

# *Сильные взаимодействия*

**В.В. Брагута**

***Институт Физики Высоких Энергий,  
г. Протвино***

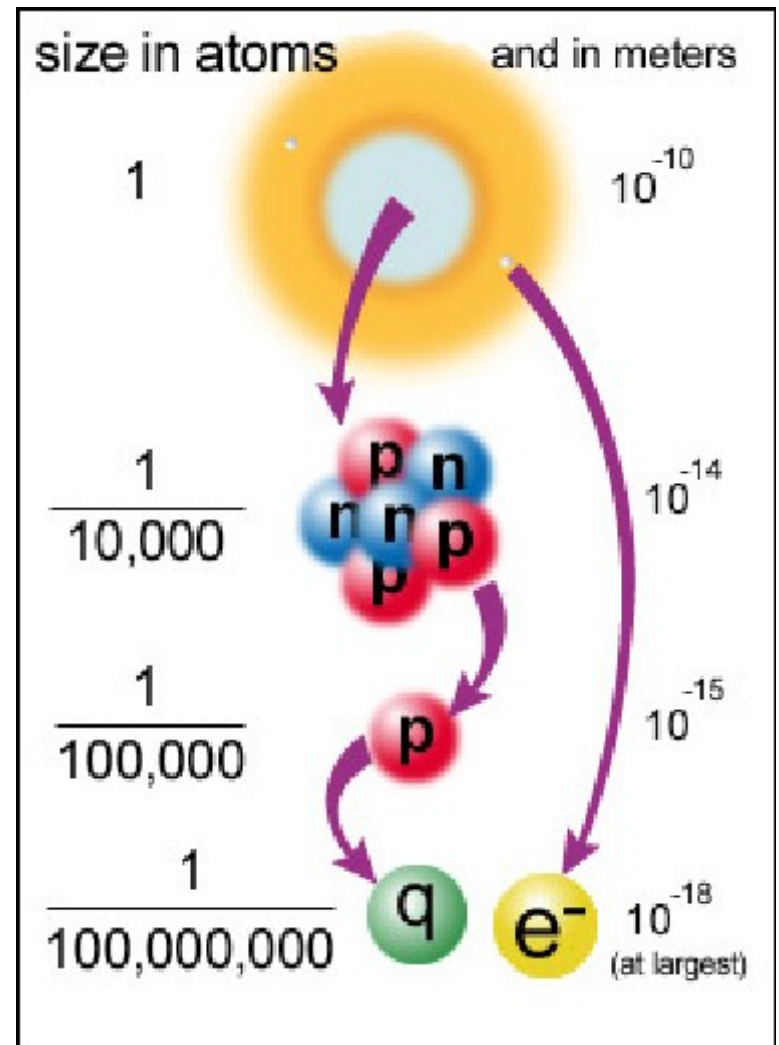
# План доклада

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

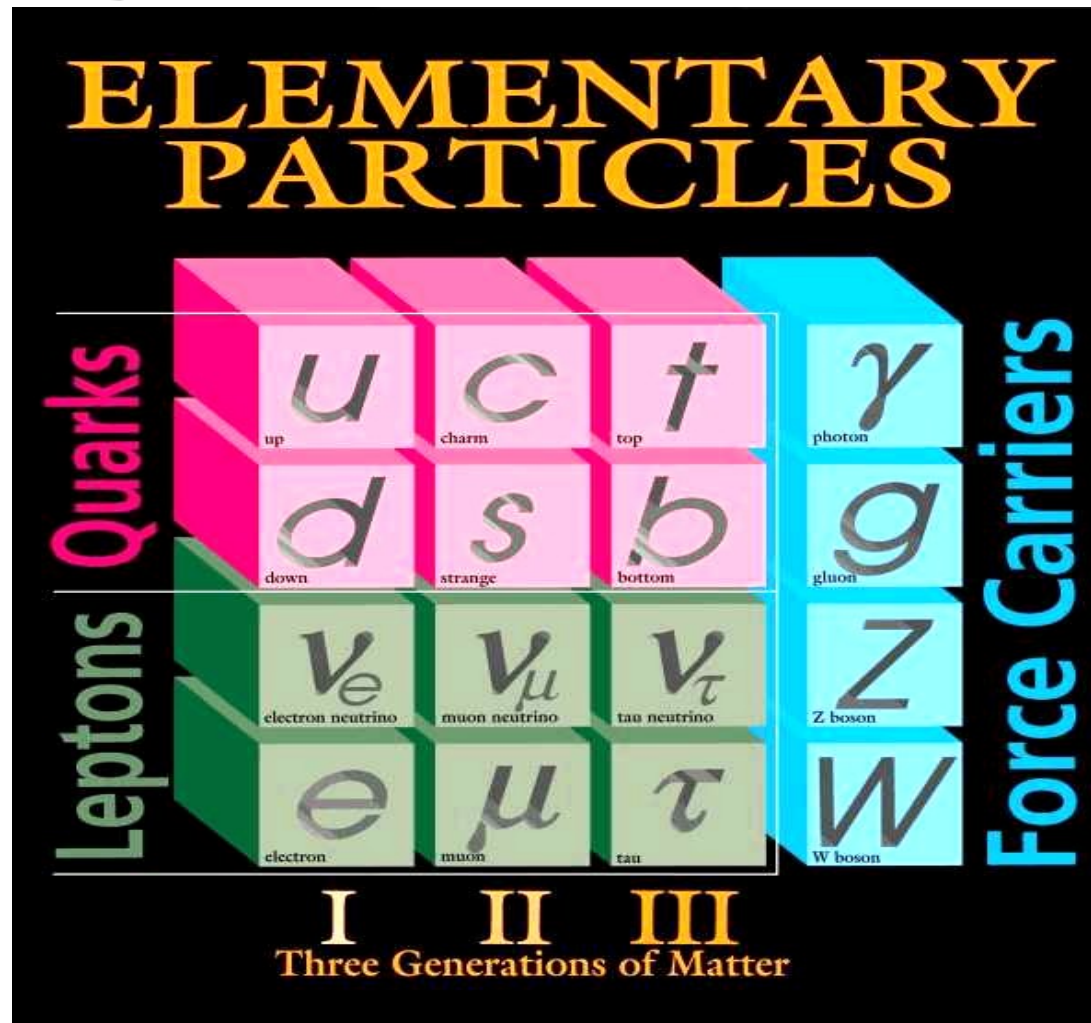
# Иерархия частиц

- 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
<b>e</b> electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0
<b><math>\mu</math></b> muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0
<b><math>\tau</math></b> tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>d</b> down	0.006	-1/3
<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b>s</b> strange	0.1	-1/3
<b>t</b> top	175	2/3
<b>b</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: 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 <sup>2</sup>	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
