

Введение в физику элементарных частиц

лекция 2

Б. И. Ермолаев

Физико-Технический институт

С.-Петербург

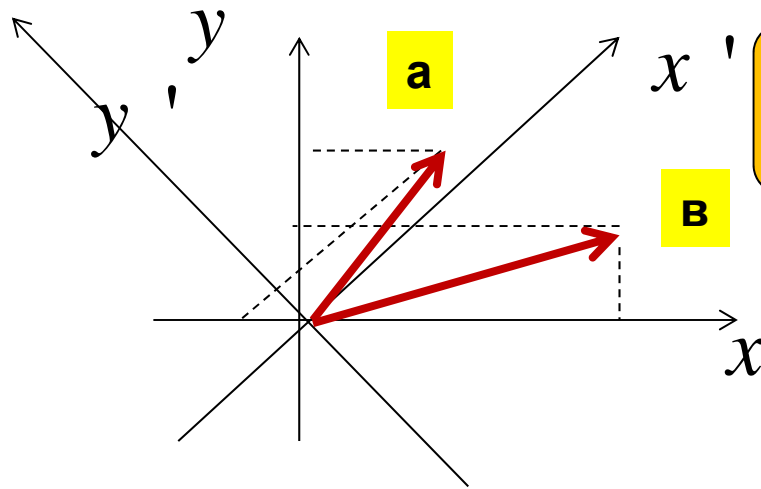
Принципы построения теорий элементарных частиц

1. Лоренц-инвариантность

Трёхмерный мир:

Инвариантами являются скалярные произведения трёхмерных векторов

$$\vec{a}\vec{b} = ab \cos \varphi = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$$



Длины векторов

Угол между векторами

четырёхмерный мир:

Инвариантами являются скалярные произведения
четырёхмерных векторов

знак
минус!!

$$ab = a_{\mu} b_{\mu} = a_0 b_0 - \vec{a} \vec{b} = a_0 b_0 - a_x b_x - a_y b_y - a_z b_z$$

Временная компонента

пространственная компонента

В различных системах отсчета временные и пространственные
компоненты различны но произведение ab не меняется

