

10 июня 2010

Кварки или Откуда берётся масса

Д.И.Дьяконов

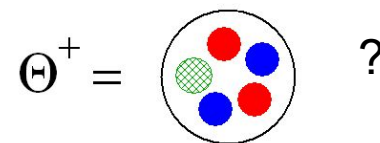
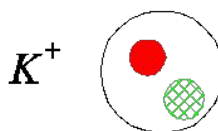
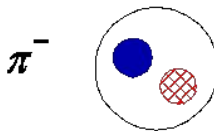
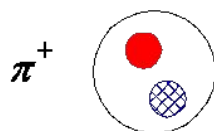
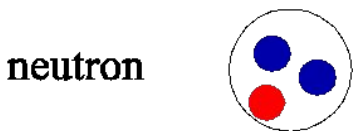
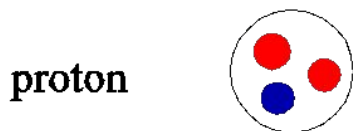
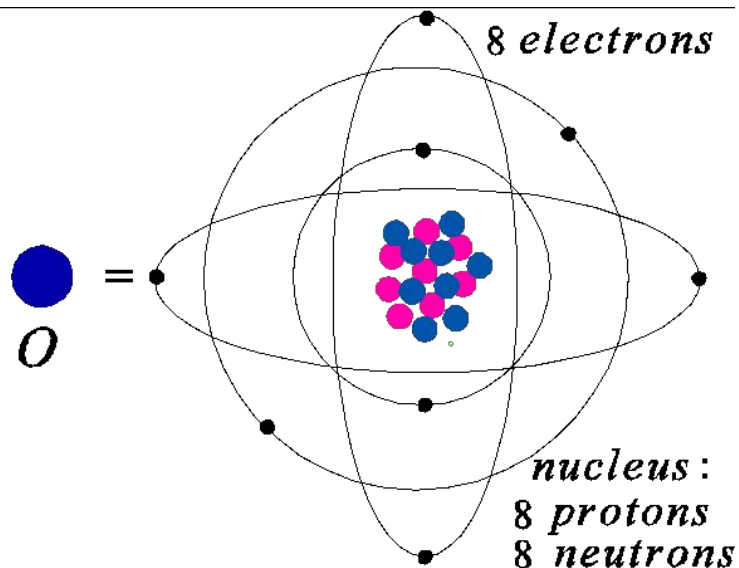
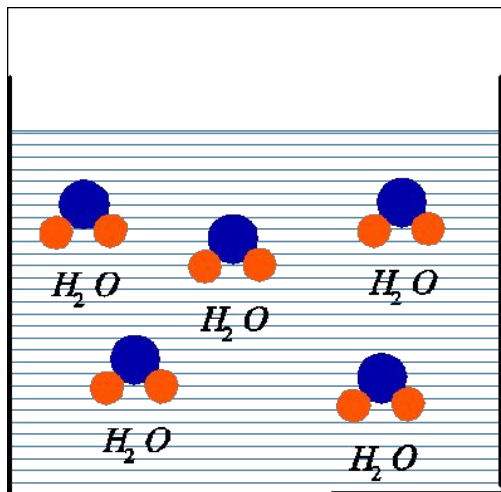
Петербургский институт ядерной физики
(ещё полгода)
Российской Академии Наук



Содержание

1. Фундаментальные частицы
2. Фундаментальные силы *или* любимая идея Б-га
3. Кривое пространство-время
4. Связанные состояния
5. Сложная жизнь пустого пространства
6. Откуда берётся масса протона
7. Что мы не понимаем

Связанные состояния разных размеров:



[Дьяконов, Петров, Поляков (1997)]

[Gell-Mann (1964), Zweig (1964)]

Фундаментальные частицы

Quarks:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \times 3 \text{ «цвет»} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \times 3 \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \times 3 \quad \text{Electric charge} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{pmatrix} \quad \text{в единицах заряда протона, +1}$$

Leptons:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \quad \text{Electric charge} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Masses: (принято измерять в единицах энергии, МэВ)

Электрон: $m_e = 0.5 \text{ MeV}$, $m_\mu = 106 \text{ MeV}$, $m_\tau = 1777 \text{ MeV}$

Кварки: $m_u \approx 4 \text{ MeV}$, $m_d \approx 7 \text{ MeV}$, $m_s \approx 150 \text{ MeV}$
(массы извлекаются косвенно, т.к. кварки в свободном виде не встречаются)

$$m_c \approx 1250 \text{ MeV}, m_b \approx 4500 \text{ MeV}, m_t \approx 175000 \text{ MeV}$$

MeV или мега-электрон-вольт = энергия, которую приобретает заряженная частица, пройдя разность потенциалов миллион вольт.

