
Сильные взаимодействия

В.В. Брагута

*Институт Физики Высоких Энергий,
г. Протвино*

План доклада

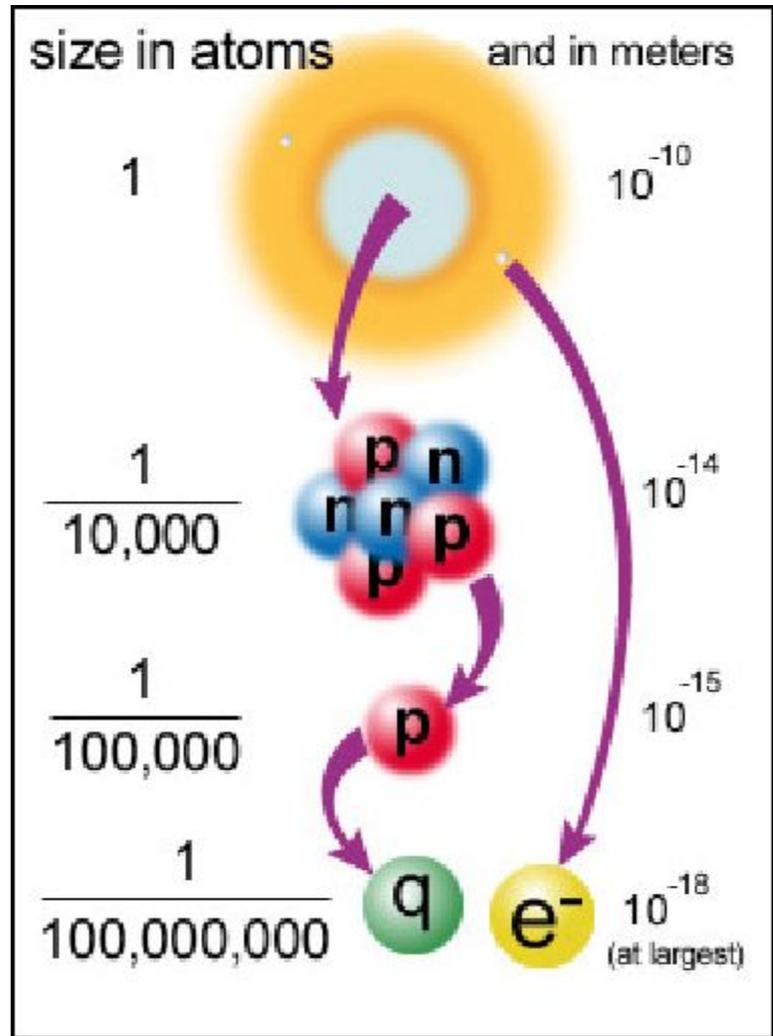
- Введение
 - Становление теории сильных взаимодействий
 - Квантовая хромодинамика
 - Заключение
-

Введение

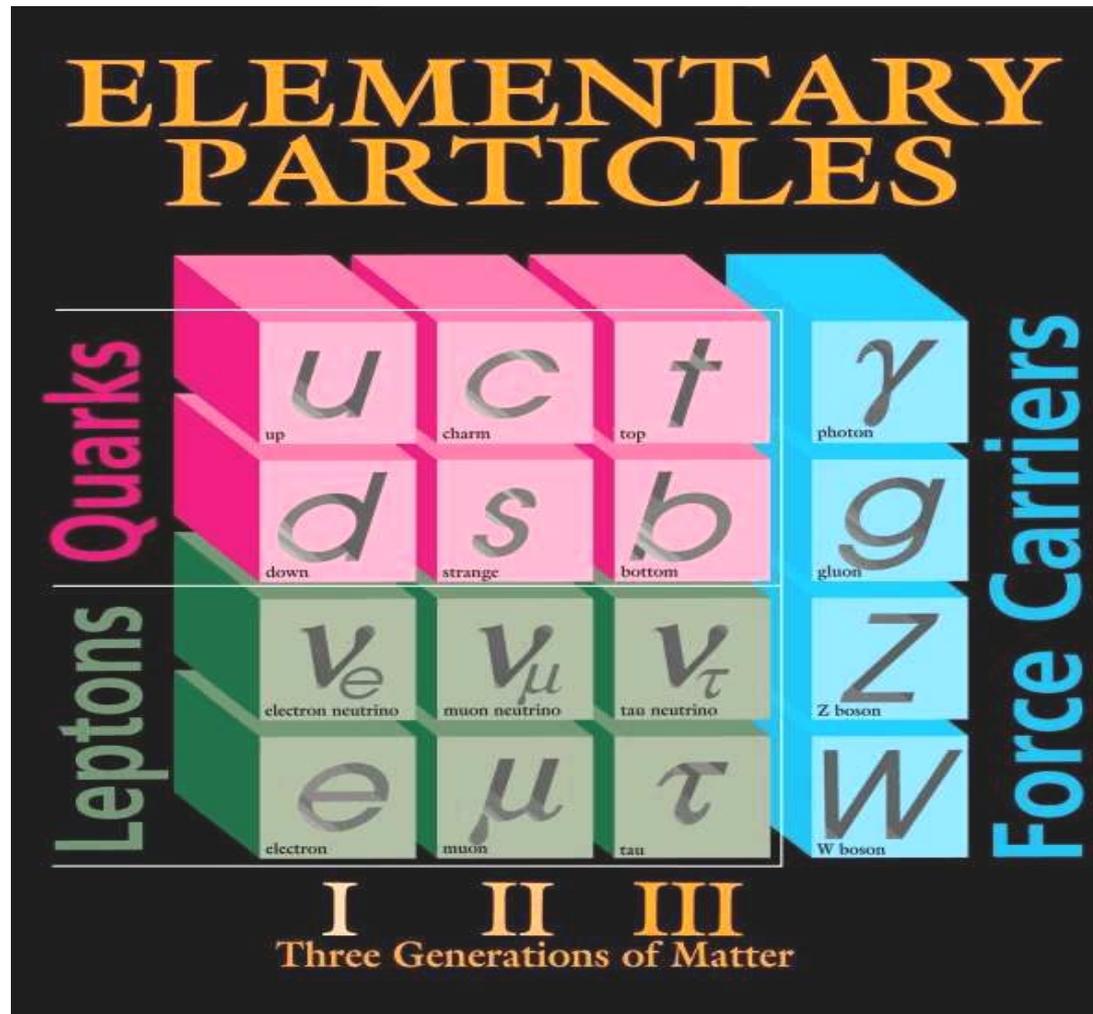
Иерархия частиц

- 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 ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	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 ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0



Становление теории СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Кварковая модель