Примеры четырехмерных инвариантов

Пространственно-временные интервалы

$$\tau^2 = (c\Delta t)^2 - (\Delta\vec{r})^2$$

Временные компоненты

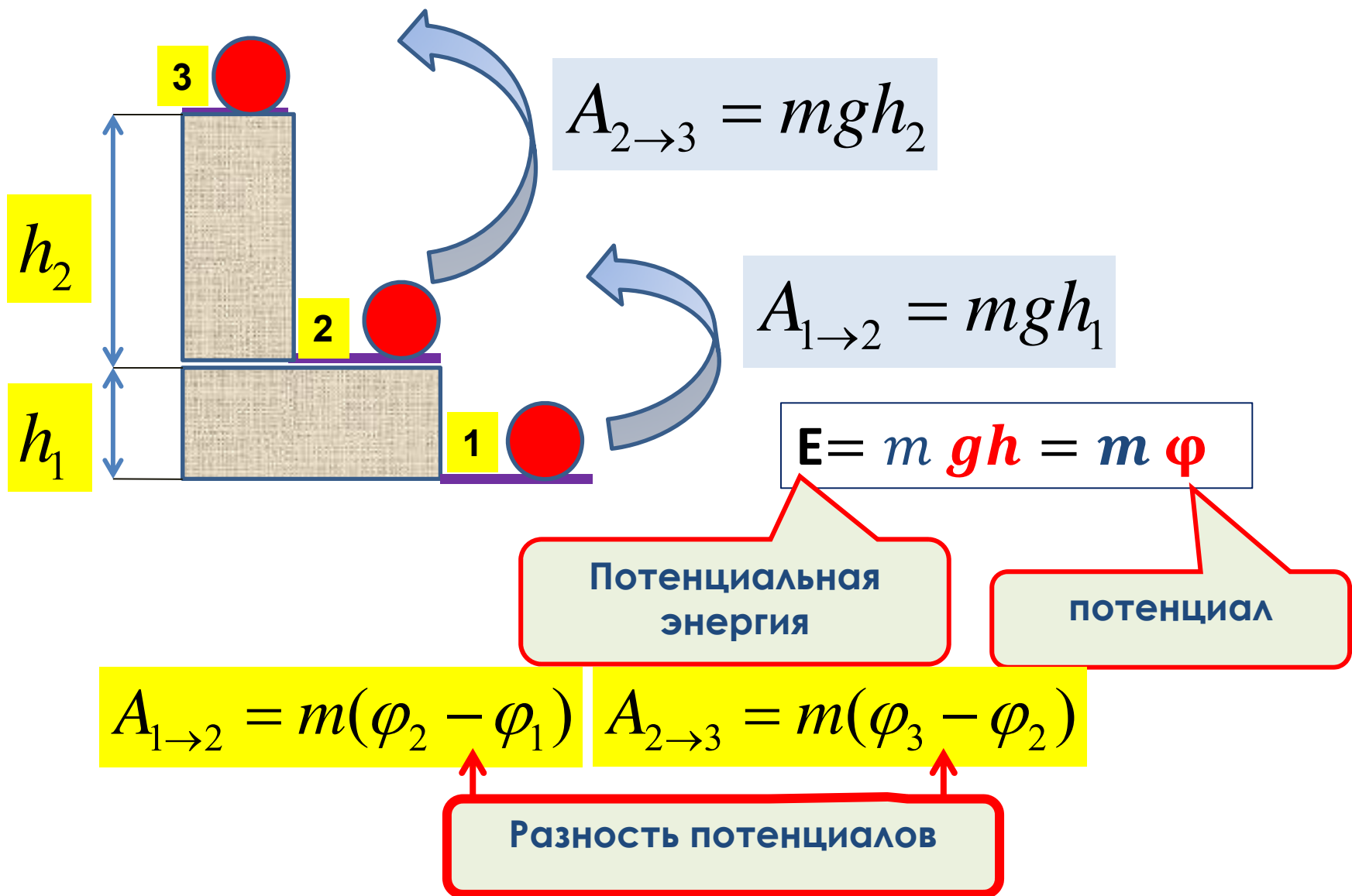
Энергия-импульс

$$p_1 p_2 = E_1 E_2 - c^2 \vec{p}_1 \vec{p}_2$$

пространственные
компоненты

Все основные выражения в теории элементарных частиц должны быть записаны в лоренц-инвариантном виде

2. Калибровочная инвариантность



То же самое в электромагнетизме

Закон Ома:

$$RI = U = \varphi_2 - \varphi_1$$

Измеряемой величиной является не потенциал, а разность потенциалов

замена

$$\varphi \rightarrow \varphi + C(x, t)$$

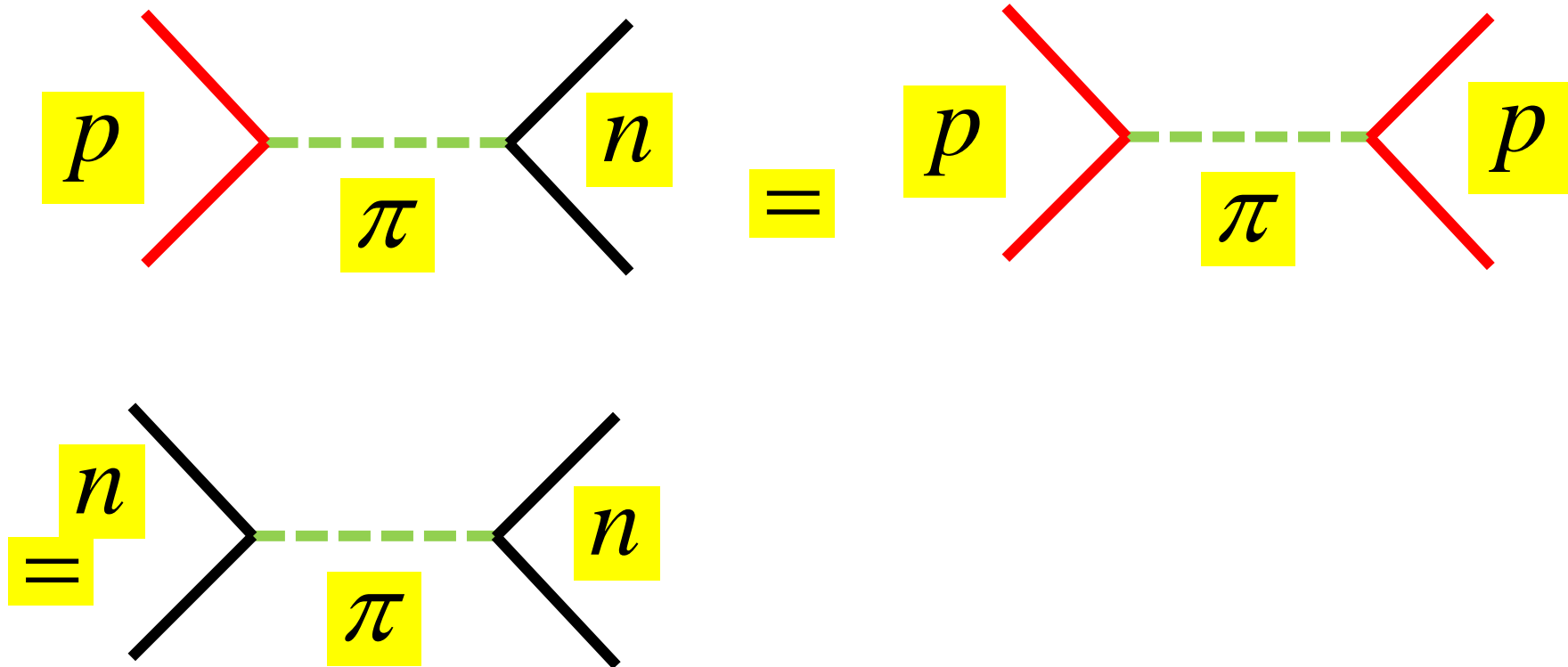
сокращается в выражении
для разности потенциалов

Поэтому такие преобразования ненаблюдаемы

Такие преобразования называются калибровочными

Теории элементарных частиц должны быть инвариантны к
калибровочным преобразованиям

Докварковая теория сильных взаимодействий



Сильные взаимодействия инвариантны к замене протона на нейтрон
Разница между протоном и нейтроном фиксируется ЭМ
взаимодействиями

$$\begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix}$$

Состояние, где есть
только протон

$$\begin{pmatrix} 0 \\ n \end{pmatrix}$$

Состояние, где есть
только нейтрон

$$\begin{pmatrix} 0 \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 30\%p \\ 70\%n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda\%p \\ (1-\lambda)\%n \end{pmatrix}$$

Все эти состояния
эквивалентны для сильных
взаимодействий

Теория сильных взаимодействий должна быть инвариантна к преобразованиям, переводящим каждое такое состояние в другое

Протон = $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

Нейтрон = $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$

Более строго:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} a_{11}x + a_{12}y \\ a_{21}x + a_{22}y \end{pmatrix}$$

Требуем, чтобы длина вектора не менялась:

$$x^2 + y^2 = x'^2 + y'^2 = 1$$



Т.е. это повороты на произвольный угол

Например, при $\theta = \pi / 2$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