Протон, нейтрон: $m_p \approx m_n \approx 940 \text{ MeV} \approx 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$E = mc^2$$

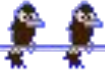
В вашем теле примерно $2 \cdot 10^{28}$ протонов и несколько больше нейтронов.

Фундаментальные силы

1. Гравитация $\sim G \frac{m_1 m_2}{r^2}$. Переносчик – безмассовый **гравитон**.
2. Слабые взаимодействия (радиус действия 10^{-18} м)
Ответственны за некоторые распады ядер и очень важны в звёздах. Переносчики – **W** и **Z** бозоны с большой массой.
3. Электромагнитные взаимодействия $\sim e^2 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
Переносчик – безмассовый **фотон**.
4. Сильные или «цветные» взаимодействия (радиус действия 10^{-15} м). Ответственны за «слипание» кварков в протоны и нейтроны, а последних – в ядра. Переносчик – восемь безмассовых **глюонов**.

Главная идея: «калибровочная инвариантность»

Eichinvarianz, gauge invariance [В.А.Фок (1926)]



Почему птичек не убивает высокое напряжение провода?

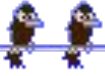
Потому что только **разность потенциалов** имеет физический смысл. Само значение потенциала $U(x,y,z)$ ненаблюдаемо, а наблюдаем, имеет физический смысл только градиент U , или напряжённость электрического поля \mathbf{E} :

$$E_x = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad E_y = \frac{\partial U}{\partial y}, \quad E_z = \frac{\partial U}{\partial z}.$$

На той же идее построены **ВСЕ** фундаментальные взаимодействия, например,

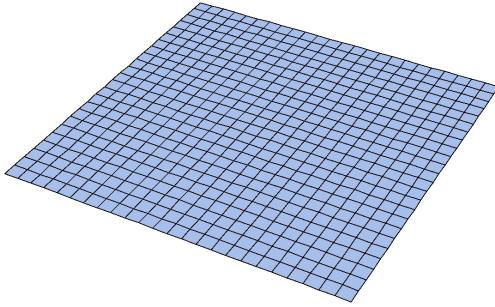
сам по себе «цвет» кварка ненаблюдаем, а только *изменение* цвета в пространстве и времени имеет физические последствия.

Идея, что ничего не должно зависеть от «выбора координат»
лежит в основе всех фундаментальных взаимодействий

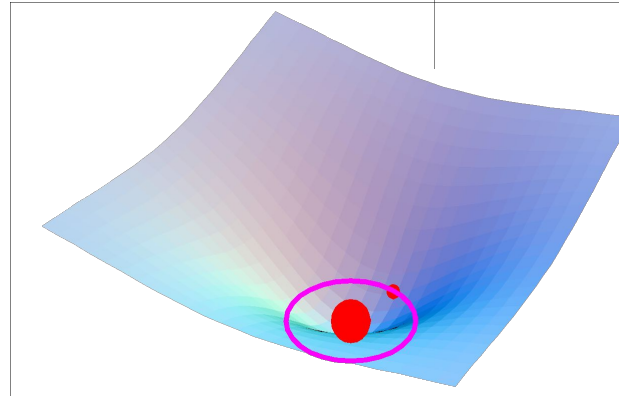
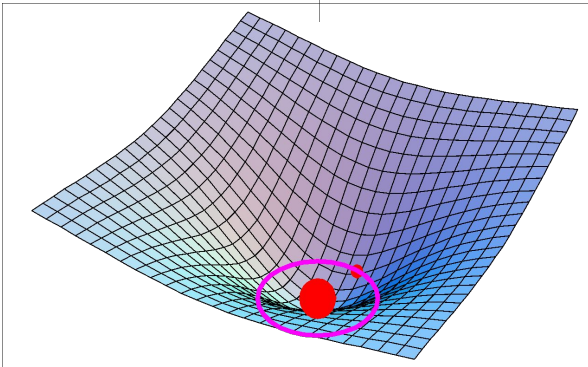
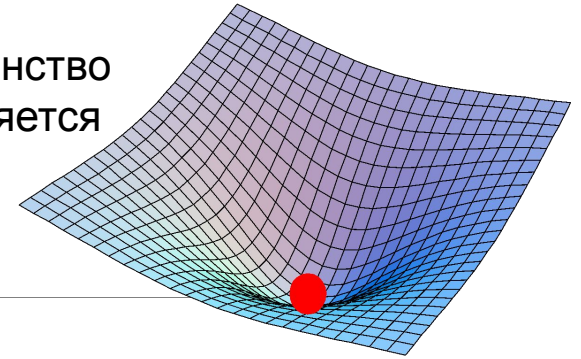