В экспериментах видят барионы и мезоны

Meson Summary Table

Baryon Summary Table

See also the table of suggested $q\bar{q}$ 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 ($S = C \neq B = 0$)		STRANGE ($S = \pm 1, C = B = 0$)		BOTTOM ($B = \pm 1$)	
J^P (J^{PC})		J^P (J^{PC})		J^P (J^{PC})	
π^\pm	$1^-(0^-)$	$\pi^\pm(1670)$	$1^-(2^-+)$	K^\pm	$1/2(0^-)$
π^0	$1^-(0^-)$	$\phi(1680)$	$0^-(1^-)$	K^0	$1/2(0^-)$
η	$0^+(0^-)$	$\rho(1690)$	$1^+(3^-)$	K_S^0	$1/2(0^-)$
$\eta(600)$	$0^+(0^-)$	$\rho(1700)$	$1^+(1^-)$	K_L^0	$1/2(0^-)$
$\eta(770)$	$1^+(1^-)$	$\omega(1700)$	$1^-(2^-+)$	$K_S^*(800)$	$1/2(0^+)$
$\eta(922)$	$0^-(1^-)$	$\phi(1710)$	$0^+(0^-)$	$K^*(892)$	$1/2(1^-)$
$\eta(958)$	$0^+(0^-)$	$\eta(1760)$	$0^+(0^-)$	$K_1^*(1270)$	$1/2(1^-)$
$\eta(980)$	$0^+(0^-)$	$\omega(1800)$	$1^-(0^-)$	$K_1^*(1400)$	$1/2(1^+)$
$\omega(980)$	$1^-(0^-)$	$\chi(1835)$	$0^+(2^-+)$	$K^*(1410)$	$1/2(1^-)$
$\phi(1020)$	$0^-(1^-)$	$\chi(1835)$	$0^+(2^-+)$	$K_S^*(1430)$	$1/2(0^+)$
$h_1(1170)$	$0^-(1^-)$	$\phi_2(1850)$	$0^-(3^-)$	$K_S^*(1430)$	$1/2(2^+)$
$h_1(1235)$	$1^+(1^-)$	$\eta_2(1870)$	$0^+(2^-+)$	$K(1460)$	$1/2(0^-)$
$a_1(1260)$	$1^-(1^+)$	$\eta(1900)$	$1^+(1^-)$	$K_S(1580)$	$1/2(2^-)$
$f_2(1270)$	$0^+(2^-+)$	$f_2(1910)$	$0^+(2^-+)$	$K(1630)$	$1/2(2^?)$
$f_1(1285)$	$0^+(1^+)$	$f_2(1950)$	$0^+(2^-+)$	$K_1(1650)$	$1/2(1^+)$
$\eta(1295)$	$0^+(0^-)$	$\rho(1990)$	$1^+(3^-)$	$K^*(1680)$	$1/2(1^-)$
$\pi(1300)$	$1^-(0^-)$	$f_2(2010)$	$0^+(2^-+)$	$K_S^*(1770)$	$1/2(2^-)$
$\omega(1320)$	$1^-(2^-+)$	$f_2(2020)$	$0^+(0^-)$	$K_S^*(1780)$	$1/2(2^-)$
$f_2(1370)$	$0^+(0^-)$	$a_4(2040)$	$1^-(4^+)$	$K_S^*(1820)$	$1/2(2^-)$
$h_1(1380)$	$1^-(1^+)$	$f_4(2050)$	$0^+(4^+)$	$K(1830)$	$1/2(0^-)$
$\pi_1(1400)$	$1^-(1^+)$	$\eta_2(2100)$	$1^-(2^-+)$	$K_S^*(1950)$	$1/2(0^+)$
$\omega(1405)$	$0^+(0^-)$	$f_2(2100)$	$0^+(0^-)$	$K_S^*(1980)$	$1/2(2^+)$
$f_1(1420)$	$0^+(1^+)$	$f_2(2150)$	$0^+(2^-+)$	$K_S^*(2045)$	$1/2(4^+)$
$\omega(1420)$	$0^-(1^-)$	$f_2(2150)$	$1^-(1^-)$	$K_S^*(2250)$	$1/2(2^+)$
$f_2(1430)$	$0^+(2^-+)$	$f_2(2200)$	$0^+(0^-)$	$K_S(2320)$	$1/2(3^+)$
$\omega(1450)$	$1^-(0^-)$	$f_2(2225)$	$0^+(0^-)$	$K_S^*(2380)$	$1/2(5^-)$
$\eta(1475)$	$0^+(0^-)$	$\rho(2250)$	$1^+(3^-)$	$K_4(2500)$	$1/2(4^-)$
$f_2(1500)$	$0^+(0^-)$	$f_2(2300)$	$0^+(2^-+)$	$K(3100)$	$2^?(2^?)$
$f_2(1510)$	$0^+(1^+)$	$f_4(2300)$	$0^+(4^+)$		
$f_2(1525)$	$0^+(2^-+)$	$f_2(2340)$	$0^+(2^-+)$		
$f_2(1565)$	$0^+(2^-+)$	$\rho(2350)$	$1^-(5^-)$		
$h_1(1595)$	$0^-(1^+)$	$a_0(2450)$	$1^-(6^+)$		
$\pi_1(1600)$	$1^-(1^+)$	$f_2(2510)$	$0^+(6^+)$		
$a_1(1640)$	$1^-(1^+)$				
$f_2(1640)$	$0^+(2^-+)$				
$\omega(1645)$	$0^-(1^-)$				
$\omega(1650)$	$0^-(1^-)$				
$\omega(1670)$	$0^-(3^-)$				
		OTHER LIGHT			
		Further States			
		CHARMED			
		$(C = \pm 1)$			
		D^\pm	$1/2(0^-)$	$\psi(4040)$	$0^-(1^-)$
		D^0	$1/2(0^-)$	$\psi(4160)$	$0^-(1^-)$
		$D^*(2007)^0$	$1/2(1^-)$	$Y(4260)$	$2^?(1^-)$
		$D^*(2010)^\pm$	$1/2(1^-)$	$\psi(4415)$	$0^-(1^-)$
		$D_S^*(2400)^0$	$1/2(0^+)$		
		$D_S^*(2400)^\pm$	$1/2(0^+)$		
		$D_1(2420)^0$	$1/2(1^+)$		
		$D_1(2420)^\pm$	$1/2(1^+)$		
		$D_1(2430)^\pm$	$1/2(1^+)$		
		$D_2^*(2460)^0$	$1/2(2^+)$		
		$D_2^*(2460)^\pm$	$1/2(2^+)$		
		$D_2^*(2640)^\pm$	$1/2(2^?)$		
		CHARMED, STRANGE			
		$(C = S = \pm 1)$			
		D_s^\pm	$0(0^-)$	$\chi_{c0}(2P)$	$0^+(0^+)$
		$D_s^{*\pm}$	$0(2^?)$	$\chi_{c1}(2P)$	$0^+(1^+)$
		$D_{s0}^*(2317)^\pm$	$0(0^+)$	$\chi_{c2}(2P)$	$0^+(2^+)$
		$D_{s1}^*(2460)^\pm$	$0(1^+)$	$\chi_{c3}(2P)$	$0^+(1^+)$
		$D_{s1}^*(2536)^\pm$	$0(1^+)$	$\chi_{c0}(3P)$	$0^+(2^+)$
		$D_{s2}^*(2573)^\pm$	$0(2^?)$	$\chi_{c1}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c2}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c3}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c4}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c5}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c6}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c7}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c8}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c9}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c10}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c11}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c12}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c13}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c14}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c15}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c16}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c17}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c18}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c19}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c20}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c21}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c22}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c23}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c24}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c25}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c26}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c27}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c28}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c29}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c30}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c31}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c32}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c33}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c34}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c35}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c36}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c37}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c38}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c39}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c40}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c41}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c42}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c43}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c44}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c45}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c46}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c47}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c48}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c49}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c50}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c51}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c52}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c53}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c54}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c55}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c56}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c57}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c58}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c59}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c60}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c61}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c62}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c63}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c64}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c65}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c66}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c67}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c68}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c69}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c70}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c71}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c72}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c73}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c74}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c75}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c76}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c77}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c78}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c79}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c80}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c81}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c82}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c83}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c84}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c85}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c86}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c87}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c88}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c89}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c90}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c91}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c92}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c93}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c94}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c95}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c96}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c97}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c98}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c99}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c100}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c101}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c102}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c103}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c104}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c105}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c106}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c107}(3P)$	$0^+(1^+)$
				$\chi_{c108}(3P)$	$0^+(2^+)$
				$\chi_{c109}(3P)$	$0^+(1^+)$
				χ_{c11	