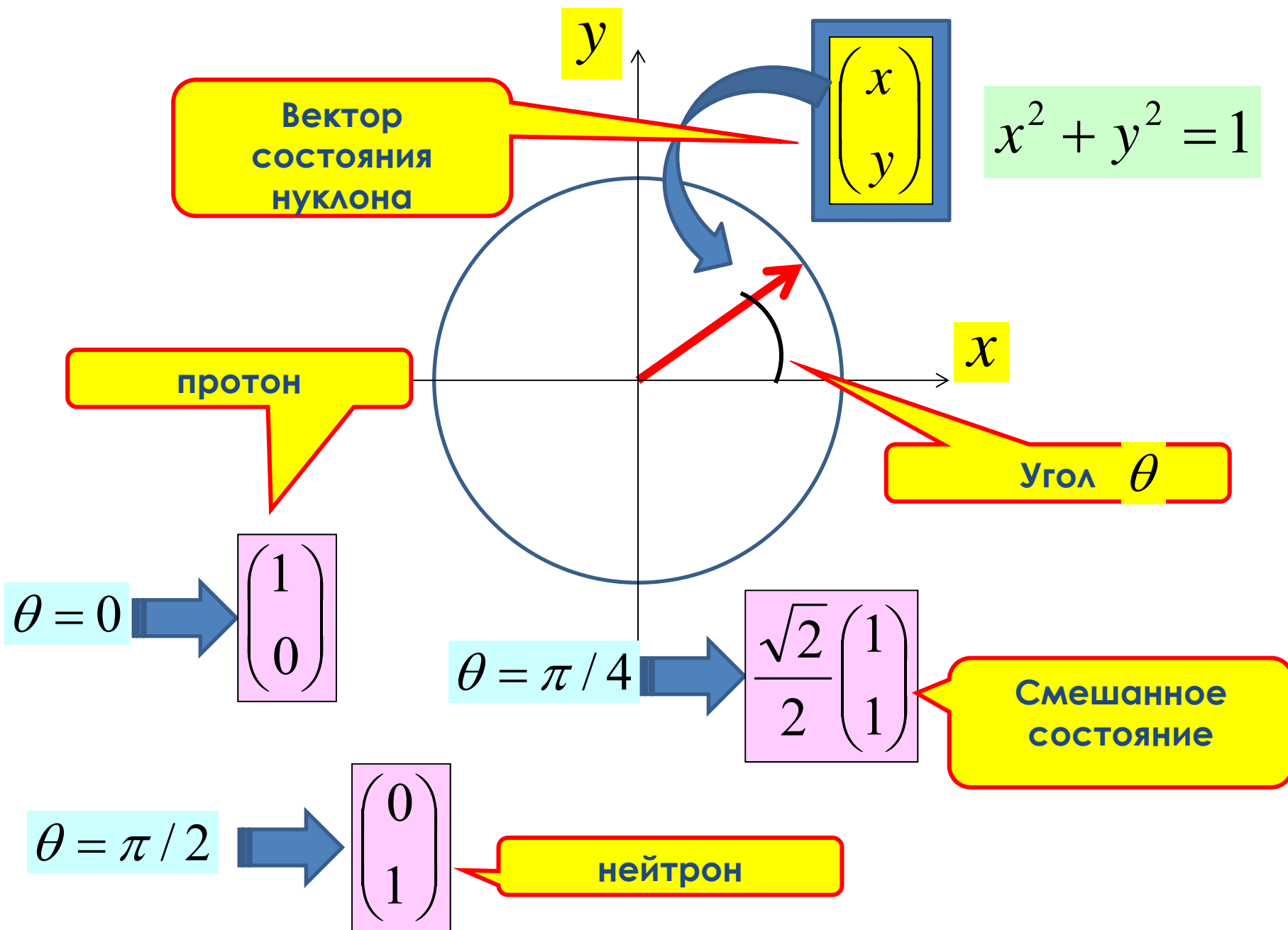
$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Нейтрон переходит в протон

протон

переход

нейтрон



Т.е. нуклонные состояния переходят сами в себя при поворотах на произвольный угол. Но это повороты не в обычном пространстве, а специально придуманном. Если это комплексное пространство (т.е. пространство КОМПЛЕКСНЫХ переменных), то такие матрицы образуют группу симметрии $SU(2)$.

