
Сильные взаимодействия

В.В. Брагута

*Институт Физики Высоких Энергий,
г. Протвино*

План доклада

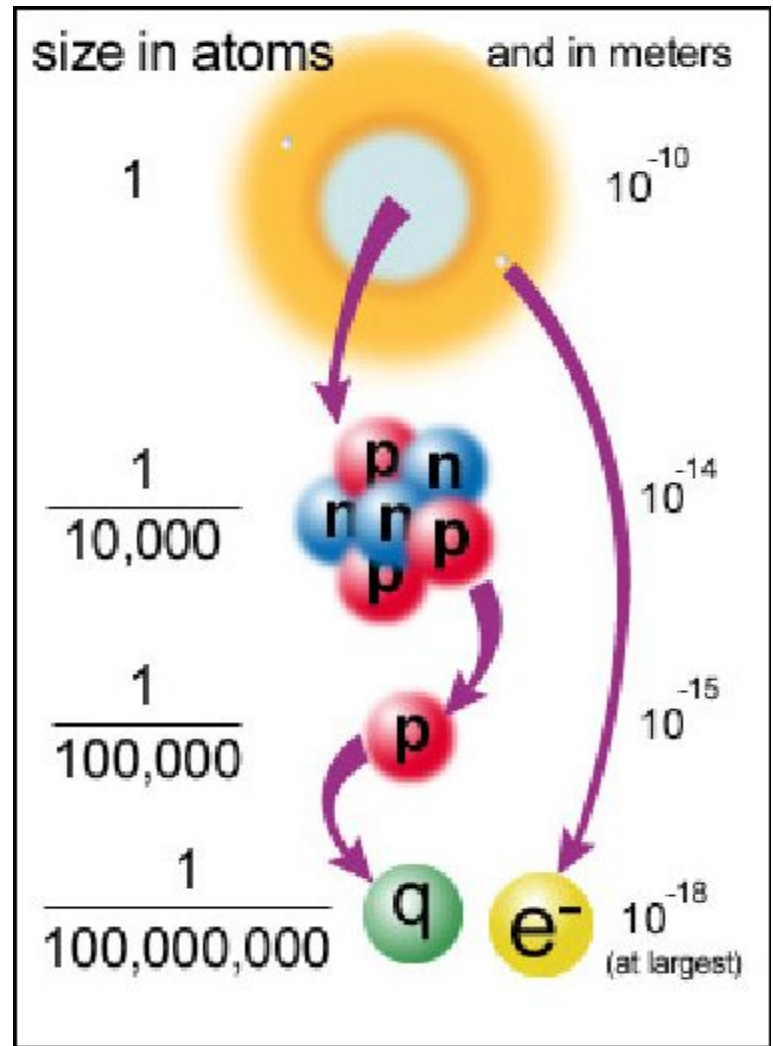
- Введение
 - Становление теории сильных взаимодействий
 - Квантовая хромодинамика
 - Заключение
-

