



Всероссийский
Фестиваль
науки



Всероссийский
Фестиваль
науки

Ускользающий мир элементарных частиц



Всероссийский
Фестиваль
науки

В одном мгновенье видеть вечность,
Огромный мир - в зерне песка,
В единой горсти - бесконечность
И небо - в чашечке цветка.

W.Blake/С.Маршак

Ускользающий мир элементарных частиц



Всероссийский
Фестиваль
науки

В одном мгновенье видеть вечность,
Огромный мир - в зерне песка,
В единой горсти - бесконечность
И небо - в чашечке цветка.

W.Blake/С.Маршак

Ускользающий мир элементарных частиц

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт



Как устроен микромир?

Как узнать что там внутри?

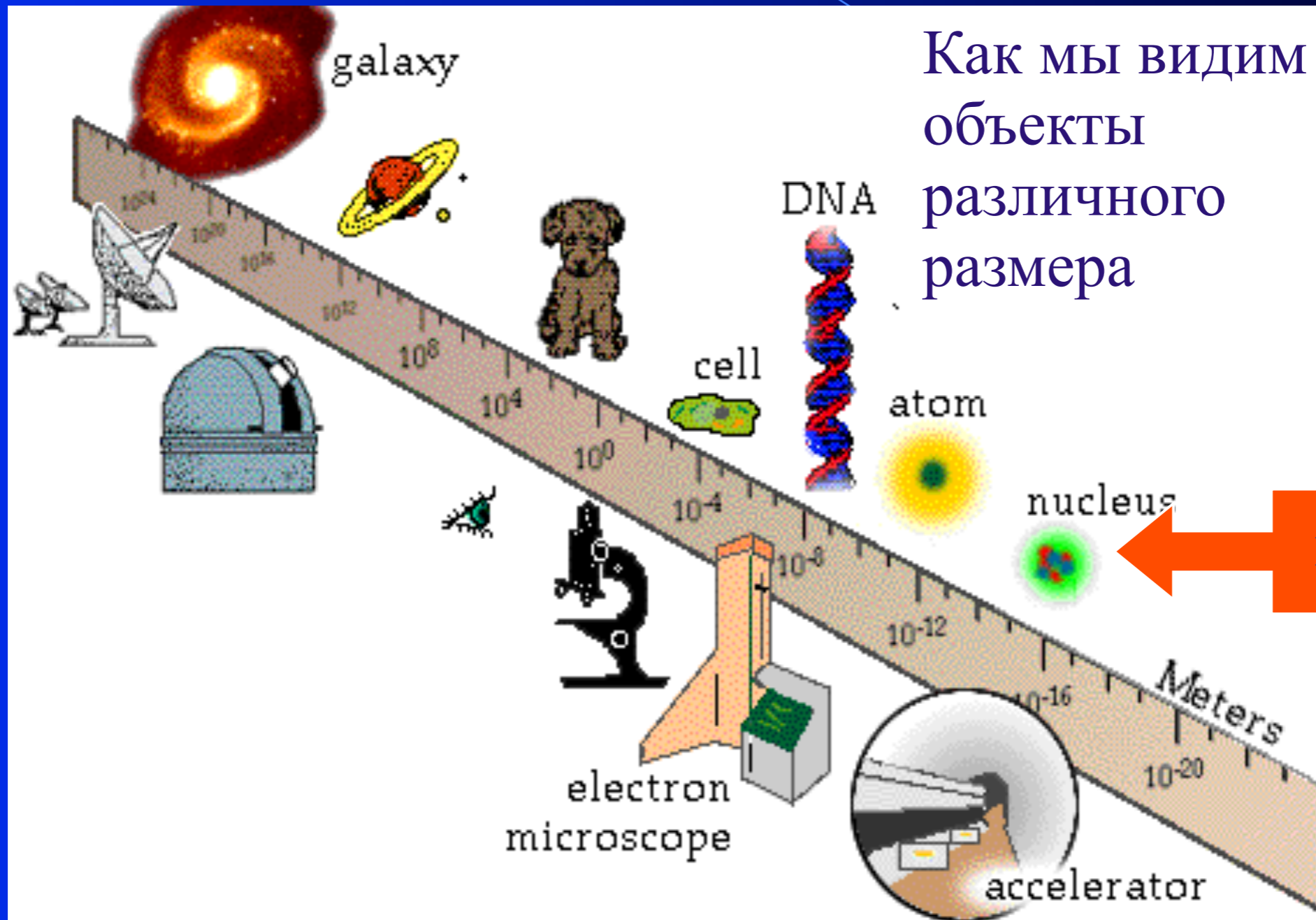
О чём говорят нам
осколки события?



e^- e^+

В основе лежит простая и
элегантная
математическая схема

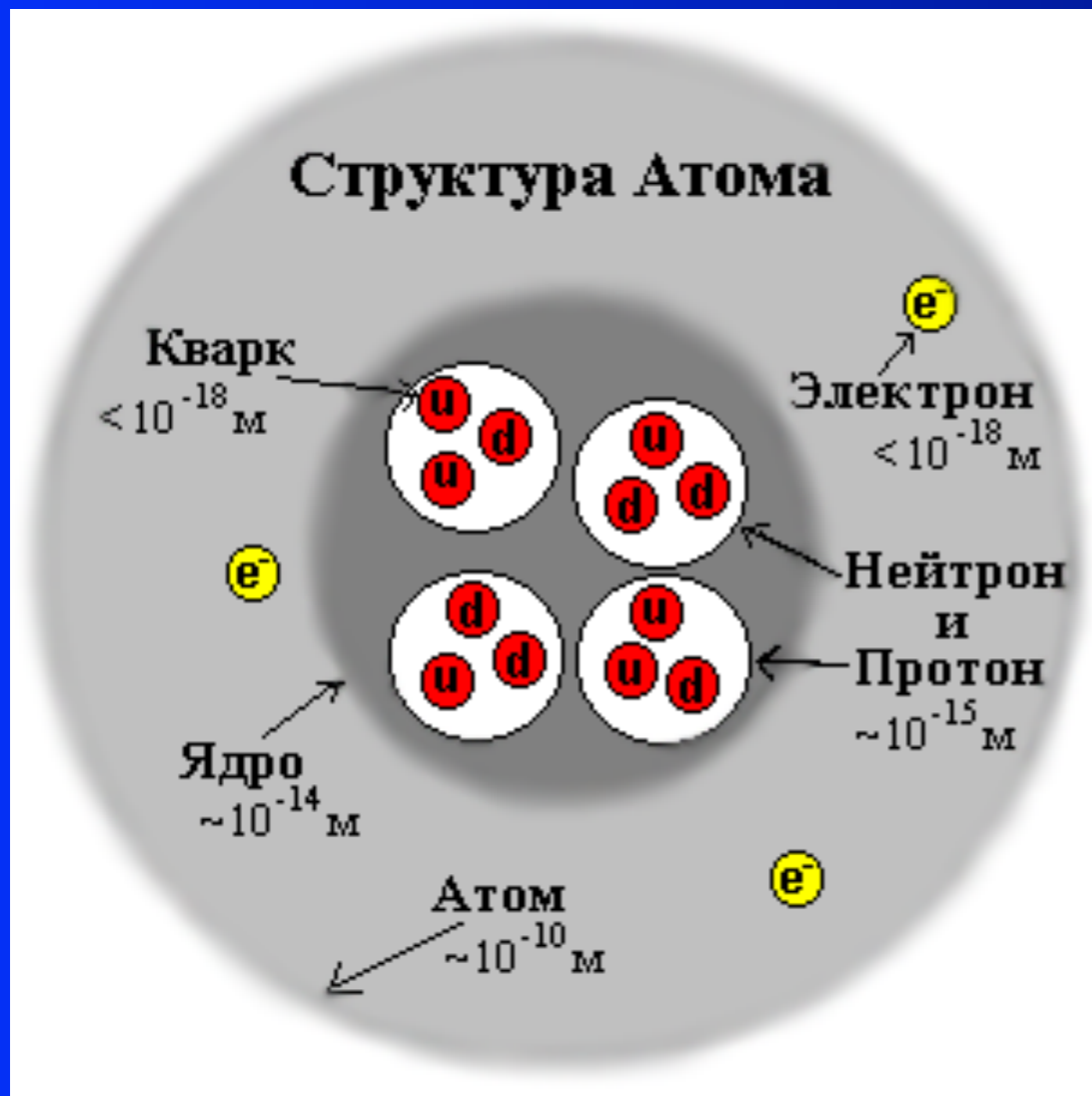
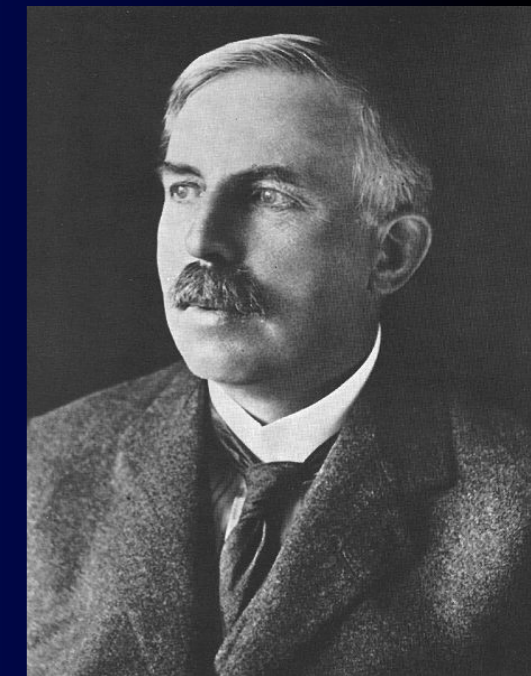
Макро и микро космос на шкале расстояний



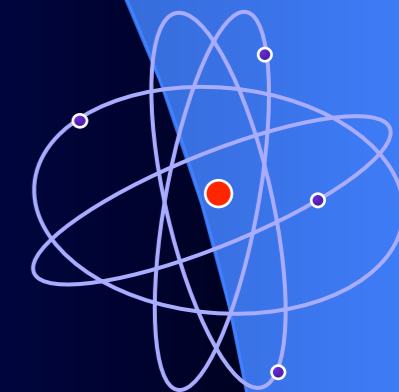
Как мы видим
объекты
различного
размера

← микромир

Структура Атома



В 1912 Э.Резерфорд бомбардировал атомы α -частицами и открыл, что атомы имеют маленькое твёрдое ядро $\sim 10^{-14}$ м



Открытие элементарных частиц

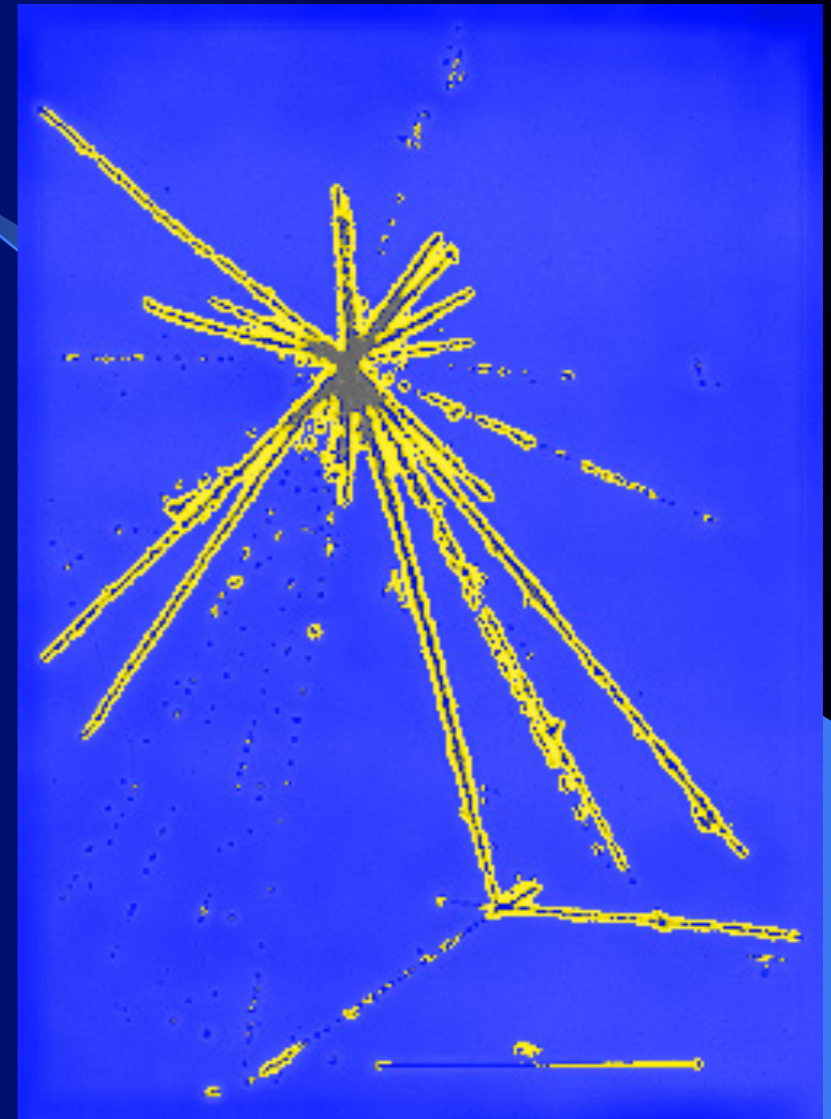
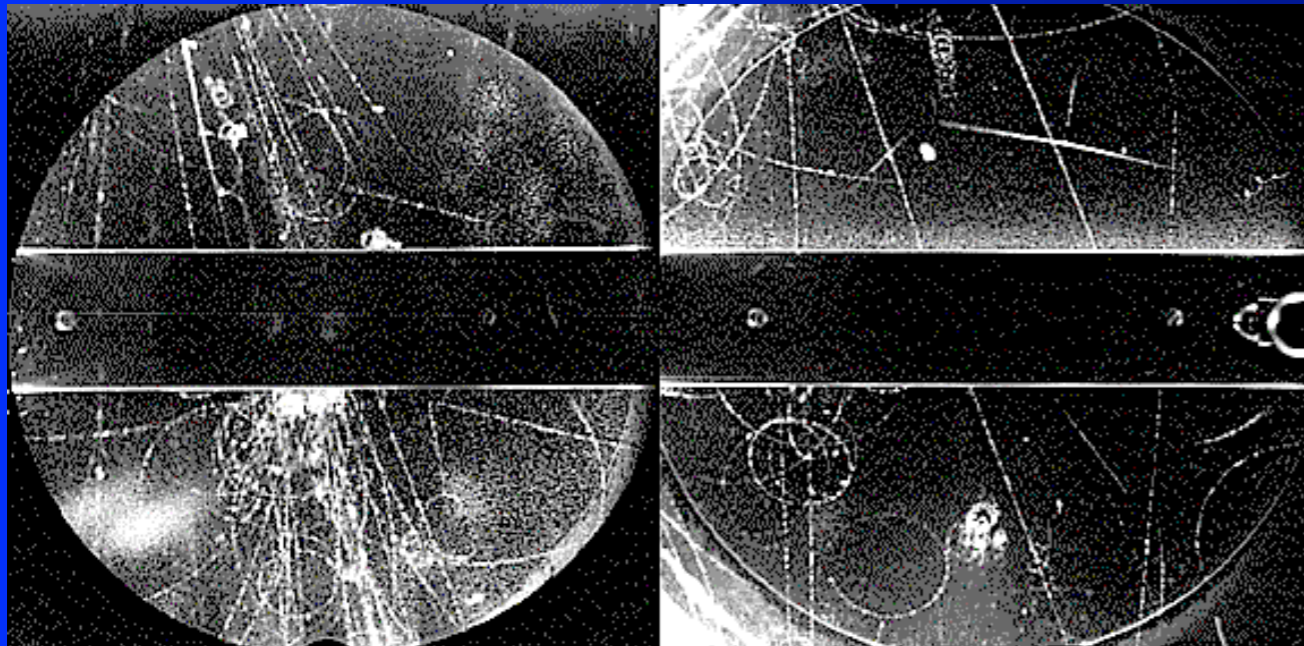