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 GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_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 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
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Гелл-Манн (1964)

СВОЙСТВО СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

Для составных объектов выполняется закон:

$$M \approx \sum_i m_i$$

Сильные взаимодействия:

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

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

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

**Свободных кварков
в экспериментах
обнаружено не было**

Глубоко неупругое рассеяние

$e p \rightarrow e X$

Опыт аналогичный Резерфордскому рассеянию:

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

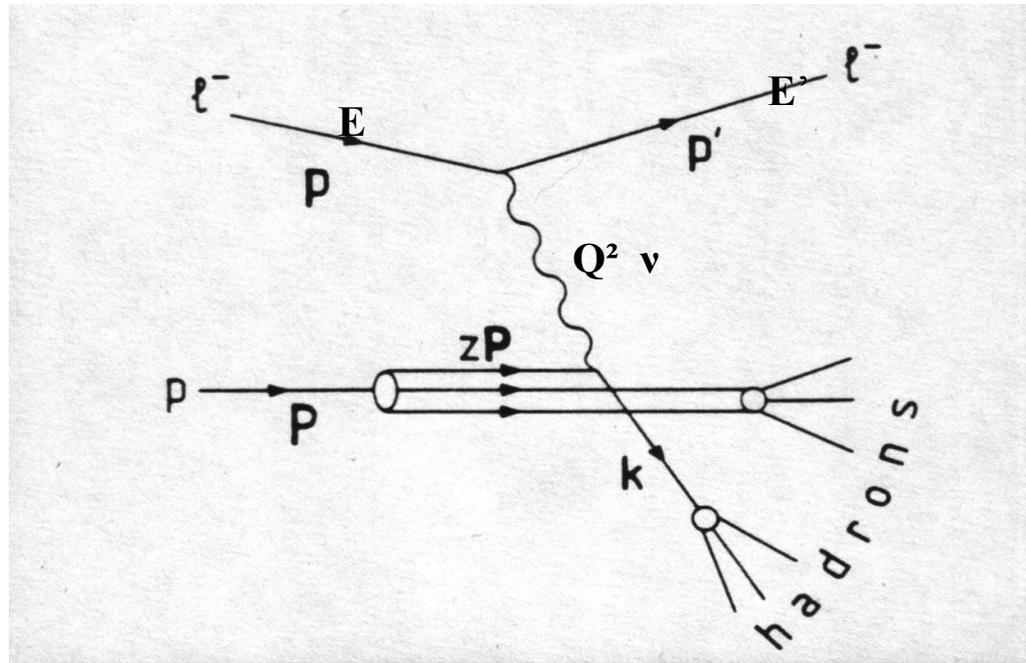
- p – импульс электрона, θ - азимутальный угол рассеяния
- $\alpha = 1/137$

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
- $\nu = E - E'$ энергия переданная ядру
- $x = Q^2/2M\nu$ безразмерная переменная
- M масса ядра
- $Q^2 = 4E^2 \sin^2 \theta / 2$



Скейлинг

Сечение глубоко неупругого рассеяния зависит от угла θ и от энергии улетающего электрона E' :

- $d^2\sigma/dE' d\Omega \sim (d\sigma/d\Omega)_R [\cos^2\theta/2 F_2(x, Q^2) + \sin^2\theta/2 (Q^2/xM^2) F_1(x, Q^2)]/v$
- При больших Q^2 : $F_1(x, Q^2) \rightarrow F_1(x)$ и $F_2(x, Q^2) \rightarrow F_2(x)$

