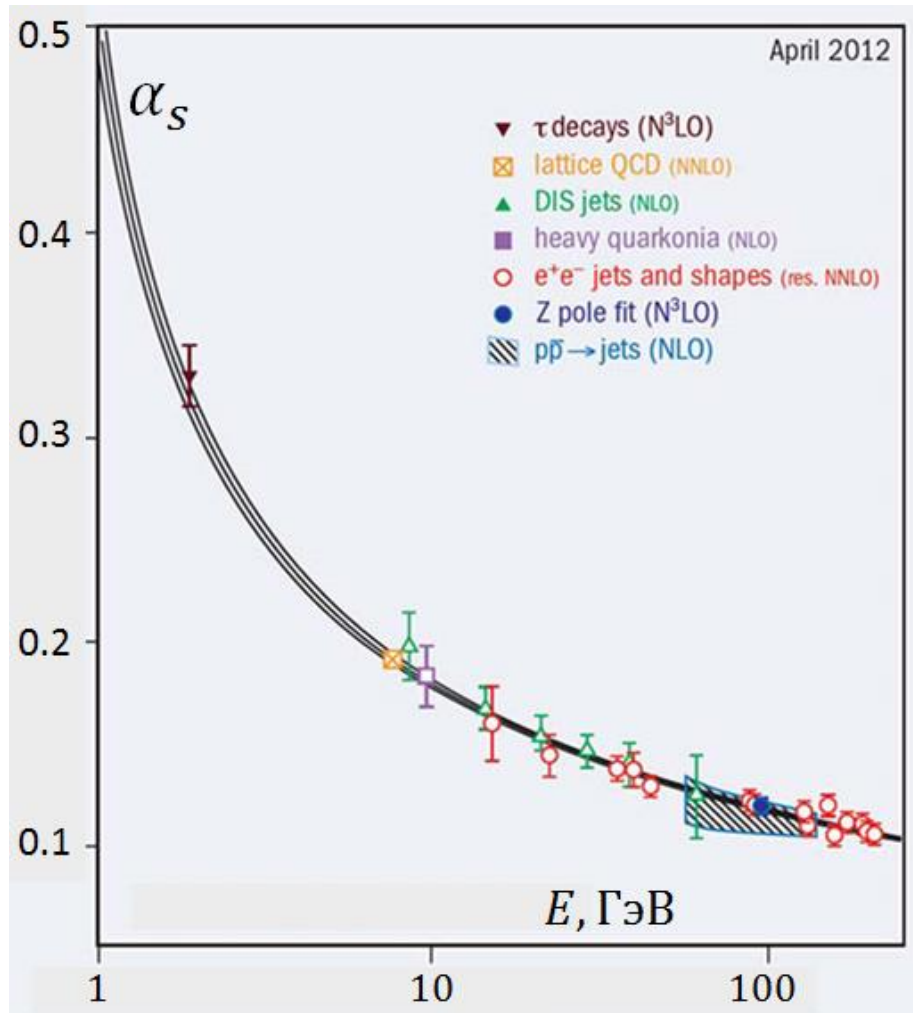


Асимптотическая свобода



Вильчек Гросс Политцер



1973



2004

Темы лекции

1. Сравнение квантовой электродинамики (**КЭД**) и квантовой хромодинамики (**КХД**).
2. Активность вакуума. Его поляризация. Реальность виртуальных частиц.
3. Экранировка электрического заряда в **КЭД** и антиэкранировка цветового заряда в **КХД**.
4. Асимптотическая свобода в сильном взаимодействии. Невылетание кварков.
5. Внутри протона.

Стандартная связь радиуса сил a
с массой кванта поля m : $a = \hbar c / mc^2$

Фундаментальные взаимодействия (поля)

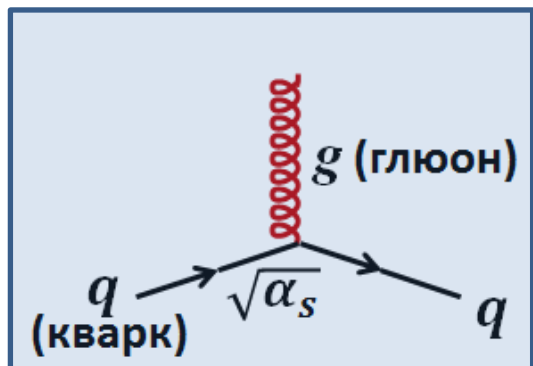
Поле Теория	Const α	Квант поля		Радиус сил (см)
		Тип	Спин-чётность, масса	
Сильное КХД	1	глюон	$1^-, m = 0$	10^{-13}
Эл-магн. КЭД	10^{-2}	фотон	$1^-, m = 0$	∞
Слабое ЭСМ	10^{-6}	$W^\pm, Z$	Спин 1, масса = 80, 4 и 91, 2 ГэВ/ c^2	10^{-16}
Гравита- ционное	10^{-38}	гравитон	Спин 2, $m = 0$	∞

?

КХД – квантовая хромодинамика
КЭД – квантовая электродинамика
ЭСМ – электрослабая модель
+ Хиггсовское поле (Лекция 6, Приложение 2)

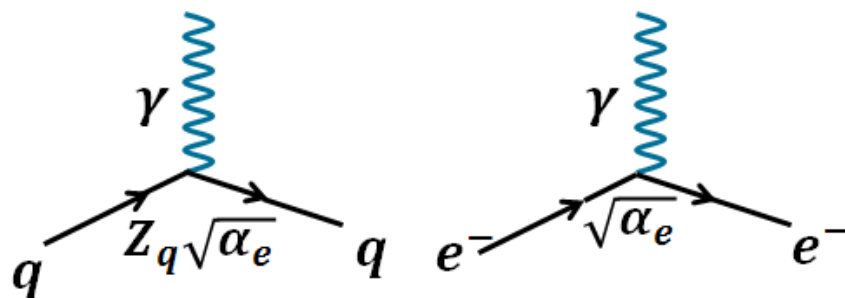
Стандартная
Модель
элементарных
частиц

Но это не единственный узел
сильного взаимодействия!

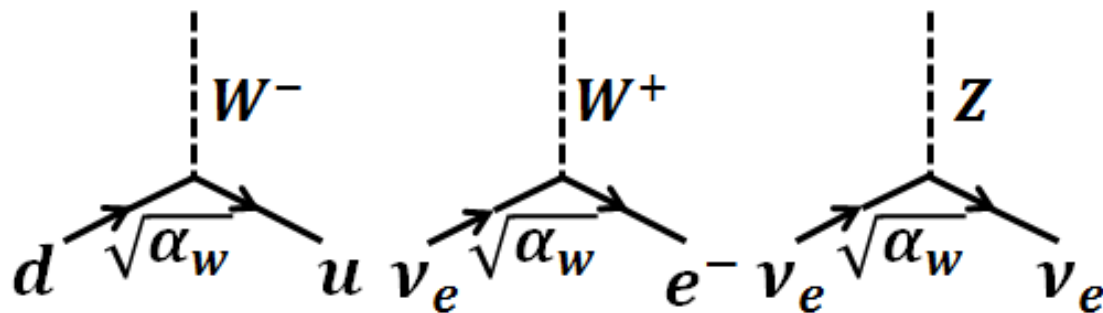


Сильное

**Типичные узлы
фундаментальных
взаимодействий**



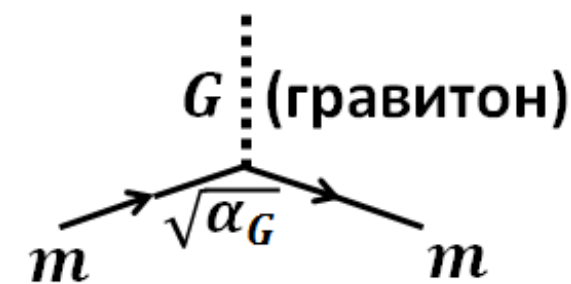
Электромагнитное



Слабое

Слабое

Слабое



Гравитационное

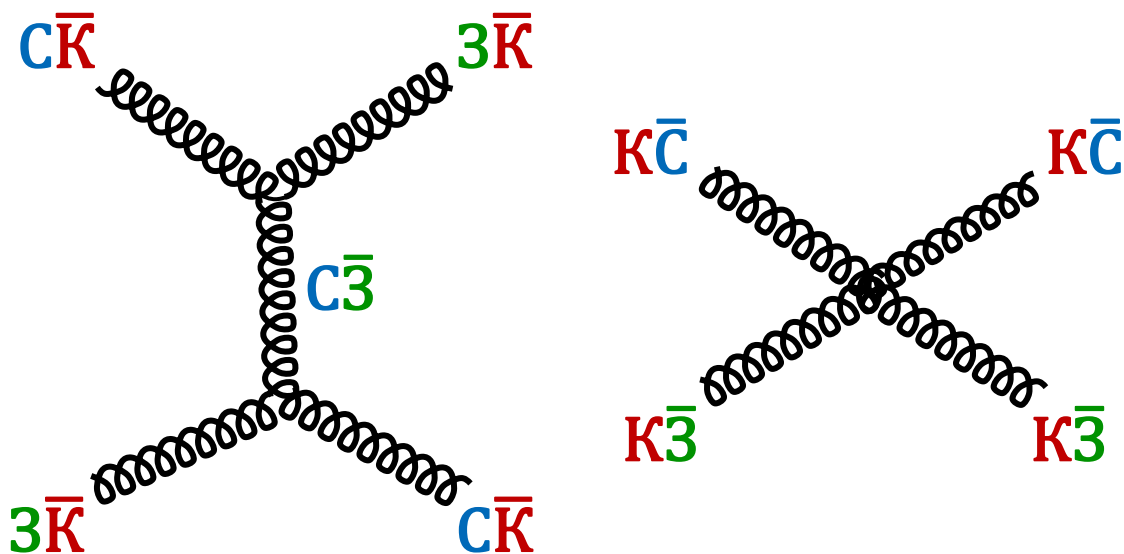
Сравнение КЭД и КХД. Экранировка и антиэкранировка заряда. Асимптотическая свобода.

В **КХД** (теории сильного взаимодействия),
в отличие от **КЭД**
(теории электромагнитного взаимодействия),
имеется не один (**фотон**),
а восемь переносчиков взаимодействия – **глюонов**.

Это связано с наличием цвета и с тем,
что сами глюоны (как и кварки) окрашены,
т.е. несут цветовой заряд, исполняющий роль
заряда сильного взаимодействия.