- Целый зоопарк элементарных частиц был открыт на ускорителях
- Это было окном в новый мир - микромир

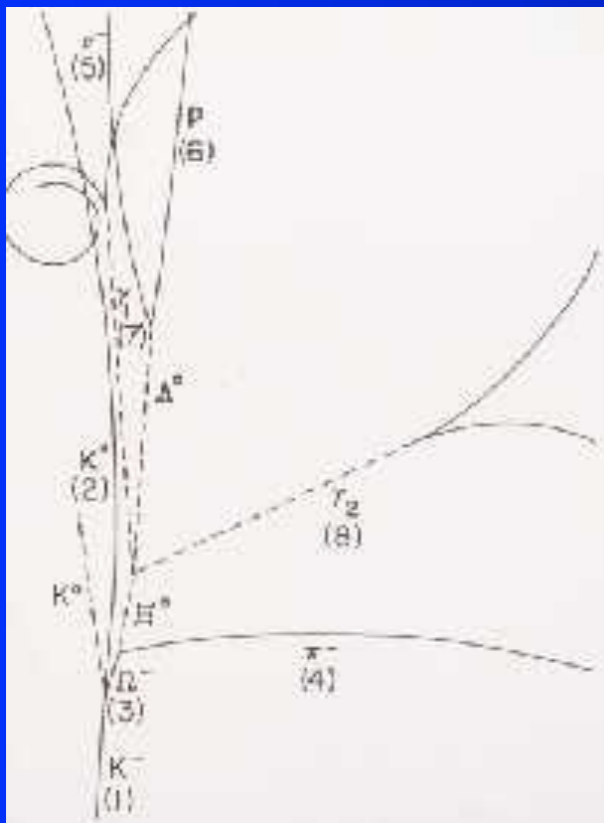
Открытие Странности

Открытие К-мезона в 1947 г. и Λ - гиперона в 1952 г. явилось первым указанием на то, что частицы из которых мы состоим - это ещё не всё.

По какой-то неизвестной причине природа хочет чего-то-ещё!



Кварковая Модель



- Открытие «омега-минус» в Брукхэйвене в 1964 г. было последним элементом субатомной мозаики.

- Оно явилось подтверждением угадываемой связи между частицами, которая была вскоре понята на языке их внутренней структуры в форме кварков.

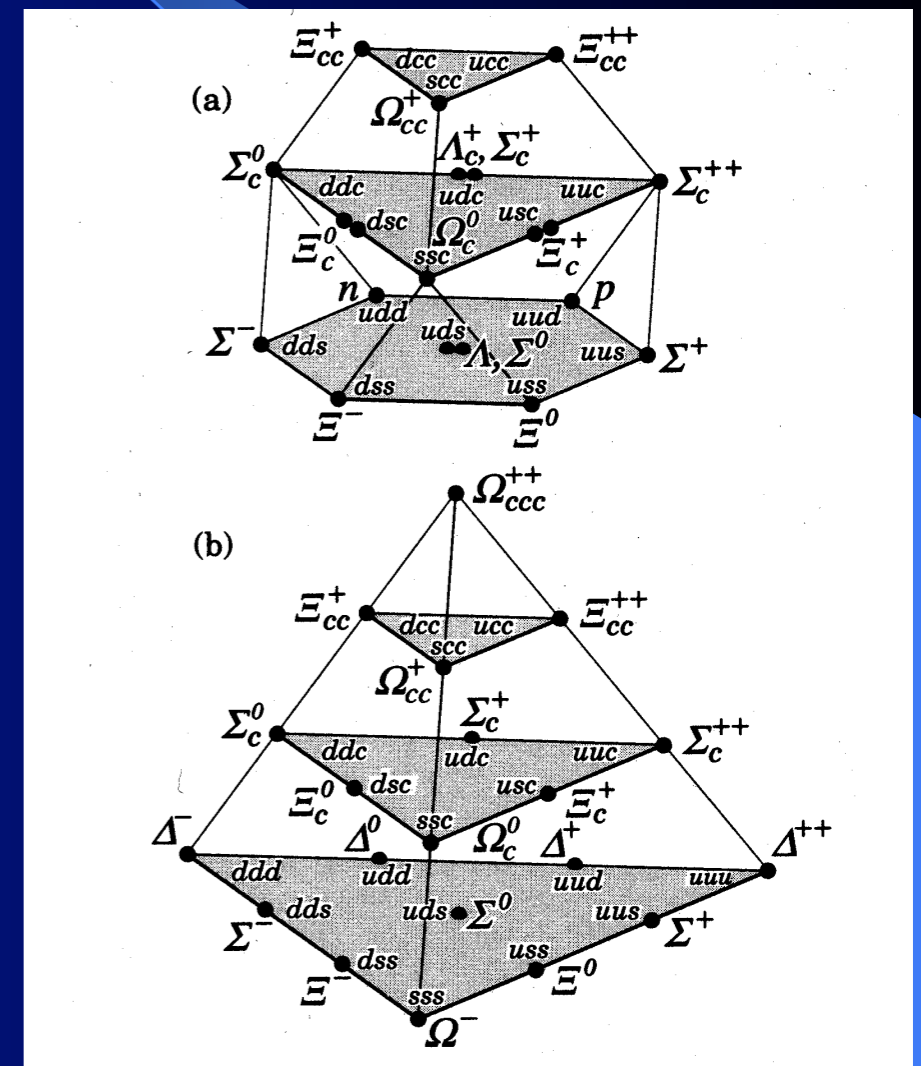
$$\Sigma^0 (d \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

$$\Xi^+ (d \uparrow c \uparrow c \downarrow)$$

$$\Lambda^+ (u \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

$$\Delta^- = \varepsilon^{ijk} (d_i \uparrow d_j \uparrow d_k \uparrow)$$

Для преодоления принципа запрета Паули была введена антисимметризация по «цвету»



Кварки — “кирпичики мироздания”



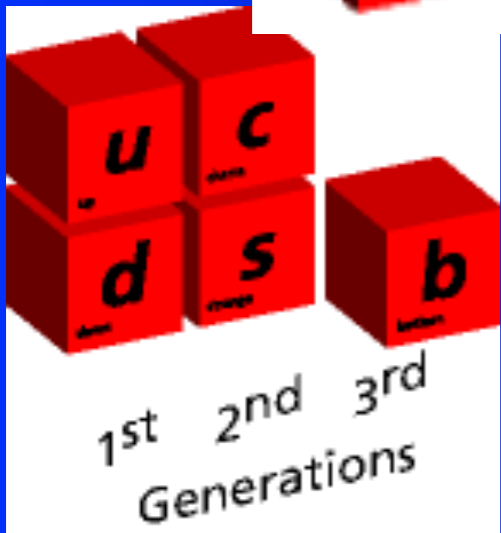
- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения

Кварки — “кирпичики мироздания”



- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения

Кварки — “кирпичики мироздания”

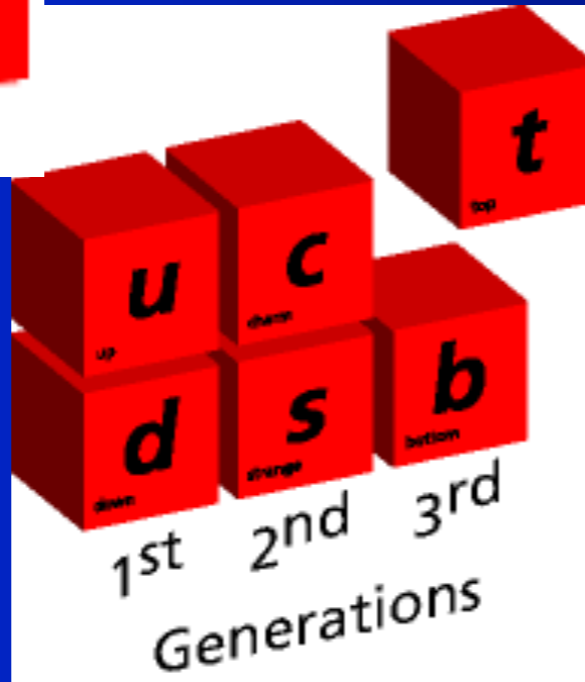
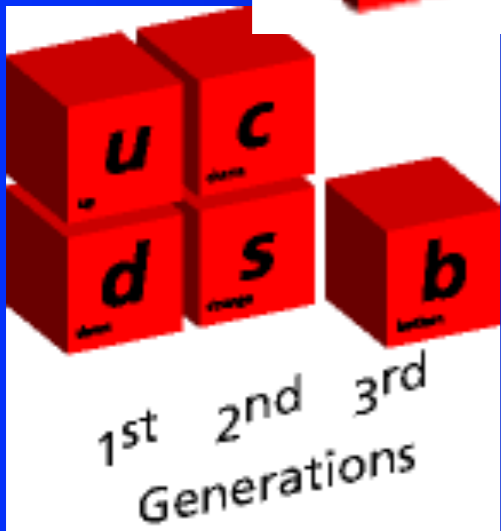


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения

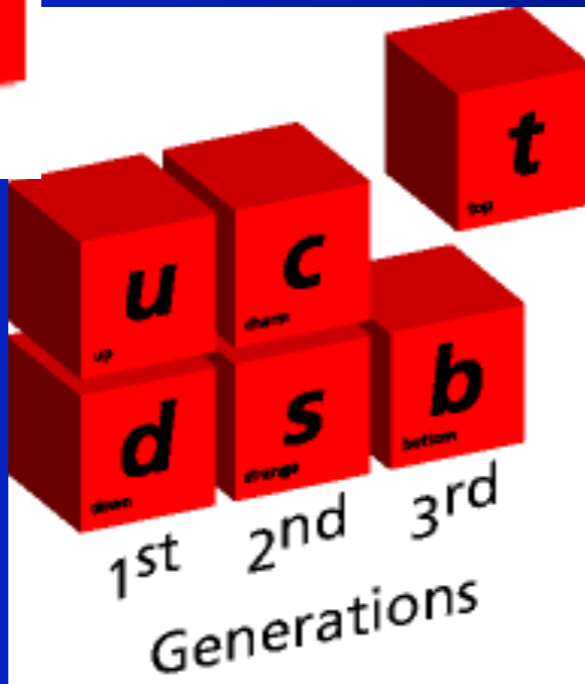
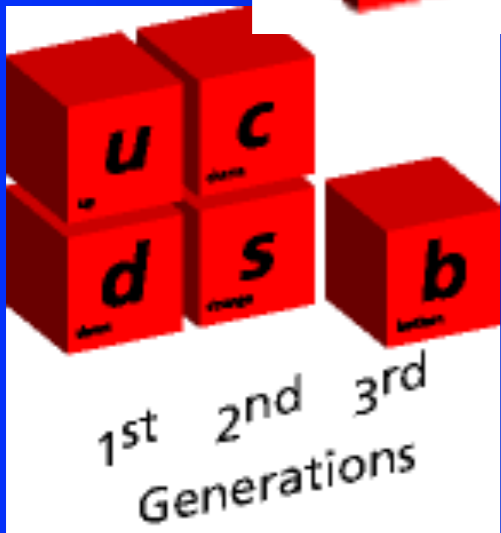
Кварки — “кирпичики мироздания”



- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения









Кварки — “кирпичики мироздания”

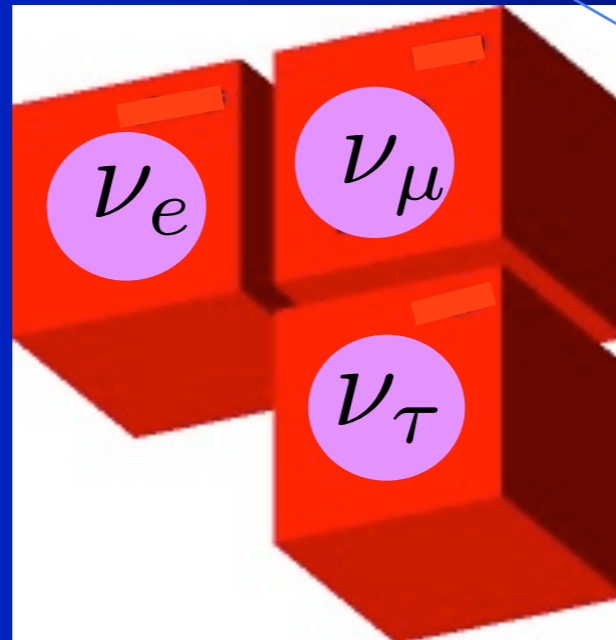
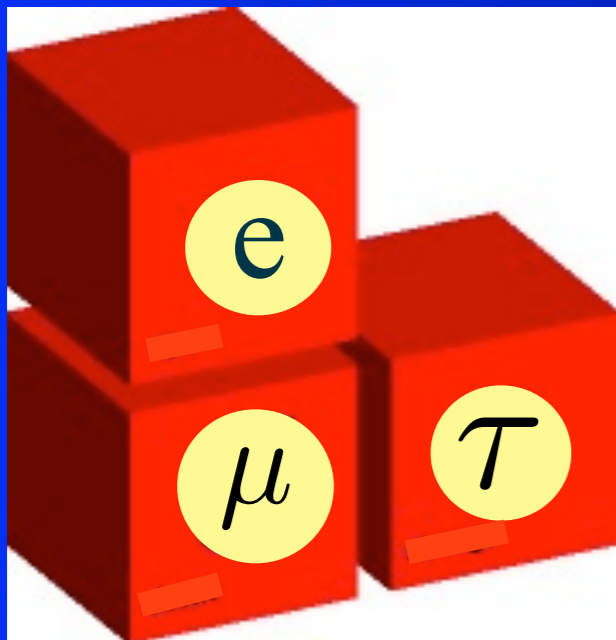