Гравитация или Общая теория относительности Эйнштейна (1915).

Плоское простран-
ство без материи



Пространство
искривляется
массой



Движение Земли в пространстве,
искривлённом Солнцем.
Показана координатная сетка.

Наблюдаемые – орбита Земли – зависит только
от кривизны, но не должны зависеть от выбора
координат, описывающих кривое пространство.

«Цветные» взаимодействия кварков

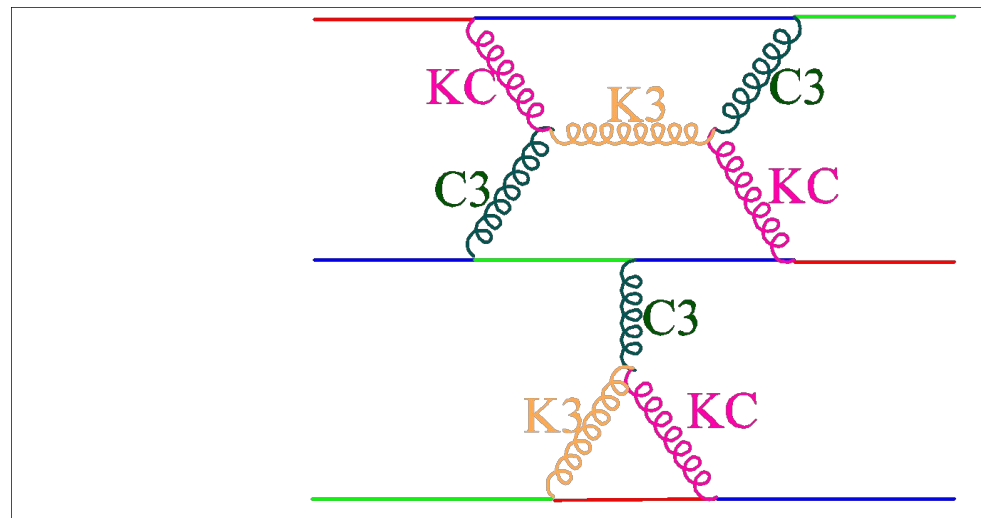
Каждый из 6 сортов кварков u, d, s, c, b, t имеет ещё по три «цвета»: «красный», «синий», «зелёный». «Переливаясь цветами», кварки испускают и поглощают глюоны, коих 8 штук:

(K_C), (K_3), (3_C), (C_K), (C_3), (3_K), ($KK - CC$) и ($KK + CC - 233$).

Квантовая хромодинамика! [Gell-Mann, Fritsch, Minkowski (1972)]

протон в разрезе

$u u d$



Примеры связанных состояний:

- молекулы, фуллерены – связанные состояния атомов.

Энергия связи ~ 1 эВ, дефект массы $\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-9}$

- атомы – связанные состояния электронов и ядер.

Энергия связи ~ 10 эВ, дефект массы $\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-8}$

- ядра - связанные состояния протонов ($Q=+1$) и нейтронов ($Q=0$)

Энергия связи ~ 10 МэВ, дефект массы $\frac{\Delta m}{m} \sim 10^{-3}$

- протоны, нейтроны – связанные состояния кварков.

Обычно:

Масса составного объекта = масса составляющих – (**минус**) энергия связи, он же дефект масс.

Так было всегда, НО ВДРУГ

Масса протона = 940 МэВ,
масса составляющих кварков (uud) = 4 + 4 + 7 = 15 МэВ !!?!