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
<b><math>\bar{p}</math></b>	anti-proton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

# 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:

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

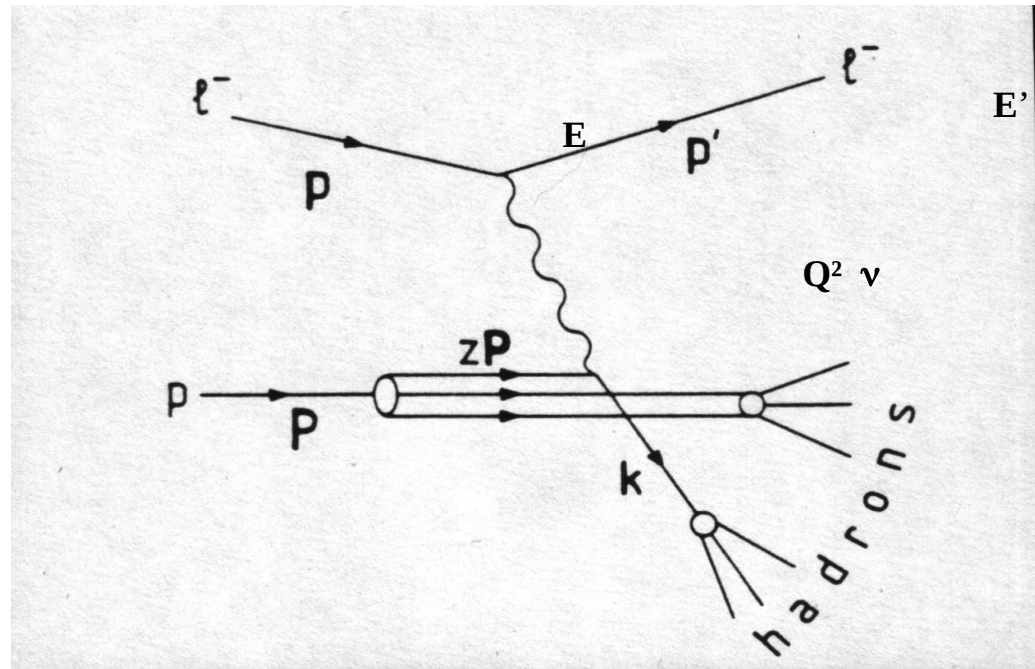
- $p$  – импульс электрона,  $\theta$  - азимутальный угол рассеяния
- $\alpha = 1/137$

Если мишень имеет пространственное распределение

- $d\sigma/d\Omega = (d\sigma/d\Omega)_R G_E^2(q^2)$
- $G_E(q^2) = \int d^3\underline{r} \rho(\underline{r}) \exp(i\underline{q} \cdot \underline{r})$
- $G_E(q^2) = 1$  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  $\theta$  и от энергии улетающего электрона  $E'$ :**

- $d^2\sigma/dE'd\Omega \sim (d\sigma/d\Omega)R[\cos^2\theta/2 F_2(x,Q^2) + \sin^2\theta/2 (Q^2/xM^2) F_1(x,Q^2)]/\nu$
- 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:*