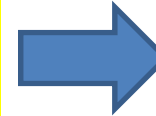
Докварковая теория сильных взаимодействий, где любые нуклонные состояния неразличимы, инвариантна к преобразованиям из калибровочной группы $SU(2)$.

кварковая теория сильных взаимодействий

оказалось, что нужны 3
кварка
У всех кварков дробные
эл заряды (в единицах
заряда протона)

$$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} p \\ n \\ \lambda \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix}$$

Первоначальное
обозначение

Современное
обозначения

Для сильных взаимодействий все эти кварки неразличимы

Инвариантность к вращениям в новом угловом пространстве

Ведет к калибровочной группе $SU(3)$

Инвариантность к калибровочной группе $SU(3)$

Кварки могут комбинироваться или в $q\bar{q}$
или в qqq

барионы

мезоны

а глюоны образуют октет (имеется 8 глюонов)

Инвариантность к калибровочной группе электромагнитных взаимодействий

существуют только нейтральные фотон

Это пространство называется **ЦВЕТОВЫМ**
просто для того, чтобы отличать его от обычного
пространства

Позже были открыты еще 3 кварка: **c, b, t**

ЦВЕТОВАЯ СИММЕТРИЯ ЯВЛЯЕТСЯ ТОЧНОЙ

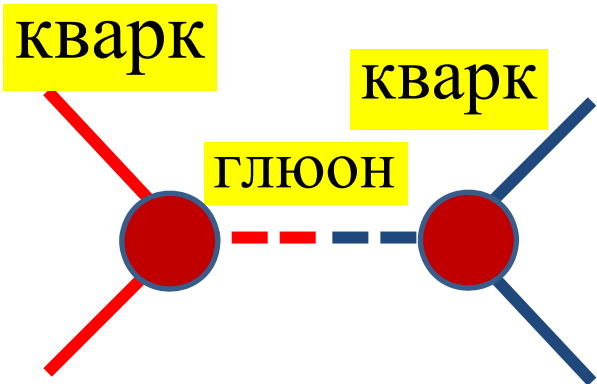
ЦВЕТ НЕНАБЛЮДАЕМ В ПРИНЦИПЕ

РЕАЛЬНО НАБЛЮДАЕМЫЕ АДРОНЫ **БЕСЦВЕТНЫ** А
ПЕРЕНОСЧИКИ СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ –
ГЛЮОНЫ- БЕЗМАССОВЫ

ОБМЕН ЦВЕТОМ - КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА

ЦВЕТ

АСИМПТОТИЧЕСКАЯ СВОБОДА или ИНФРАКРАСНАЯ ТЮРЬМА



закон Кулона

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$q_1 = eQ_1 \quad q_2 = eQ_2$$