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 партон

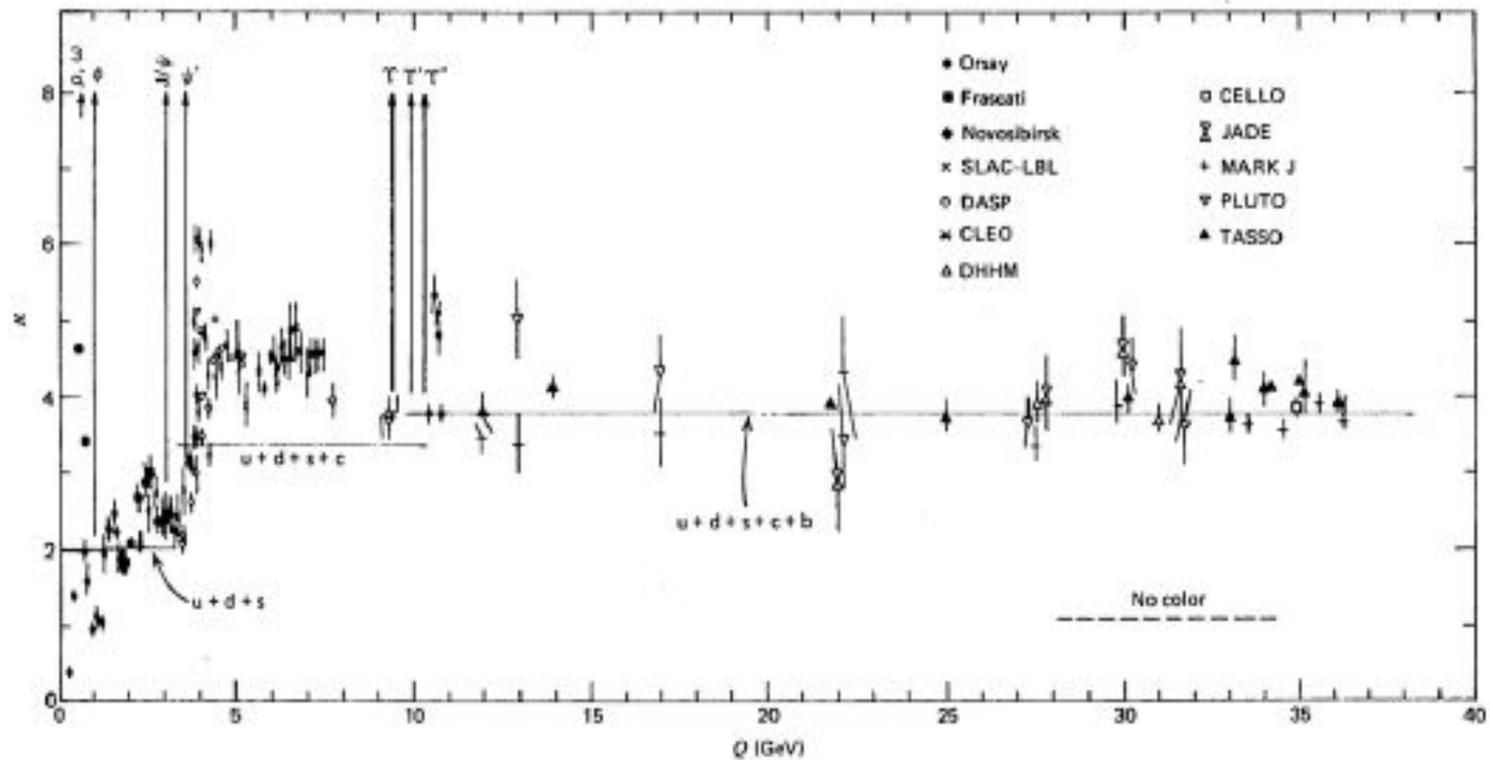
Партонь:

- Спин-0 партонь $\Rightarrow F_1(x) = 0$;
Спин-1/2 партонь $\Rightarrow 2xF_1(x) = F_2(x)$
- 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^- аннигиляция

Для одного кварка: $R=Q^2$

Эксперимент: $R = 3 \sum_i Q_i^2$

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

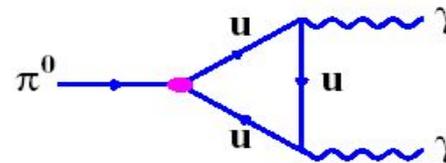
However quarks are FERMIONS, therefore require an ANTI-SYMMETRIC wave-function, *i.e.* need another degree of freedom, namely COLOUR.

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

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

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

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



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

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

Квантовая хромодинамика

Электродинамика (КЭД)

Уравнение движения заряженной частицы

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{p}}{dt} &= q \vec{E} + \frac{q}{c} [\vec{v} \times \vec{H}] \\ \vec{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \\ \vec{H} &= \text{rot } \vec{A}\end{aligned}$$

Электродинамика – абелева калибровочная теория

$$\begin{aligned}\vec{A}' &= \vec{A} + \nabla f, \quad \varphi' = \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial t} \\ A^i &= (\varphi, \vec{A}), \quad A'_k = A_k - \frac{\partial f}{\partial x^k}\end{aligned}$$

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

Квантовая хромодинамика (КХД)

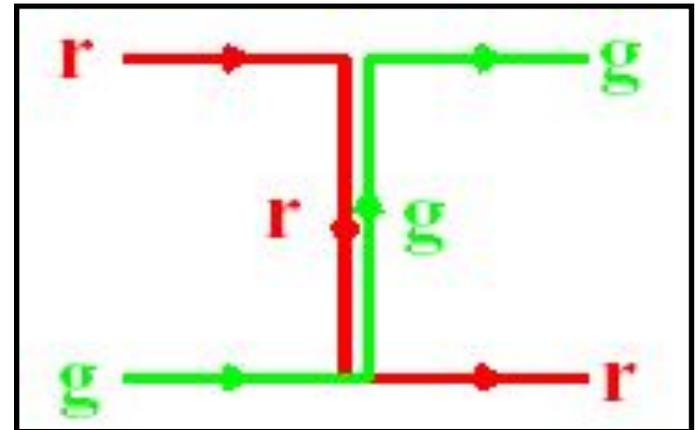
Неабелева калибровочная теория

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

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

Свойства КХД:

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



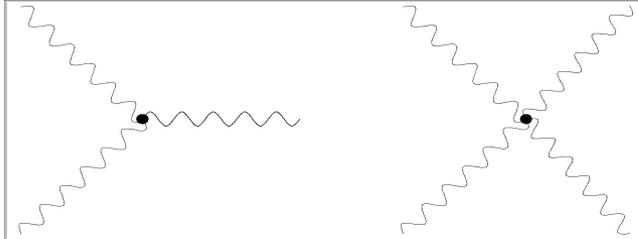
КХД и КЭД

Сильные взаимодействия:

Частицы: Кварки и глюоны

Переносчики: Глюоны (цветовой заряд)

Неабелева Калибровочная теория



Сила взаимодействия:

Малые расстояния :

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

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

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

Большие расстояния :

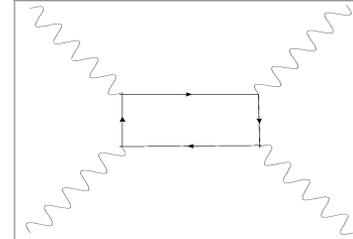
$$\text{конфайнмент } V(r) \sim \sigma \times r$$

Электромагнитные взаимодействия:

Частицы: Любые заряженные частицы

Переносчики: Фотоны (не имеют заряда)

Абелева Калибровочная теория



Сила взаимодействия:

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

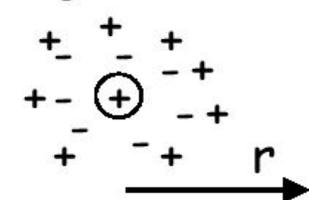
$$\alpha_{em} = \frac{1}{137}$$

Бегущий заряд



"screening" of the charge

like QED

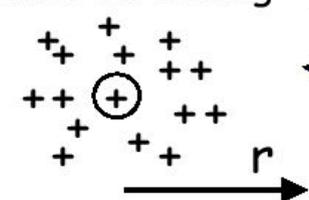


$\alpha_s(r) \uparrow$ if $r \downarrow$



"anti-screening"

non abelian



$\alpha_s(r) \downarrow$ if $r \downarrow$

Who wins?