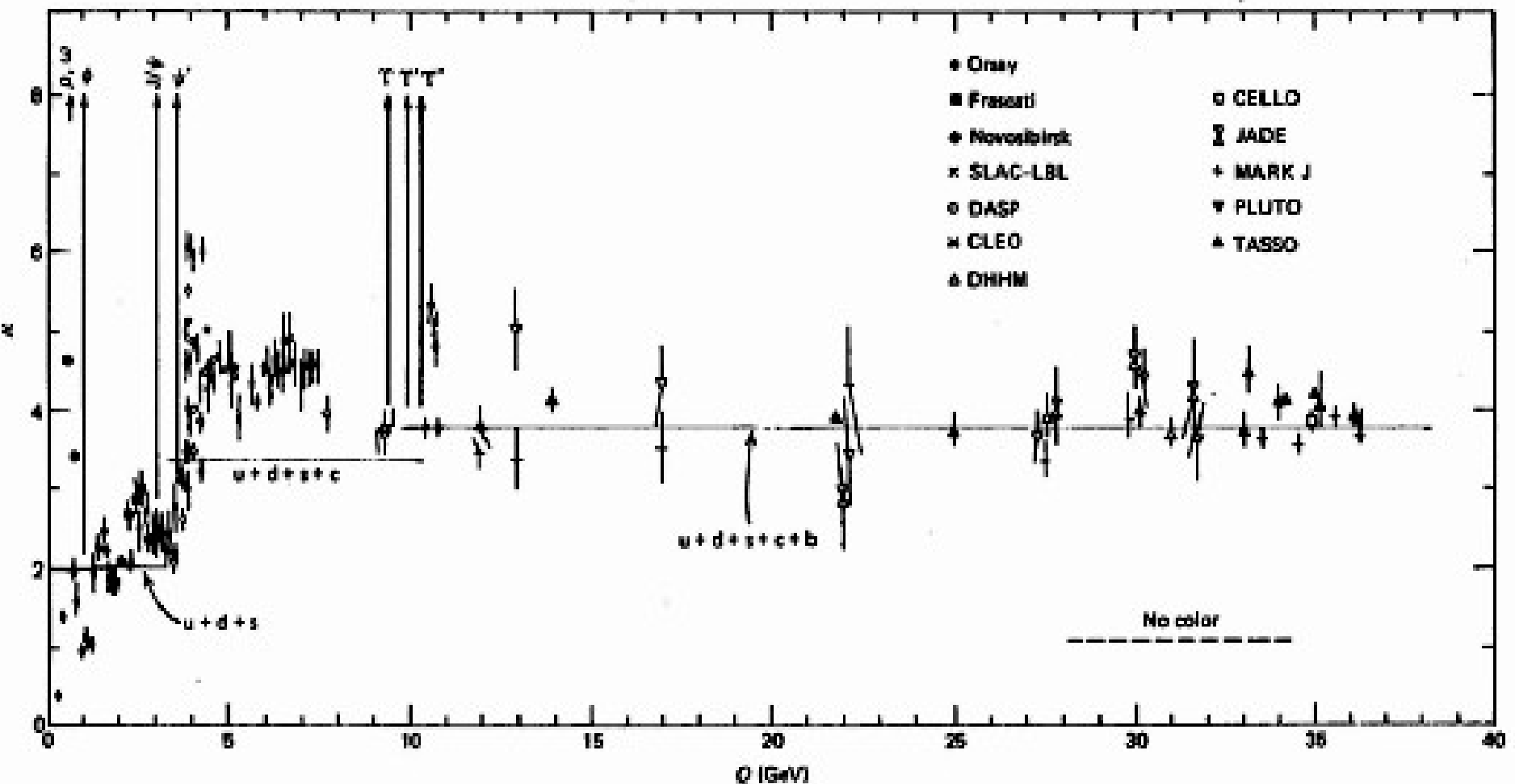
- Спин-0 партонь  $\Rightarrow F_1(x) = 0$ ;  
Спин-1/2 партонь  $\Rightarrow 2xF_1(x) = F_2(x)$
- Имеют дробный заряд
- Несут  $\sim 50\%$  импульса всего протона

---

**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:

$$R = \Omega^2$$

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

Эксперимент

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

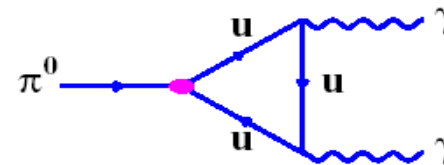
However quarks are FERMIONS, therefore require an ANTI-SYMMETRIC wave-function, i.e. need another degree of freedom, namely COLOUR.

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

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

★  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  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

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

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

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

## Электродинамика – абелева калибровочная теория

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

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

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

# Квантовая хромодинамика (КХД)

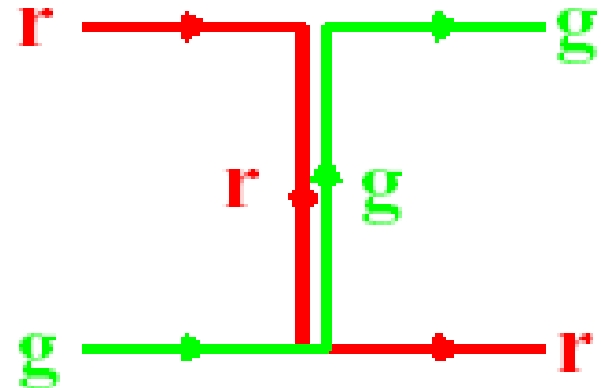
## Неабелева калибровочная теория

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

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

### Свойства КХД:

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



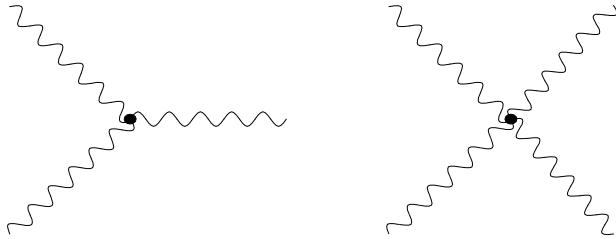
# КХД и КЭД

## Сильные взаимодействия:

Частицы: Кварки и глюоны

Переносчики: Глюоны (цветовой заряд)

