

**Введение в физику элементарных
частиц
лекция 1**

**Б. И. Ермолаев
Физико-Технический институт
С.-Петербург**

Элементарные частицы

Т.е. то не имеет структуры и из чего сделан мир

АТОМЫ + СВЕТ

электроны и протоны

Модель Томсона,
Модель
Резерфорда

Электроны, протоны, нейтроны,
мюоны, нейтрино

Эксперименты 20-30
ГОДОВ

Мезоны, барионы, гипероны,
резонансы

Эксперименты 50-60
ГОДОВ

лептоны и кварки + переносчики их взаимодействий

Взаимодействия элементарных частиц

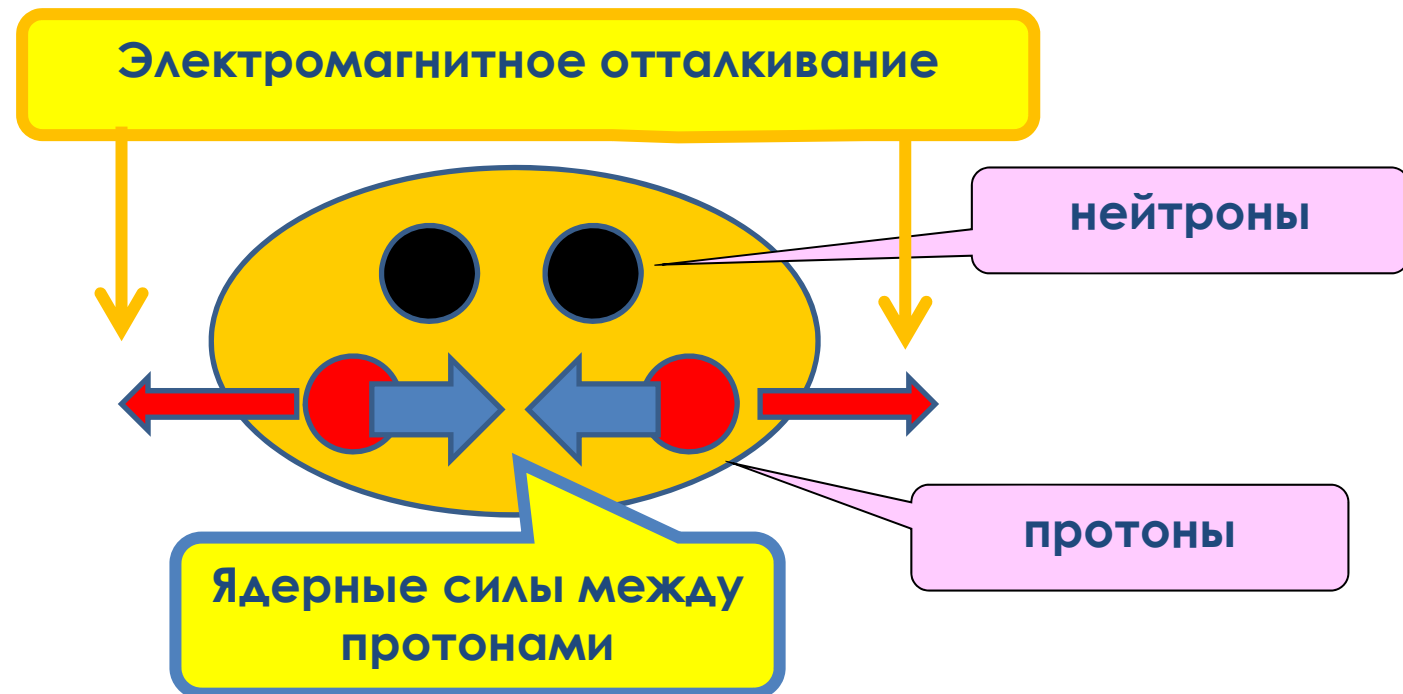
Сильные взаимодействия

Именно они скрепляют ядра атомов

Размер атома $\sim (3 - 20)10^{-11} \text{ м}$

Размер ядра $\sim (1 - 10)10^{-15} \text{ м}$

Ядро атома гелия: 2 протона и 2 нейтрона и оно стабильно



Протоны имеют одинаковые электрические заряды и поэтому между ними силы отталкивания
Сильные взаимодействия нейтрализуют отталкивание и держат ядра стабильными