Введение

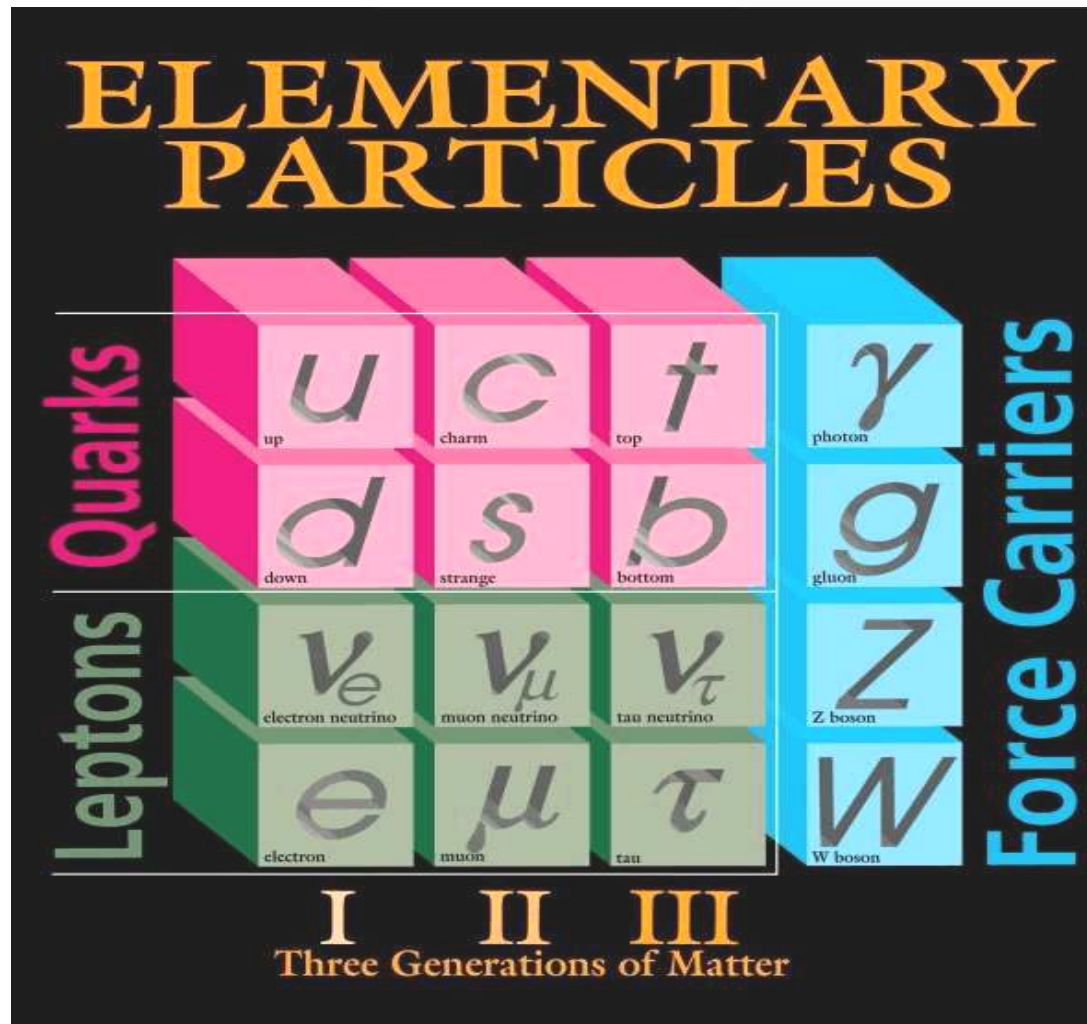
Иерархия частиц

- 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: 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 |

Гелл-Манн (1964)

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:

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

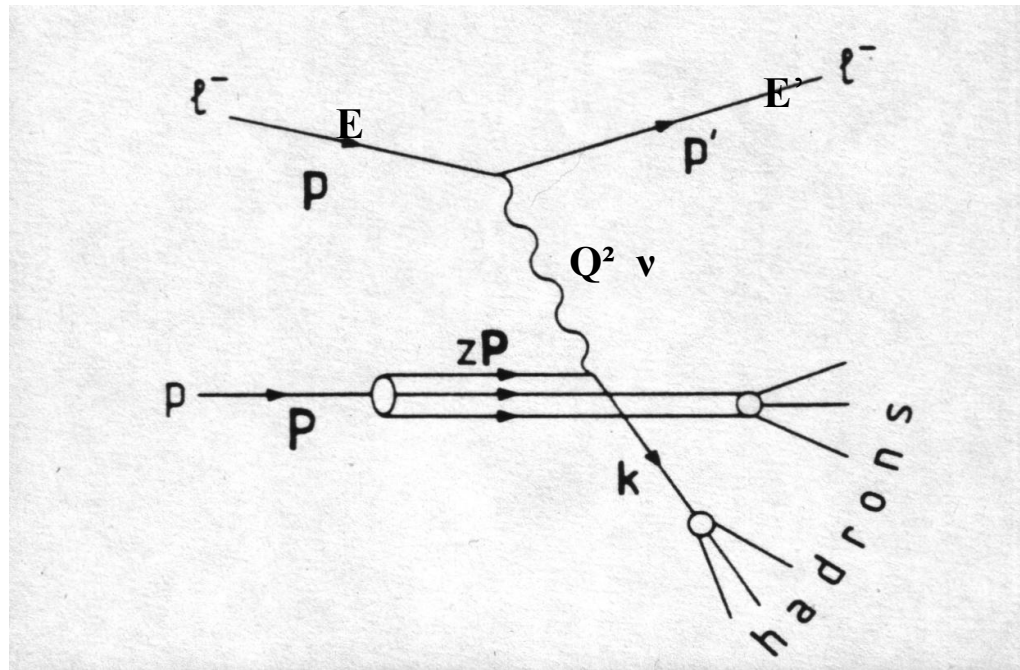
- p – импульс электрона, θ - азимутальный угол рассеяния
- $\alpha = 1/137$