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

По непонятной причине природа создала 3 копии (поколения) кварков и лептонов

$(\frac{2}{3})$ up	$(\frac{2}{3})$ charm	$(\frac{2}{3})$ top
		
		
down $(-\frac{1}{3})$	strange $(-\frac{1}{3})$	bottom $(-\frac{1}{3})$

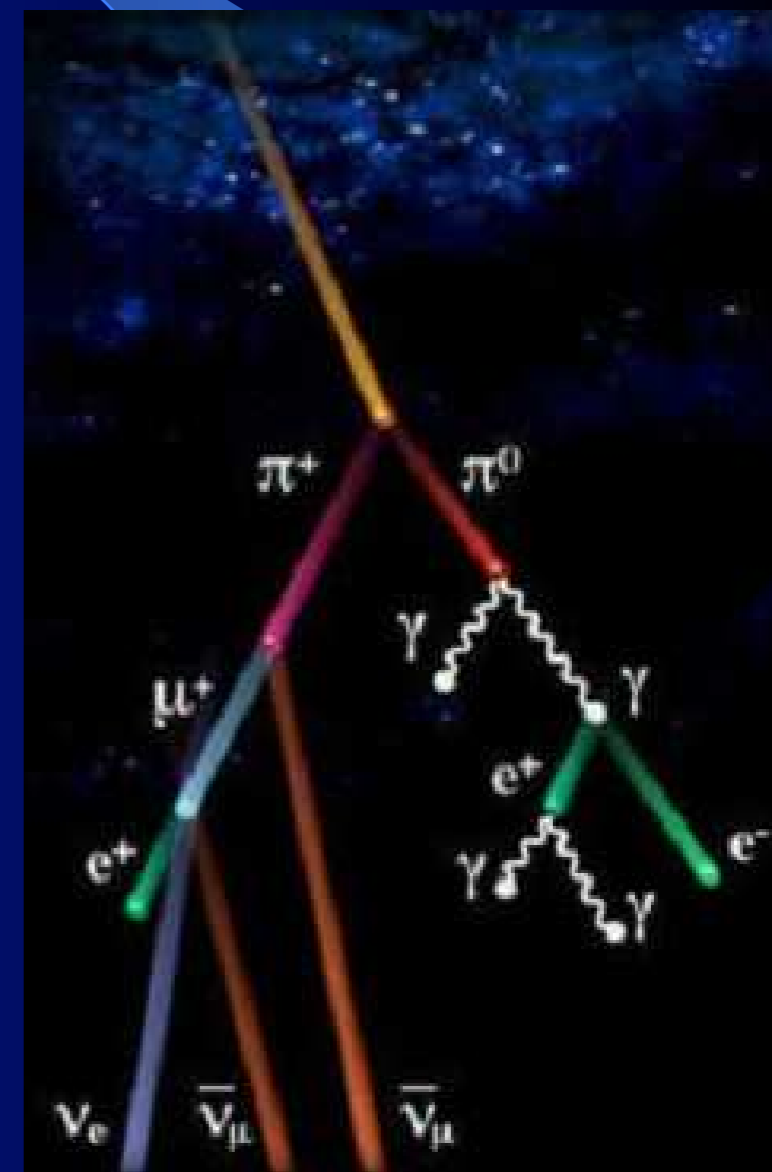
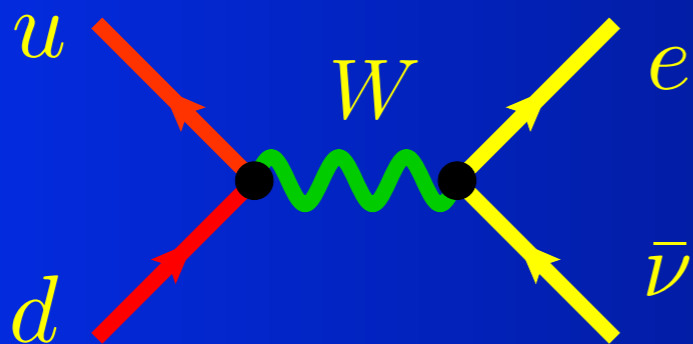
Лептоны от слова ΛΕΤΤΌΣ



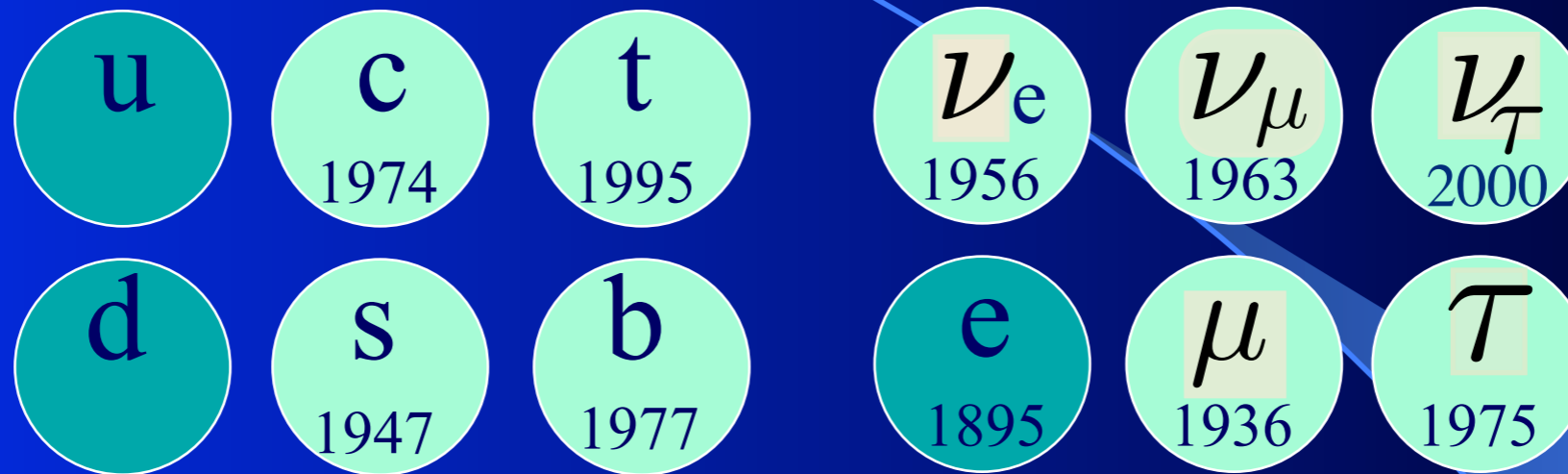
Мюоны рождаются от распада π -мезонов в космических лучах и распадаются на электроны и два нейтрино

Электроны образуют оболочки атомов и определяют всю химию неживой и живой природы

Нейтрино рождаются в процессах распада адронов $n(udd) \rightarrow p(uud) + e + \bar{\nu}$



История открытий



шесть кварков

шесть лептонов

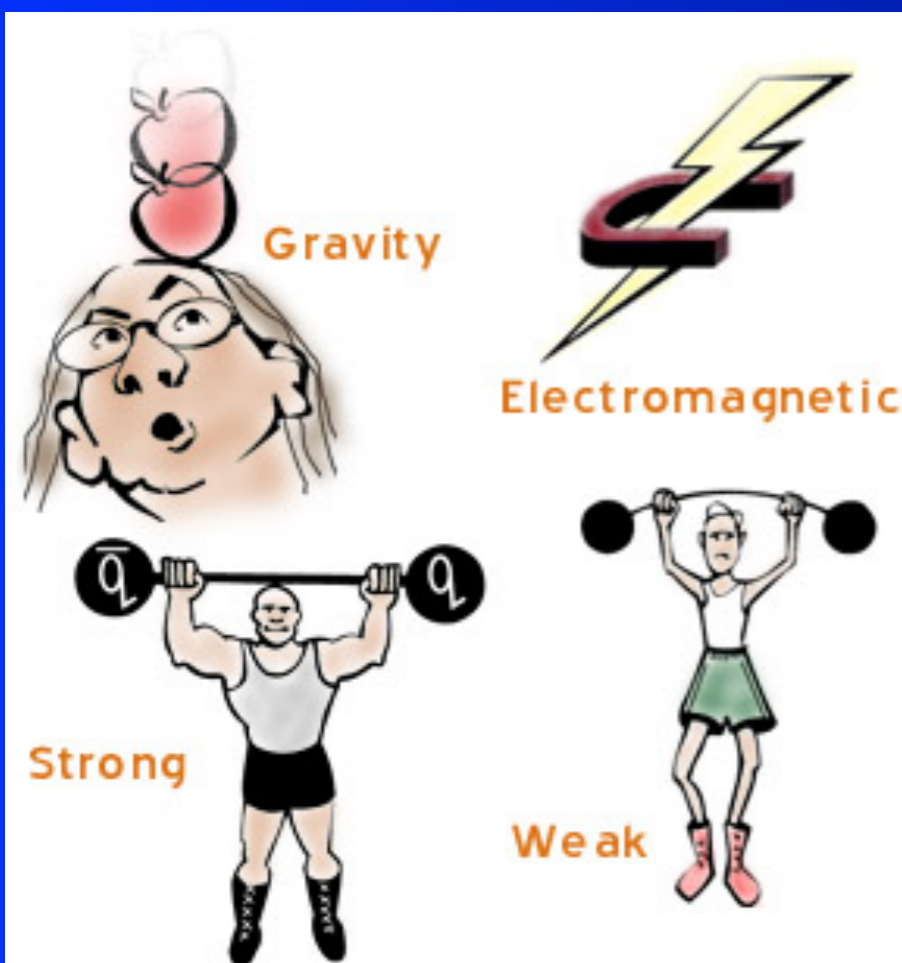


Теперь у нас есть замечательная картина из трёх пар кварков и трёх пар лептонов и пяти переносчиков фундаментальных взаимодействий. Здесь показана также история их открытия.

Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе

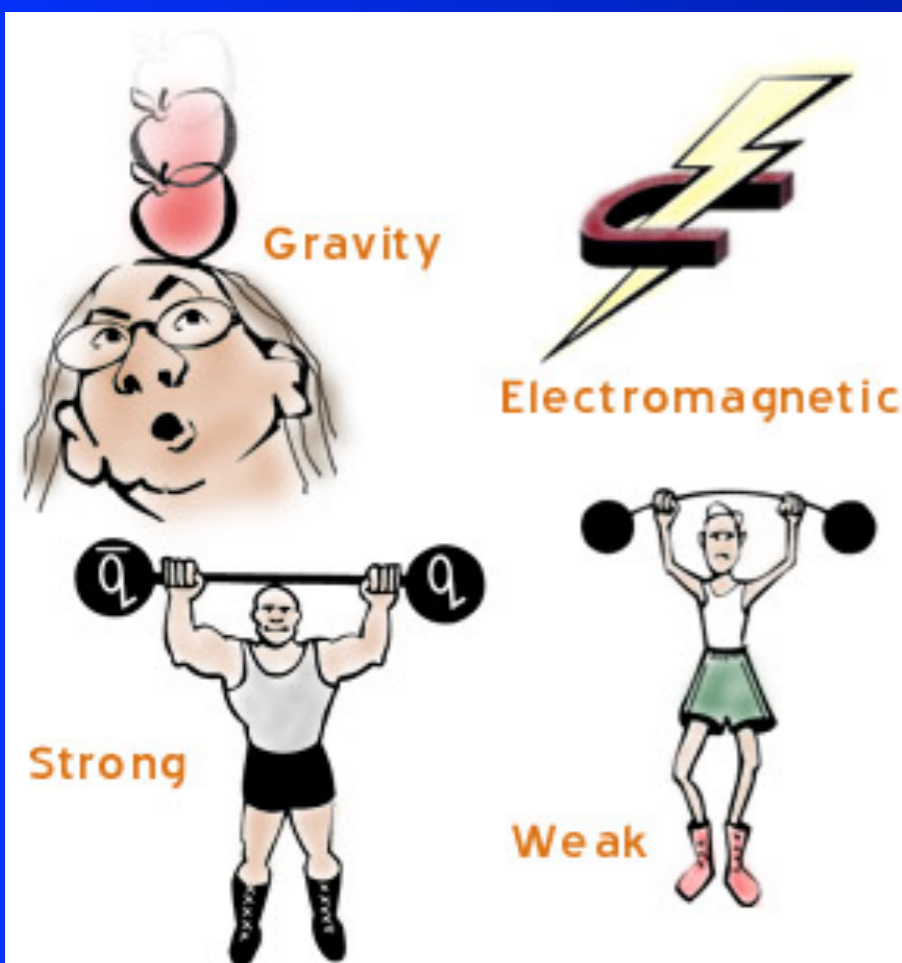


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе



Пятая сила - обмен хиггсовским бозоном

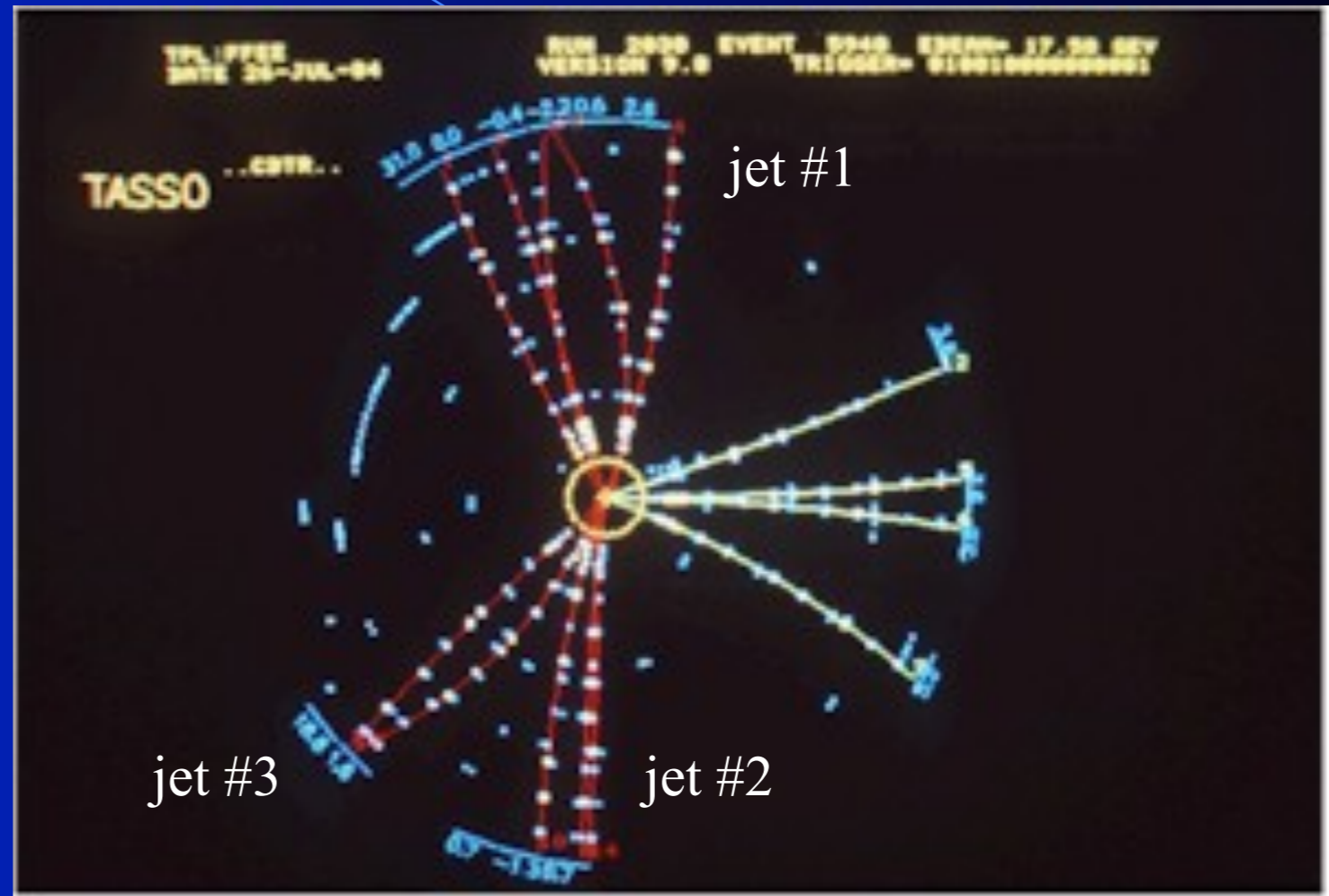


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

Открытие глюона




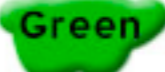


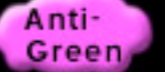

- Глюон – переносчик сильных взаимодействий был открыт в 1979 году на ускорителе PETRA (DESY)
- Свидетельством открытия глюона явилось наличие трёх-струйного события в рассеянии адронов