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

$Q \sim 1/r$

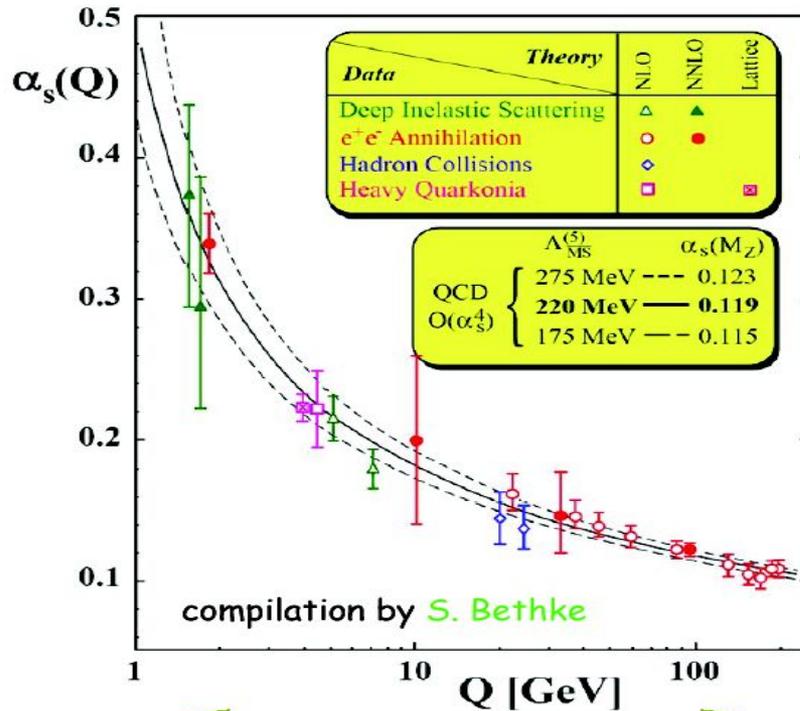
coupling at some reference scale Q_0

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

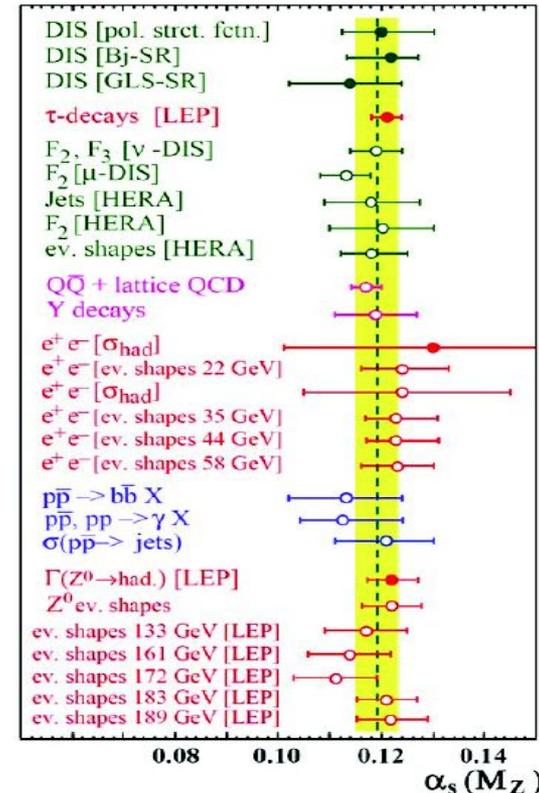
На малых расстояниях заряд - малый параметр!!!

Экспериментальное подтверждение ассимптотической свободы

test of QCD: experimental confirmation of asymptotic freedom



compilation by S. Bethke



confinement (?)  asymp. freedom

Заряд - единственный параметр, определяющий силу взаимодействия



Вы можете помочь проекту Википедия изменить мир!

37 794 уже пожертвовали.

[» Пожертвовать!](#)

"Ein Klasse System, mein Rückgrat beim Lernen" - Ronald Baumann

навигация

- [Заглавная страница](#)
- [Рубрикация](#)
- [Индекс А — Я](#)
- [Случайная статья](#)
- [Текущие события](#)

участие

- [Портал сообщества](#)
- [Форум](#)
- [Свежие правки](#)
- [Новые статьи](#)
- [Справка](#)
- [Пожертвования](#)

поиск

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](#)

Конфайнмент

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Конфа́йнмент (от англ. *confinement* — удержание, удержание цвета) — явление в **физике элементарных частиц**, состоящее в невозможности получения **кварков** в свободном состоянии, притом что имеются веские указания в пользу того, что сами кварки существуют: кварки хорошо описывают систематику **элементарных частиц** и наблюдаются внутри них в качестве **партонов** при **глубоко неупругих столкновениях**.

Для объяснения удержания предполагалось, что **цветовой заряд**, которым обладают кварки, имеет свойство так называемого антиэкранирования. Антиэкранирование происходит из-за того, что переносчики сильного взаимодействия, которому подвержены кварки, сами обладают цветовым зарядом и сами порождают дополнительное взаимодействие. В результате, кварки взаимодействуют тем сильнее, чем дальше они друг от друга. Эта гипотеза хорошо объясняла многие явления, в том числе рождения **струй адронов** при **глубоко неупругих столкновениях**.

Впоследствии эта гипотеза оказалась органической частью математической теории сильного взаимодействия — **квантовой хромодинамики**.

Категории: [Явления в микромире](#) | [Физика элементарных частиц](#)