Частицы, участвующие в сильных взаимодействиях, называются АДРОНАМИ

Реально наблюдаемые АДРОНЫ это мезоны и барионы

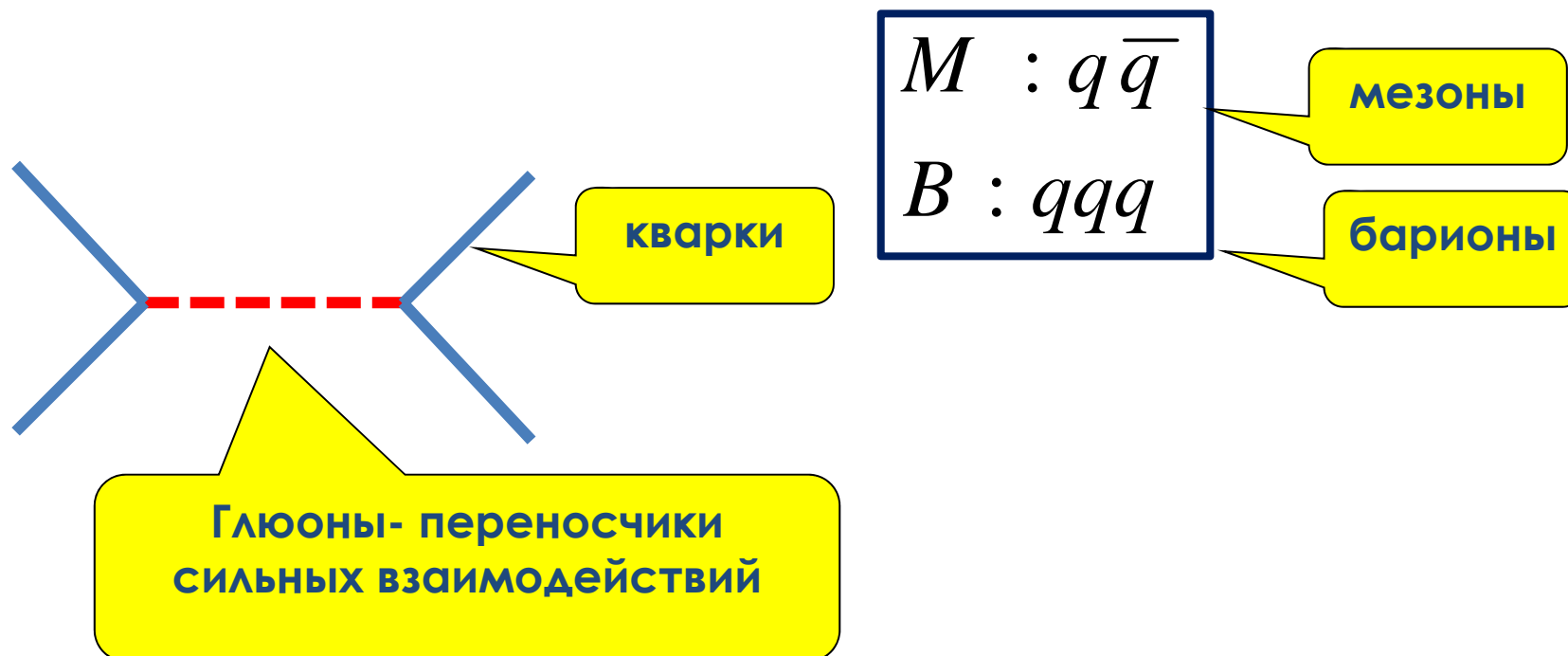
Докварковое описание сильных взаимодействий