$$g_{ij}^a$$

$$a = 1, \dots, 8$$

$$i, j = 1, 2, 3 \quad \leftarrow \text{«ЦВЕТ»}$$

			Color
			Quarks
			Anti-Quarks
			Anti-Color

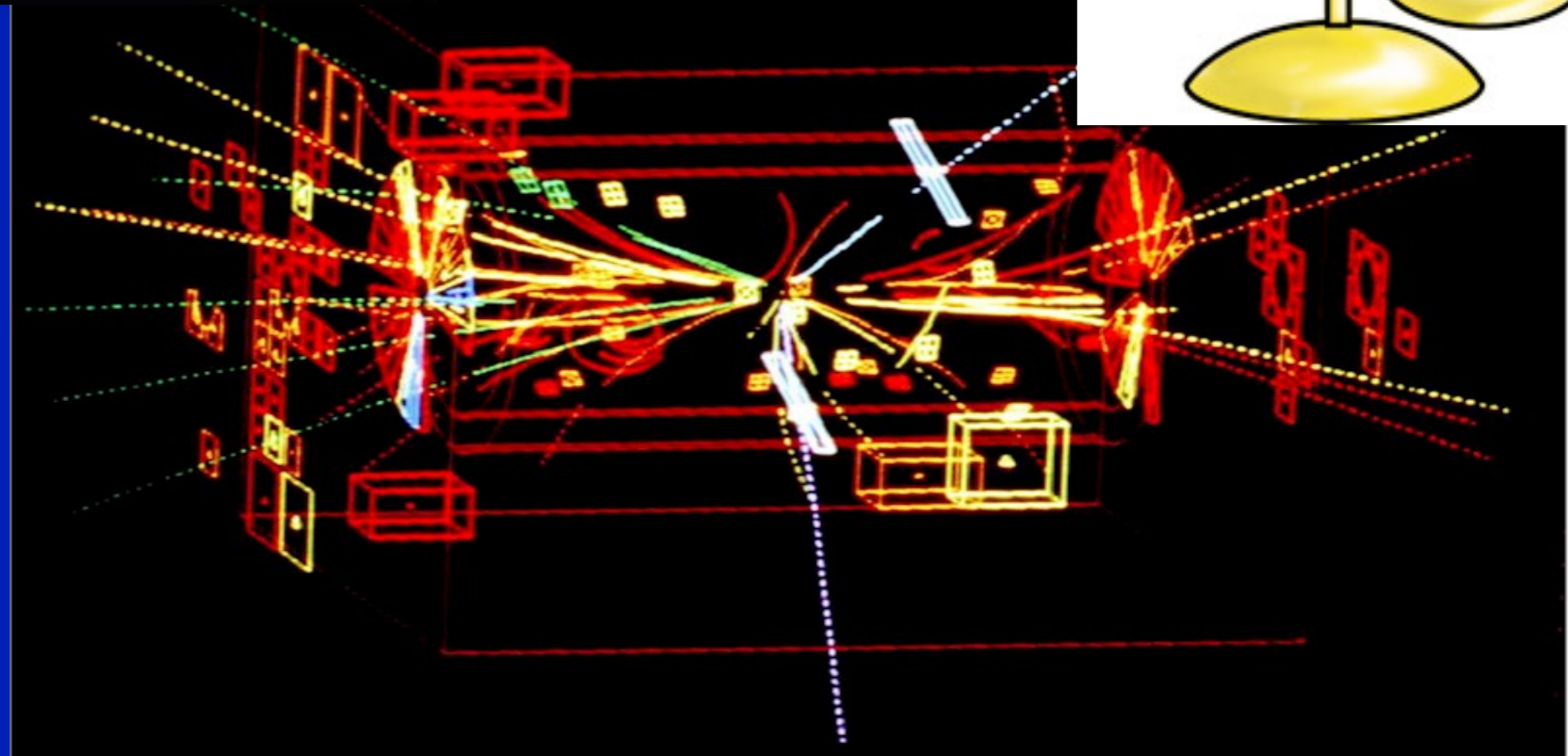
Открытие W и Z бозонов



- Открытие W и Z бозонов – переносчиков слабых взаимодействий на ускорителе SPS (CERN) в 1983 году



явилось триумфом
Стандартной модели
фундаментальных
взаимодействий



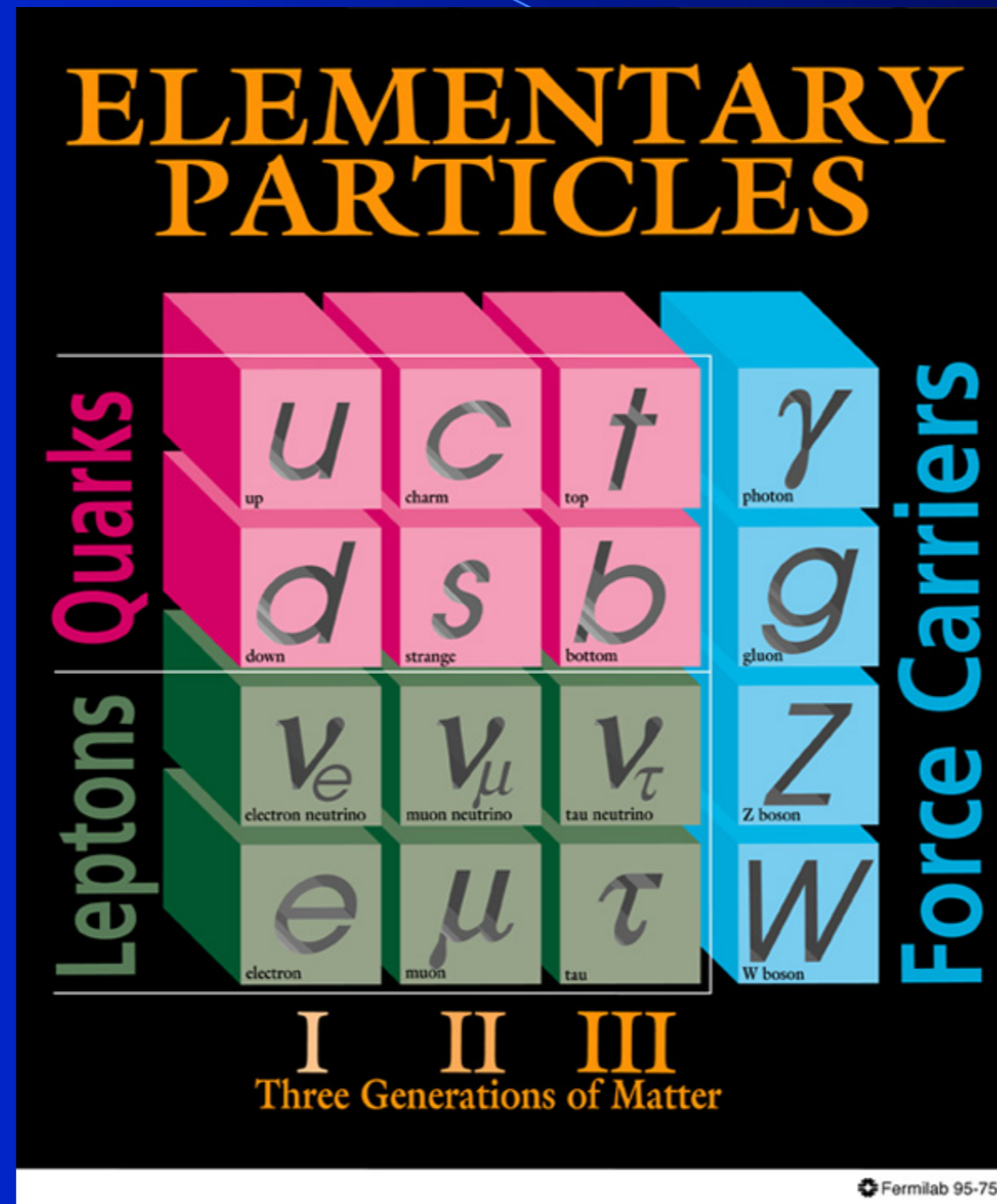
Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

ФЕРМИОНЫ



Силы

Электромагнитные

Сильные

Слабые

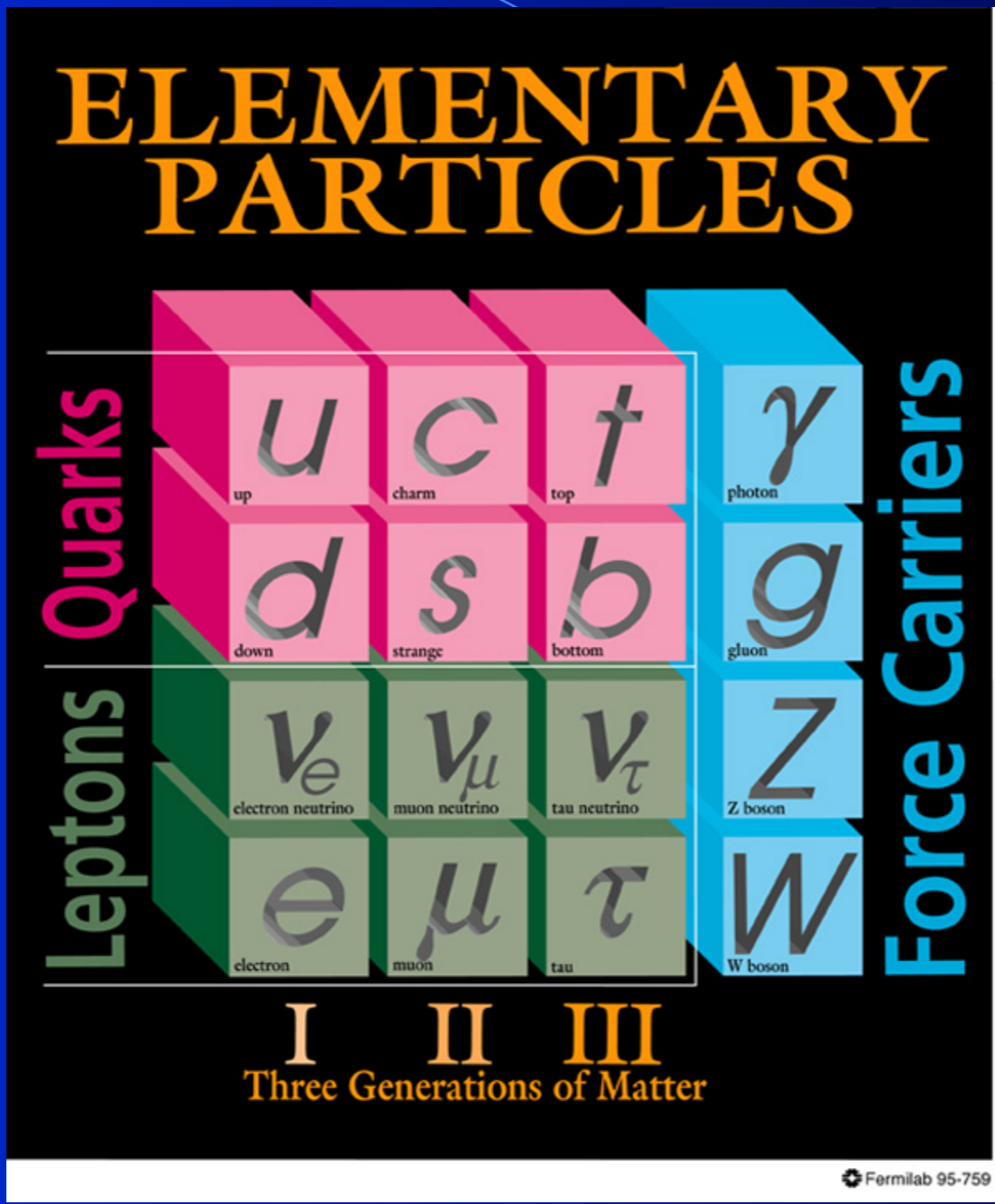
Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

У
Д
И
Т
С
А
Ч



Силы

Электромагнитные

Сильные

Слабые

H

Хиггсовский бозон

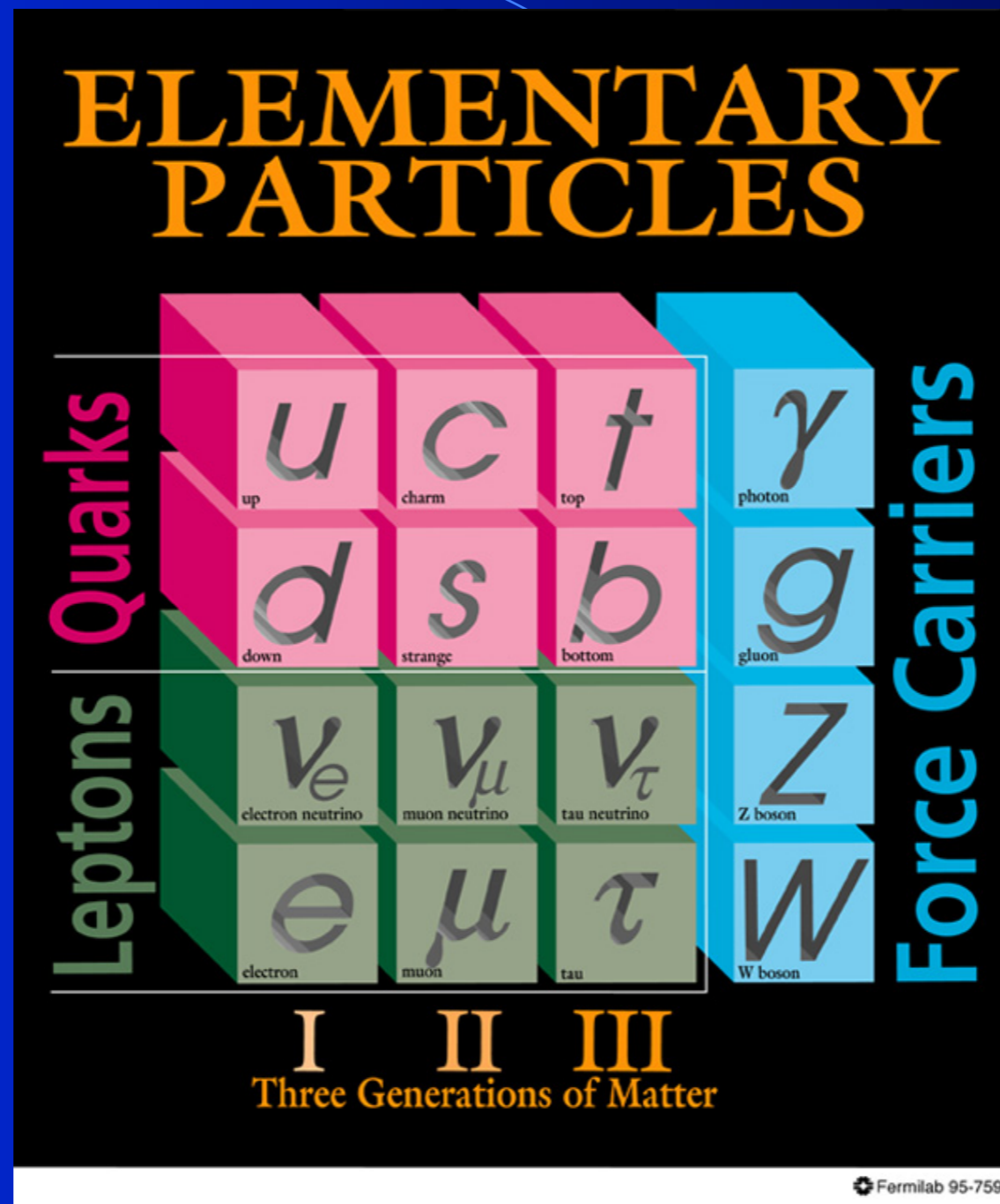
Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

