

## Уравнение движения заряженной частицы

$$\frac{dp}{dt} = q \vec{E} + \frac{q}{c} [\vec{v} \times \vec{H}]$$

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \varphi$$

$$\vec{H} = \text{rot } \vec{A}$$

## Электродинамика – абелева калибровочная теория

$$\vec{A}' = \vec{A} + \nabla f, \quad \varphi' = \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t}$$

$$\vec{A}^i = (\varphi, \vec{A}), \quad \vec{A}'_k = \vec{A}_k - \frac{\partial f}{\partial x^k}$$

$$A \xrightarrow{f_1} A' \xrightarrow{f_2} A'' = A \xrightarrow{f_2} A' \xrightarrow{f_1} A''$$

# Квантовая хромодинамика (КХД)

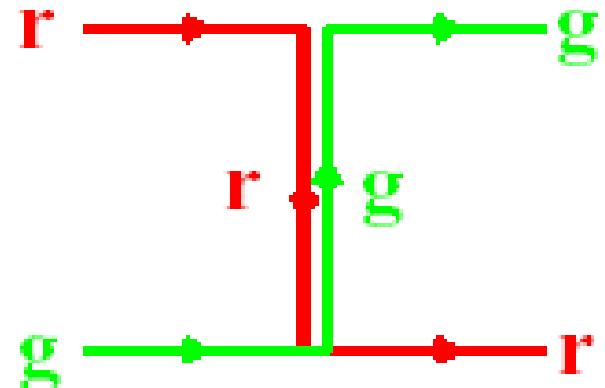
## Неабелева калибровочная теория

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} A_1 \\ \dots \\ A_8 \end{pmatrix}$$

$$\hat{A} \xrightarrow{f_1} \hat{A}' \xrightarrow{f_2} \hat{A}'' \neq \hat{A} \xrightarrow{f_2} \hat{A}' \xrightarrow{f_1} \hat{A}''$$

### Свойства КХД:

- $N_c = 3$  цвета кварков
- $N_c^2 - 1 = 8$  глюонов
- Калибровочная группа  $SU(3)$



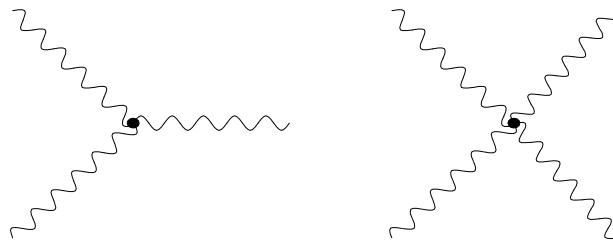
# **$KXD$ и $K\mathcal{D}$**

## Сильные взаимодействия:

Частицы: Кварки и глюоны

Переносчики: Глюоны ( цветовой заряд )

**Неабелевая Калибровочная теория**



## Сила взаимодействия:

Малые расстояния :

$$\text{потенциал взаимодействия} \quad V(r) \sim \frac{\alpha_s(r)}{r}$$

$$\text{ассимптотическая свобода} \quad \alpha_s(r) \sim \frac{1}{\text{Log}(\mu \times r)}$$

$$\alpha_s(1 \text{ GeV}) \sim 0.5, \quad \alpha_s(3 \text{ GeV}) \sim 0.25, \quad \alpha_s(90 \text{ GeV}) \sim 0.12$$

Большие расстояния :

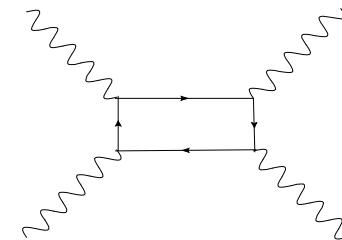
конфайнмент  $V(r) \sim \sigma \times r$

## Электромагнитные взаимодействия:

Частицы: Любые заряженные частицы

Переносчики: Фотоны (не имеют заряда)