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

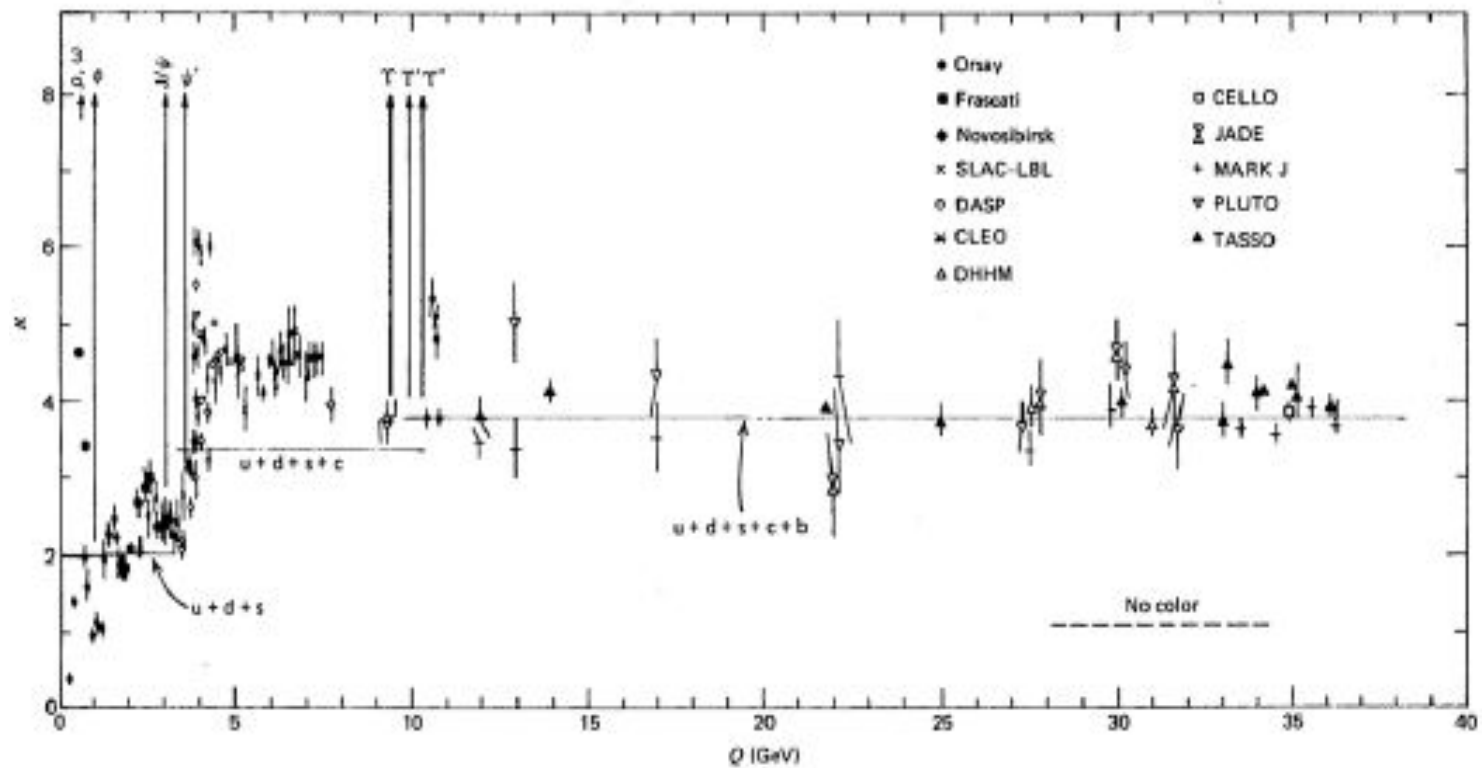
Партонь:

- 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.

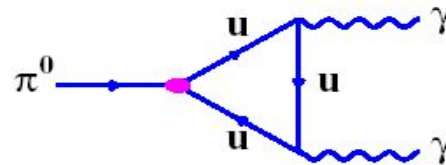
However quarks are FERMIONS, therefore require an ANTI-SYMMETRIC wave-function, *i.e.* need another degree of freedom, namely COLOUR.

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

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

★ $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 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)

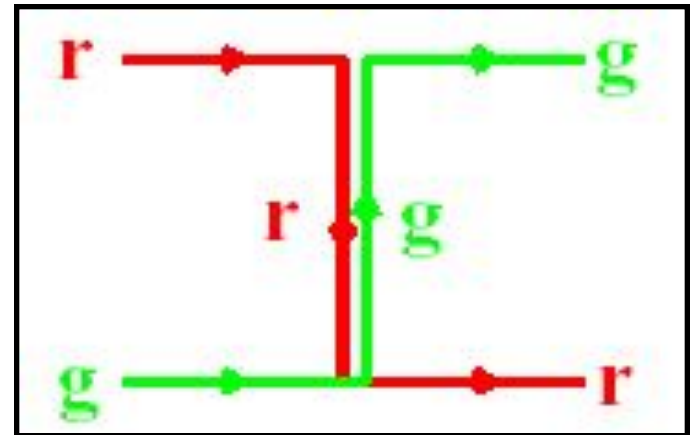
Неабелева калибровочная теория

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

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

Свойства КХД:

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



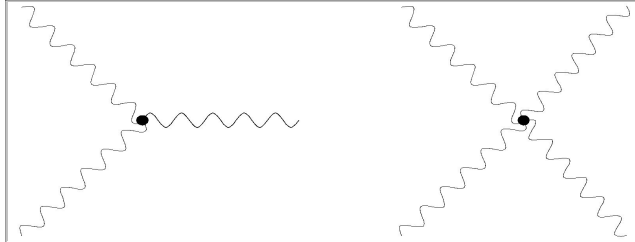
КХД и КЭД

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 :

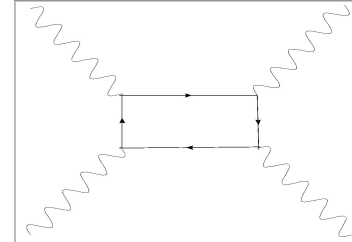
$$\text{конфайнмент } V(r) \sim \sigma \times r$$

Электромагнитные взаимодействия:

Частицы: Любые заряженные частицы

Переносчики: Фотоны (не имеют заряда)

Абелева Калибровочная теория




Сила взаимодействия:

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

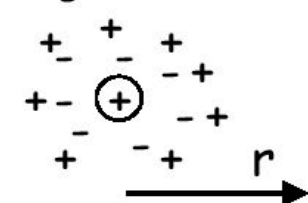
$$\alpha_{em} = \frac{1}{137}$$

Бегущий заряд




"screening" of the charge

like QED

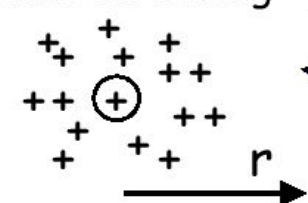


$\alpha_s(r) \uparrow$ if $r \downarrow$



"anti-screening"

non abelian



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

Who wins?