У
Д
К
И
С
А
Ч
Ы
Д
И
М
Д
У



Силы

Электромагнитные

Сильные

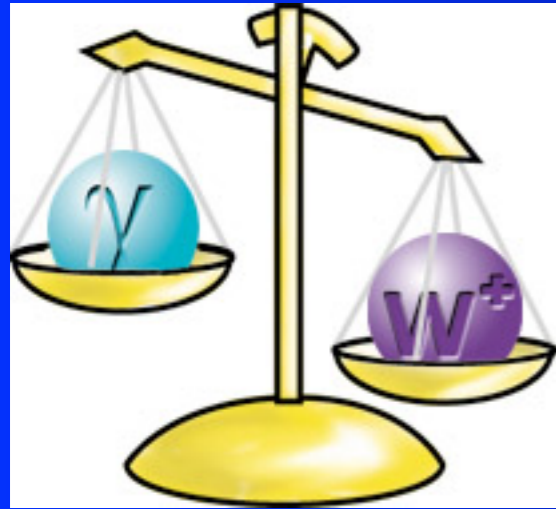
Слабые

H

Хиггсовский бозон

Гравитация

ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН



Поле Браута-Энглера-Хиггса

$$\langle H(x) \rangle = v$$

среднее значение поля

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

$$m_{quark} = y_{quark} \cdot v$$

$$m_{lepton} = y_{lepton} \cdot v$$

$$m_W = g \cdot v$$

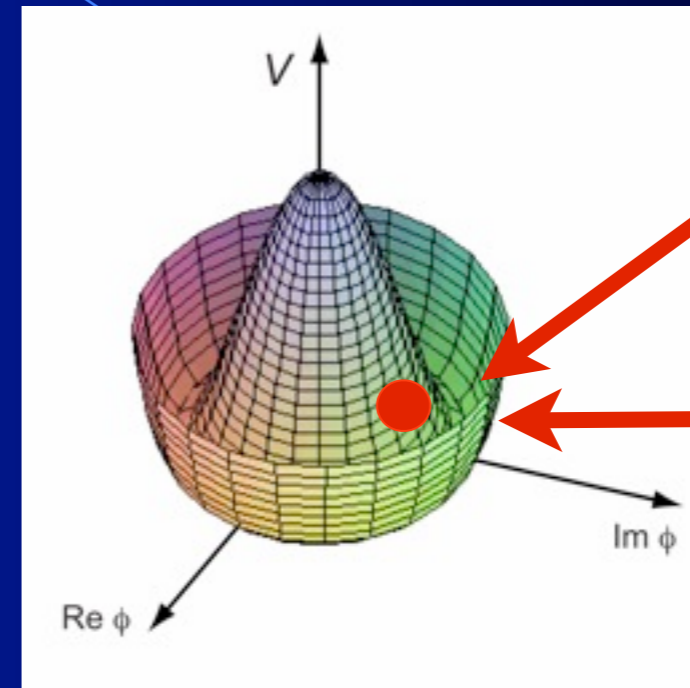
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

$$m_H = \sqrt{\lambda} \cdot v$$

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

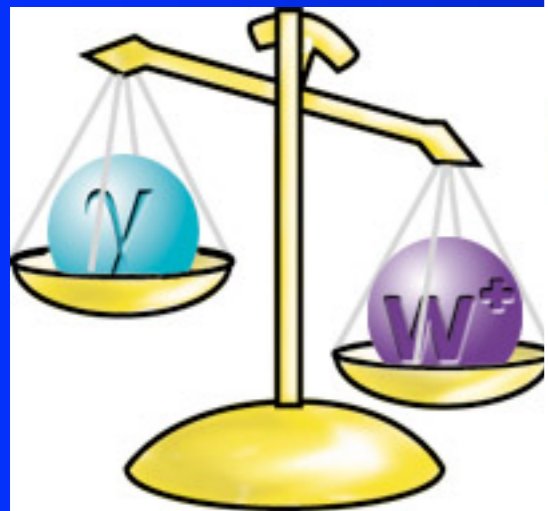
Потенциал



Основное
состояние

Спонтанное
нарушение
симметрии

Хиггсовский бозон - квантовое возбуждение поля Браута-Энглера-Хиггса, безспиновая нейтральная частица - переносчик «пятой силы»



The Nobel Prize in Physics 2013
François Englert, Peter W. Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013

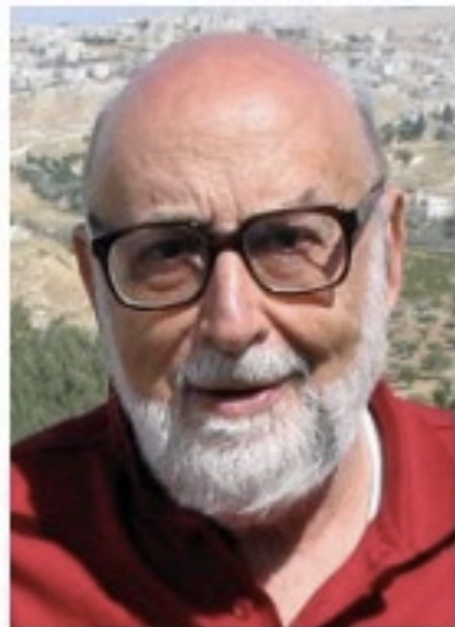


Photo: Pnicolet via Wikimedia Commons

François Englert



Photo: G-M Greuel via Wikimedia Commons

Peter W. Higgs

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

ОН

Основное состояние

Спонтанное нарушение симметрии

е
лера-Хиггса,
ица -

Массы элемен
в Стандар

$$m_{quark} =$$

$$m_{lepton} =$$

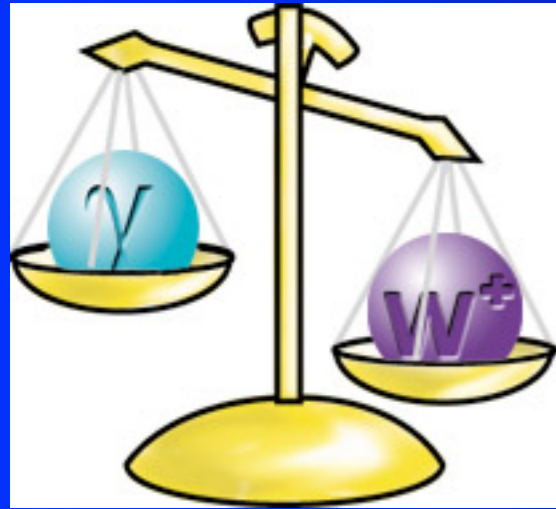
$$m$$

$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2}$$

$$m_F$$

$$m$$

ХИГГСОВСКИЙ БОЗОН



Поле Браута-Энглера-Хиггса

$$\langle H(x) \rangle = v$$

среднее значение поля

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

$$m_{quark} = y_{quark} \cdot v$$

$$m_{lepton} = y_{lepton} \cdot v$$

$$m_W = g \cdot v$$

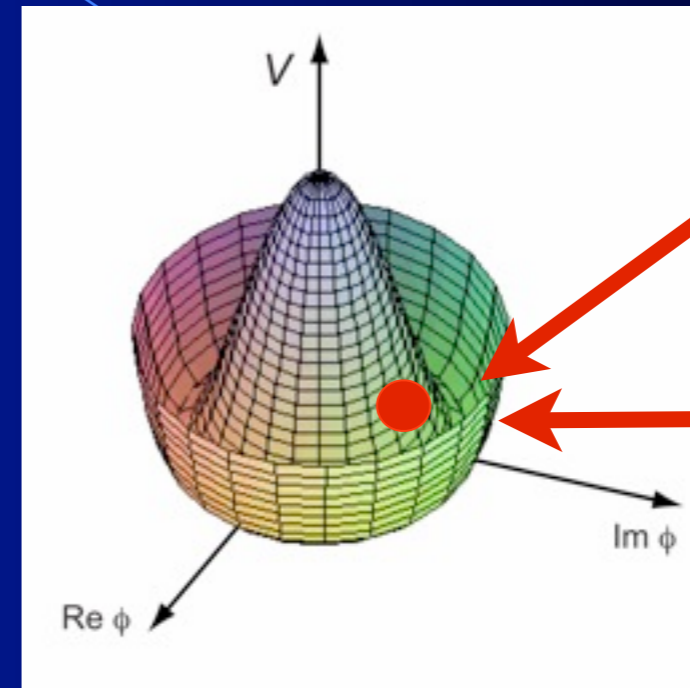
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

$$m_H = \sqrt{\lambda} \cdot v$$

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Потенциал



Основное
состояние

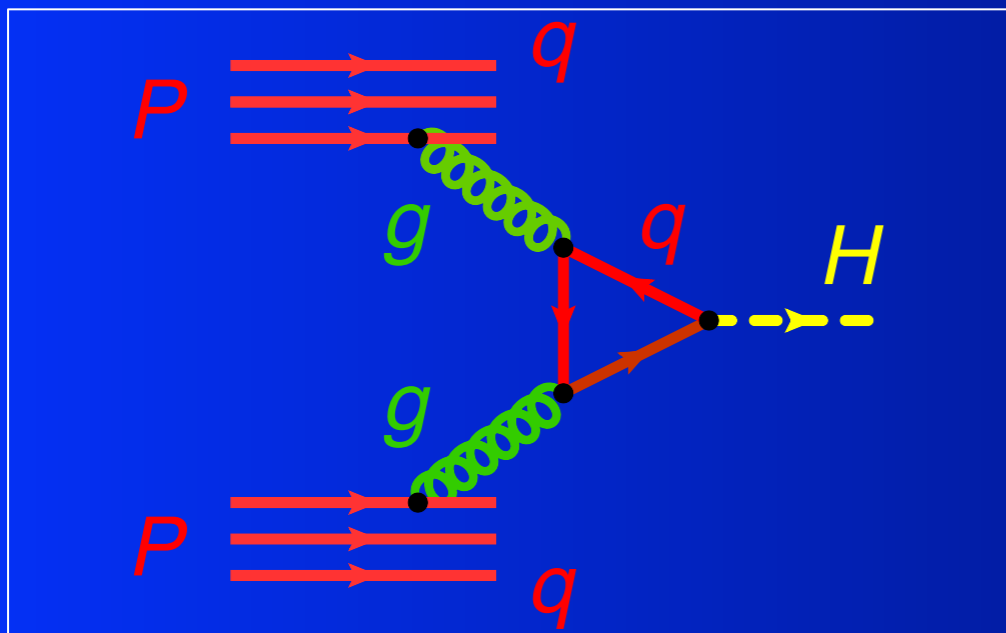
Спонтанное
нарушение
симметрии

Хиггсовский бозон - квантовое возбуждение поля Браута-Энглера-Хиггса, безспиновая нейтральная частица - переносчик «пятой силы»

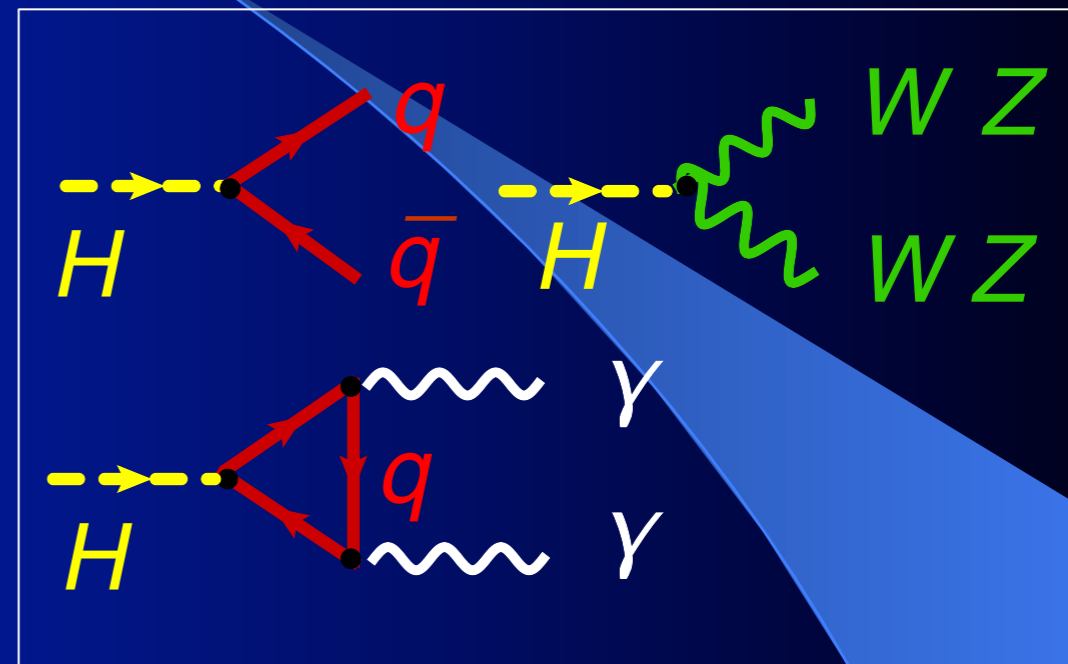
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