**Абелевая Калибровочная теория**

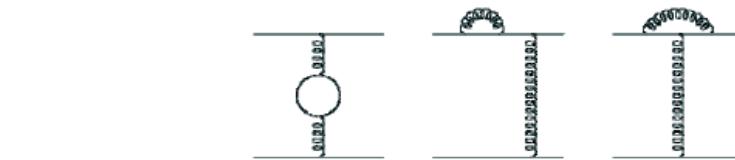


## Сила взаимодействия:

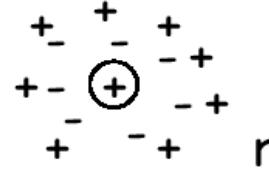
$$\text{потенциал взаимодействия} \quad V(r) \sim \frac{\alpha_{em}}{r}$$

$$\alpha_{em} = \frac{1}{137}$$

# Бегущий заряд



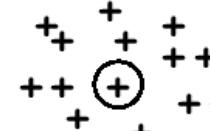
"screening" of the charge



$$\alpha_s(r) \uparrow \text{ if } r \downarrow$$



"anti-screening"



non  
abelian

$$\alpha_s(r) \downarrow \text{ if } r \downarrow$$

Who wins?

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{g^2}{4\pi} \approx \frac{4\pi}{(11 - \frac{2}{3}N_f) \ln(Q^2/\Lambda^2)}$$

$$Q \sim 1/r$$

coupling at some reference scale  $Q_0$

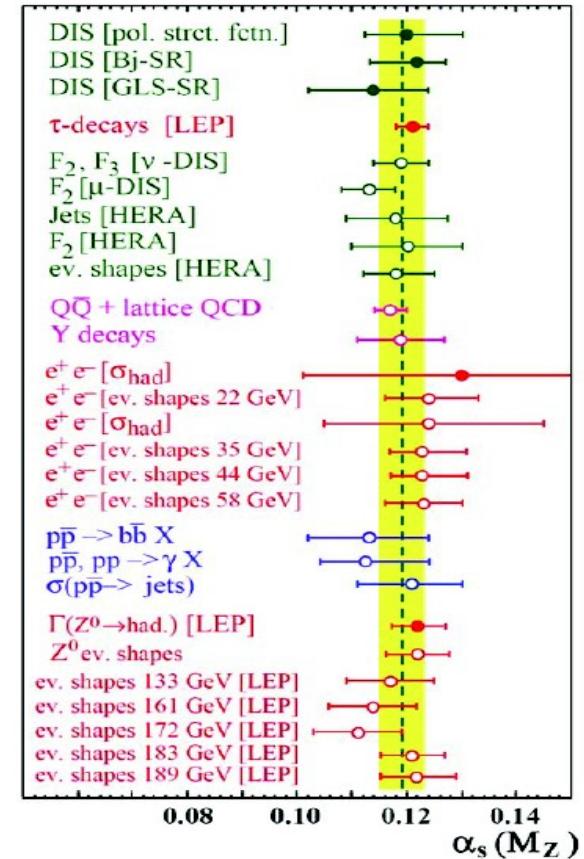
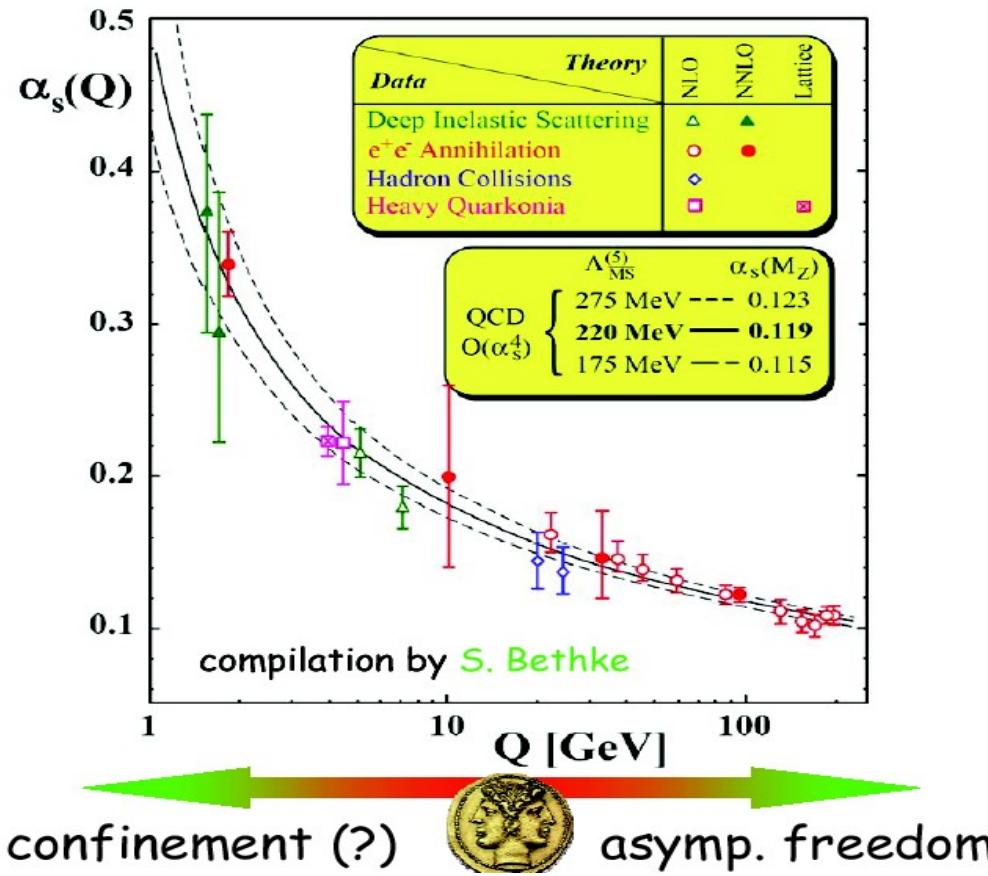
$$\alpha_s \sim \frac{1}{\ln(1/r)} \rightarrow 0, \text{ при } r \rightarrow 0$$