**Неабелева Калибровочная теория**



## Сила взаимодействия:

Малые расстояния :

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

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 :

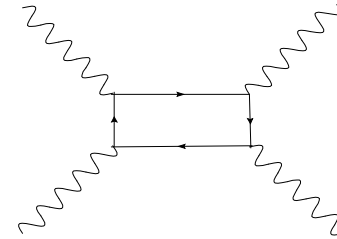
конфайнмент  $V(r) \sim \sigma \times r$

## Электромагнитные взаимодействия:

Частицы: Любые заряженные частицы

Переносчики: Фотоны (не имеют заряда)

**Абелева Калибровочная теория**



## Сила взаимодействия:

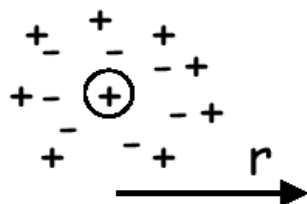
потенциал взаимодействия  $V(r) \sim \frac{\alpha_{em}}{r}$

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

# Бегущий заряд



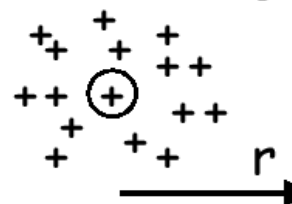
"screening" of the charge



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



"anti-screening"



$\alpha_s(r) \downarrow$  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  $Q_0$

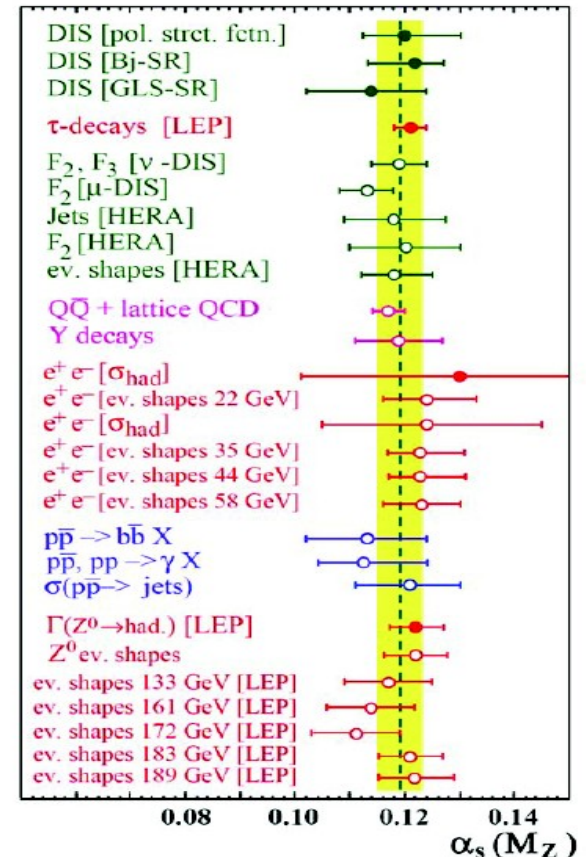
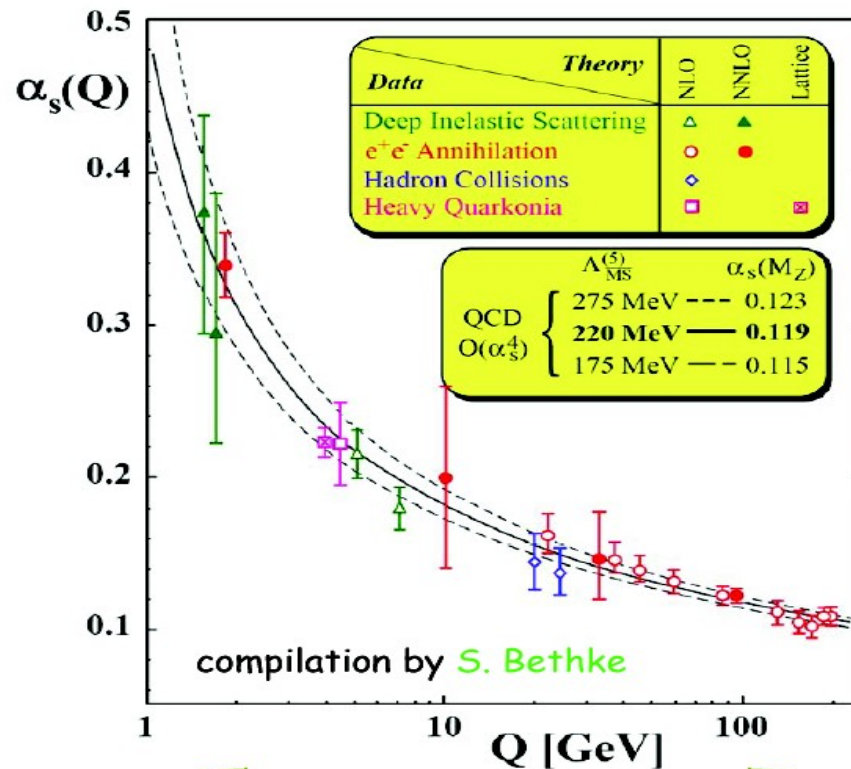
*Асимптотическая свобода:*

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

*На малых расстояниях заряд - малый параметр!!!*

# Экспериментальное подтверждение асимптотической свободы

test of QCD: experimental confirmation of asymptotic freedom



confinement (?)  asymp. freedom

Заряд - единственный параметр, определяющий силу взаимодействия



» Пожертвовать!