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

$Q \sim 1/r$

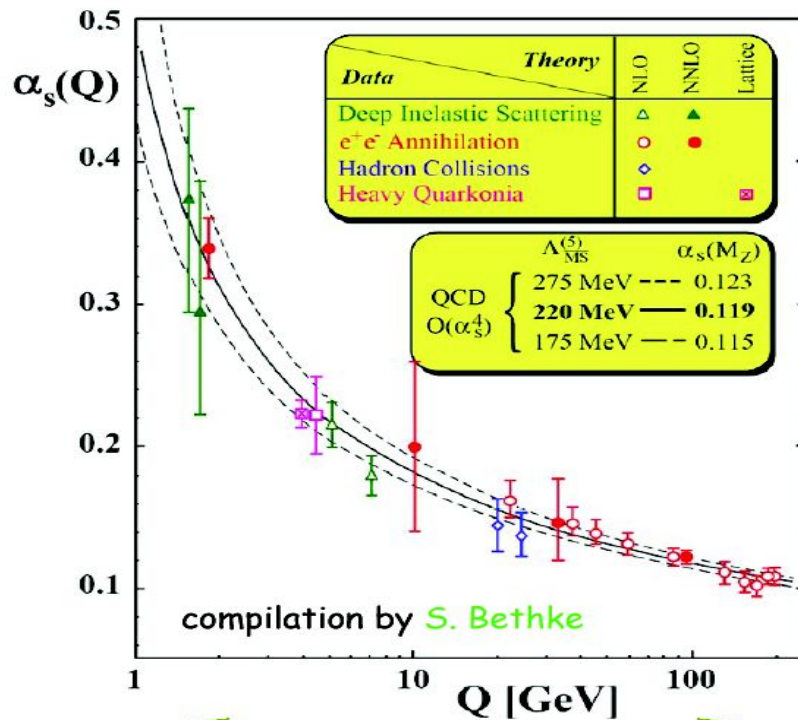
coupling at some reference scale Q_0

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

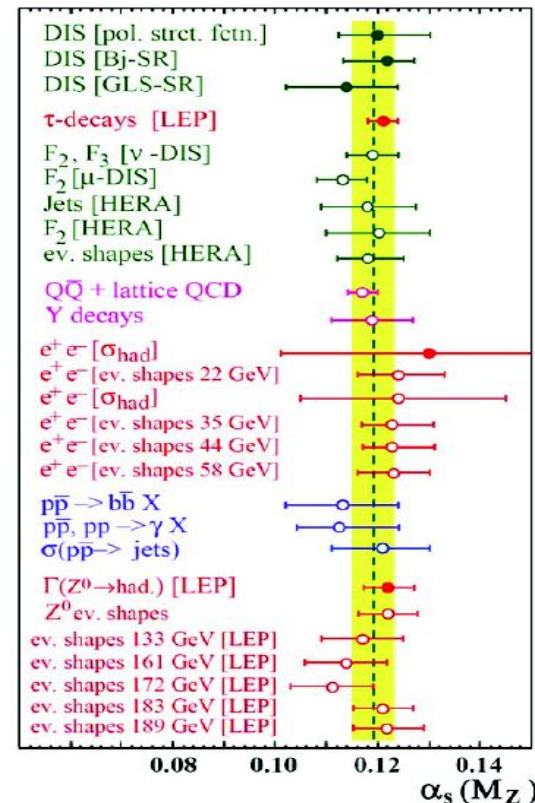
На малых расстояниях заряд - малый параметр!!!

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



37 794 уже пожертвовали.

Вы можете помочь проекту Википедия изменить мир!

» Пожертвовать!