На малых расстояниях заряд – малый параметр!!!

Асимптотическая свобода:

# Экспериментальное подтверждение асимптотической свободы

## test of QCD: experimental confirmation of asymptotic freedom



Заряд - единственный параметр, определяющий силу взаимодействия

Википедия  
Свободная энциклопедия

## навигация

- Заглавная страница
- Рубрикация
- Индекс А — Я
- Случайная статья
- Текущие события

## участие

- Портал сообщества
- Форум
- Свежие правки
- Новые статьи
- Справка
- Пожертвования

## поиск

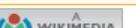
**Перейти** **Найти**

## инструменты

- Ссылки сюда
- Связанные правки
- Загрузить файл
- Спецстраницы
- Версия для печати
- Постоянная ссылка
- Цитировать статью

## на других языках

- Deutsch
- English
- Français
- עברית
- Italiano
- 日本語
- Plattdüütsch
- Português
- Tiếng Việt
- 中文



Done

Последнее изменение этой страницы: 16:45, 24 августа 2007.

Содержимое доступно в соответствии с GNU Free Documentation License.



# Асимптотическая свобода и конфайнмент

## Асимптотическая свобода

Нобелевская премия 2004 года

Д. Гросс



Д. Политцер



Ф. Вильчек

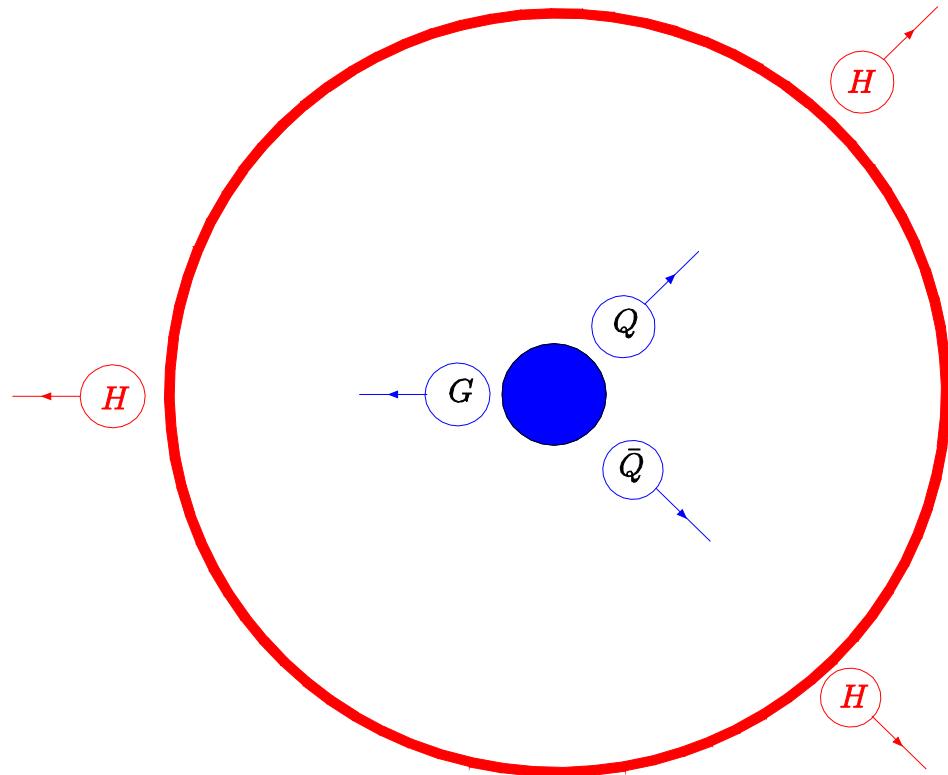


## Конфайнмент

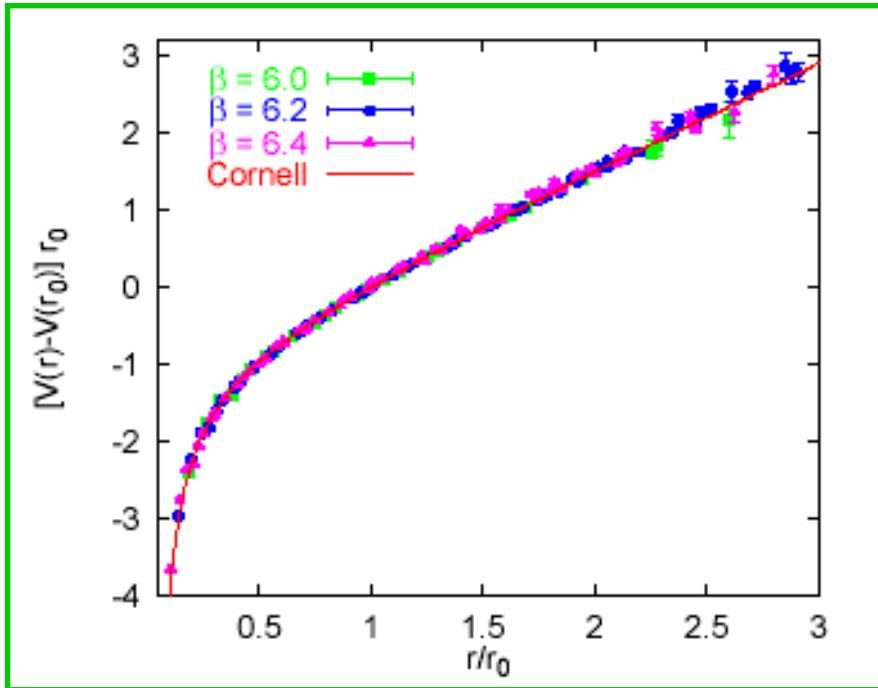
Проблема тысячелетия

(Математический институт Клэя, 1000000 \$)