# Асимптотическая свобода и **конфайнмент**

## Асимптотическая свобода

Нобелевская премия 2004 года

Д. Гросс

Д. Политцер

Ф. Вильчек

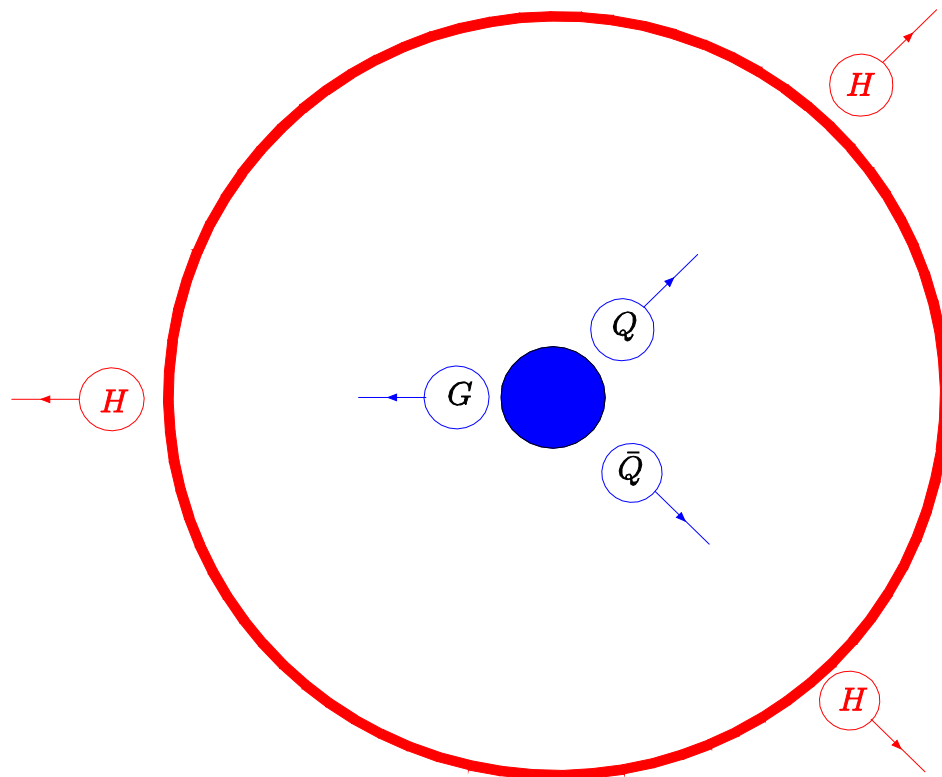


## **Конфайнмент**

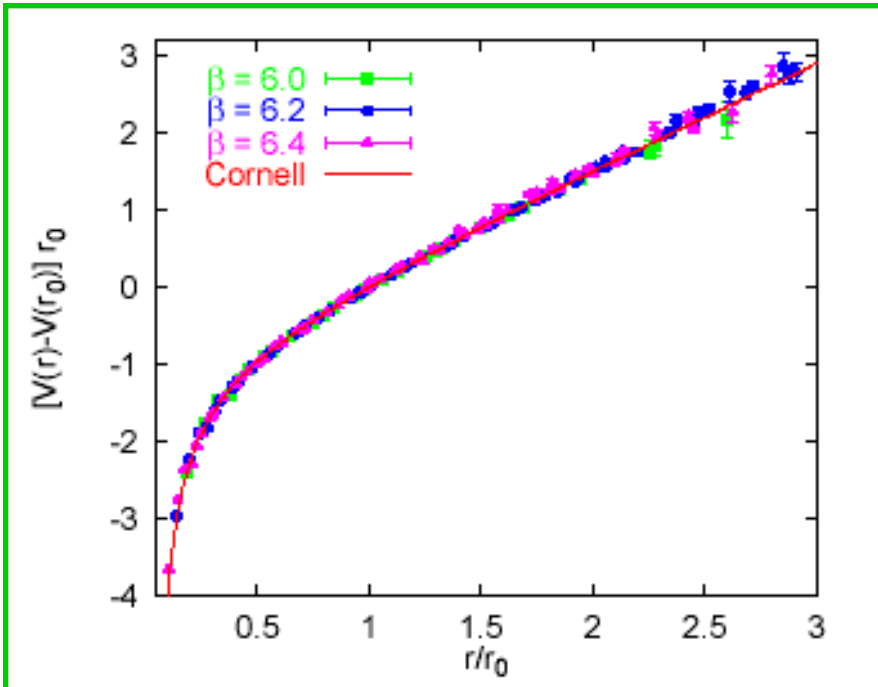
Проблема тысячелетия

(Математический институт Клэя, 1000000 \$)