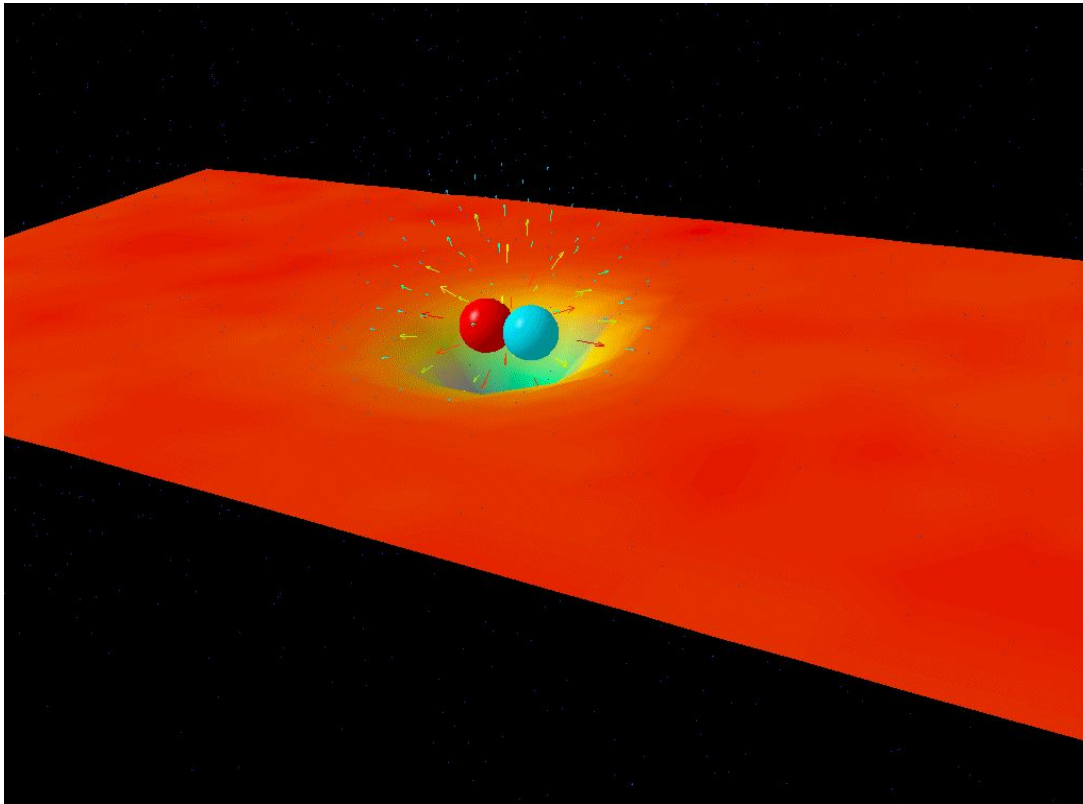
Масса протона значительно больше массы составляющих кварков!

ОТКУДА У ПРОТОНА МАССА ??

(Масса нашего тела на 99.95% задаётся массой протонов и нейтронов внутри нас, а оставшиеся 0.05% - это масса электронов.)

Ещё одна несуразица:

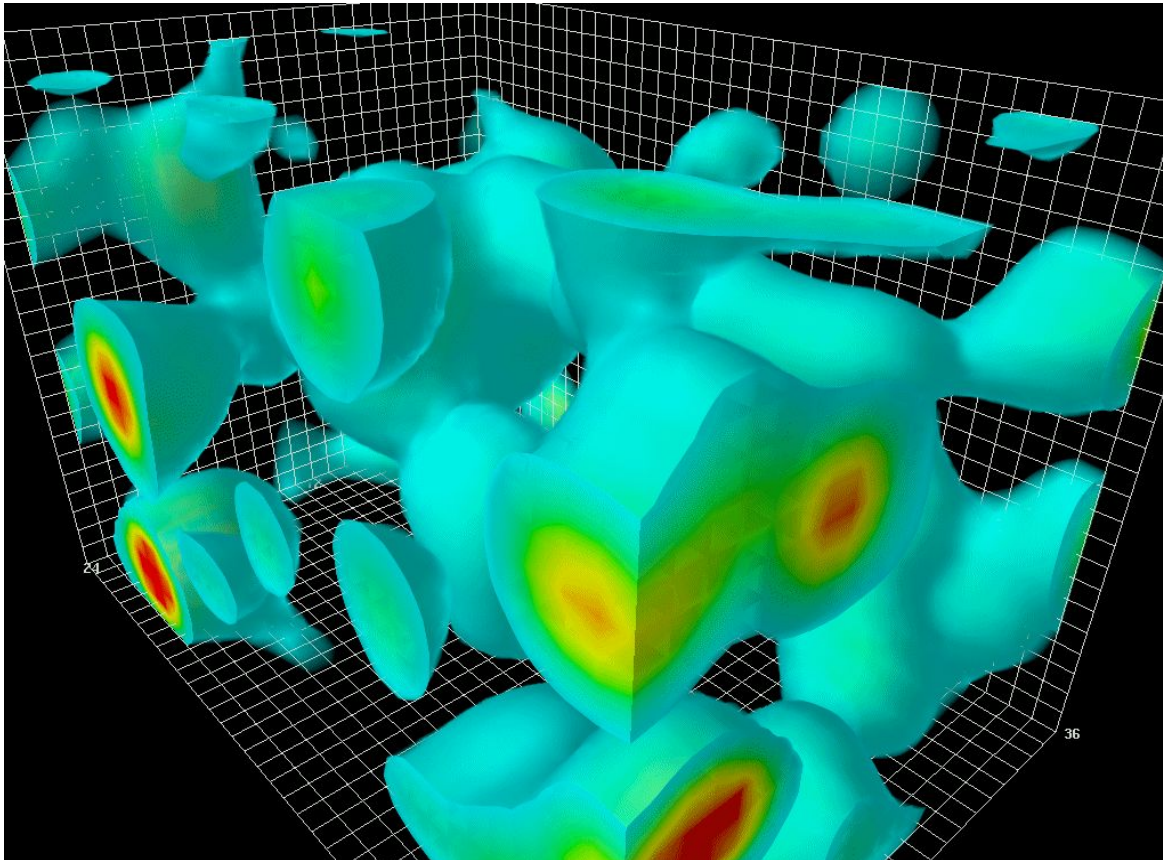
Все известные связанные состояния, кроме нуклонов, можно, затратив некоторую **энергию связи**, разъять на составляющие. Кварки же **не существуют в свободном виде**, принципиально!!! Считается, что между ними действует сила притяжения даже при сколь угодно большом разведении, равная 14 тонн!!



Понять это нелегко...

Новый принципиальный элемент: сложная жизнь пустого пространства - вакуума

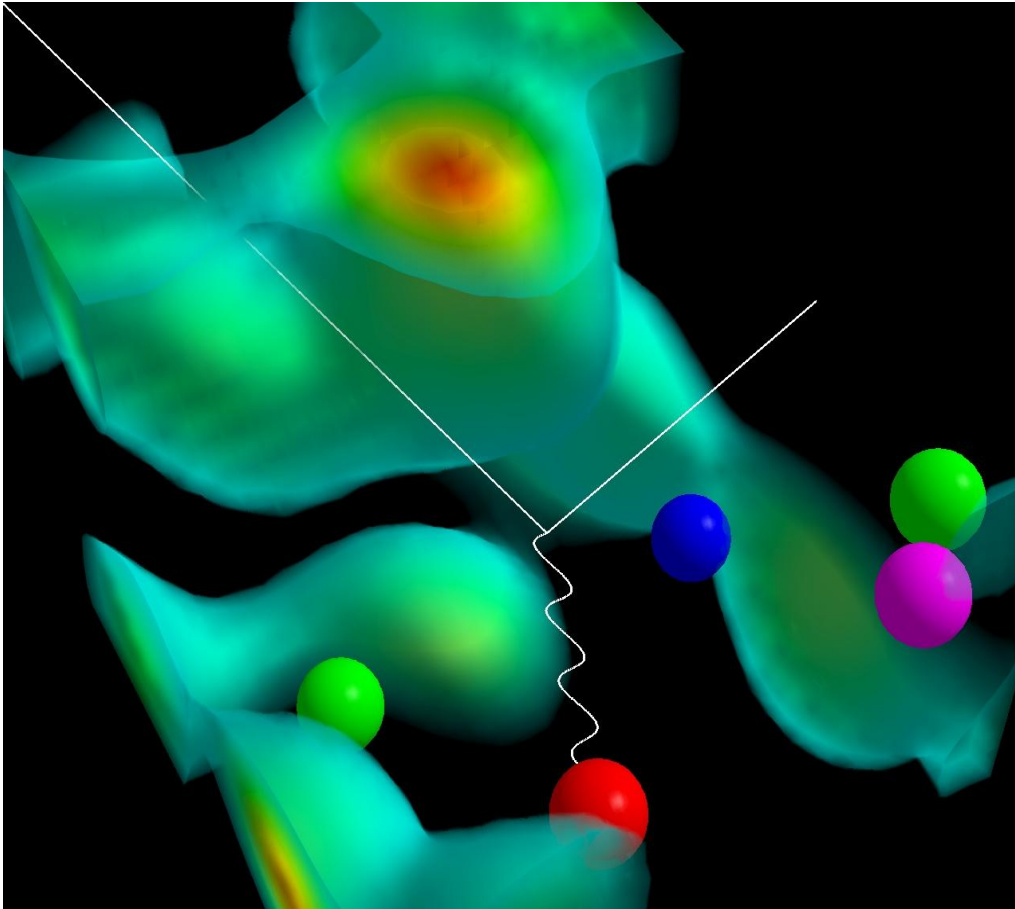
В вакууме всё время происходят большие нелинейные флуктуации поля глюонов с характерным размером 10^{-15} м .