Нобелевская премия ? года



# Конфайнмент

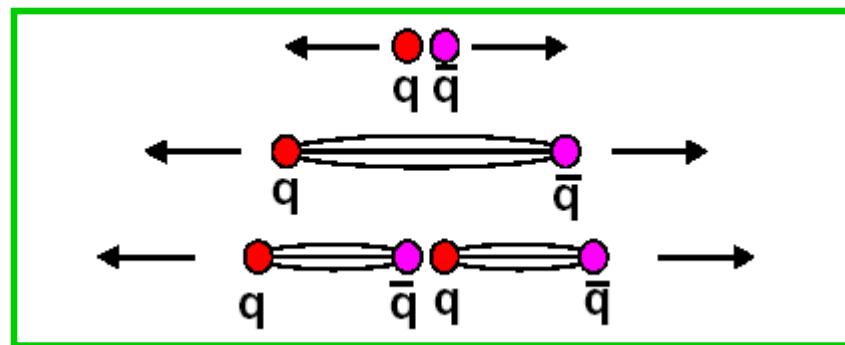
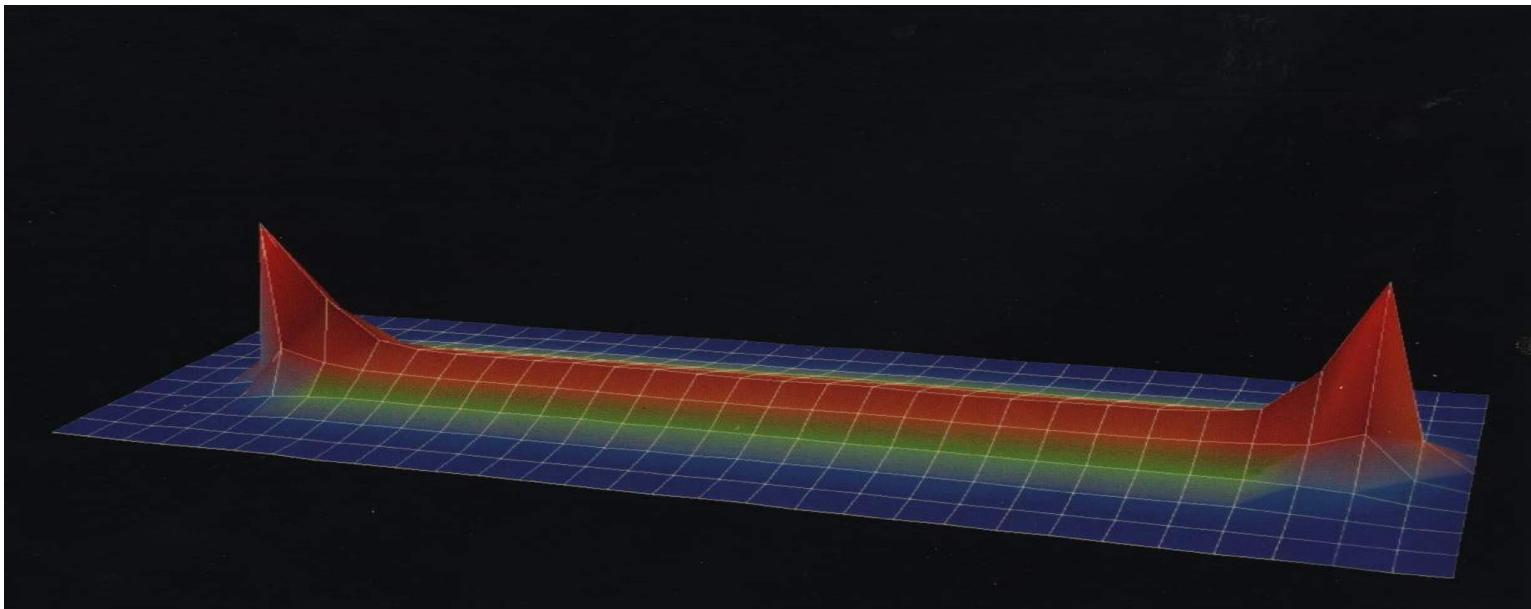