**Глюоны сами участвуют в сильном взаимодействии
не только с кварками, но и с другими глюонами.
Глюоны способны испускать и поглощать глюоны.**

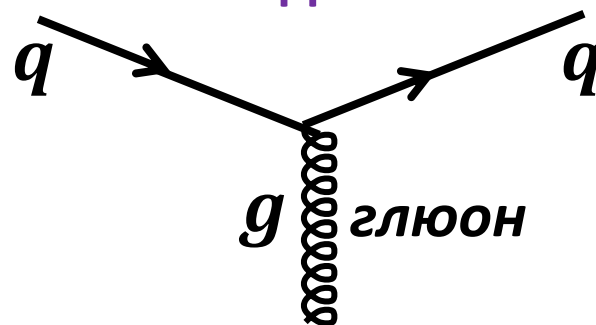
Специфические узлы сильного взаимодействия:



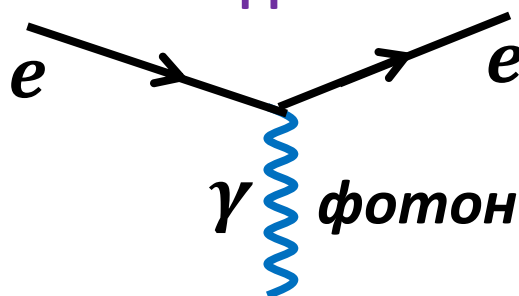
В узлах этих глюонных диаграмм выполняется закон сохранения цвета

Традиционные узлы:

Сильное взаимодействие



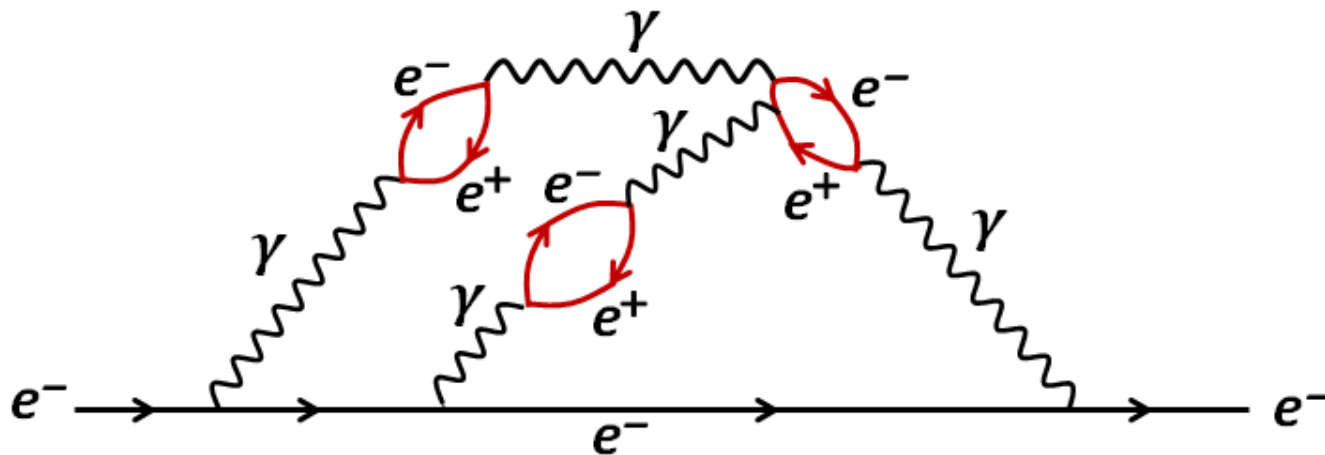
Электромагнитное взаимодействие



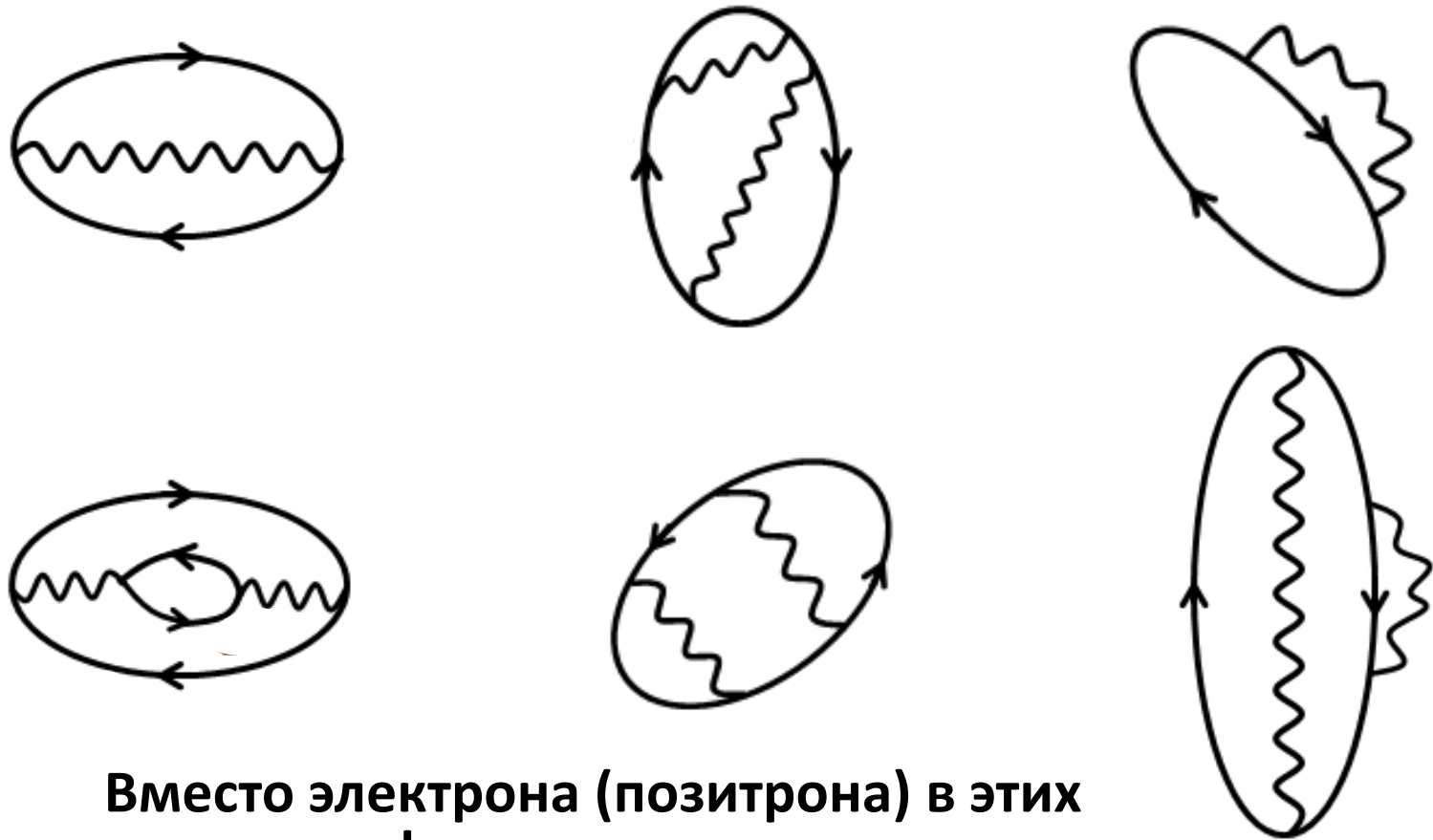
Сумма диаграмм,
описывающих свободный электрон:

$$e^- = \rightarrow_{e^-} + \begin{array}{c} \gamma \\ \text{loop} \end{array} \rightarrow_{e^-} + \begin{array}{c} \gamma \\ \text{loop} \end{array} \rightarrow_{e^-} \gamma + \begin{array}{c} \gamma \quad \text{loop} \quad \gamma \\ \text{loop} \end{array} \rightarrow_{e^-} \dots$$

Одна из возможных диаграмм,
отвечающих свободному электрону:



Квантовые флуктуации вакуума (его электромагнитная поляризация)



Вместо электрона (позитрона) в этих вакуумных флуктуациях участвуют все заряженные частицы и их античастицы

**Три наиболее очевидных свидетельства
реальности виртуальных частиц
и активности вакуума (его поляризации):**

1. Магнитный момент электрона на 0,1% больше того, который должен быть для «голового» (дираковского) электрона. **1947 г. P. Kusch, Nobel Prize 1955.**
2. Расщепление уровней $2s_{1/2}$ и $2p_{1/2}$ атома водорода (лэмбовский сдвиг уровней).
1947 г. W. Lamb, Nobel Prize. 1955.
3. Эффект Казимира (**Н. Casimir, 1948 г.**). Притяжение проводящих незаряженных тонких металлических пластин под действием квантовых флуктуаций вакуума.



Kusch



Lamb



Casimir

КЭД – квантовая электродинамика,
Nobel Prize 1965 г.,
Томонага, Швингер, Фейнман

Магнитный момент электрона:

$$\mu_e = \begin{cases} 1,001159652181(4) & \mu_B \\ 1,001159652180(91 \pm 26) & \mu_B \end{cases}$$

КЭД
Эксперимент

Без учета квантовых флуктуаций вакуума
магнитный момент электрона μ_e
точно равен **1** в магнетонах Бора μ_B

Эффект Казимира

В вакууме рождаются и исчезают виртуальные фотоны, соответствующие всем длинам волн электромагнитного спектра.

Однако в пространстве между близко расположенными проводящими поверхностями ситуация меняется. В нём возможны лишь такие волны, длины которых целое или полуцелое число раз укладываются между поверхностями (**допустимы только такие флуктуации электромагнитного поля, значения которых равны нулю в месте расположения каждой пластины**). Возбуждение волн с другими длинами (а их больше) в этом промежутке подавляется, то-есть, подавляется рождение соответствующих виртуальных фотонов.