Заряд протона

$$F = \frac{e^2 Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{1}{137}$$

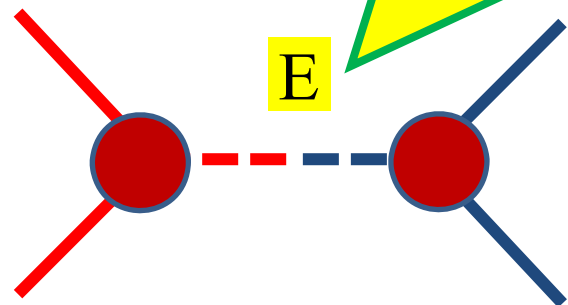
константа связи ЭМ
взаимодействий

α_s

Константа связи
сильных взаимодействий

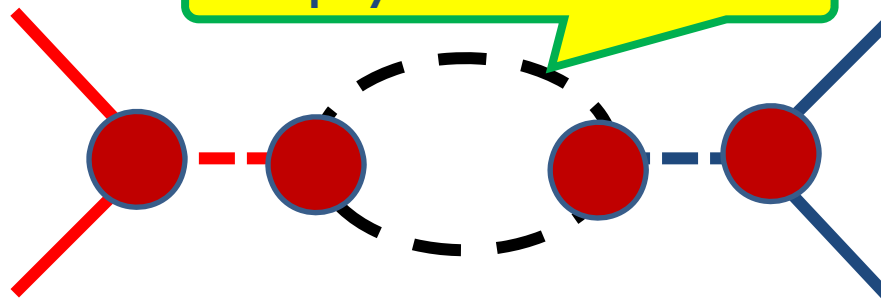
Энергия взаимодействия

учтем ралиационные поправки

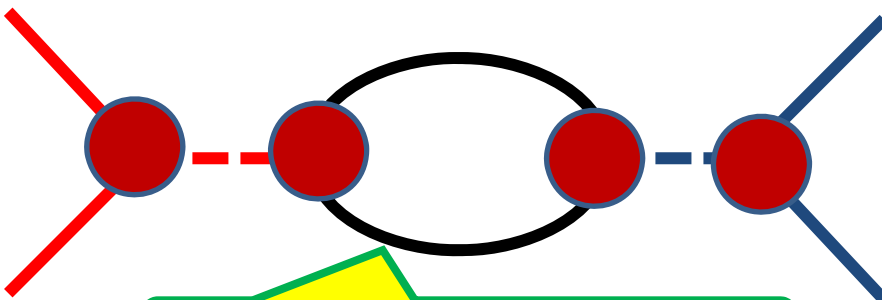


+

Виртуальные глюоны



+



+

Другие поправки

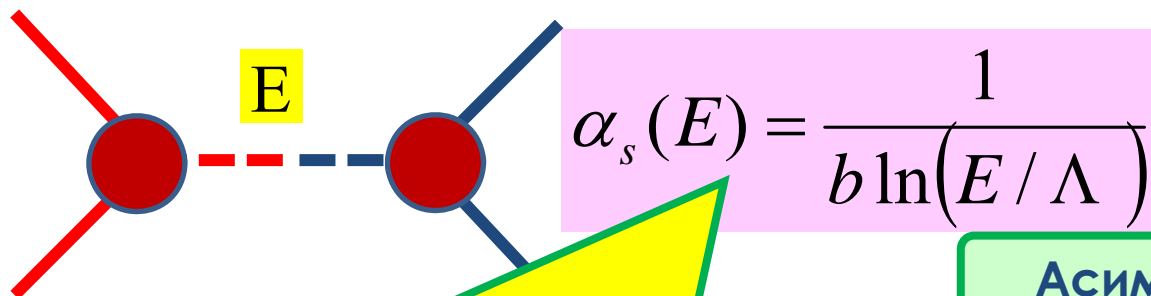
Виртуальные кварки

α_s



$$\alpha_s(E) = \frac{1}{b \ln(E / \Lambda)}$$

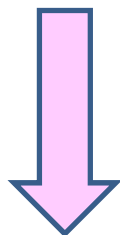
Бегущая константа связи



Асимптотическая свобода

константа связи уменьшается с ростом энергии взаимодействия
и неограниченно растет при уменьшении энергии

например, энергия двух электрических зарядов обратно пропорциональна расстоянию между ними



$$E = -\frac{q_1 q_2}{r}$$

Аналогично, энергия связи двух кварков обратна расстоянию между ними

$$\alpha_s(r) \sim \frac{1}{\ln(1/r)}$$

константа связи убывает с уменьшением расстояния
между кварками
и
неограниченно растет при увеличении расстояния

на близких расстояниях кварки
почти свободны

Внутри адроне кварки почти
свободны

но зато

кварки не могут удалиться друг от
друга на далекие расстояния

Инфракрасная тюрьма

кварки не могут вылететь из
адронов
Поэтому свободные кварки не
наблюдаются на эксперименте

Вместо **кварков** наблюдаются **адроны** т.е. **мезоны** и **барионы**
Механизм перехода кварков в адроны **практически неизвестен**
Поэтому точного описания адронных реакций **не существует**

КХД- ФАКТОРИЗАЦИЯ для СТОЛКНОВЕНИЙ ПРОТОНОВ