$V(r) \rightarrow kr$  при больших  $r$

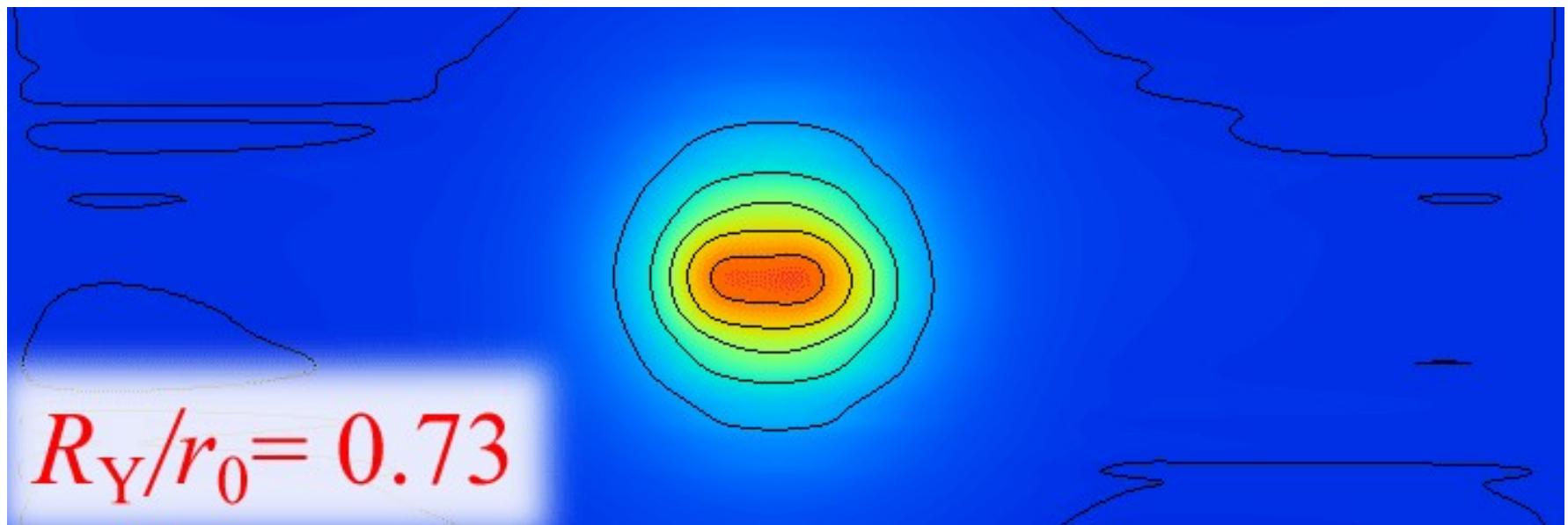
$F = \text{const} \sim 16\ 000 \text{ Н}$