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

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

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

Асимптотическая свобода и конфайнмент

Асимптотическая свобода

Нобелевская премия 2004 года

Д. Гросс

Д. Политцер

Ф. Вильчек

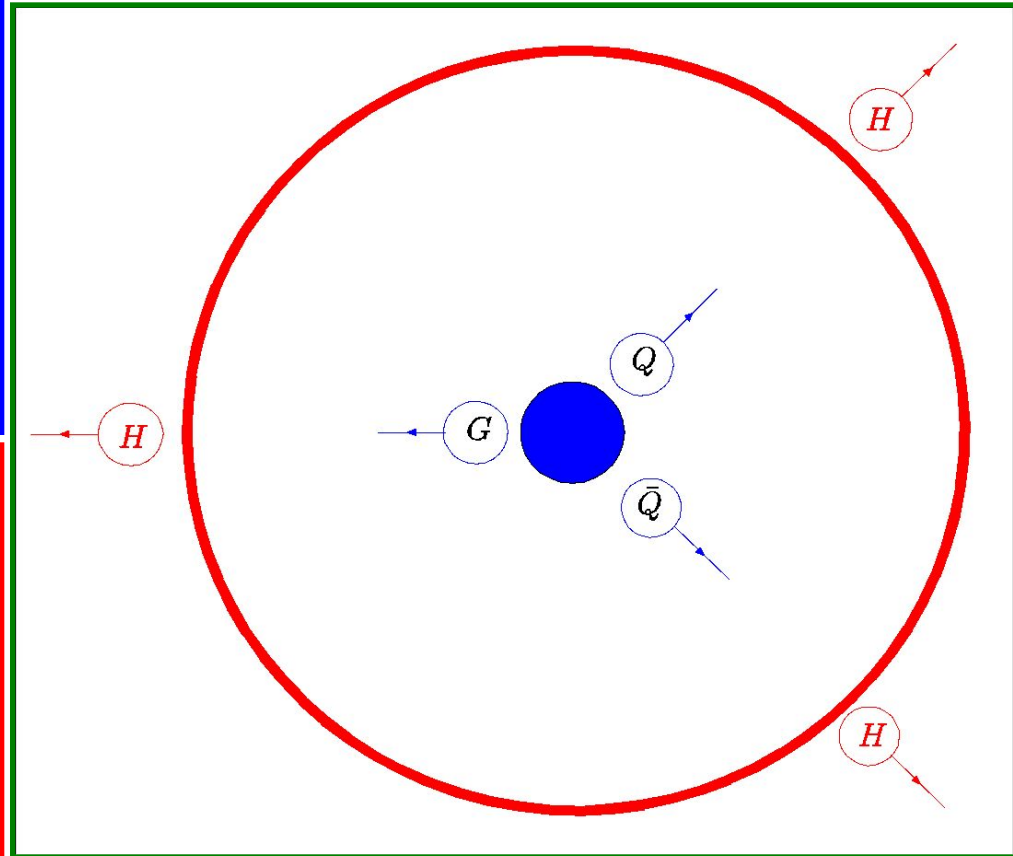


Конфайнмент

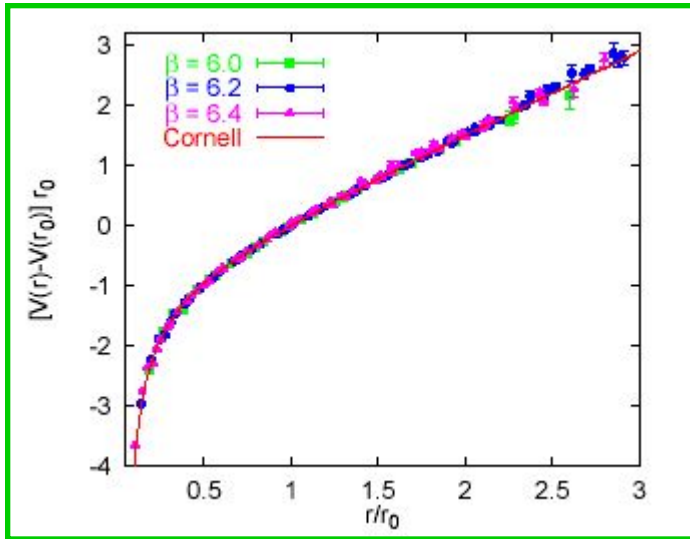
Проблема тысячелетия

(Математический институт Клэя, 1000000 \$)