Асимптотическая свобода и конфайнмент

Асимптотическая свобода

Нобелевская премия 2004 года

Д. Гросс

Д. Политцер

Ф. Вильчек

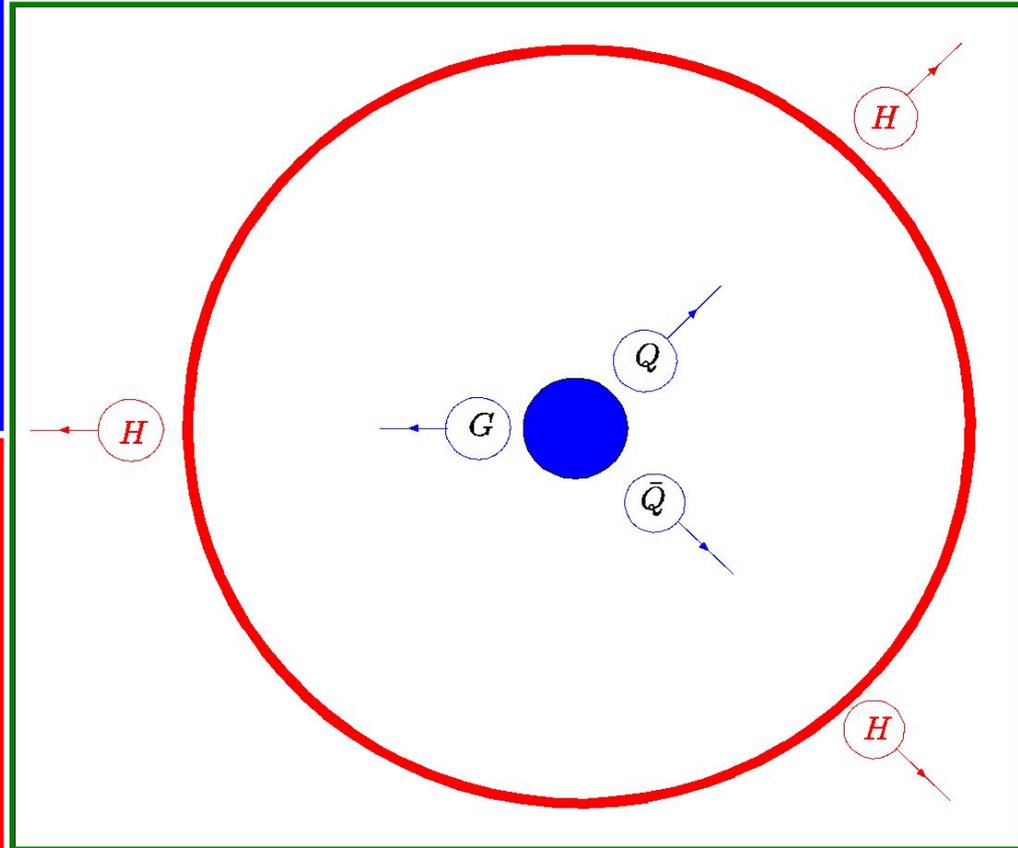


Конфайнмент

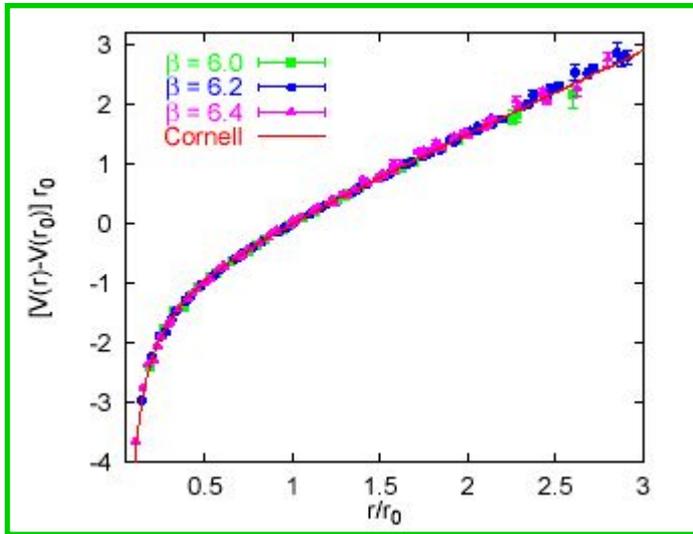
Проблема тысячелетия

(Математический институт Клэя, 1000000 \$)

Нобелевская премия ? года



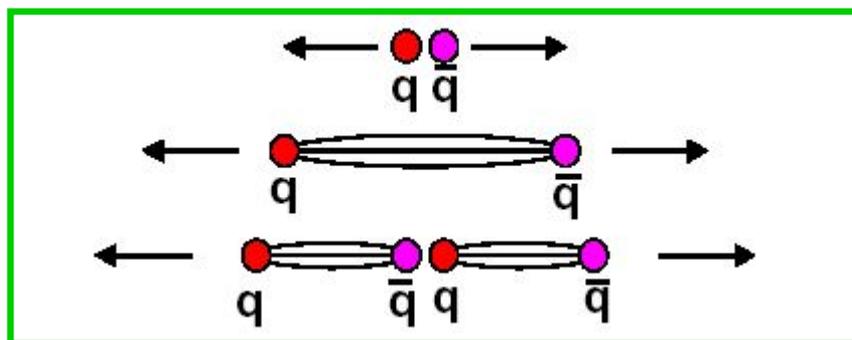
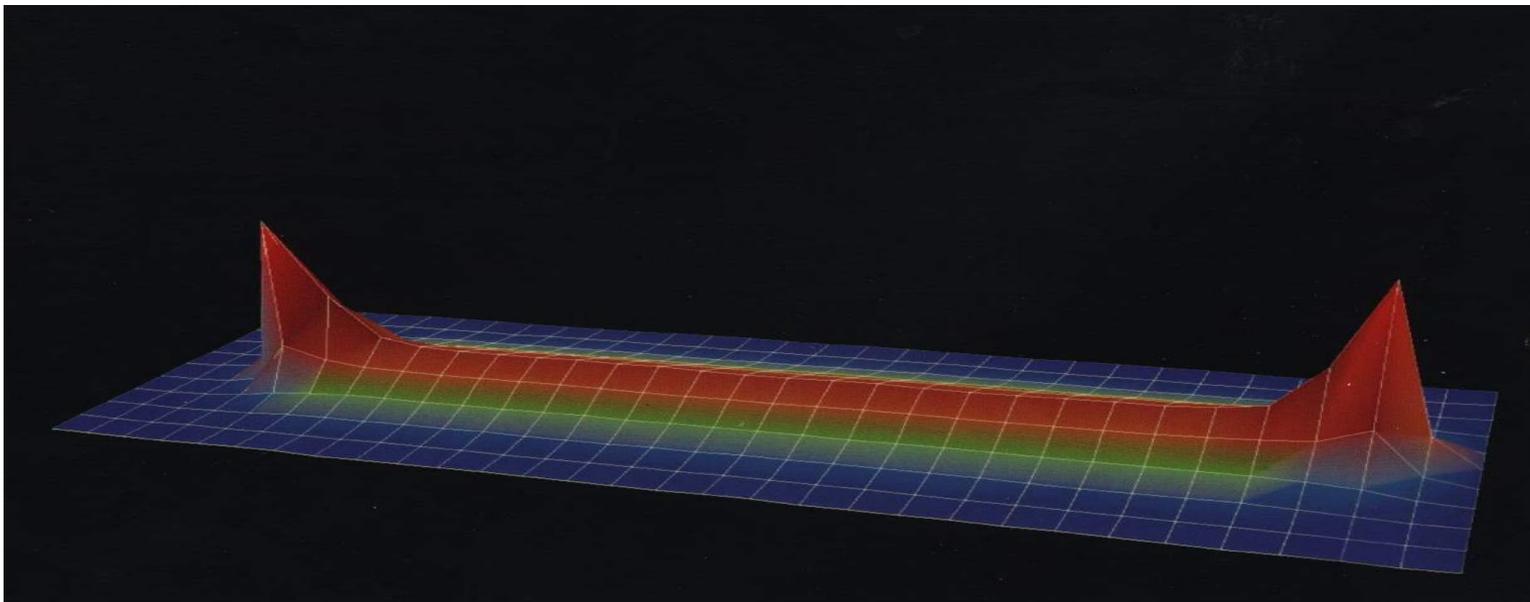
Конфайнмент