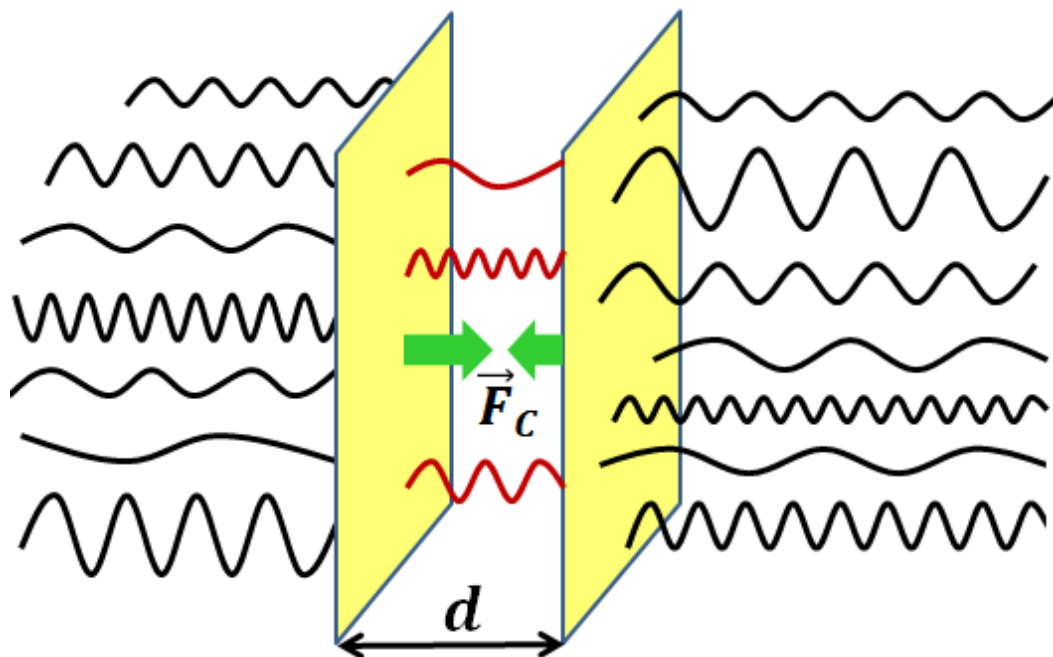
В результате, **давление виртуальных фотонов изнутри на две поверхности оказывается меньше, чем давление на них извне**, где рождение фотонов ничем не ограничено.

Чем ближе друг к другу поверхности, тем меньше длин волн между ними оказываются в резонансе и больше — оказываются подавленными.

Как следствие, растёт сила притяжения между поверхностями.

Эффект подтверждён экспериментально с точностью 1-3%.

Эффект Казимира это прямое механическое проявление флуктуаций вакуума



$$\text{Сила Казимира: } \frac{F_C}{S} = \frac{\hbar c \pi^2}{240 d^4}$$

Для пластин в форме игральных карт, отстоящих друг от друга на расстоянии 10^{-4} см, сила Казимира равна *весу одной капли росы*

Аналогия

Эффект, аналогичный эффекту Казимира, наблюдался ещё в **XVIII** веке французскими моряками.

Когда два корабля, раскачивающихся из стороны в сторону в условиях сильного волнения, но слабого ветра, оказывались на расстоянии меньше приблизительно **40** метров,

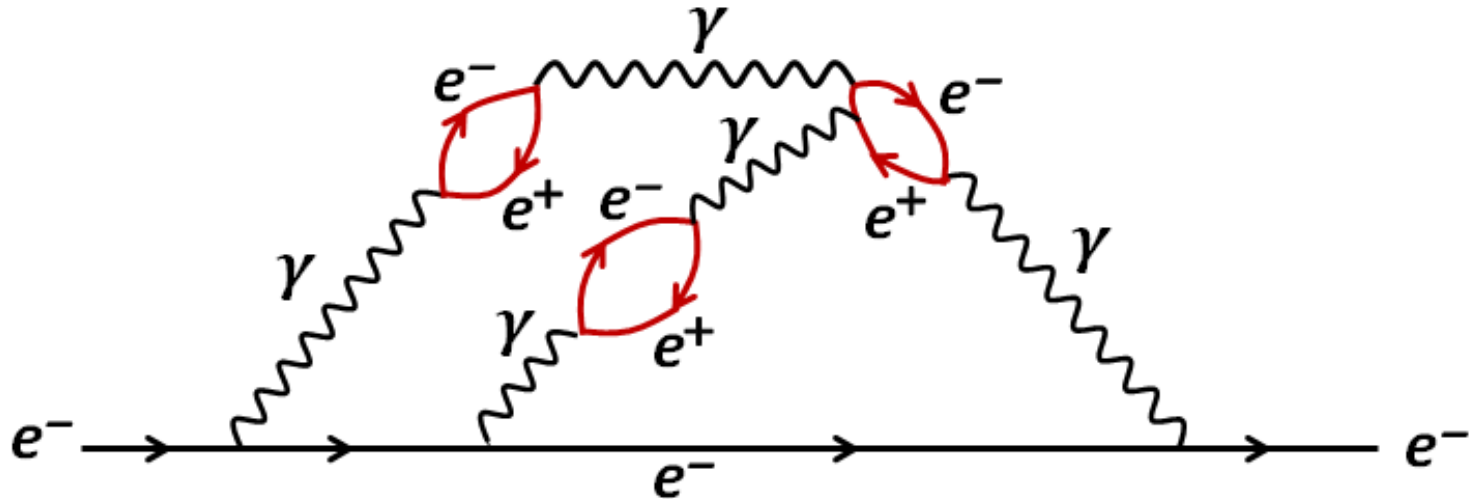
то в результате уменьшения числа типов волн в пространстве между кораблями волнение затихало.

Успокойное море между кораблями создавало меньшее давление, чем волнующееся с внешних сторон.

В результате возникала сила, стремящаяся столкнуть корабли. В качестве контрмеры, руководство по мореплаванию начала **1800**-х годов рекомендовало обоим кораблям послать по шлюпке с **10-20** моряками, чтобы расталкивать корабли.

Экранировка электрического заряда в КЭД

Одна из возможных диаграмм,
отвечающих свободному электрону:

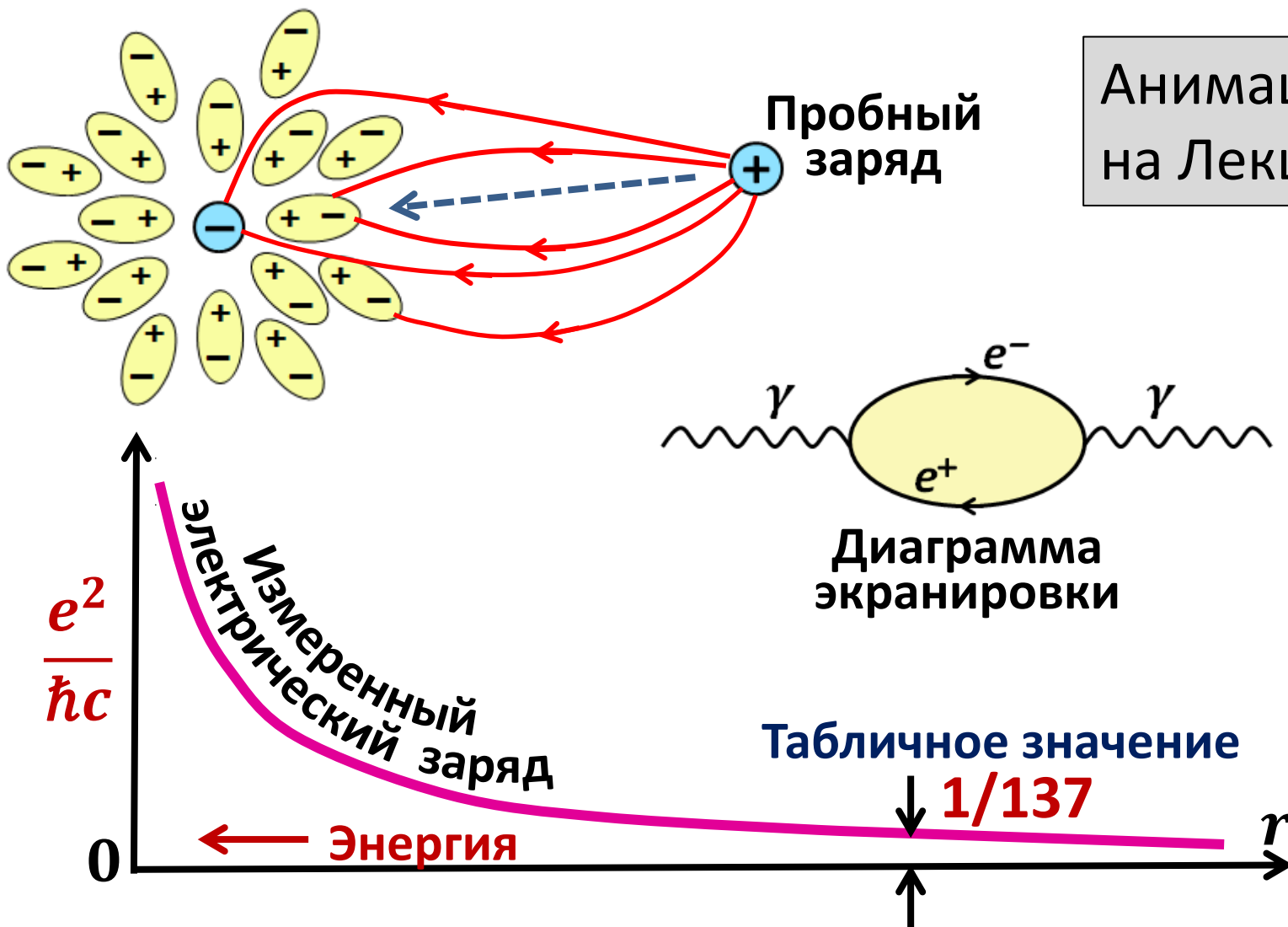


Позитрон в петле (e^-e^+ -диполе) располагается ближе к родительскому электрону.

Таким образом, возникает такая поляризация e^-e^+ -диполей, при которой их положительные стороны (т.е., позитроны) развернуты в сторону родительского электрона.

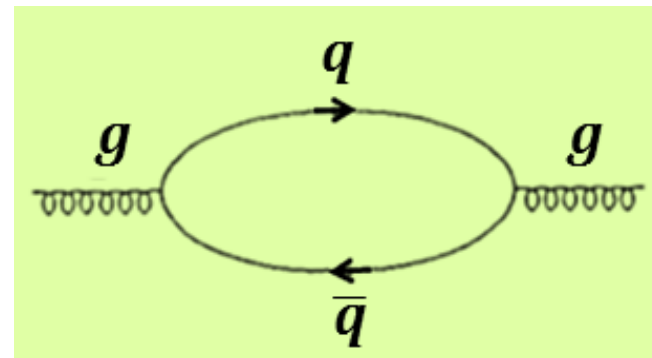
Экранировка электрического заряда в КЭД

Анимация
на Лекции

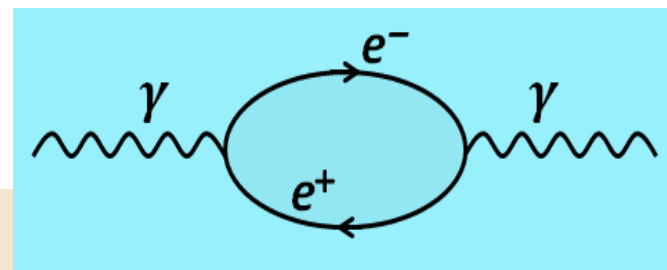
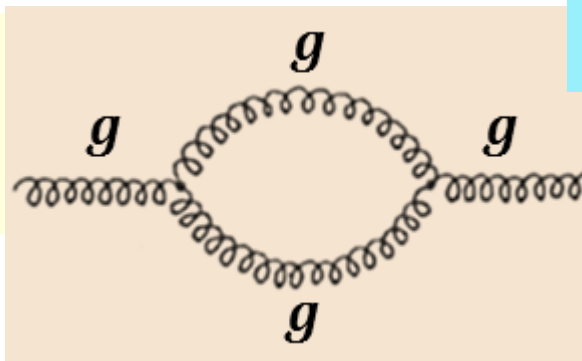