Нобелевская премия ? года



# Конфайнмент

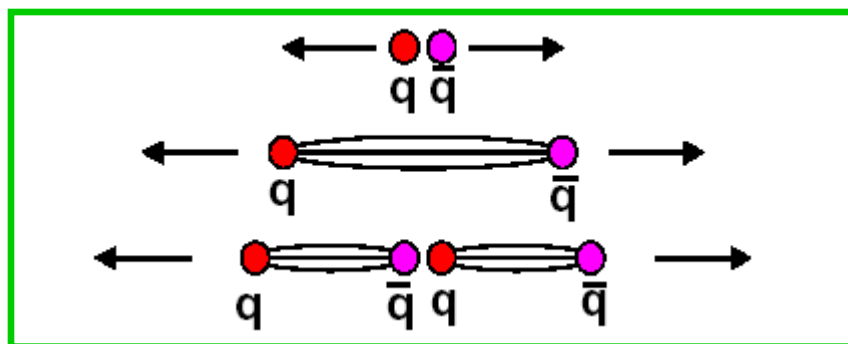
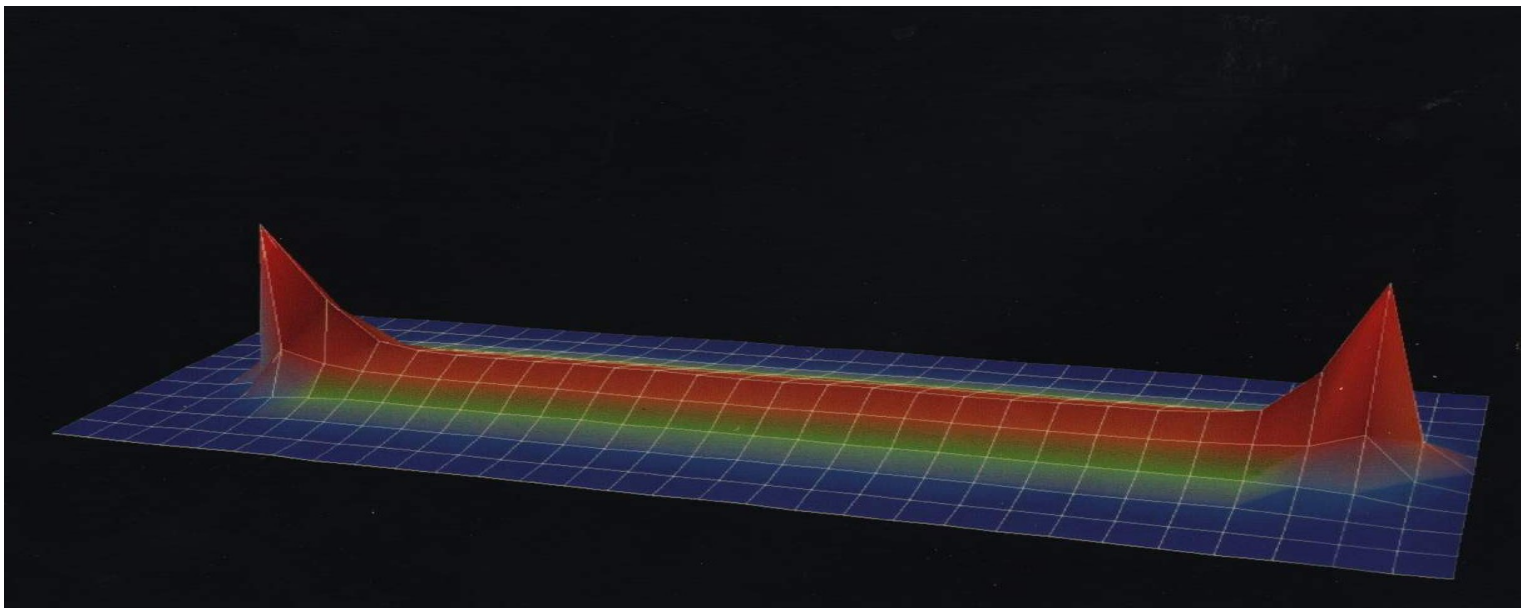


$V(r) \rightarrow kr$  при больших  $r$

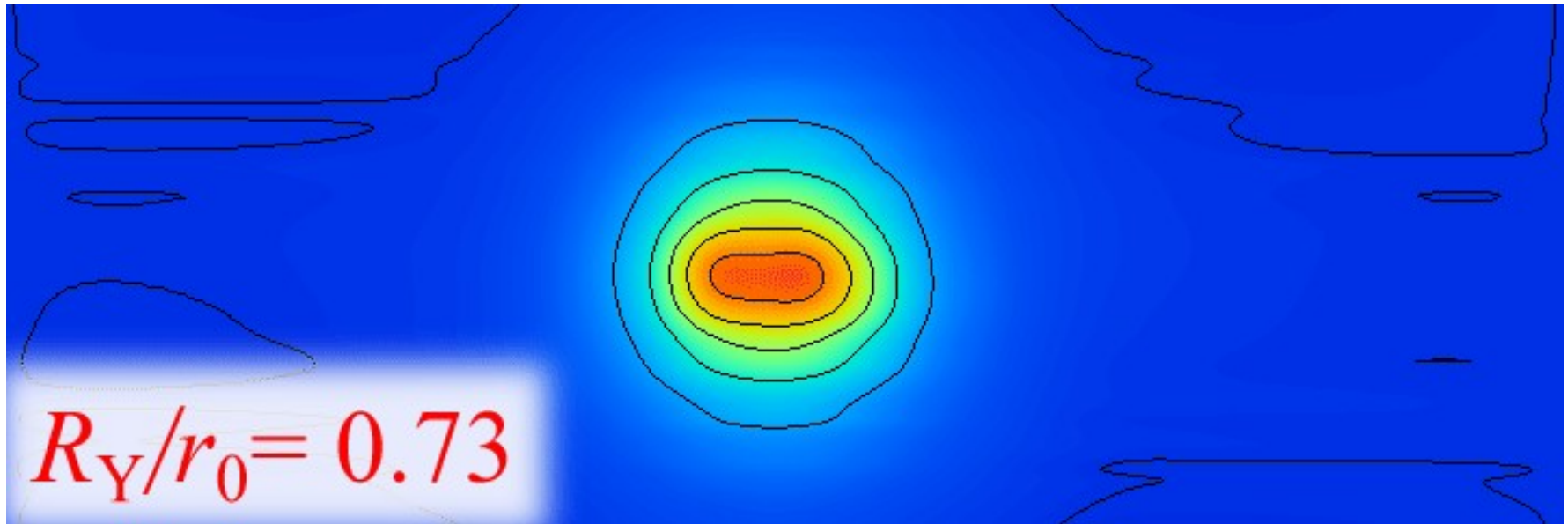
$F = \text{const} \sim 16\,0000\text{ Н}$