Ядерные силы не отличают протон от нейтрона



Реально наблюдаемые АДРОНЫ состоят из кварков

Кварковое описание сильных взаимодействий



Теория, описывающая взаимодействия кварков и глюонов:
Квантовая Хромодинамика (КХД)
КХД, в основном, развита для описания реакций при высоких энергиях

Электромагнитные взаимодействия



Электромагнитные взаимодействия описываются
квантовой электродинамикой (КЭД)
КЭД явилась образцом для разработки КХД и других теорий

Слабые взаимодействия



Слабые и электромагнитные взаимодействия описываются совместно квантовой теорией электрослабых взаимодействий

Гравитационные взаимодействия

Квантовая теория гравитационных взаимодействий не создана

Стандартная Модель элементарных частиц

КВАРКИ

$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
--	--	--

Эл заряд = $2/3$

Эл заряд = $-1/3$

ЛЕПТОНЫ

$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$
--	--	--

Эл заряд = 0

Эл заряд = -1

ПЕРЕНОСЧИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

g

глюоны- переносят сильные взаимодействия

γ, W^\pm, Z

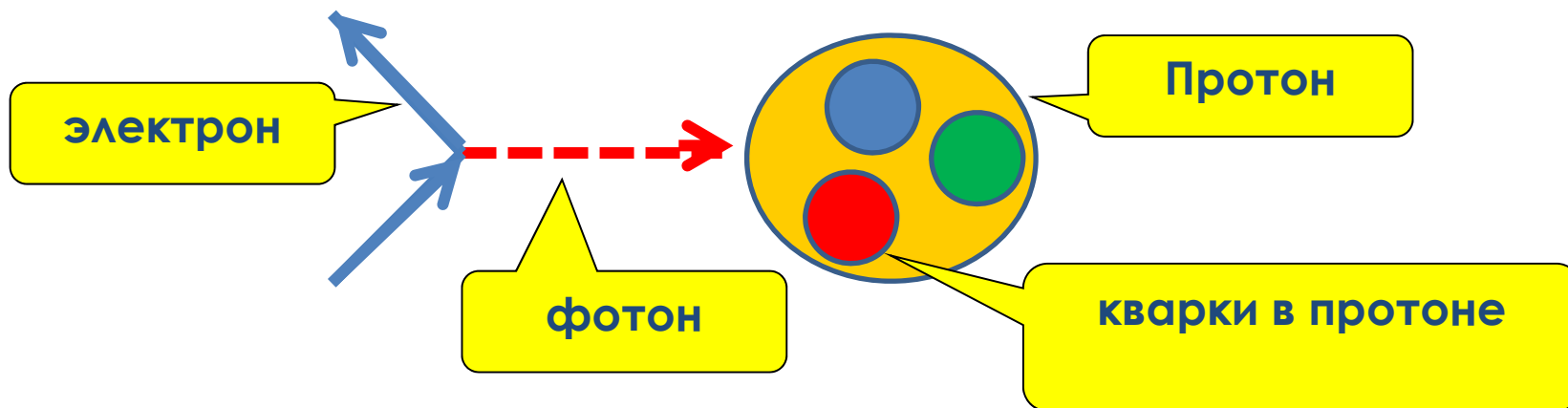
переносят электрослабые взаимодействия

БОЗОНЫ ХИГГСА

H^\pm, H_0

источник массы элементарных частиц

Для чего нужны ускорители элементарных частиц?