Экранировка и антиэкранировка цветового заряда в КХД

«Стандартные»
кварк-глюонные диаграммы: →
приводят к эффекту экранировки
цветового заряда, аналогичному
эффекту экранировки
электрического заряда,
создаваемому диаграммами: →



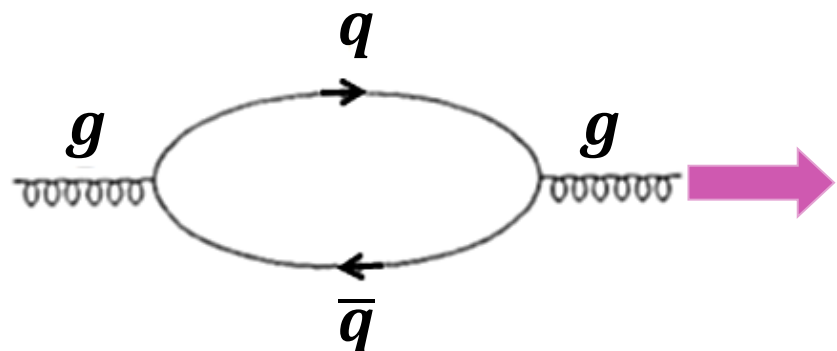
В то же время
чисто глюонные
диаграммы: →



приводят к эффекту,
обратному
экранировке
цветового заряда.

Влияние этих диаграмм (диаграмм антиэкранировки)
преобладает над влиянием диаграмм экранировки и
за счёт них цветовой заряд кварка, измеряемый
пробным цветовым зарядом, уменьшается
с приближением пробного заряда к кварку.

Диаграмма экранировки
цветового заряда:



Возникновение
экранировки
цветового заряда:

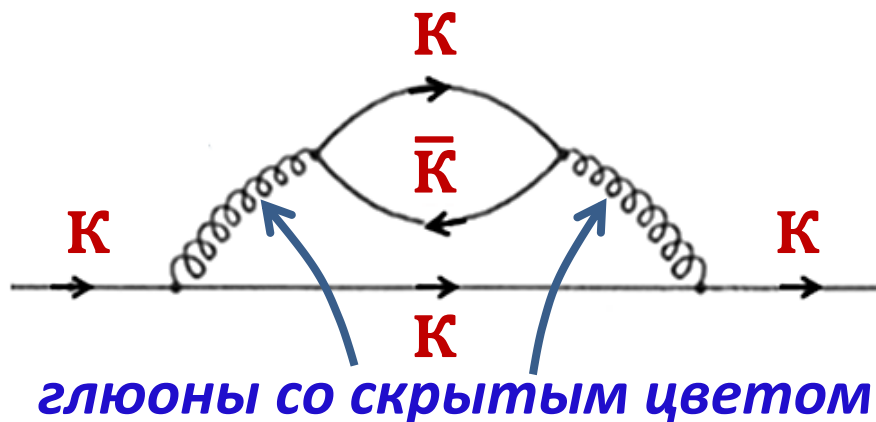
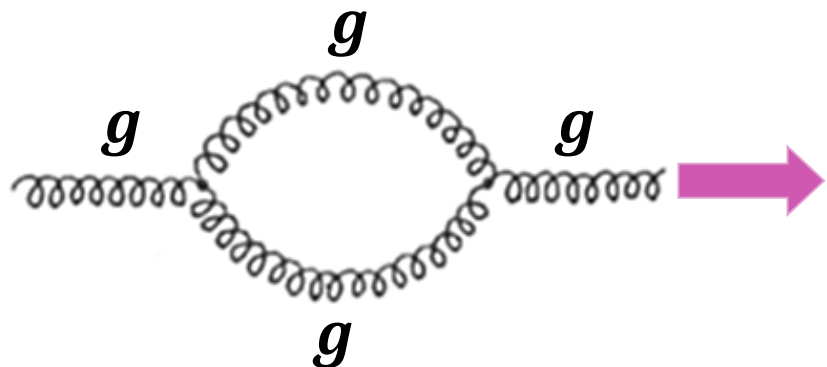
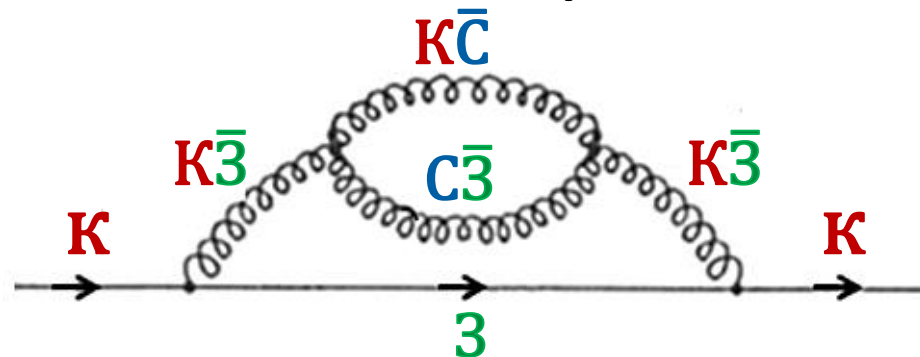


Диаграмма антиэкранировки
цветового заряда:



Возникновение
антиэкранировки
цветового заряда:



***Возникновение антиэкранировки
можно объяснить
с помощью следующего рассуждения:***

**Цветовой заряд кварка выносится глюоном
во внешнюю область.**

**Глюоны «размазывают» (расщепляют) цветовой заряд
по окружающей его области пространства,
так что цветовой заряд,
содержащийся в любой сфере, окружающей кварк,
уменьшается с уменьшением радиуса сферы.**

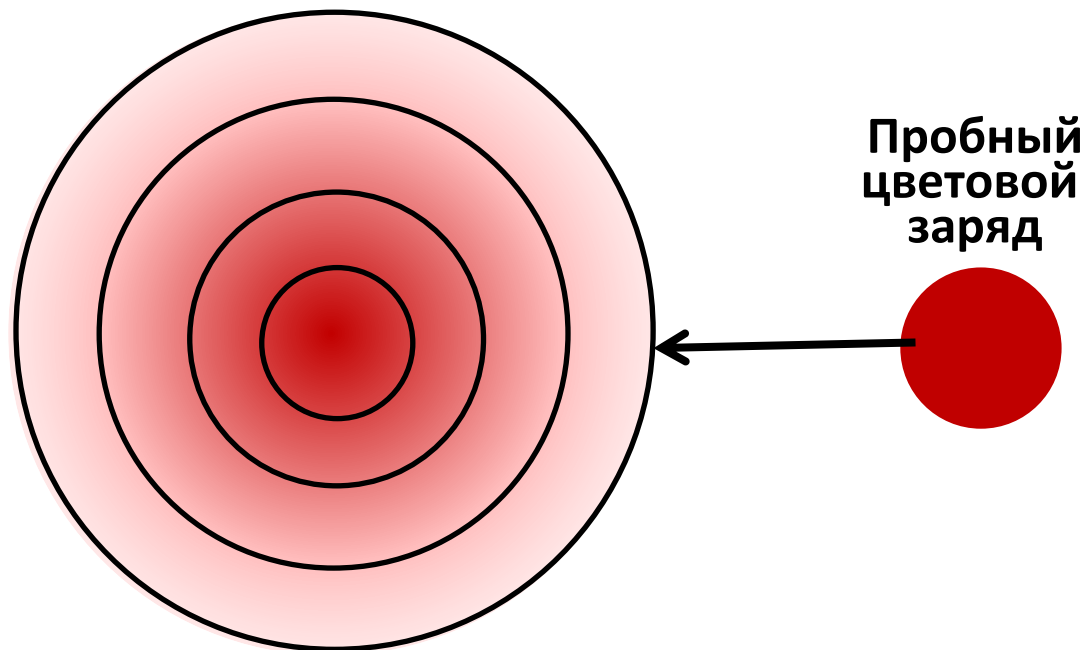
**Пробный цветовой заряд, проникая вглубь облака
размазанного (расщеплённого) цветового заряда кварка,
достигает сферы всё меньшего радиуса,
содержащей всё меньший цветовой заряд внутри,
и поэтому сила цветового взаимодействия
уменьшается с приближением пробного заряда к кварку.**

**Цветовые заряды, как и электрические,
вне достигнутой сферы не оказывают никакого влияния
на взаимодействие внутри сферы.**

Вариант с размазанным цветовым зарядом

Размазанный
антиэкранировкой
цветовой заряд кварка

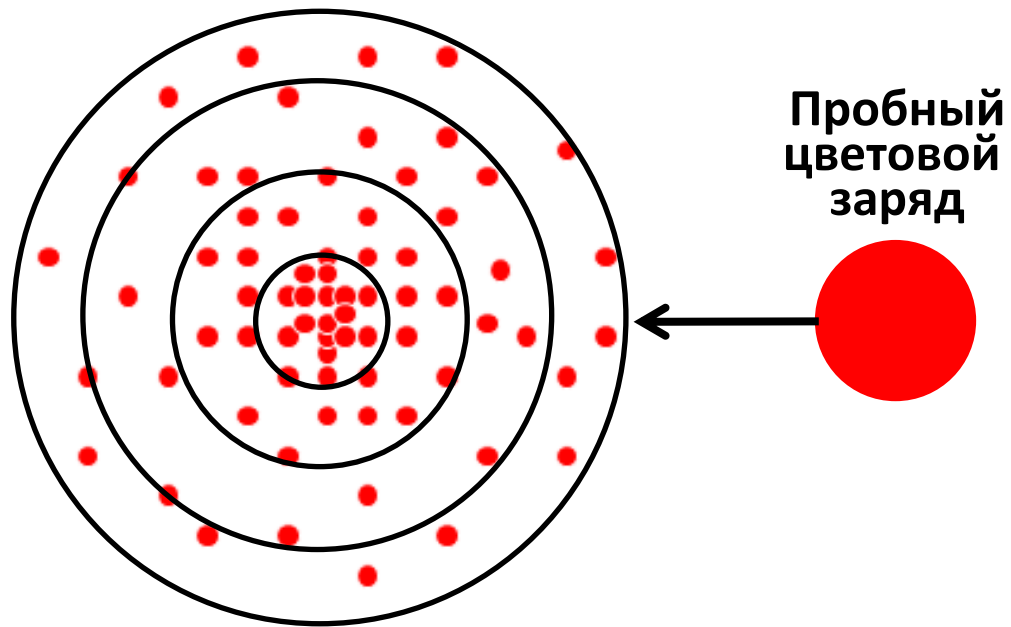
Анимация
на Лекции



Вариант с расщеплением цветового заряда

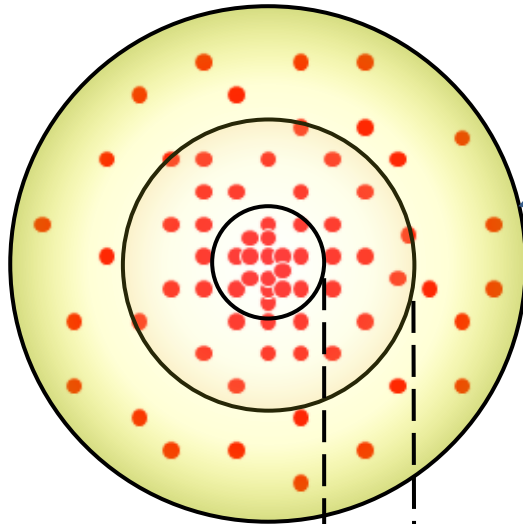
Расщеплённый
антиэкранировкой
цветовой заряд кварка