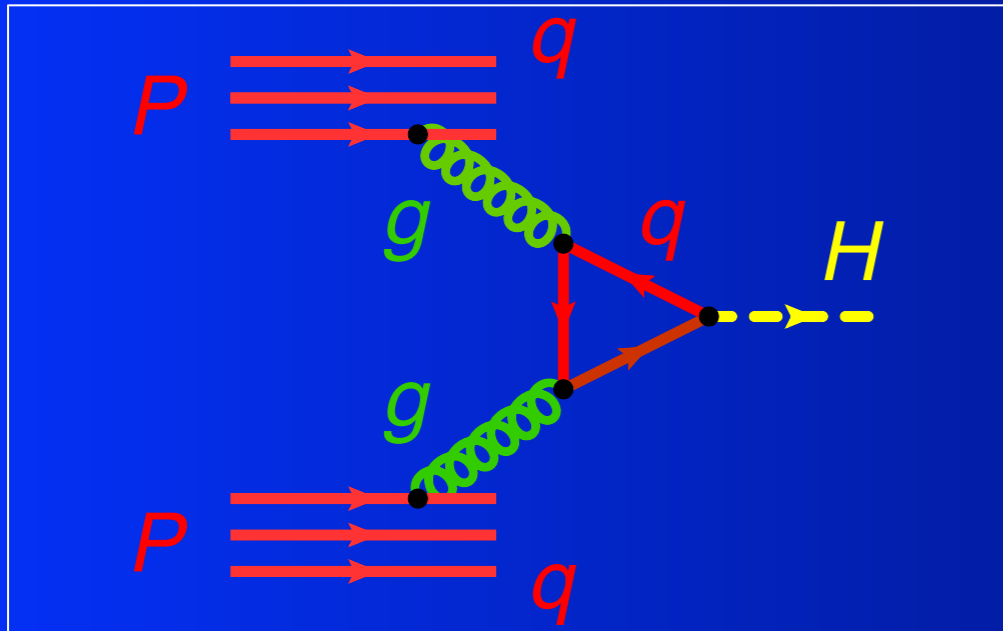
Процессы распада



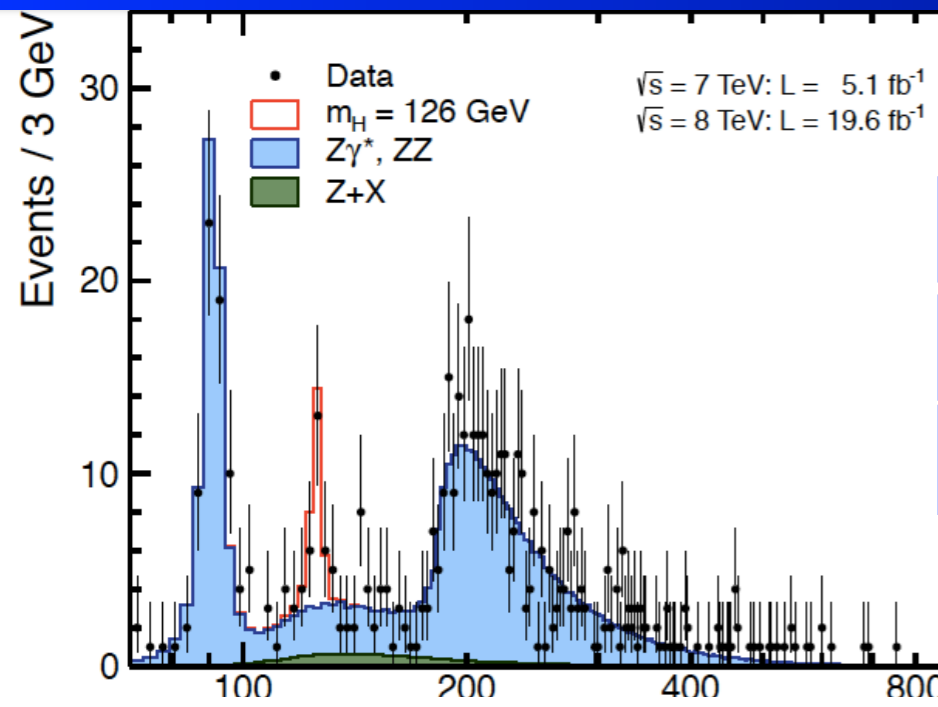
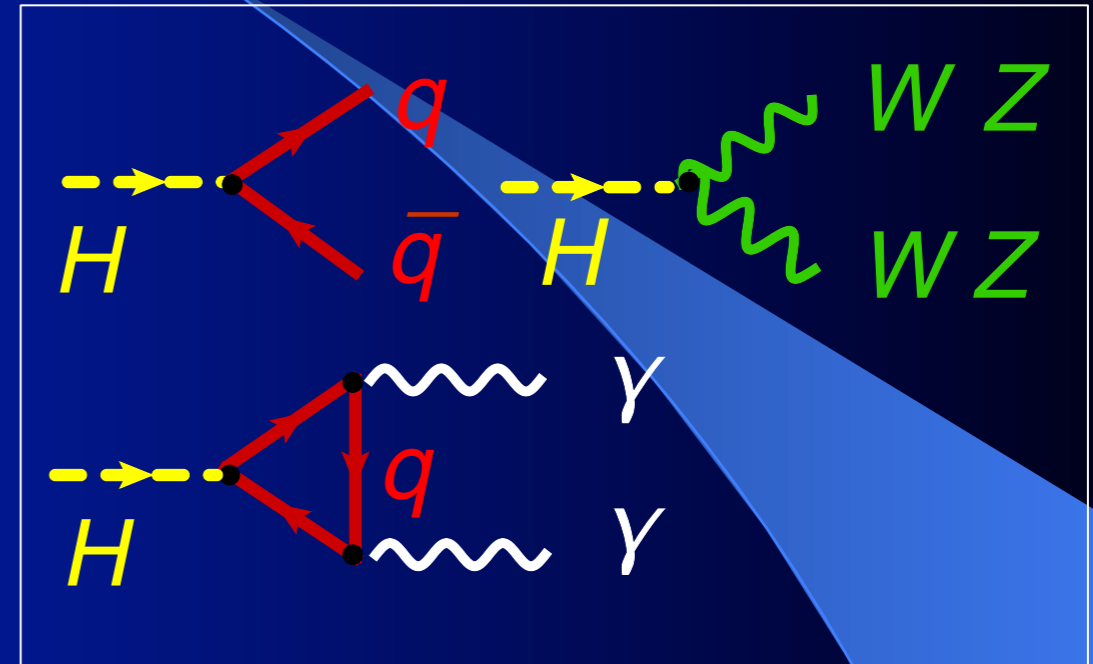
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



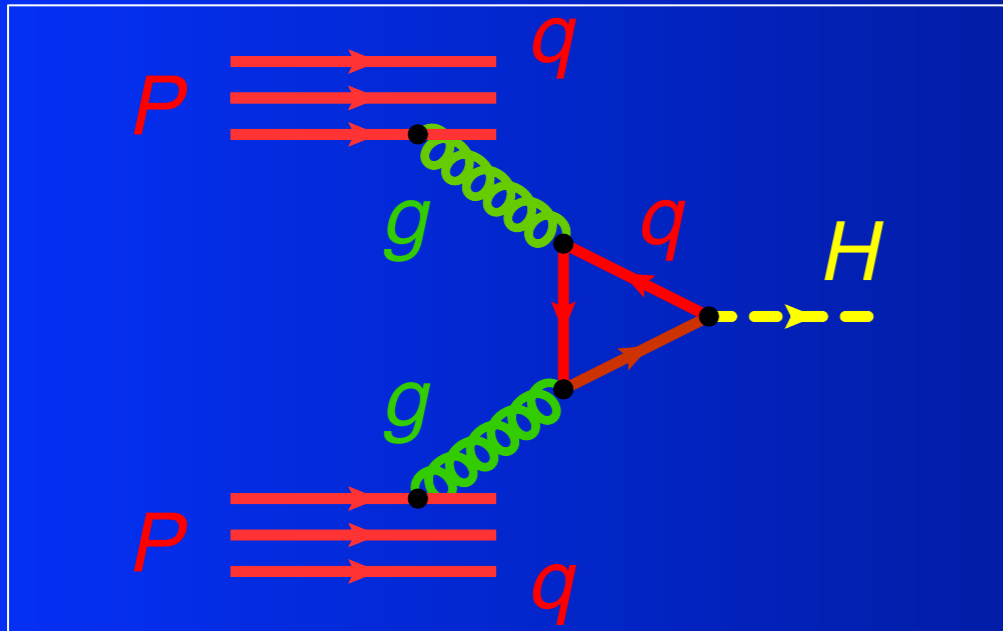
Процессы распада



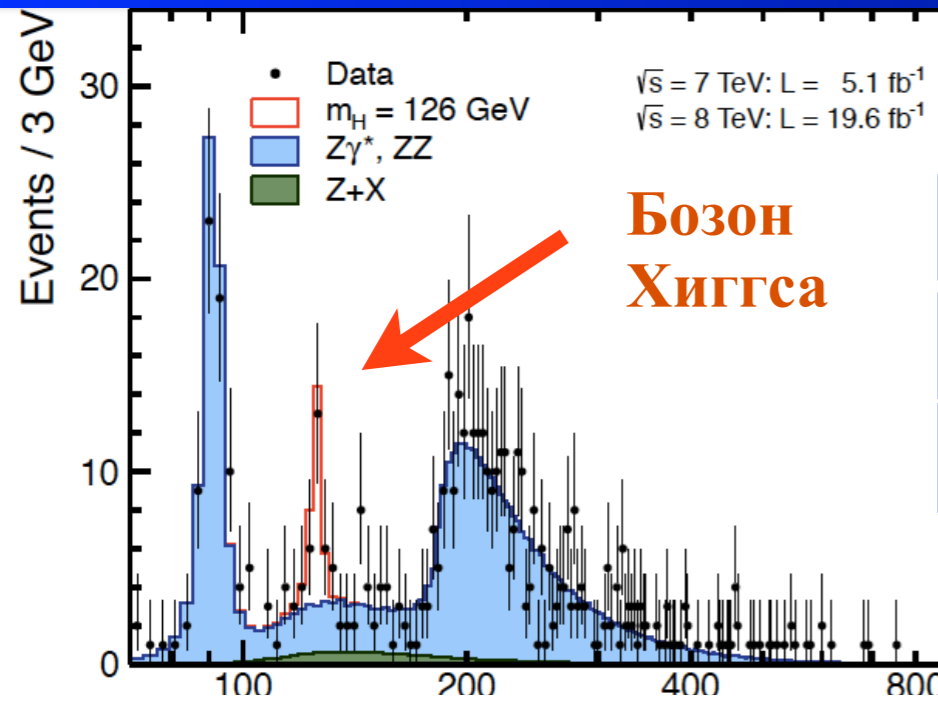
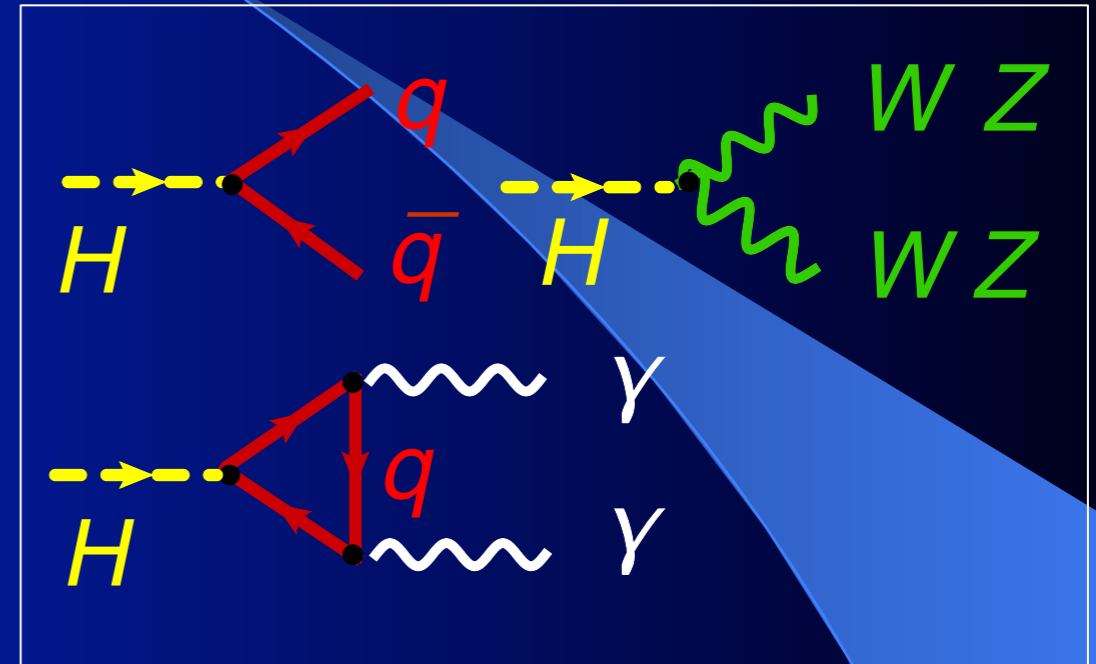
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