Наличие или отсутствие
материи почти не
сказывается на
вакуумных флуктуациях

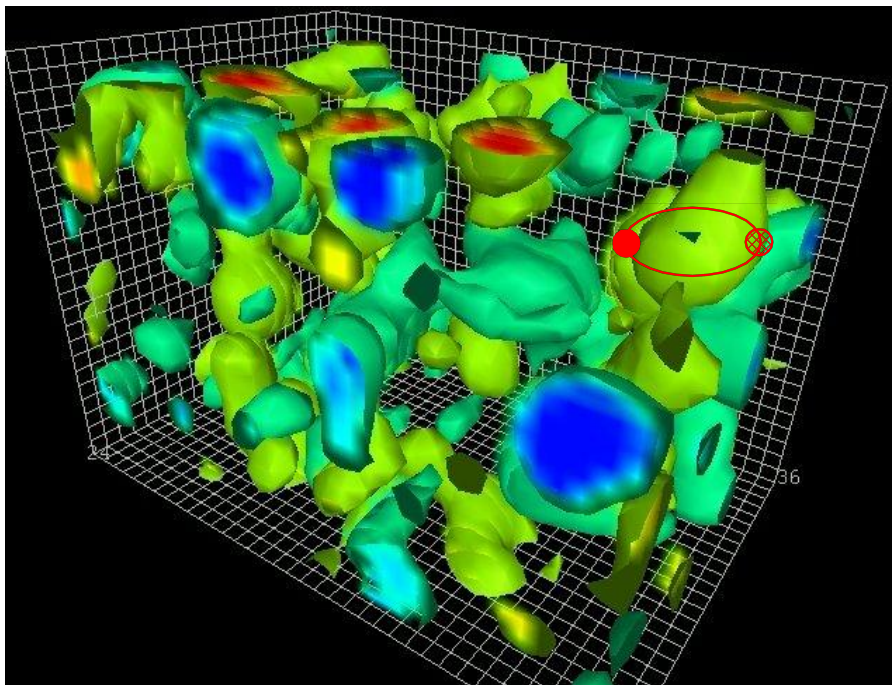
Анимация сделана на основе
довольно точного компьютерного
моделирования реального мира.
Courtesy: Derick Leinweber

Нуклон в разрезе



Кварки внутри протонов и нейтронов находятся в «среде» больших флуктуаций глюонного поля, которые и определяют все свойства!

Как почти безмассовый кварк приобретает массу?



Общая идея:

Вакс и Ларкин (1961)

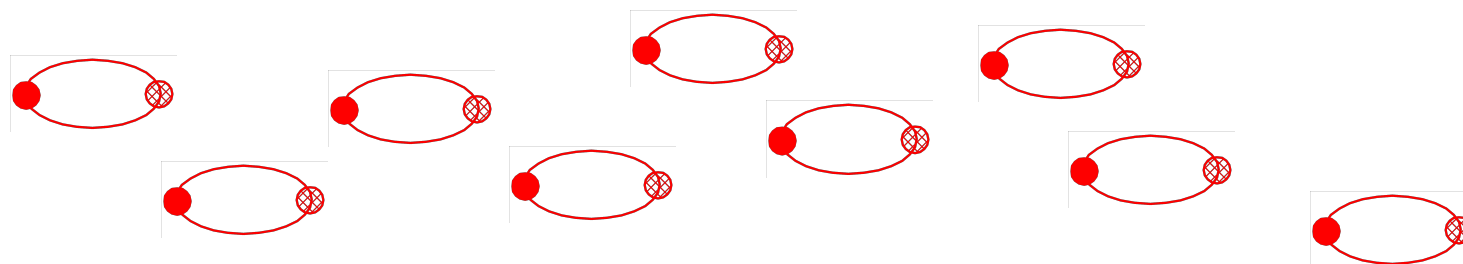
Nambu (1961) (нобелевская
премия 2008, см. polit.ru)