Нобелевская премия ? года



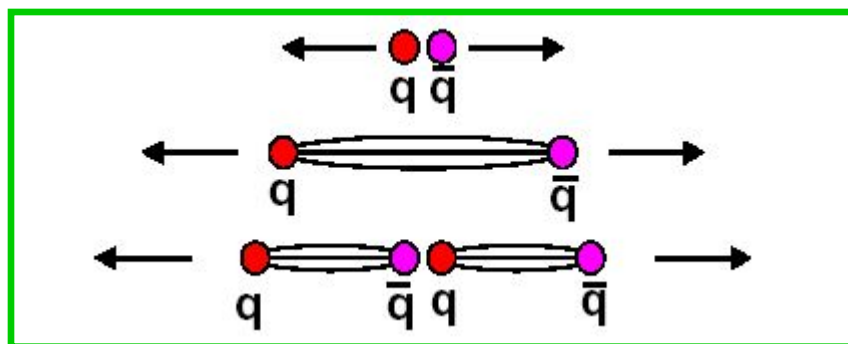
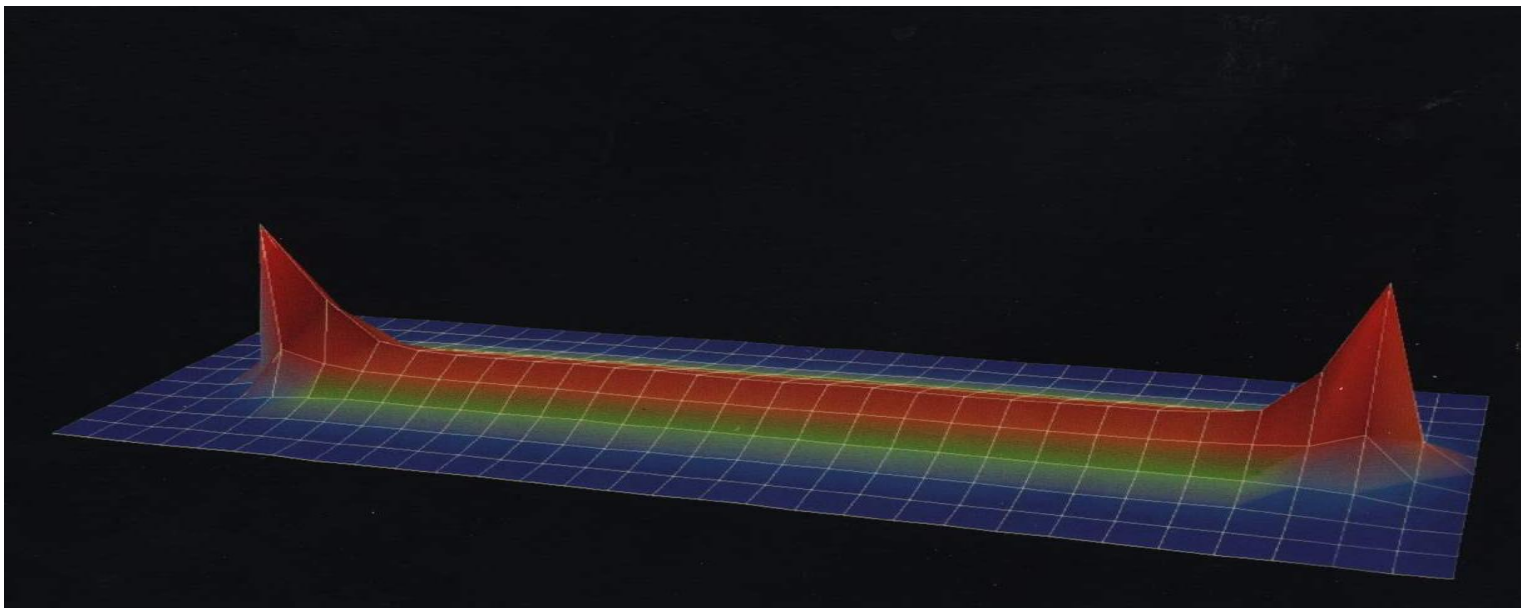
Конфайнмент



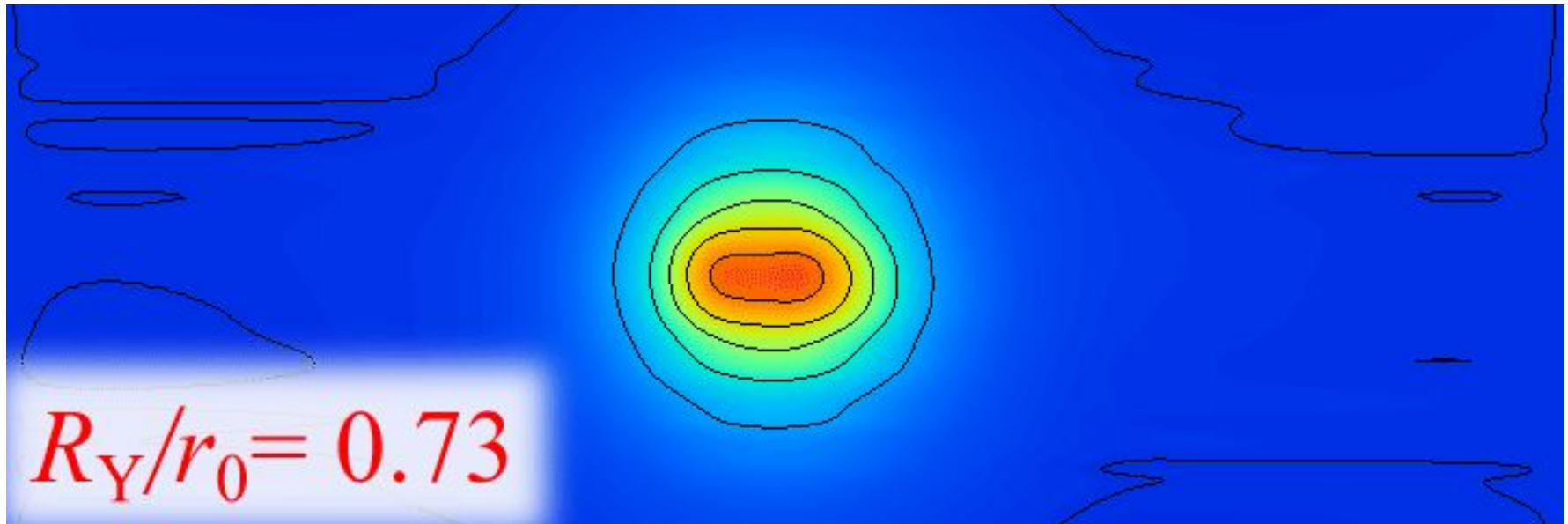
$V(r) \rightarrow kr$ при больших r
 $F = const \sim 16\,0000\text{ Н}$

Чтобы разделить кварки нужна бесконечная энергия!!!