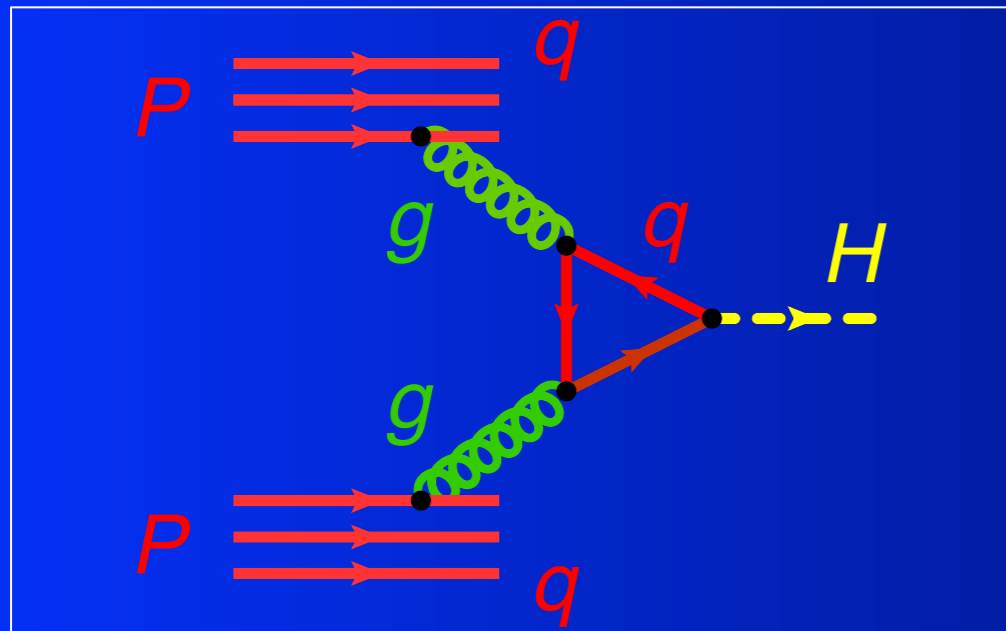
Процессы распада



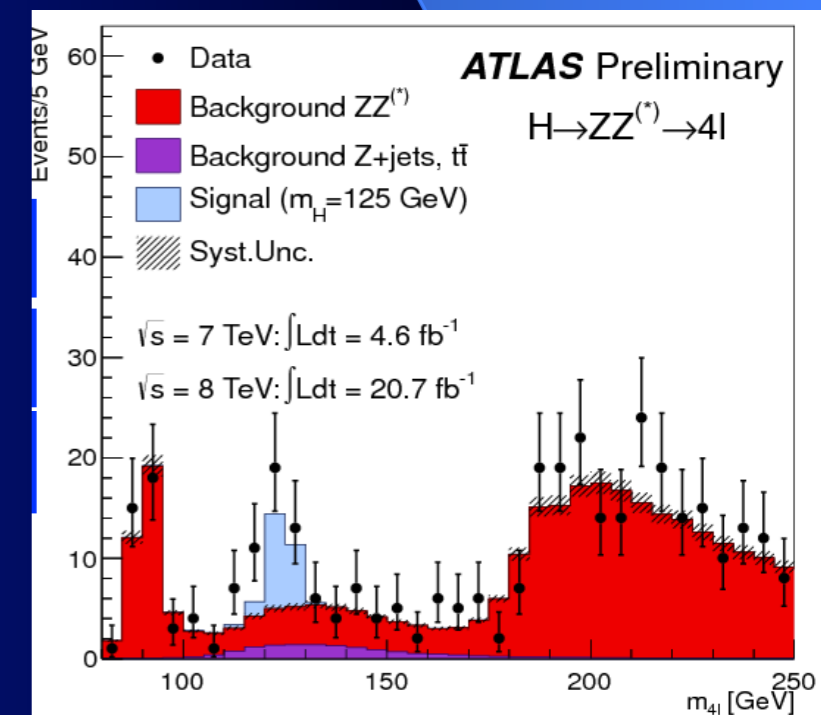
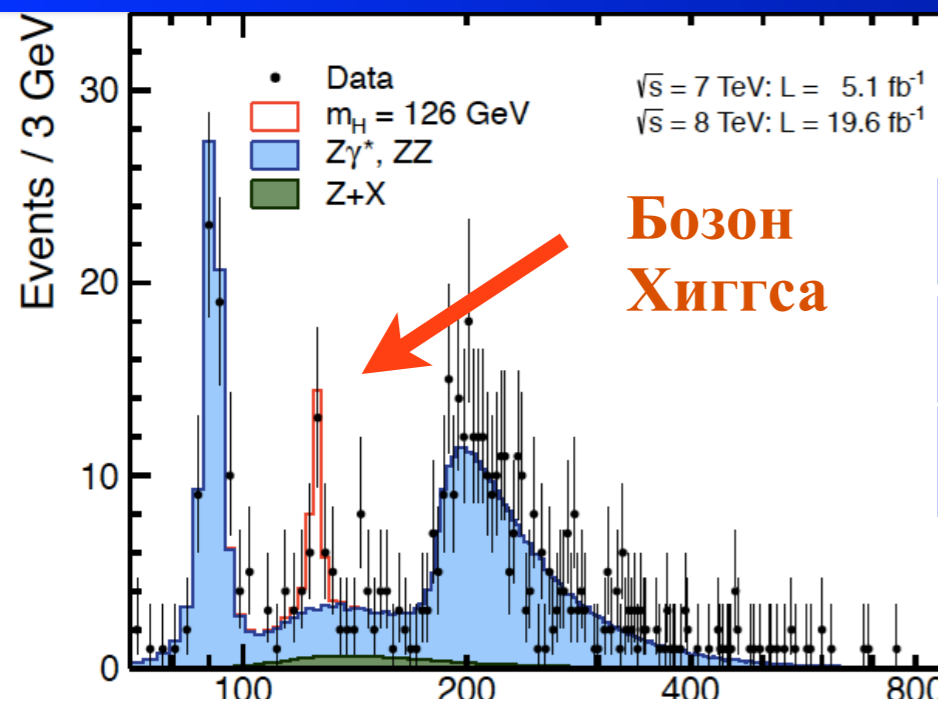
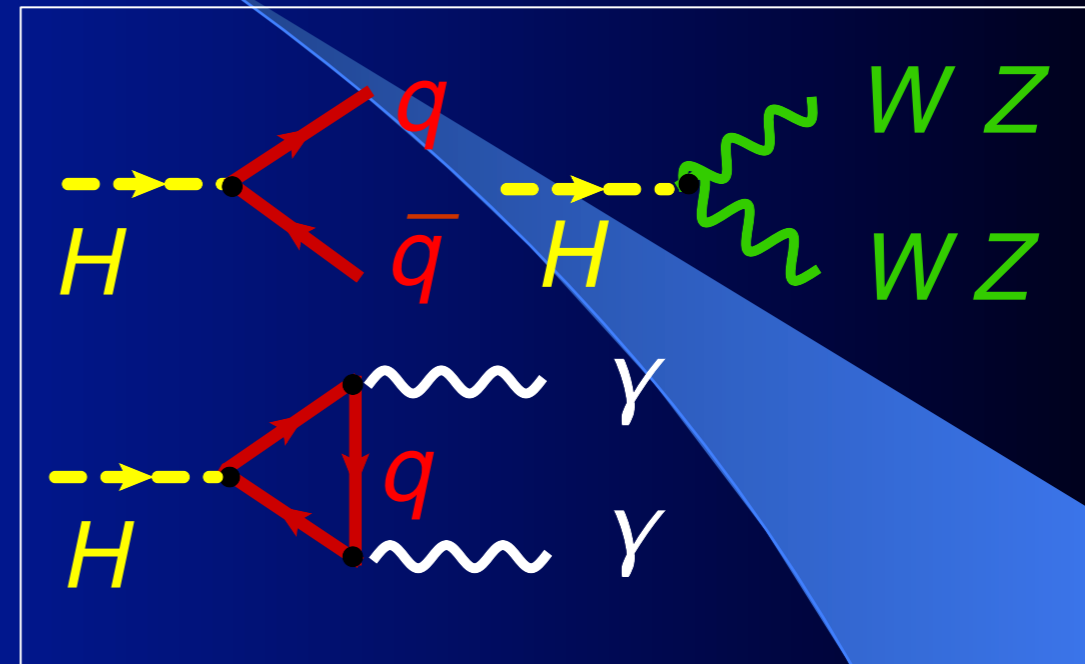
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



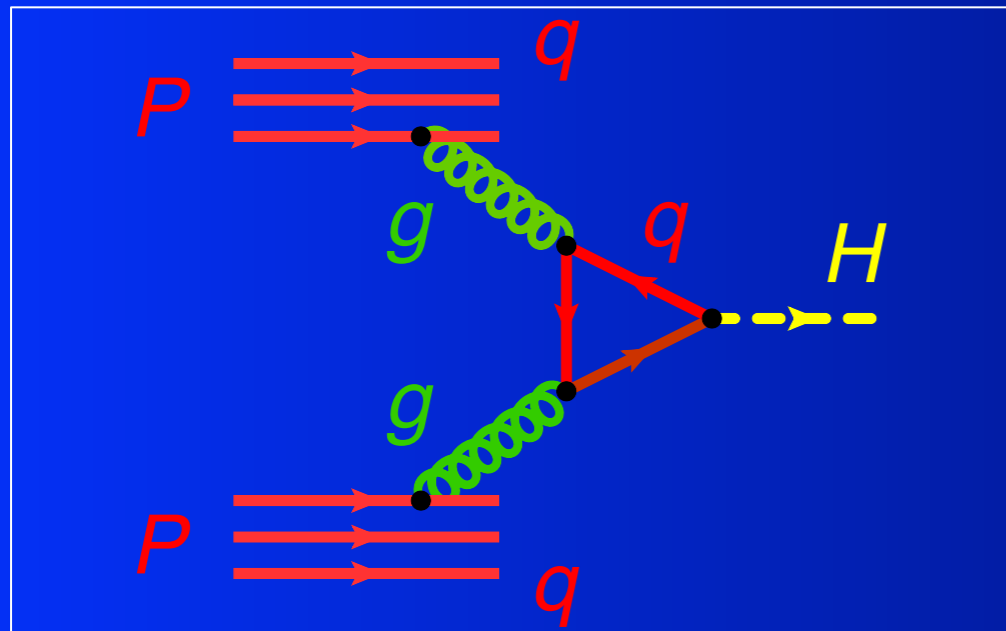
Процессы распада



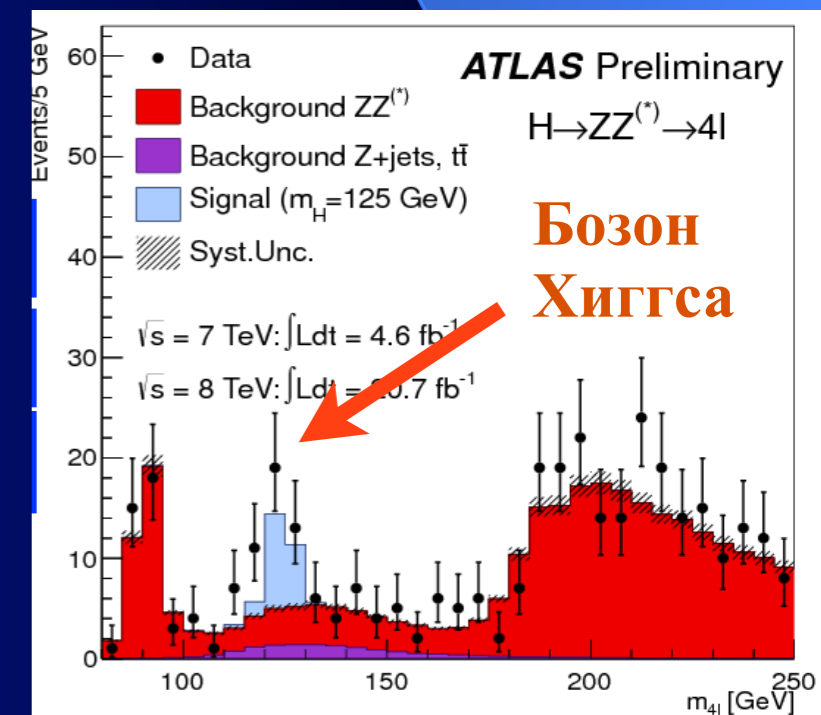
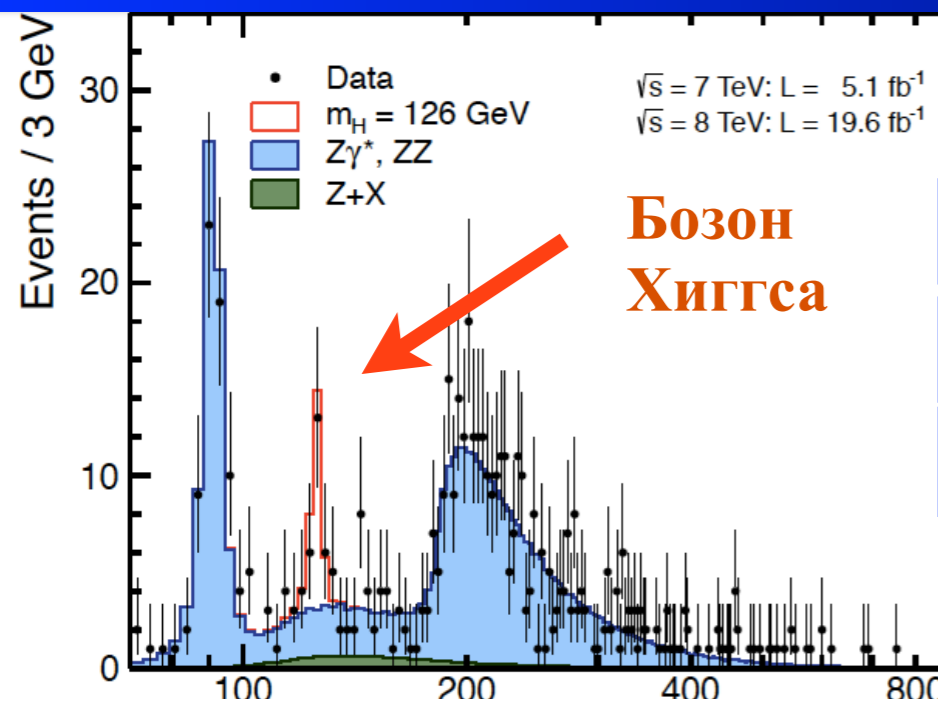
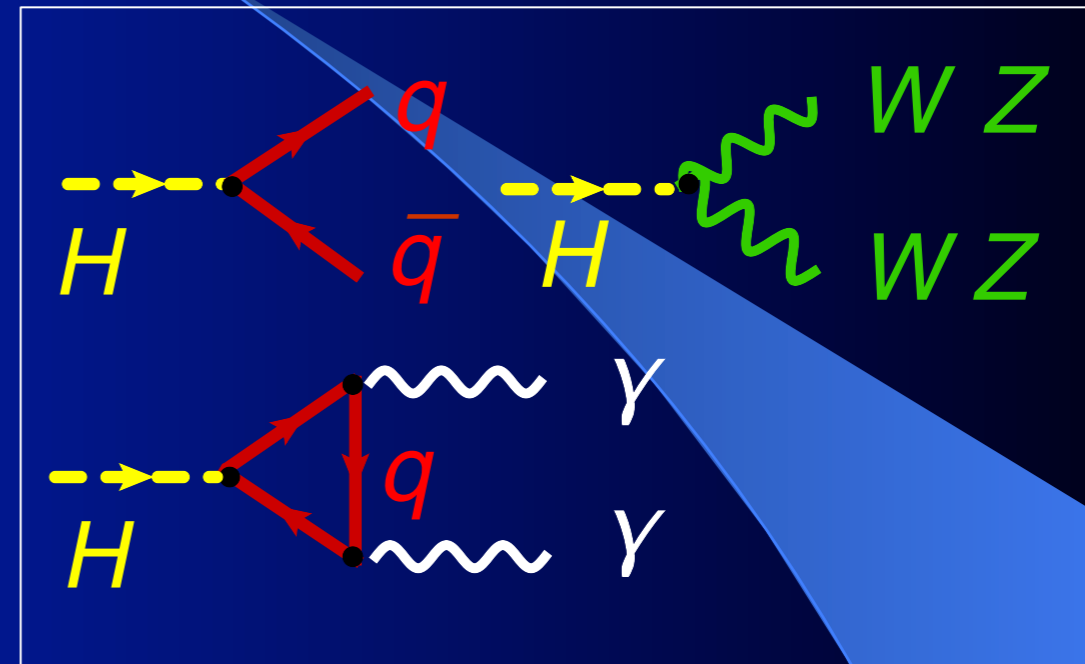
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