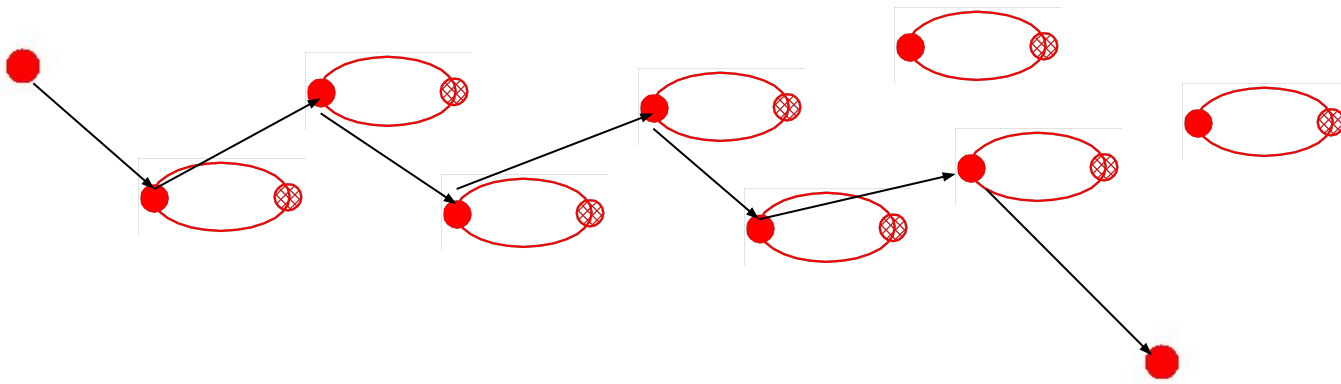
Реализация

в квантовой хромодинамике:

Дьяконов и Петров (1986)

Вакуумные флуктуации глюонного поля (в пустом пространстве) наводят сильную корреляцию кварков и анти-кварков, которые из-за этого «склеиваются» и образуют во всём пустом пространстве квантовый конденсат $q\bar{q}$ пар:





Кварк, летая в конденсате из пар, заменяет по очереди кварки внутри пар и приобретает в результате массу! (То же происходит с анти-кварком.)

было исходно
«затравочная масса»

u (4 MeV), d (7 MeV)

стало в результате «спонтанного
нарушения киральной симметрии»

330 MeV



$330 \text{ MeV} \times 3 = 990 \text{ MeV}$, а масса протона 940 MeV, почти что надо.

На самом деле это – квантовый эффект, «житейского» аналога которому нет. Ближайшая аналогия – конденсация куперовских пар в сверхпроводнике, благодаря которой материал становится сверхпроводящим.

Вилла на территории пивоварни Carlsberg в Копенгагене, где 30 лет жил Niels Bohr, создатель квантовой механики



CARLSBERG AKADEMI

Что мы не понимаем?

- 1) Почему кварки никогда «не вылетают» из протонов и нейтронов
- 2) Из чего состоит невидимая или «тёмная» материя, составляющая 80% массы Вселенной
- 3) Откуда берутся исходные массы фундаментальных частиц (кварков и лептонов), и почему они такие, а не другие
- 4) Все четыре фундаментальные взаимодействия построены явно по одному принципу, хочется их объединить в единую теорию, включая квантовую гравитацию

В конце XIX века было два «тёмных облачка» – не объяснённый фотоэффект и опыт, показывающий, что нет эфира. Из первого «выросла» квантовая теория, из второго – теория относительности, которые не только перевернули наше понимание мира, но изменили всю жизнь и быт.

По опыту прежнего, ответы на вопросы выше тоже могут изменить нашу жизнь до неузнаваемости...