Рассмотрим различные соотношения между длиной волны фотона и размером адрона

$$\lambda \geq a_{proton}$$

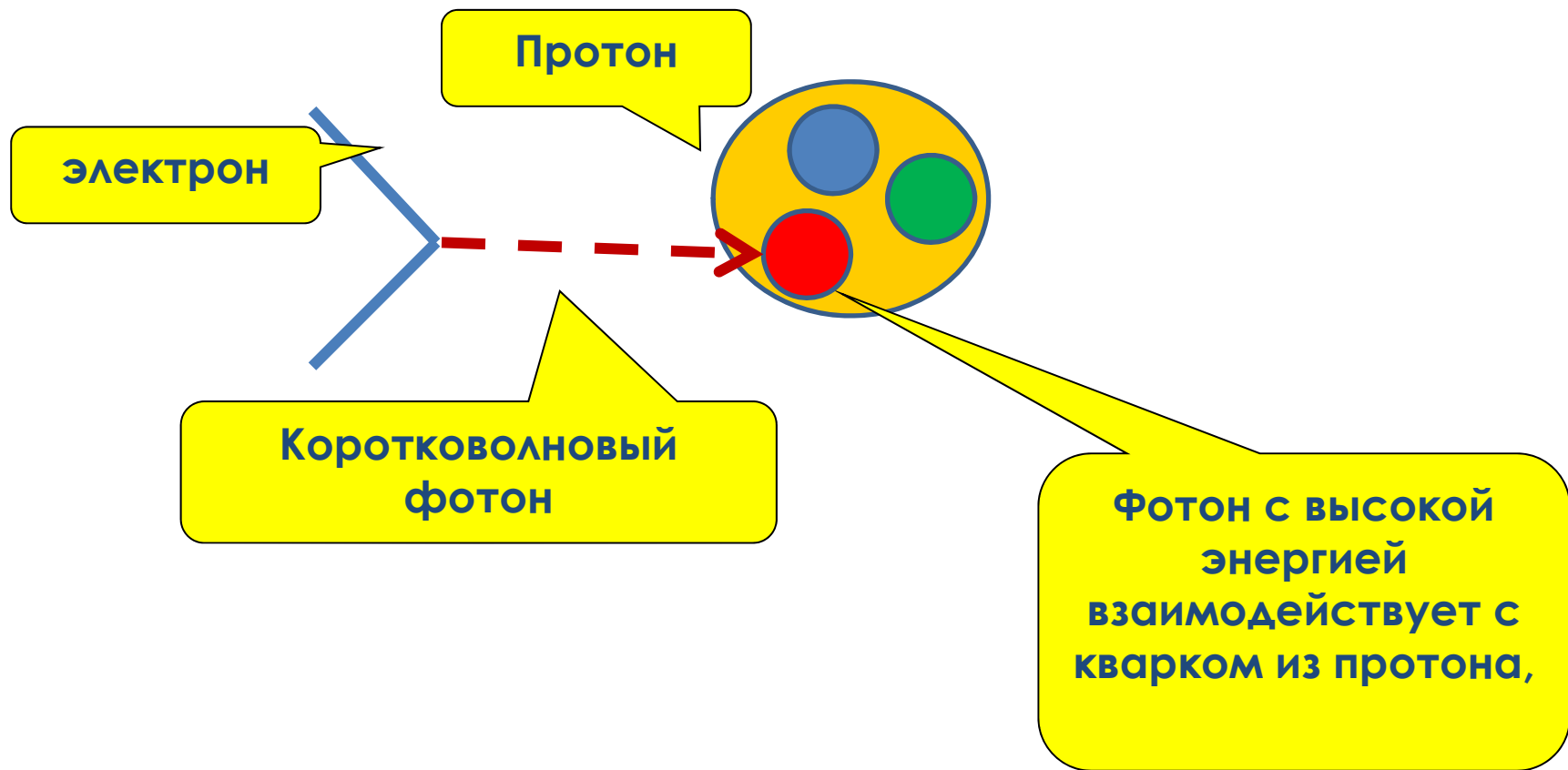
Фотон взаимодействует с протоном как с элементарным объектом и не чувствует его структуры