*Чтобы разделить кварки нужна бесконечная энергия!!!*

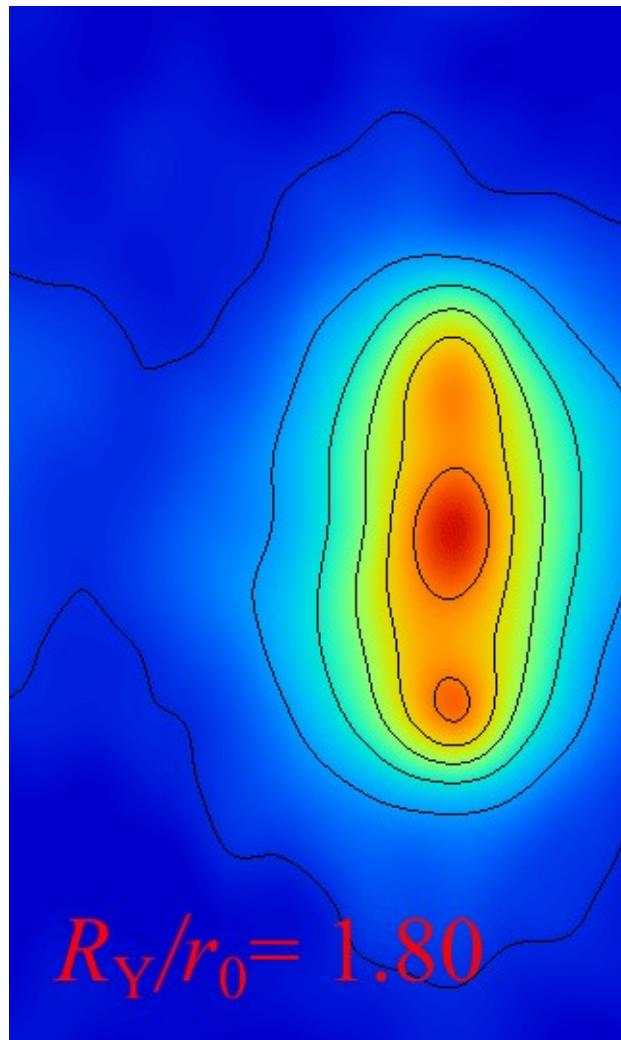
# Разрыв струны



# Разрыв струны (Мезоны)



# Разрыв струны (Барионы)



# Тяжелый кварконий

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

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

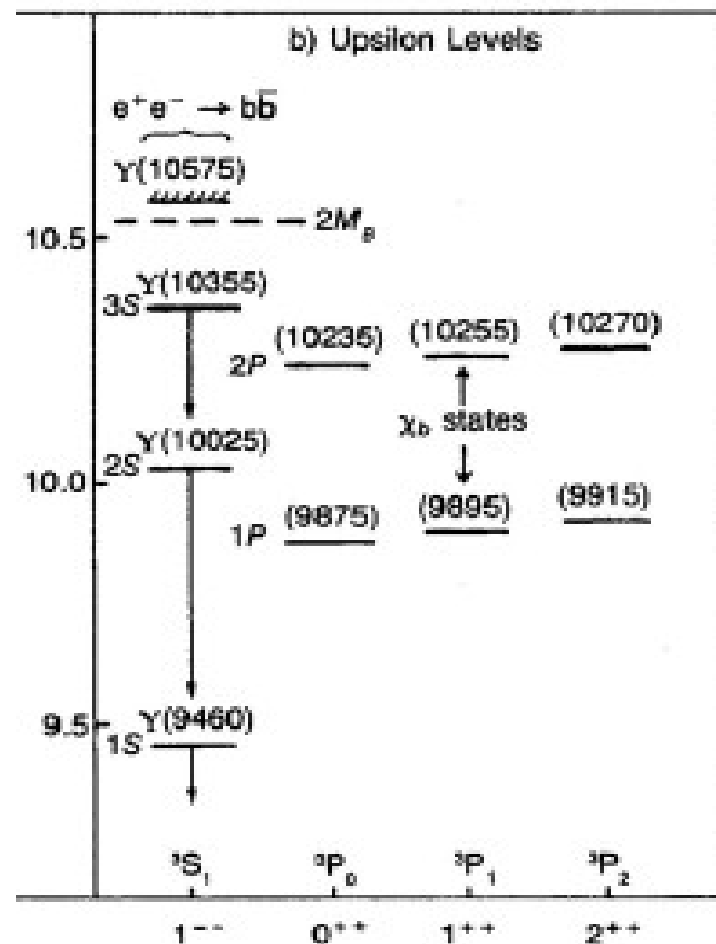
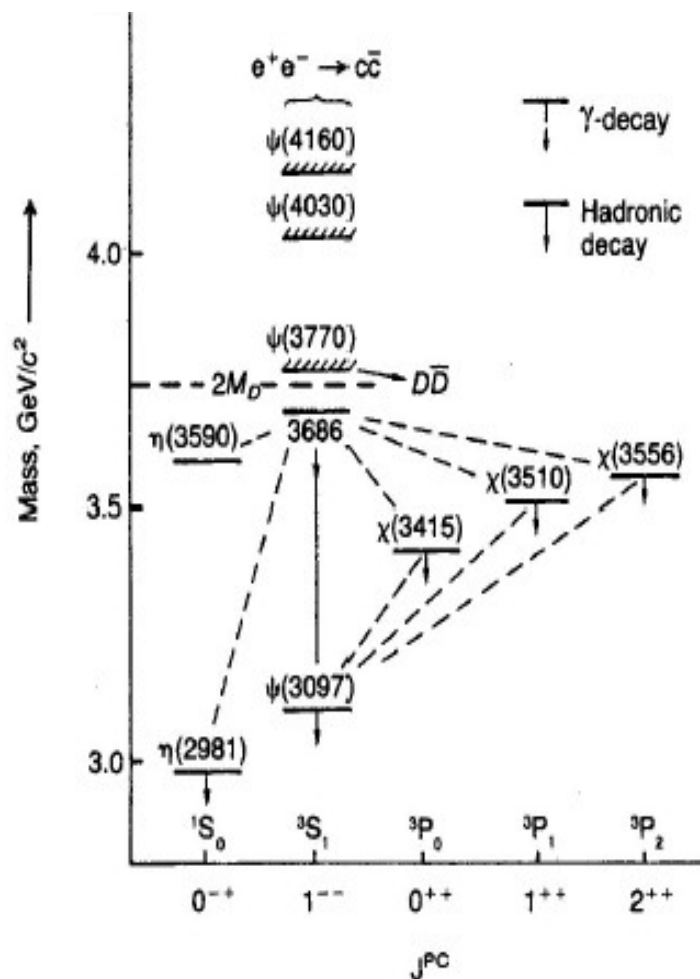