*Чтобы разделить кварки нужна бесконечная энергия!!!*

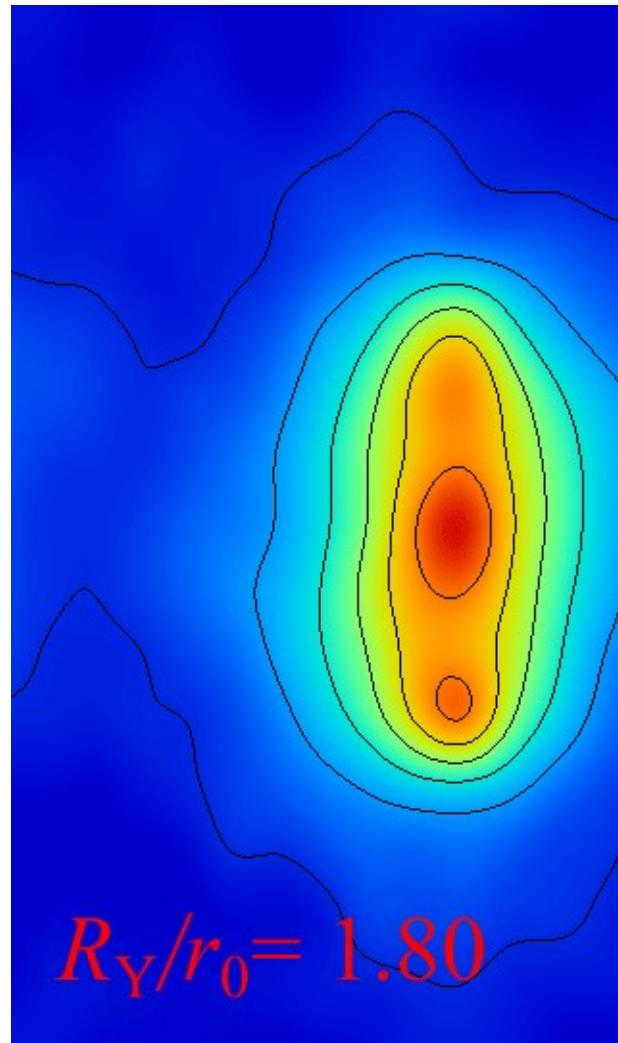
# Разрыв струны



# Разрыв струны (Мезоны)



# Разрыв струны (Барионы)



## Тяжелый кварконий

Тяжелые кварки: с ( $M_c \sim 1.5 \text{ GeV}$ )

б ( $M_b \sim 4.5 \text{ GeV}$ )