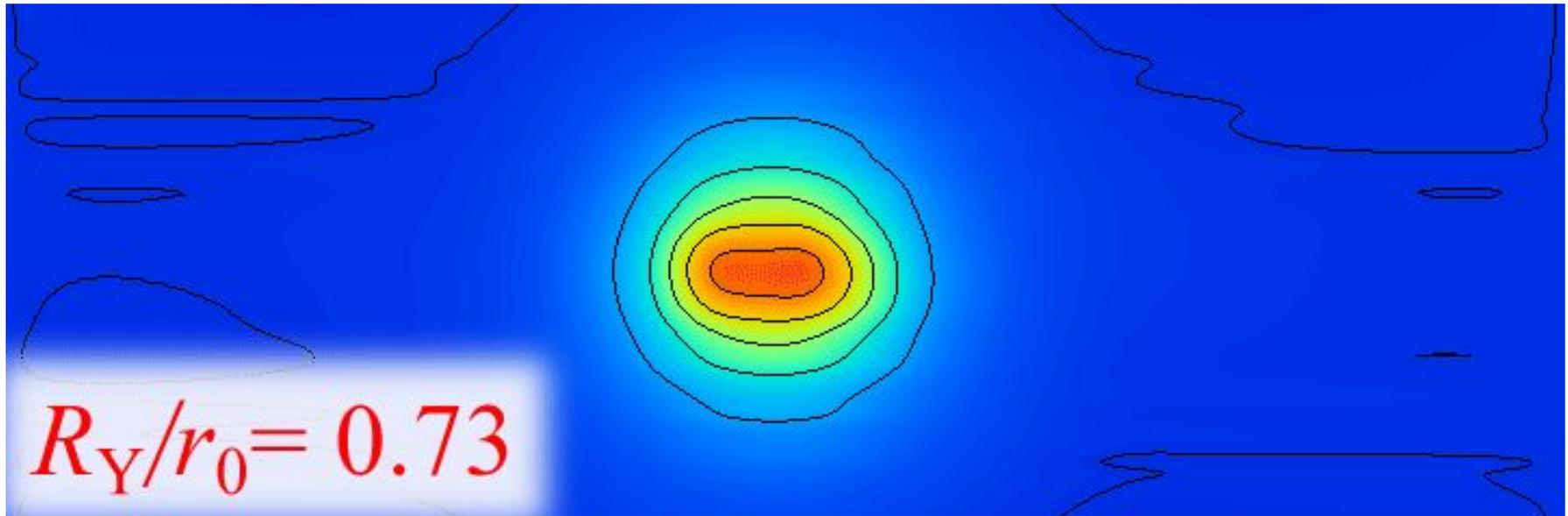
$V(r) \rightarrow kr$ при больших r
 $F = const \sim 16\,0000\text{ Н}$

Чтобы разделить кварки нужна бесконечная энергия!!!

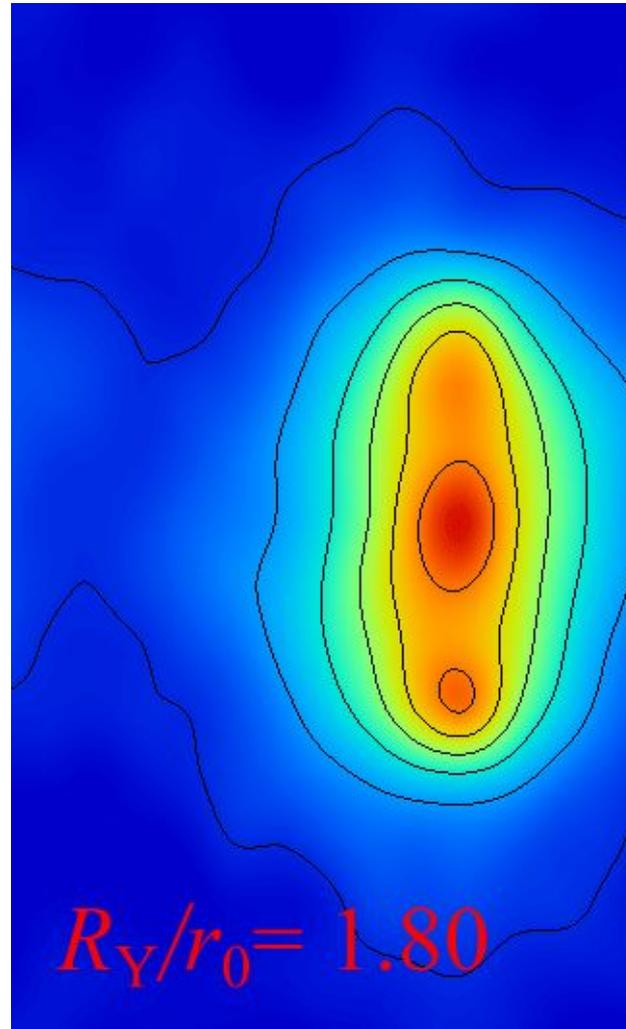
Разрыв струны



Разрыв струны (Мезоны)



Разрыв струны (Барионы)



Тяжелый кварконий

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

b ($M_b \sim 4.5 \text{ GeV}$)