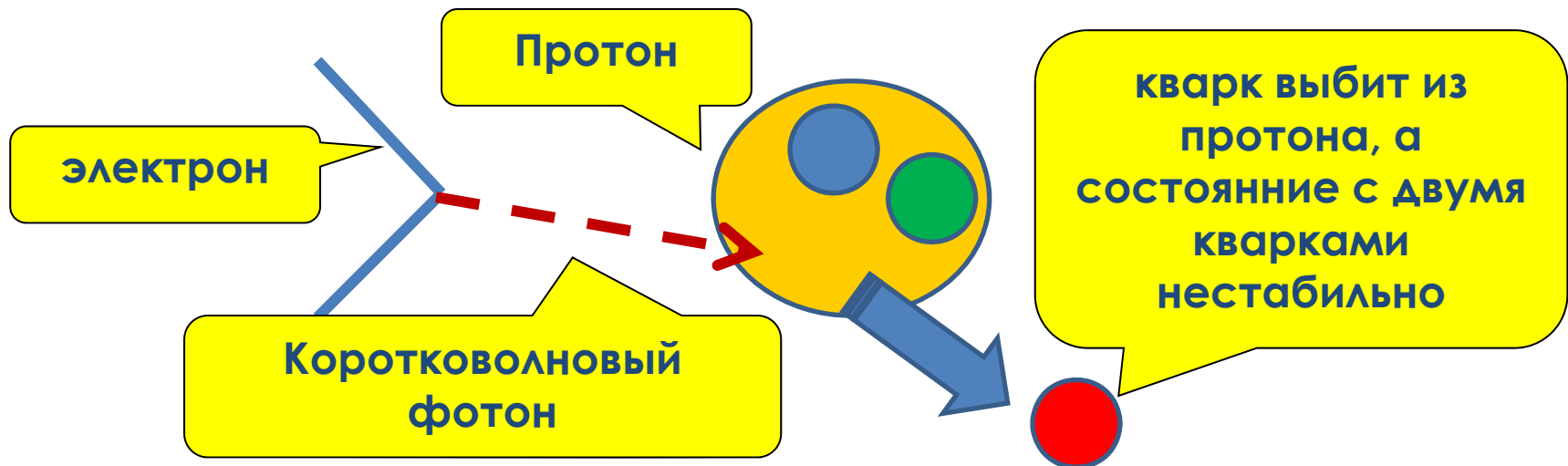
$$\lambda \ll a_{proton}$$

Фотон взаимодействует с объектами, составляющие протон

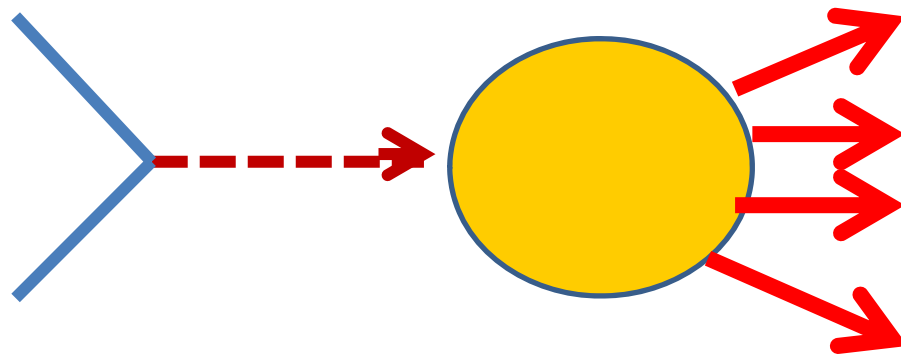
Длина волны фотона обратно пропорциональна его энергии

$$E = h\nu \sim 1/\lambda$$

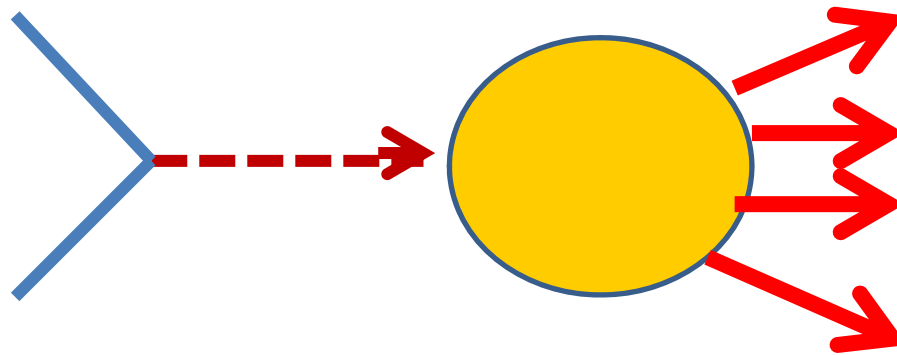




В итоге столкновения протон взрывается, производя множество мезонов и барионов и по их угловому и энергетическому распределению делаются заключения о структуре протона