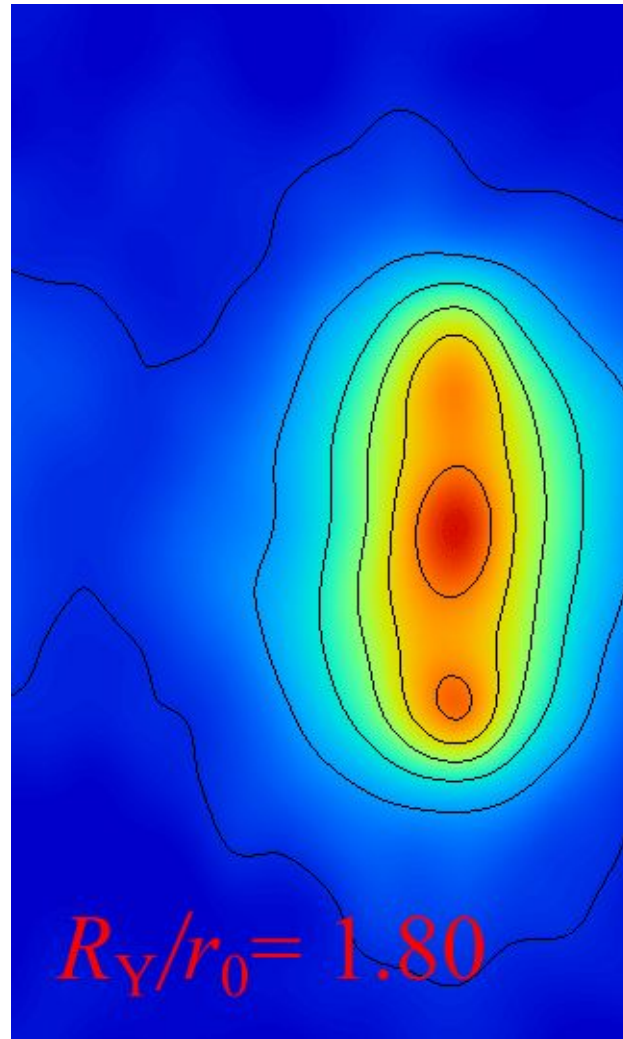
Разрыв струны



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

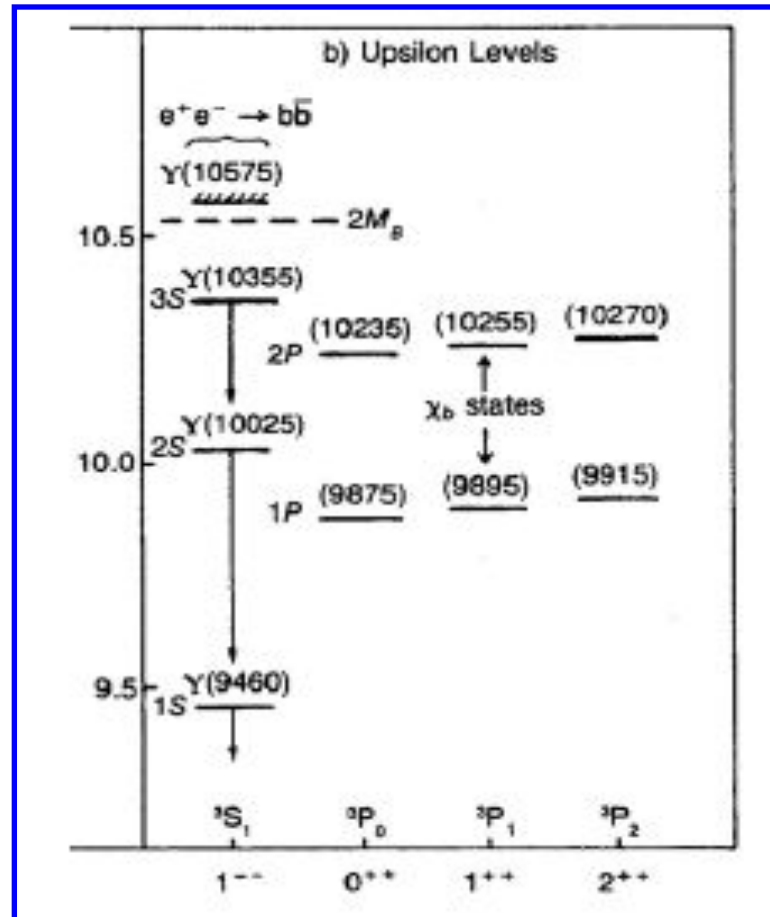
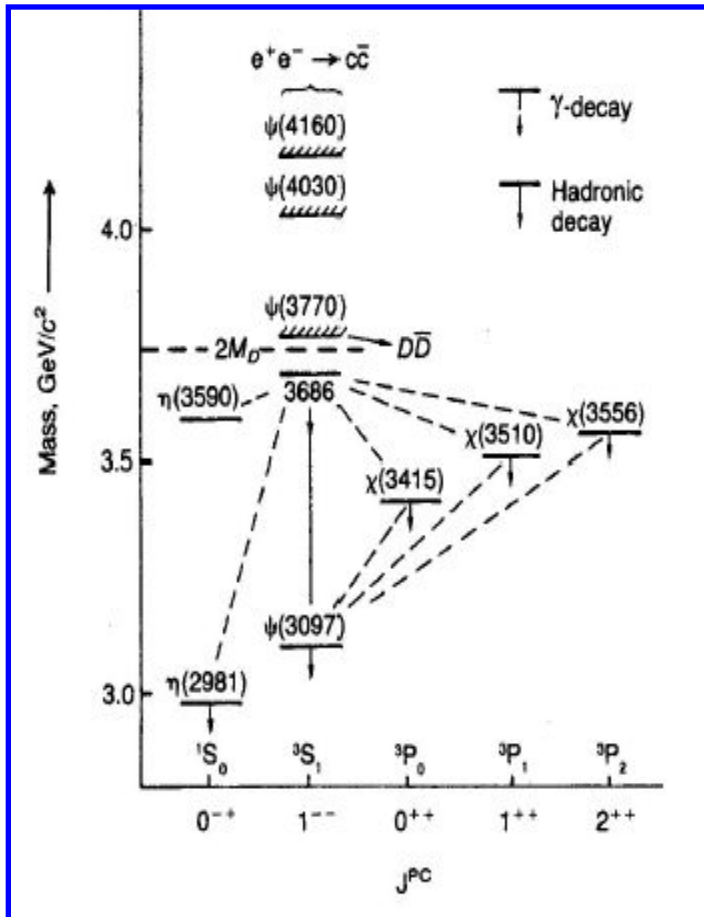
с потенциалом $V(r) = -\frac{\alpha_{em}}{r}$