Анимация
на Лекции



Антиэкранировка цветового заряда в КХД

Расщеплённый
цветовой заряд кварка



Пробный
цветовой заряд
кварка

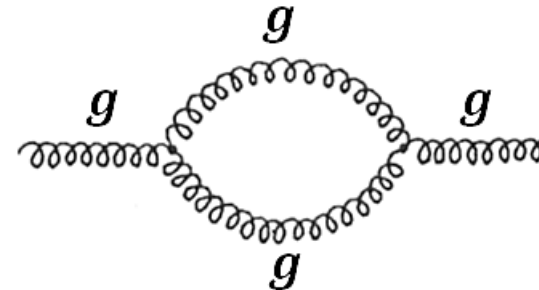
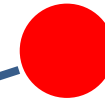


Диаграмма
антиэкранировки

Измеренный
цветовой
заряд



За счёт глюонных диаграмм цветовой заряд кварка, измеряемый пробным зарядом, уменьшается с приближением пробного заряда к кварку.

Сближаясь, два кварка будут «чувствовать» всё более ослабленные цветовые заряды друг друга и сила их цветового взаимодействия будет ослабевать.

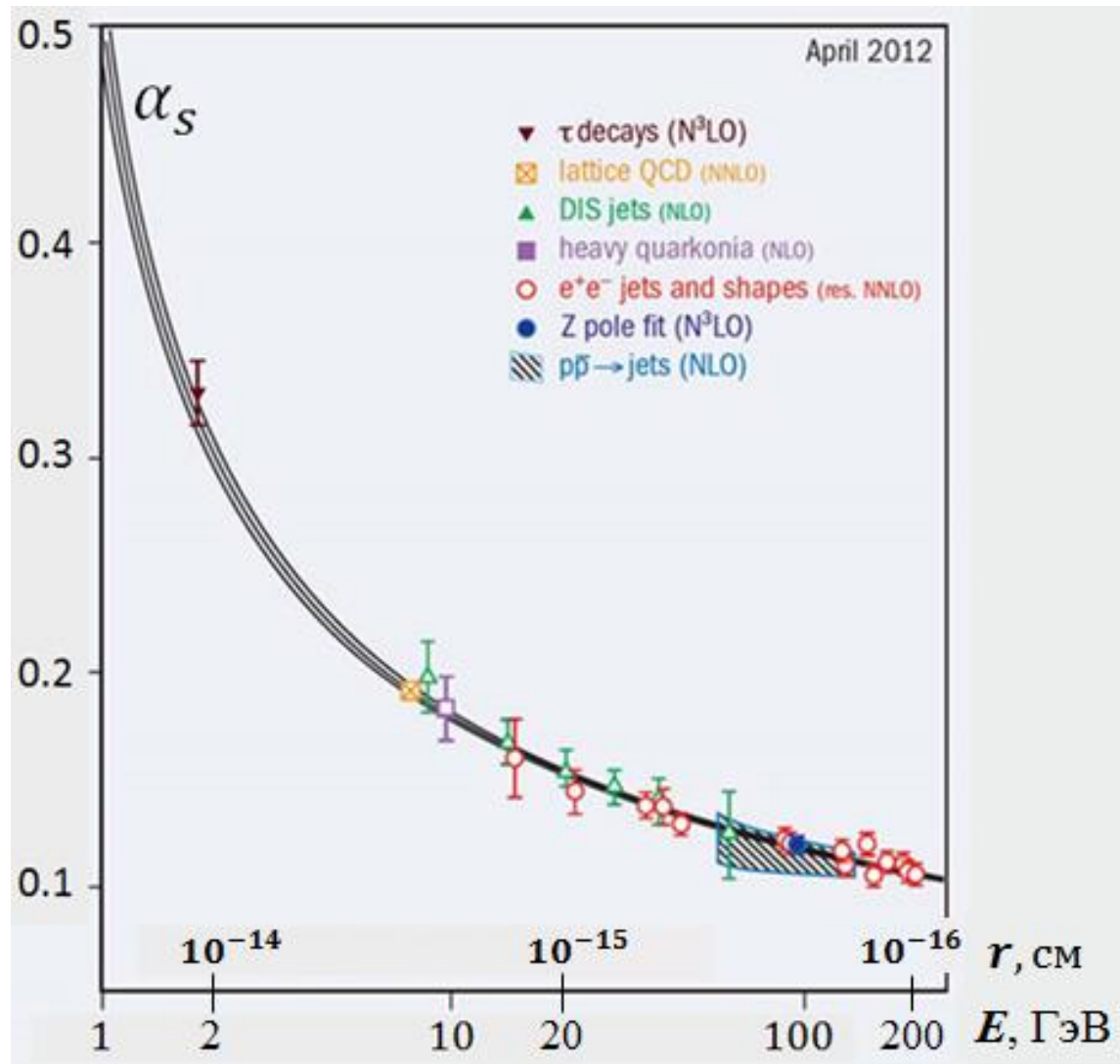
В пределе очень малых расстояний кварки перестают взаимодействовать и ведут себя как свободные.

В этом суть явления *асимптотической свободы* в сильном взаимодействии кварков.

Обратной стороной *асимптотической свободы* является рост энергии притяжения двух кварков с увеличением расстояния между ними, приводящий к невылетанию кварков из адронов.

Это явление называется *пленением* или *конфайнментом (confinement)* кварков.

Экспериментальная зависимость константы сильного взаимодействия от энергии (расстояния между кварками)



Связь энергии E
и расстояния r :
Из соотношения
неопределённости:

$$\Delta r \cdot \Delta E \approx r \cdot E \approx \hbar c \approx \\ \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ ГэВ} \cdot \text{см}$$

Уменьшение энергии межкваркового взаимодействия с уменьшением расстояния между кварками эквивалентно уменьшению константы сильного взаимодействия α_s с увеличением энергии кварков. Константа $\alpha_s = 1$ отвечает энергии кварков ≈ 100 МэВ. При росте энергии кварков до 100 ГэВ константа α_s уменьшается до 0,12. Асимптотическая свобода делает КХД теорией, пригодной для количественных вычислений.

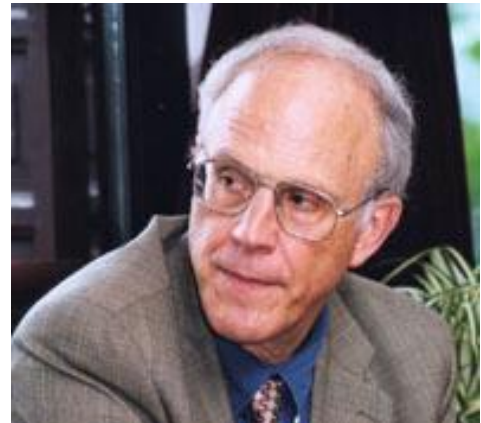
В 2004 г. D. Politzer, D. Gross и F. Wilczek удостоены Нобелевской премии «За открытие асимптотической свободы в теории сильных взаимодействий»