с потенциалом  $V(r) = -\frac{\alpha_{em}}{r}$

Массовый спектр кваркония :  
решение уравнения Шредингера

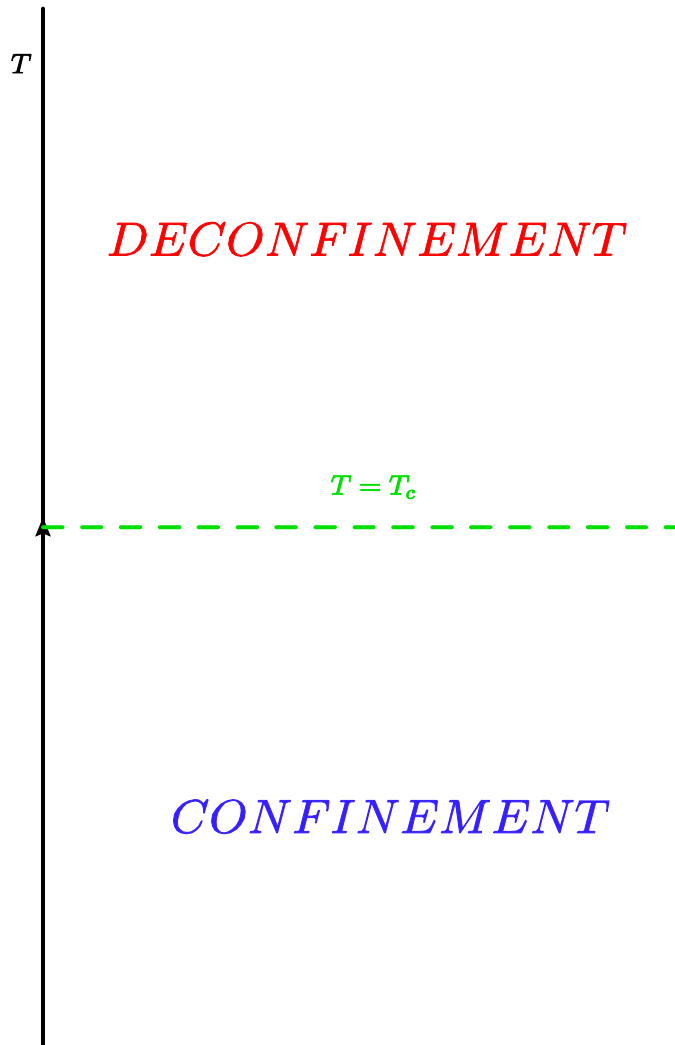
с потенциалом  $V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$

*Универсальный потенциал взаимодействия!!!*

# Спектр чармониев и боттомониев



# Заключение



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