такие столкновения называют глубоко-неупругими

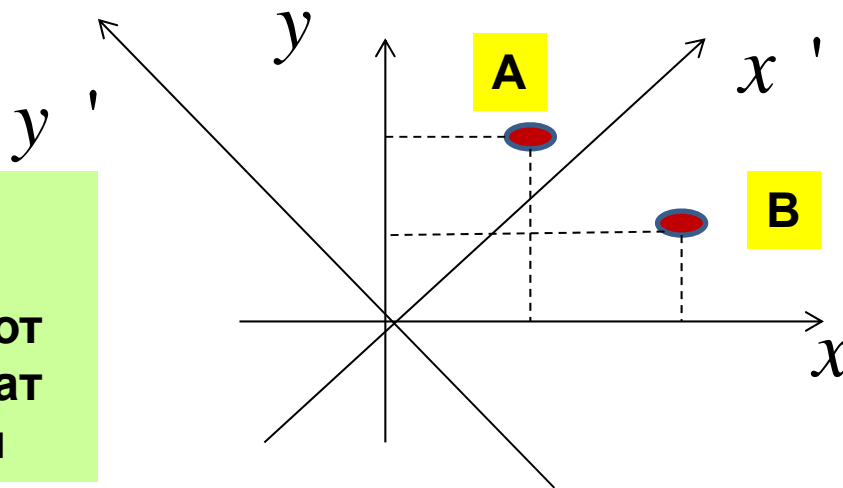


Если регистрируются **ВСЕ** родившиеся частицы- это
эксклюзивный процесс
Но реально регистрируется только небольшое число частиц

Если ни одна родившаяся частица не регистрируется, а
регистрируется только электрон –это
инклюзивный процесс
Несмотря на простоту, инклюзивные процессы дают много
важной информации о структуре адронов

Для чего нужны ускорители со встречными пучками?

Трёхмерный мир:
расстояние между
точками А и В не зависит от
выбора системы координат
т.е. является инвариантом



$$R = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} = \sqrt{(x'_A - x'_B)^2 + (y'_A - y'_B)^2 + (z'_A - z'_B)^2}$$

Четырехмерный мир: четырехмерное расстояние (пространственно-временной интервал) между событиями А и В не зависит от выбора инерциальной системы отсчета т.е. является инвариантом

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

скорость света

знак минус

где

$$(\Delta t)^2 = (t_A - t_B)^2$$

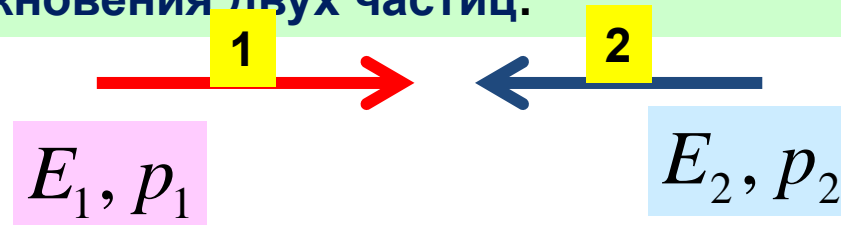
$$(\Delta \vec{r})^2 = (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2$$

В разных системах отсчета события А и В разделены различными временными и различными пространственными интервалами но значение τ^2 одно и тоже во всех системах

Четырехмерный инвариант энергии и импульса для одной частицы:

$$E^2 - (c\vec{p})^2 = (m c^2)^2$$

Четырехмерный инвариант энергии и импульса для столкновения двух частиц:



$$s \equiv (p_1 + p_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 - c^2 (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