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

Массовый спектр позитрония :
решение уравнения Шредингера

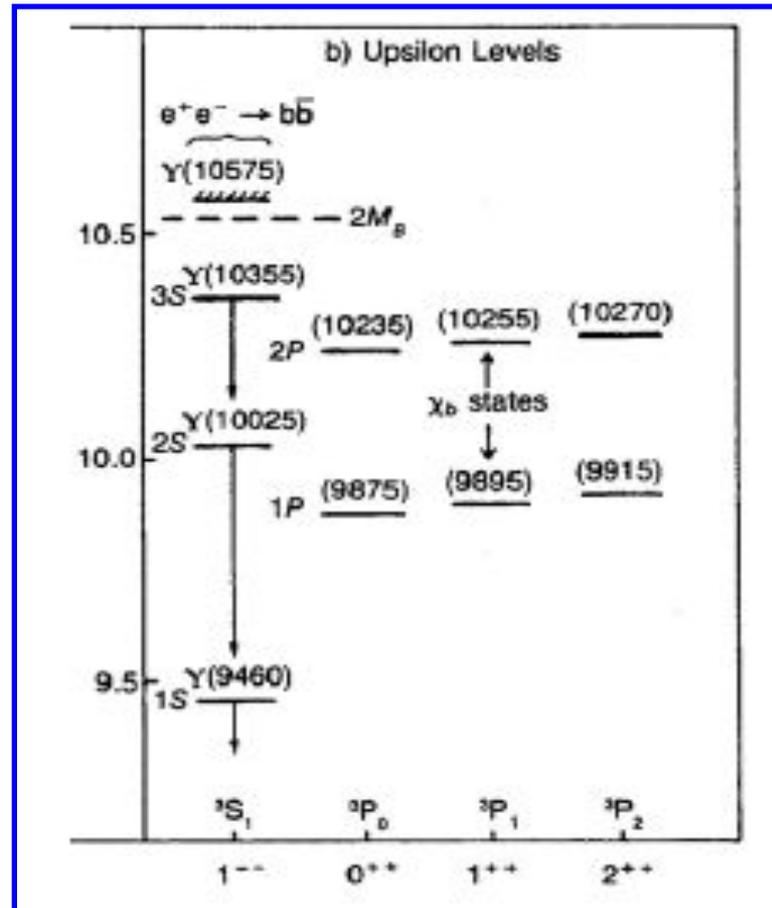
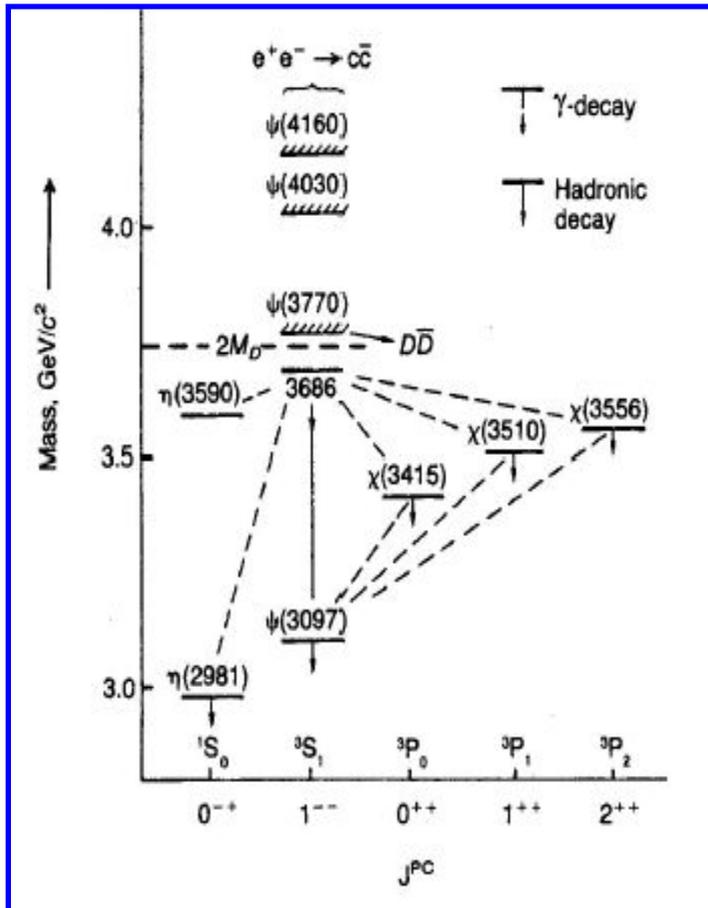
с потенциалом $V(r) = -\frac{\alpha_{em}}{r}$

Массовый спектр кваркония :
решение уравнения Шредингера

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

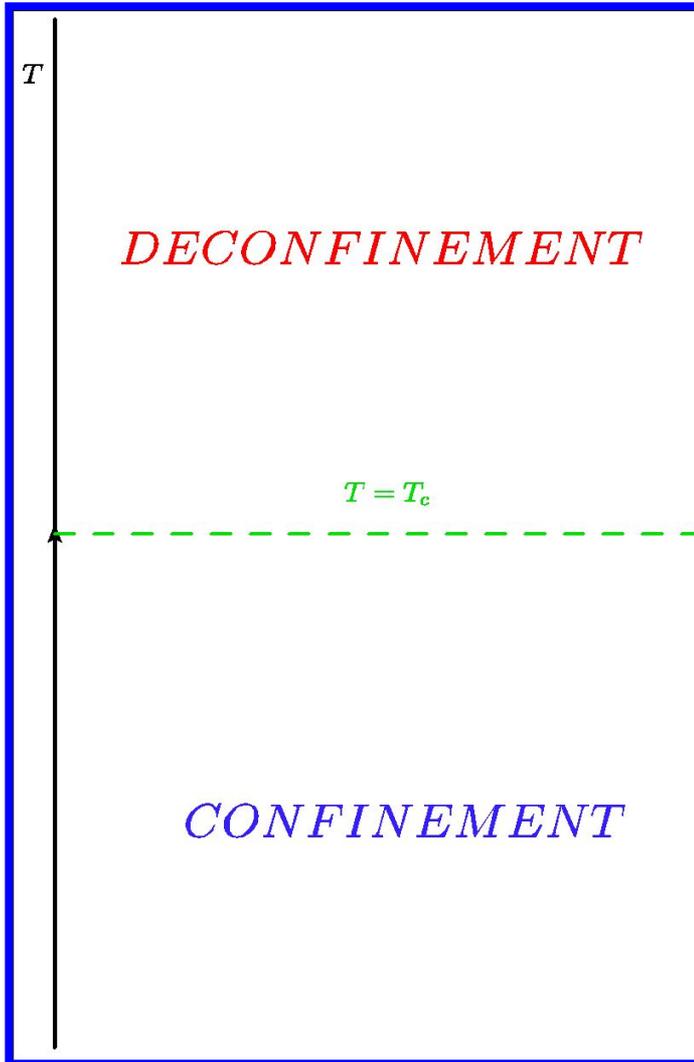
Универсальный потенциал взаимодействия!!!

Спектр чармониев и боттомониев

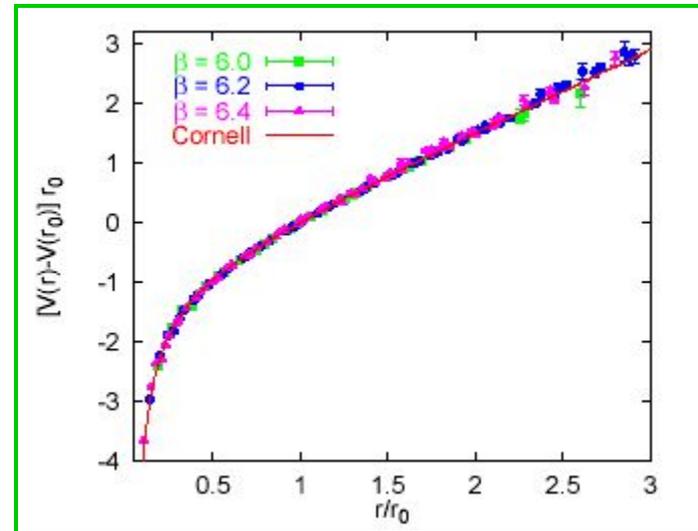


Заключение

Заключение



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



Спасибо за внимание