Wilczek

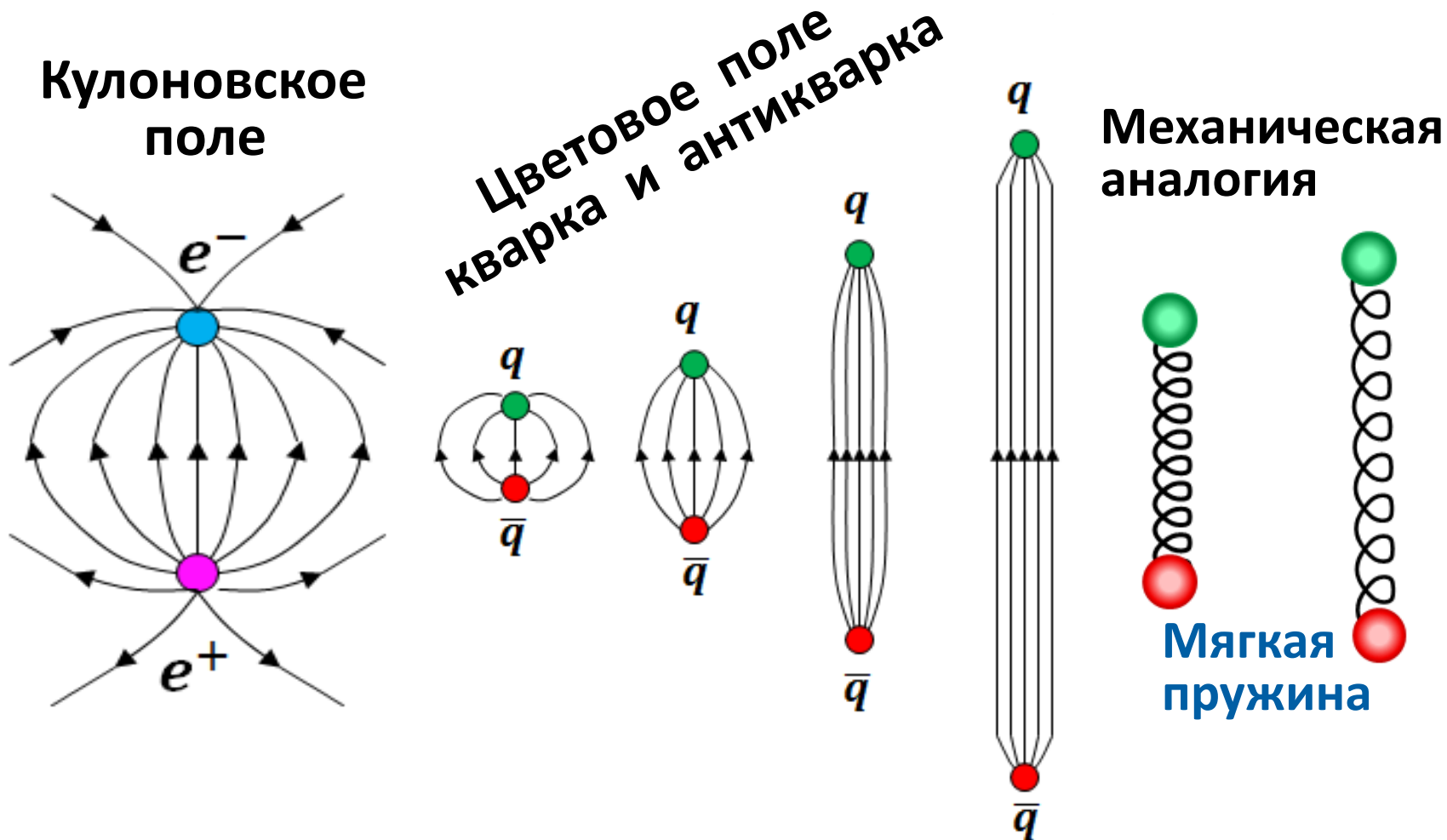


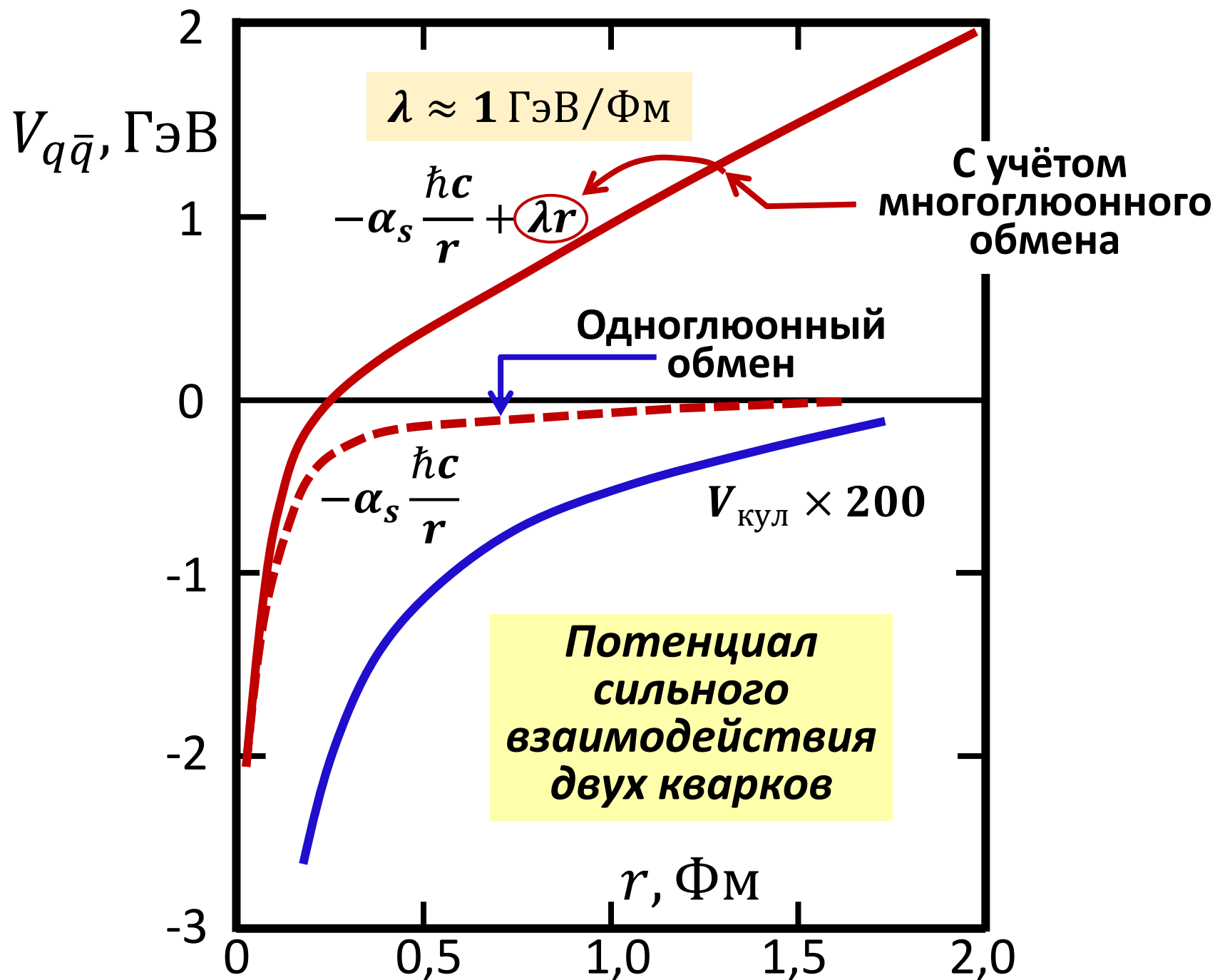
Gross



Politzer

Силловые линии кулоновского поля и поля сильного взаимодействия





На предыдущем слайде показана зависимость потенциала межкваркового сильного взаимодействия от расстояния между кварками.

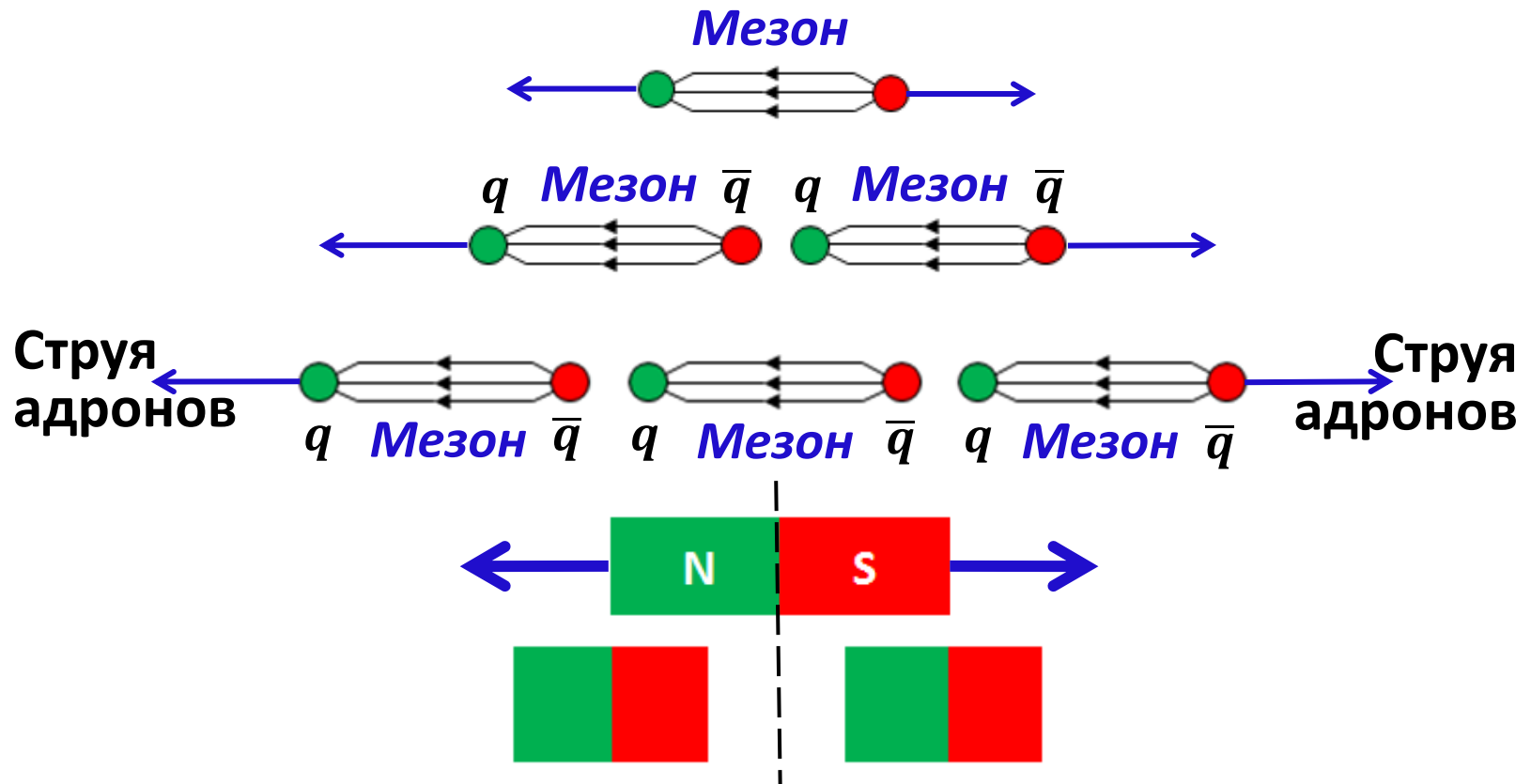
Его называют потенциалом типа «**воронки**».

На расстояниях $r > 0,5 \text{ Фм}$ он растёт линейно.

Если продлить эту тенденцию до макроскопических расстояний (**сантиметры**), то получим, что для того чтобы раздвинуть два кварка на расстояние **1 см** нужна фантастическая энергия $\approx 10^{13} \text{ ГэВ} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$.

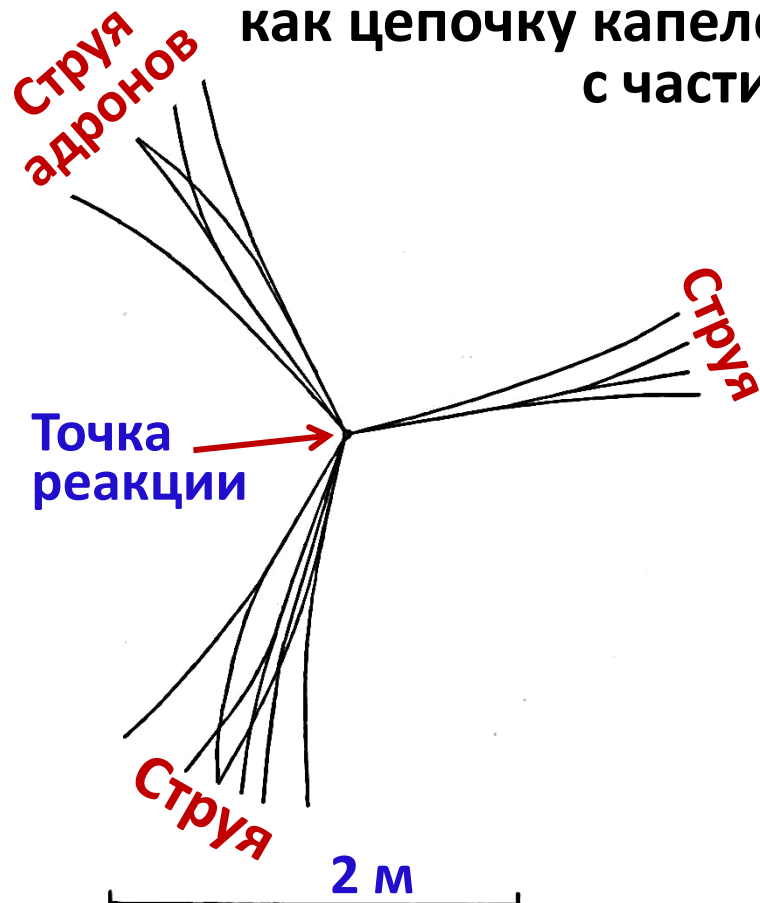
Эта энергия, затрачиваемая прыгуном в высоту для преодоления планки на высоте **2 м**.