Вычислим его сначала в системе покоя частицы 2 Там

$$\vec{p}_2 = 0, \quad E_2 = m_2 c^2$$

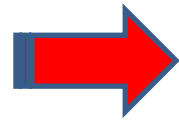
Поэтому

$$s = (E_1 + m_2 c^2)^2 - c^2 \vec{p}_1^2$$

При высоких энергиях массой в
можно пренебречь, так что

$$E_1^2 - (c\vec{p}_1)^2 = (m_1c^2)^2$$

$$E_1^2 \approx (c\vec{p}_1)^2$$



$$s \approx (E_1 + m_2c^2)^2 - E_1^2 \approx 2m_2c^2 E_1$$



Теперь вычислим этот же инвариант в системе
центра масс частиц Там

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = 0$$



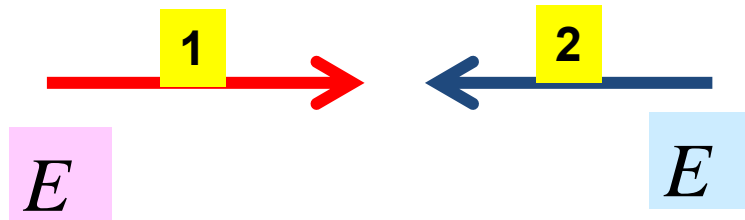
так что

$$s = (E_1 + E_2)^2 - c^2(\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 = (E_1 + E_2)^2 \approx 4E^2$$

Поскольку s инвариант, то

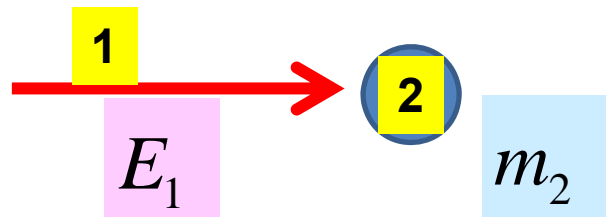
$$s = 4E^2 = 2(m_2c^2)E_1$$

1. Ускоритель со встречными пучками, каждый с энергией 1 ТэВ = 1000 ГэВ



$$2E^2 = 2 \text{ TeV}^2$$

2. Ускоритель с фиксированной протонной мишенью



$$m_2c^2 = 1 \text{ GeV} = 10^{-3} \text{ TeV}$$

$$E_1 = \frac{2E^2}{m_2c^2} = 2000 \text{ TeV}$$





Таким образом, на ускорителе с фиксированной мишенью придется ускорять протон до энергии 2 000 Тэв тогда как энергии встречных пучков = 1 Тэв

Помимо огромных технических трудностей, разгон до 2000 Тэв существенно замедлил бы эксперимент

На БАК время разгона протонов до 1 Тэв приблизительно 15 минут

Время разгона до 2000 Тэв такими же средствами составила бы Почти ДВОЕ СУТОК

Тем не менее иногда без фиксированной мишени не обойтись

ПРИМЕР: Эксперимент COMPASS в ЦЕРНе
Исследование спиновой структуры протонов и нейтронов

Taken from www.compass.cern.ch



COMPASS is a high-energy physics experiment at the Super Proton Synchrotron (SPS) at [CERN](http://www.cern.ch) in Geneva, Switzerland. The purpose of this experiment is the study of hadron structure and hadron spectroscopy with high intensity muon and hadron beams. On February 1997 the experiment was approved conditionally by CERN and the final Memorandum of Understanding was signed in September 1998. The spectrometer was installed in 1999 - 2000 and was commissioned during a technical run in 2001. Data taking started in summer 2002 and continued until fall 2004. After one year shutdown in 2005, COMPASS will resume data taking in 2006. Nearly 240 physicists from 11 countries and 28 institutions work in COMPASS

COMPASS

Taken from www.compass.cern.ch

COMMON **M**UON **P**ROTON **A**PPARATUS **F**OR **S**TRUCTURE **A**ND **S**PECTROSCOPY



Artistic view of the 60 m long COMPASS two-stage spectrometer. The two dipole magnets are indicated in red