Массовый спектр кваркония :
решение уравнения Шредингера

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

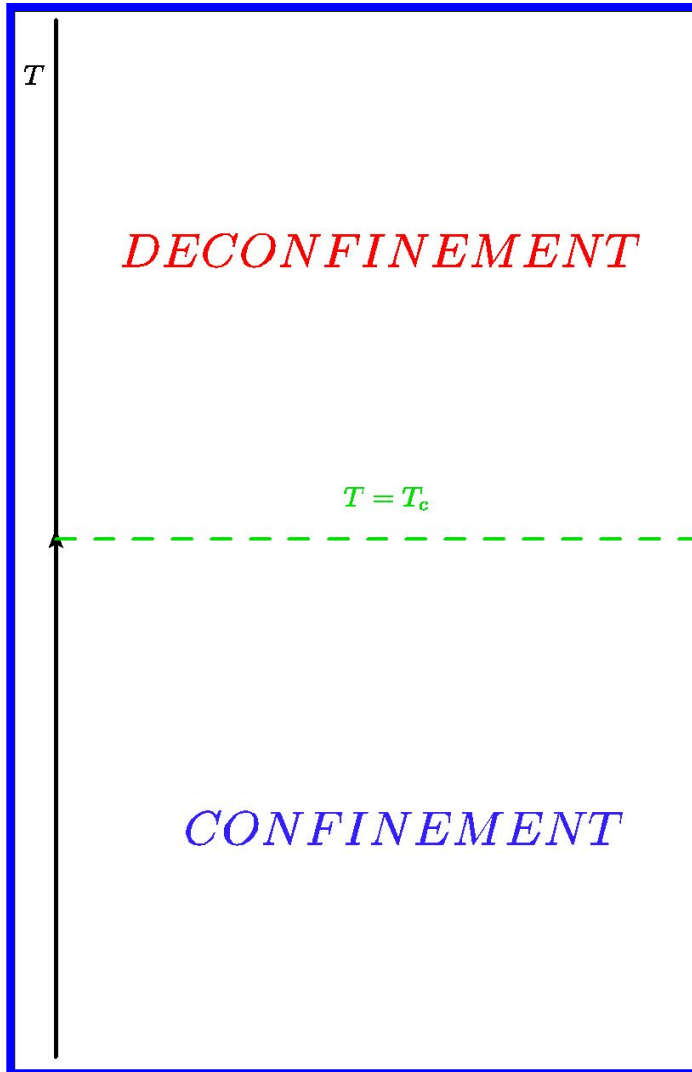
Универсальный потенциал взаимодействия!!!

Спектр чармониев и боттомониев

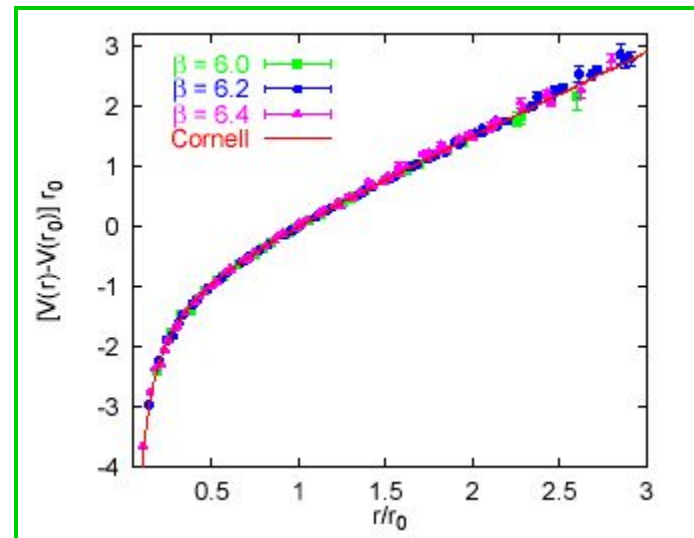


Заключение

Заключение



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



Спасибо за внимание