Удаление взаимодействующих кварка и антикварка друг от друга приводит к делению их трубкообразного цветового поля с рождением новых кварк-антикварковых пар

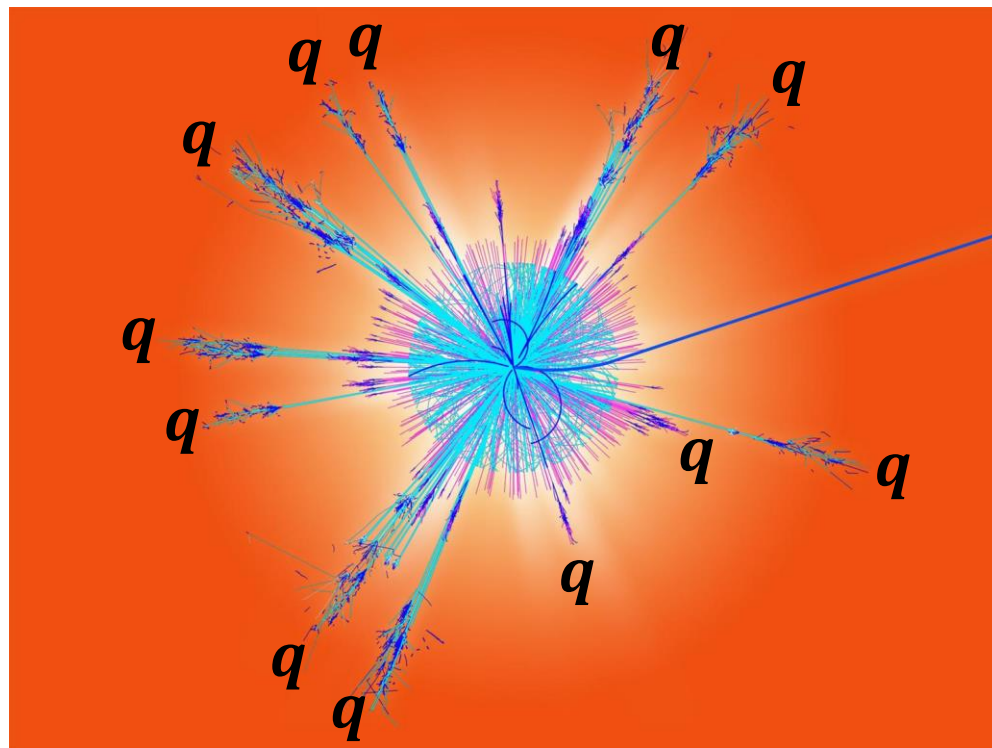


Ситуация напоминает попытки оторвать друг от друга полюса магнита

Аналогом трека кварка (или глюона), вылетающего из области сильного взаимодействия, его следом, является многочастичный сгусток быстрых адронов – адронная струя. Эту струю можно отождествить с самим кварком в полной аналогии с тем, как цепочку капелек в камере Вильсона отождествляют с частицей, вызвавшей эту цепочку капелек.



Трёхструйное событие,
1990 г., детектор ALEPH,
коллайдер LEP, CERN



Струи адронов от столкновения двух
протонов в детекторе ATLAS
Большого Адронного Коллайдера,
CERN

Радиус сильного взаимодействия

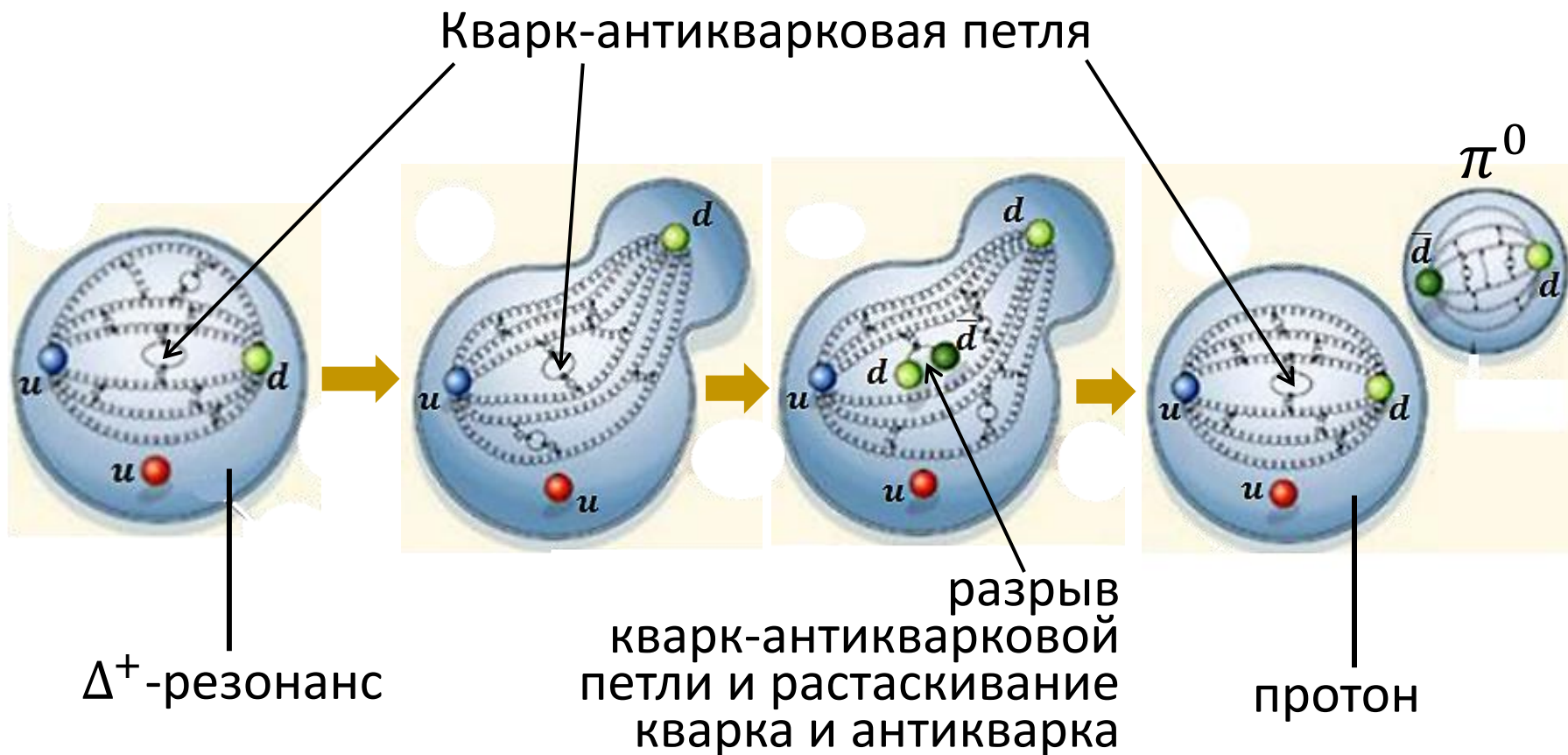
Безмассовость глюона, казалось бы, должна давать бесконечный радиус сильного взаимодействия (как электромагнитного или гравитационного).

Однако, вместо дальнодействующего сильного поля мы наблюдаем короткодействующие силы, радиус которых $\approx 1 \text{ Фм}$, т.е. ограничен размером адрона.

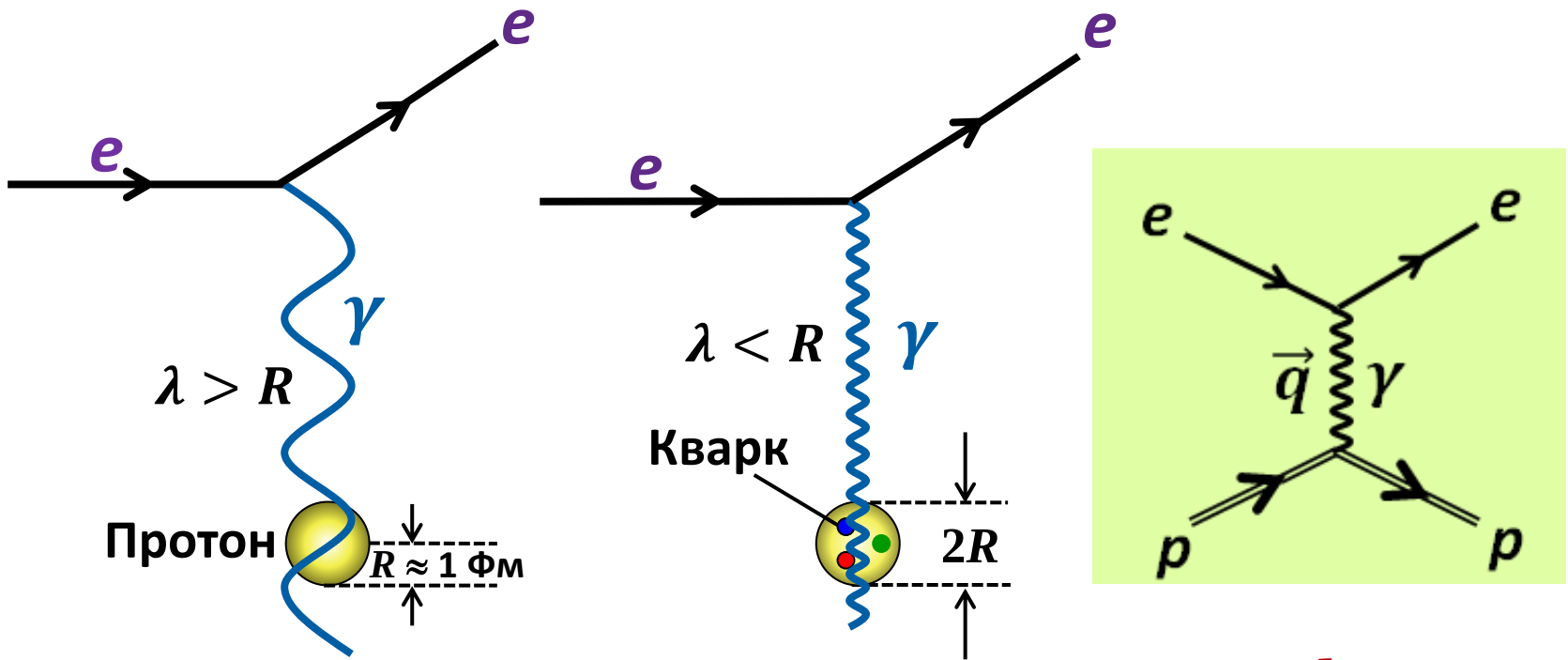
Сами адроны, состоящие из цветных кварков, лишены цвета. Они «**белые**» и не могут быть источником глюонов. Их источником могут быть лишь цветные кварки. Но они заперты внутри бесцветных адронов и внутри этих объектов, лишённых с точки зрения внешнего наблюдателя цвета, интенсивно обмениваются цветными глюонами.