Общая особенность:  $M_{c,b} \gg \Lambda_{\text{QCD}} = 300 \text{ MeV}$

Массовый спектр позитрония:  
решение уравнения Шредингера

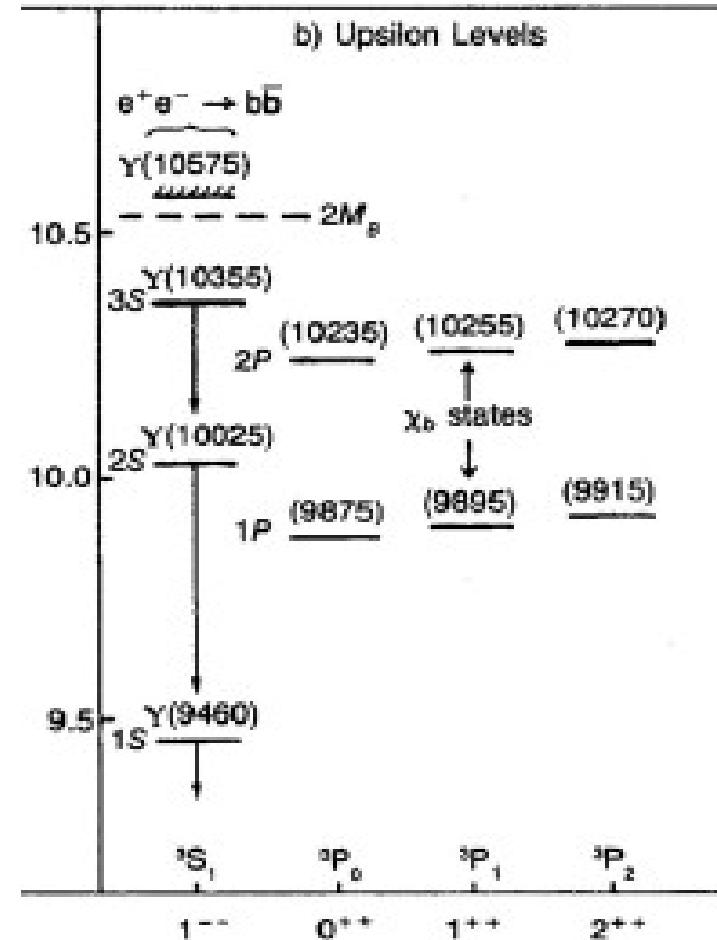
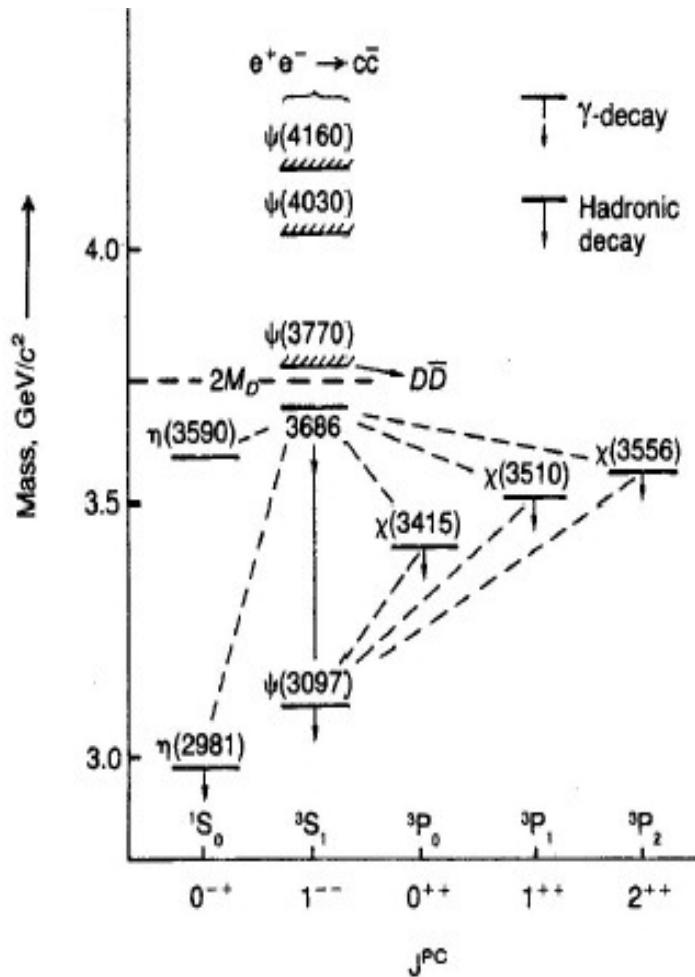
с потенциалом  $V(r) = -\frac{\alpha_{em}}{r}$

Массовый спектр кваркония:  
решение уравнения Шредингера

с потенциалом  $V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$

*Универсальный потенциал взаимодействия!!!*

# Спектр чармониев и боттомониев



# Заключение

T

*DECONFINEMENT*

$T = T_c$

*CONFINEMENT*

- Квантовая теория поля
- Статистическая физика
- Критические явления
- Теория гравитации
- Теория струн
- Физика плазмы