Таким образом, основная область сильного (цветного) взаимодействия ограничена размерами адрона ($\approx 1 \text{ Фм}$) и не может далеко распространяться за его пределы.

Адронизация на примере распада $\Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$



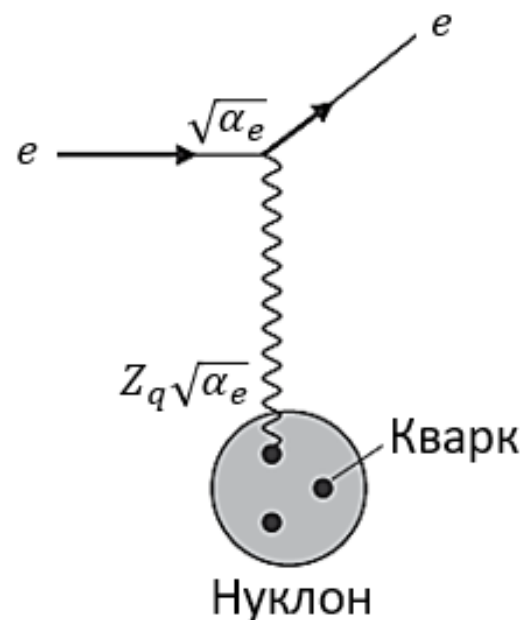
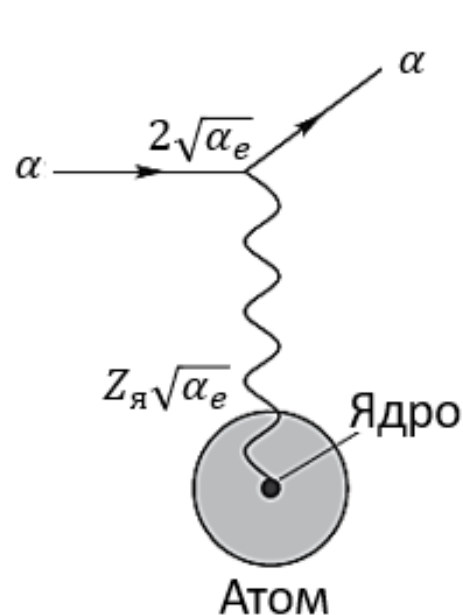
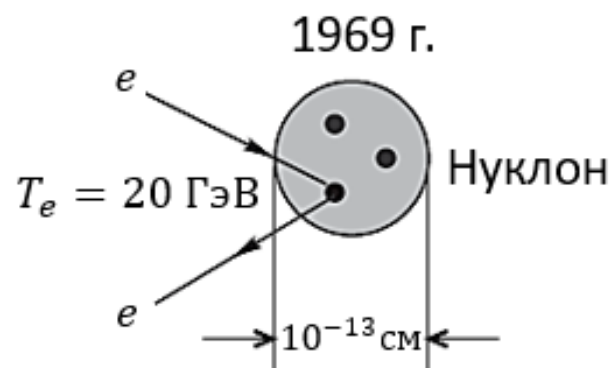
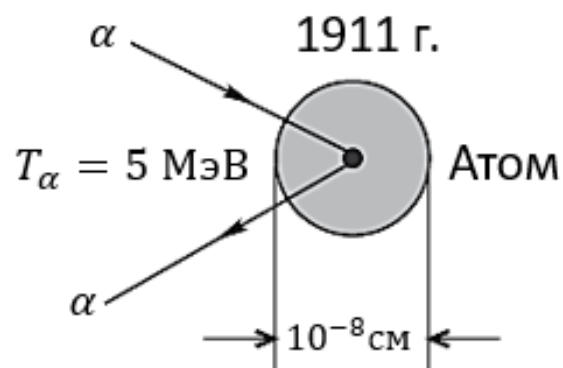
Исследование структуры протона с помощью рассеяния на нём высокоэнергичных электронов



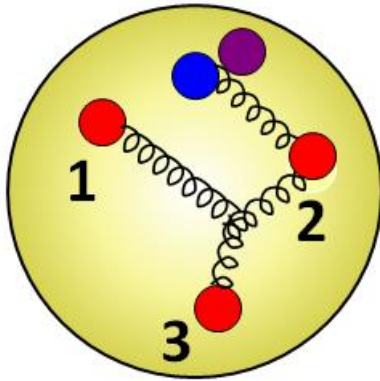
Длина волны виртуального фотона: $\lambda = \frac{h}{q}$

$\vec{q}$ — импульс виртуального фотона, переданный им протону

Сопоставление опыта Резерфорда с глубоконеупругим рассеянием электрона на нуклоне



Внутри протона

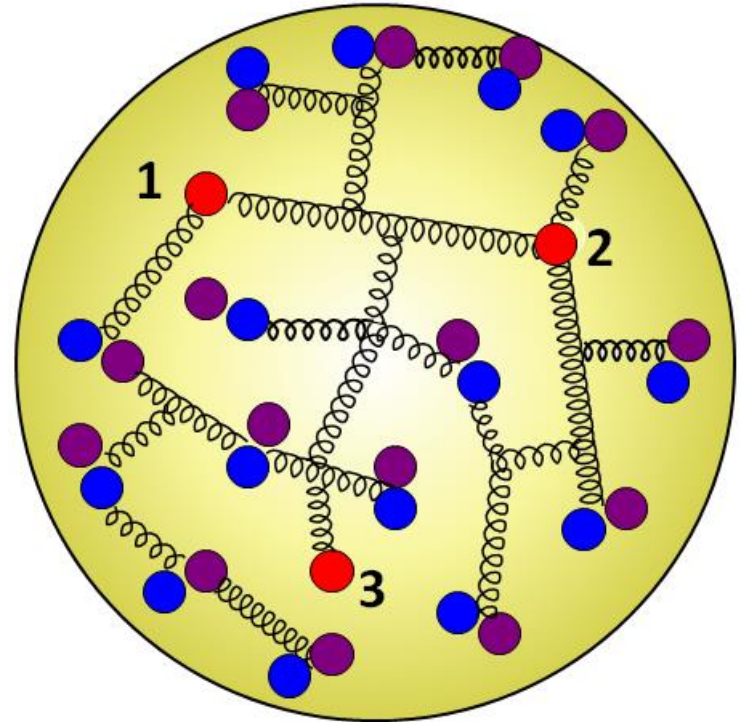


Виртуальный фотон
 $c \lambda \approx 0,1 \text{ Фм}$

● - валентный кварк (*u* или *d*)
●● - пара кварк-антикварк
~~~~~ - глюон

Доли внутреннего импульса  
(массы) протона, которую несут  
кварки и глюоны ( $q = 3 \text{ ГэВ/с}$ ):

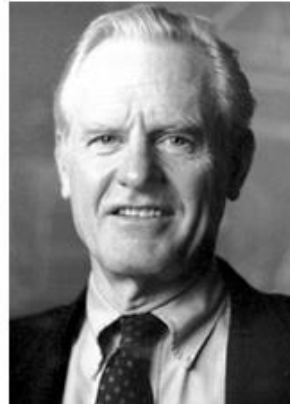
*u*-кварки — 33%,  
*d*-кварки — 16%,  
глюоны — 46%,  
антикварки — 5%



**Виртуальный фотон**  
 $c \lambda \approx 0,01 \text{ Фм}$

**Около 50% массы нуклона  
приходится на глюоны!**

В 1968 г. в высокоэнергичном рассеянии электронов на протонах в Стэнфорде (США) обнаружена так называемая **партонная структура нуклона (партоны – кварки и глюоны)**. Эти исследования в 1990 г. удостоены Нобелевской премии.



Jerome I. Friedman   Henry W. Kendall   Richard E. Taylor

The Nobel Prize in Physics 1990 was awarded jointly to Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall and Richard E. Taylor *"for their pioneering investigations concerning deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons, which have been of essential importance for the development of the quark model in particle physics"*.

## Как формируется масса протона

Протон состоит из двух ***u***-кварков и одного ***d***-кварка, взаимодействующих между собой посредством сильного поля, переносчиками которого являются безмассовые глюоны.

Суммарная масса покоя невзаимодействующих (голых) кварков протона равна

$$2m_u + m_d \approx (2 \cdot 2,2 + 4,7) \text{ МэВ}/c^2 \approx 9,1 \text{ МэВ}/c^2$$

что составляет  **$\approx 1\%$**  массы протона ( **$938,3 \text{ МэВ}/c^2$** ).

Т. е. около  **$99\%$**  массы протона (**и нейтрона**) формируется за счёт кинетической энергии кварков и энергии глюонного поля.

И то и другое – результат сильного взаимодействия.

Как мы теперь знаем  
природа массы самих голых кварков другая.  
Они не имеют внутренней структуры и поэтому их массы  
не могут возникать за счёт кинетической  
и потенциальной энергии объектов этой структуры.  
Аналогичная ситуация имеет место  
и с массой всех других фундаментальных,  
т. е. бесструктурных, частиц (лептонов и квантов полей).  
Ответ на вопрос о природе масс фундаментальных частиц  
был дан **Стандартной Моделью**.  
Согласно ей массы фундаментальных частиц  
являются результатом их взаимодействия с  
*Хиггсовским полем*.  
Квантом этого поля является бозон Хиггса.  
Это поле присутствует всюду во Вселенной.  
**Главная роль поля Хиггса –  
обеспечить массы  
всем фундаментальным частицам.**

**Если бы поле Хиггса исчезло,  
то мы с Вами стали бы легче  
всего примерно на 1 кг**