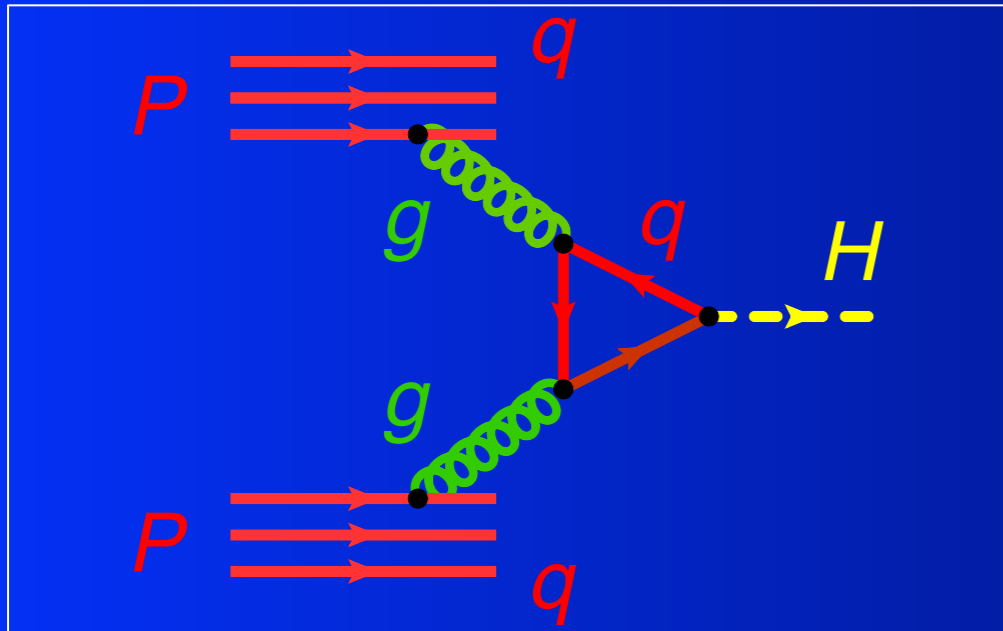
Процессы распада



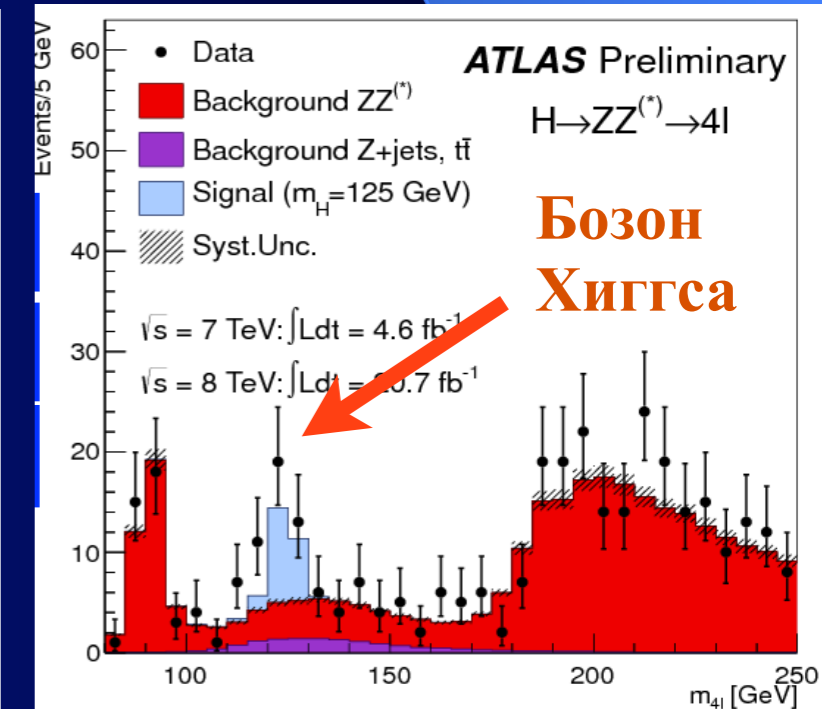
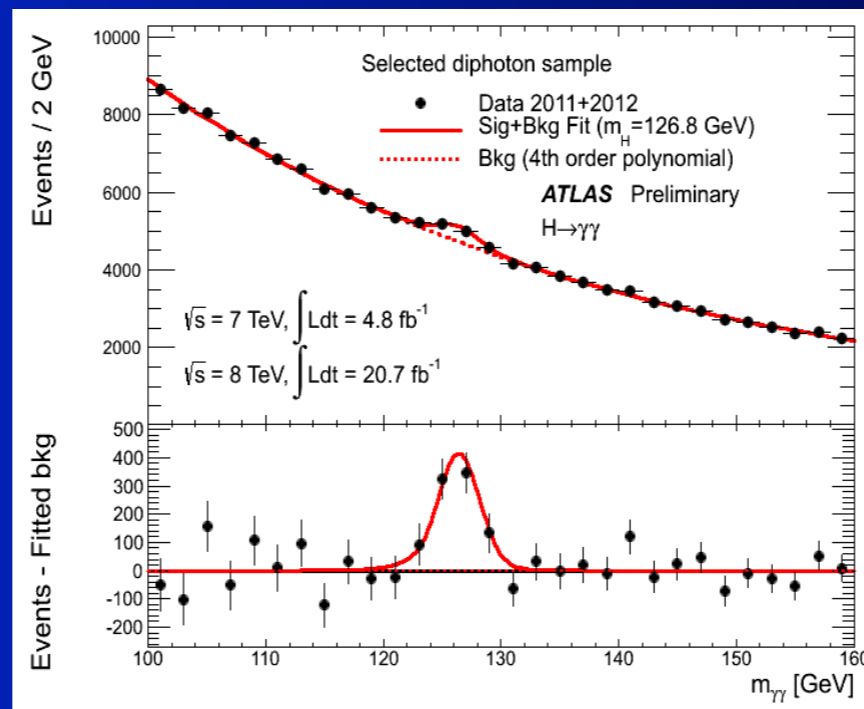
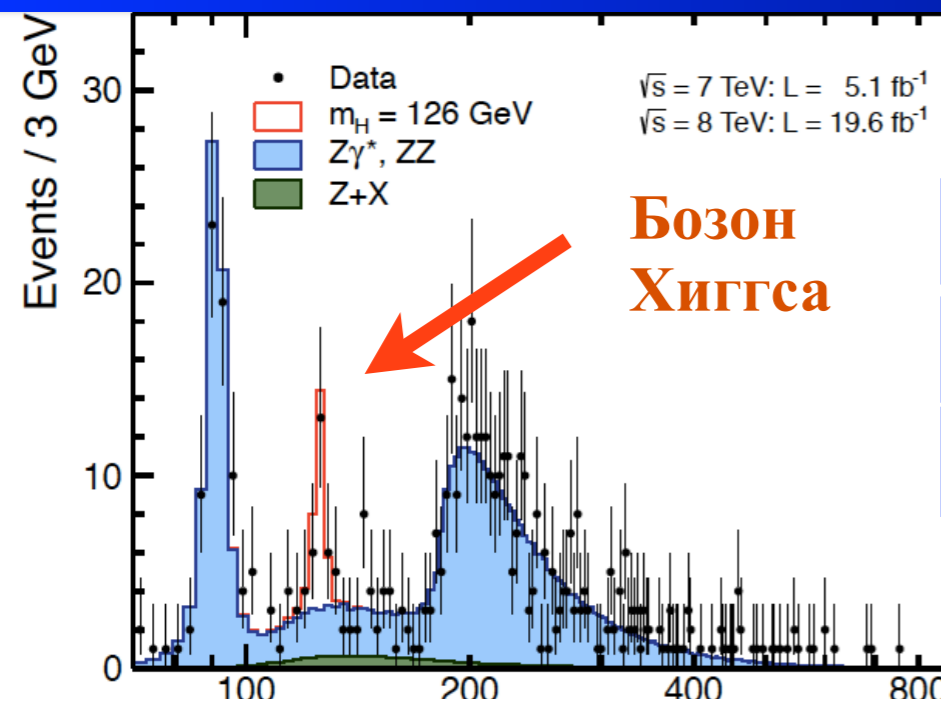
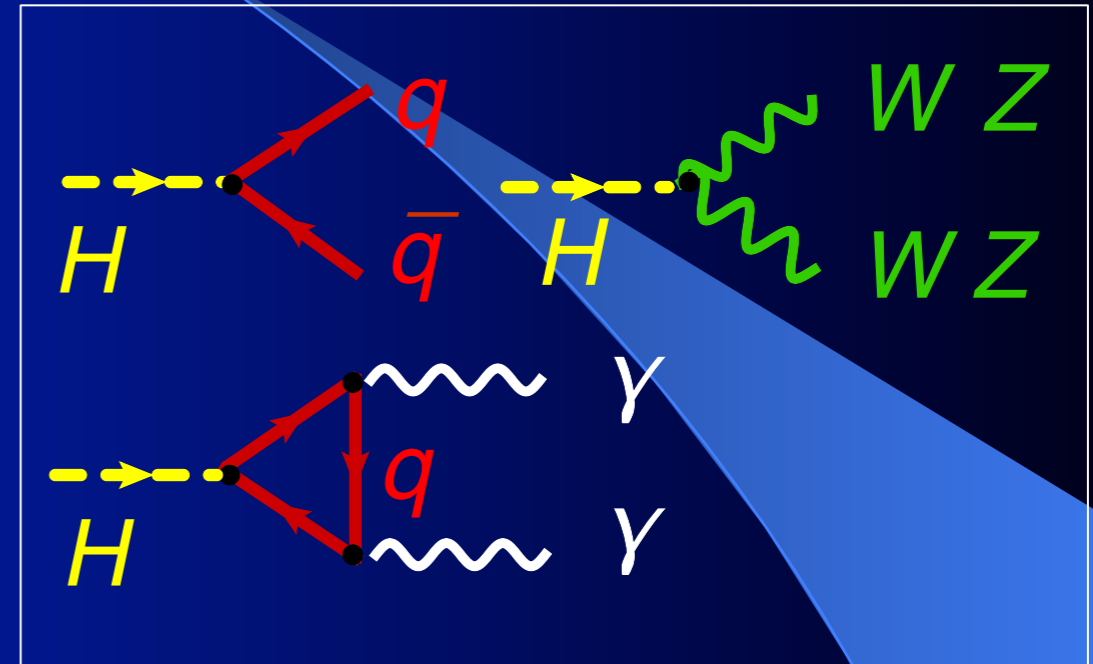
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



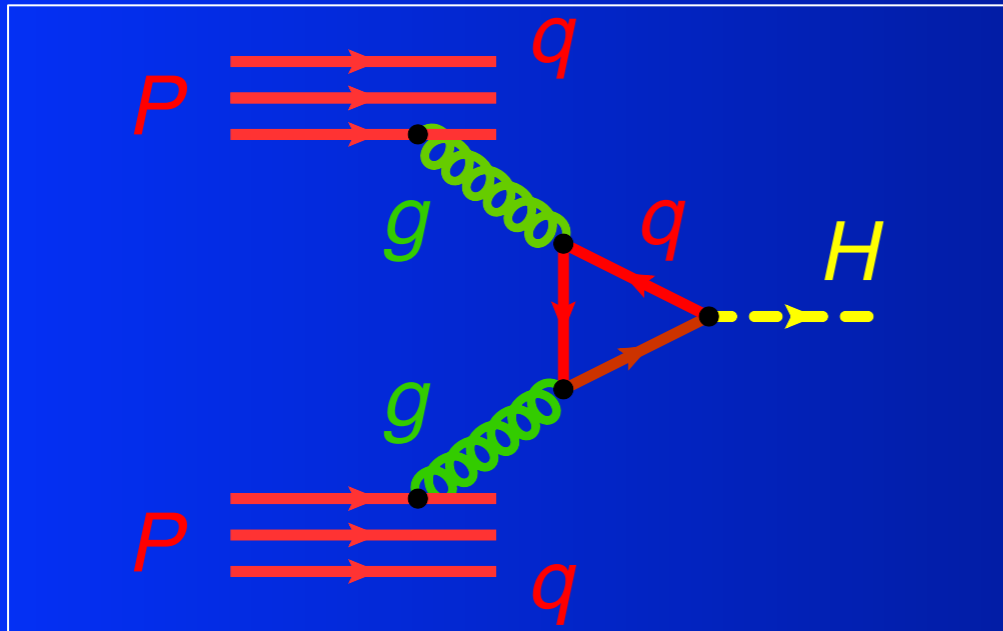
Процессы распада



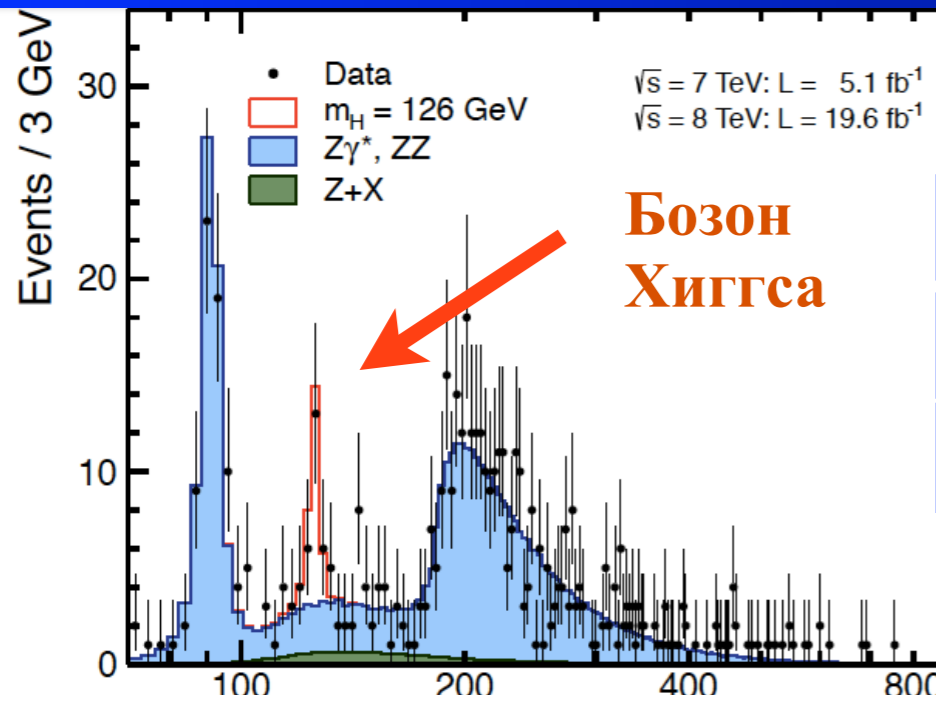
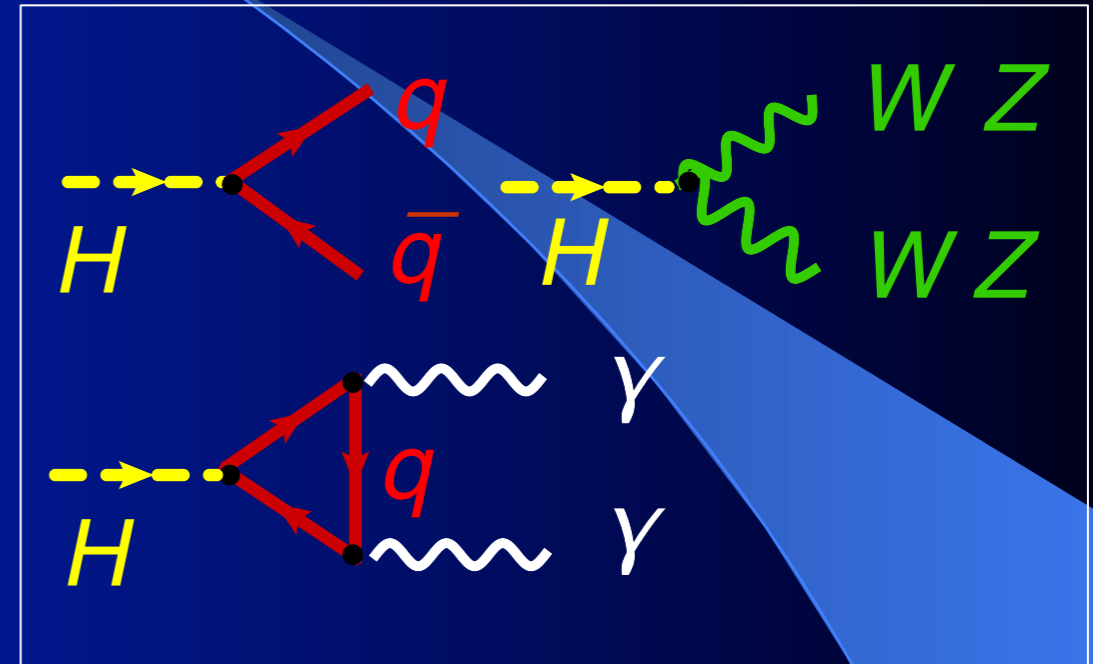
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

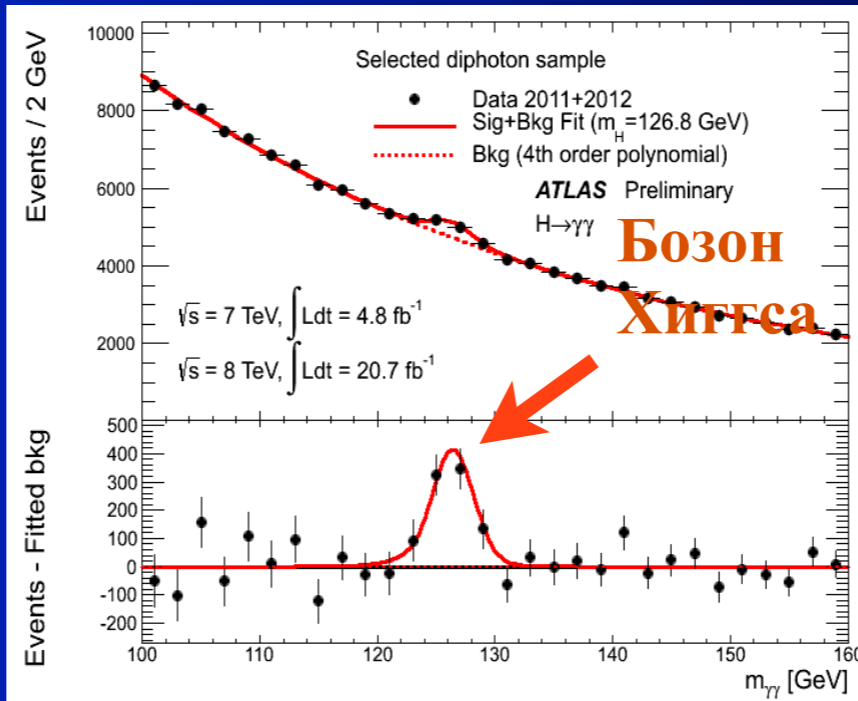
Рождение на протонном коллайдере



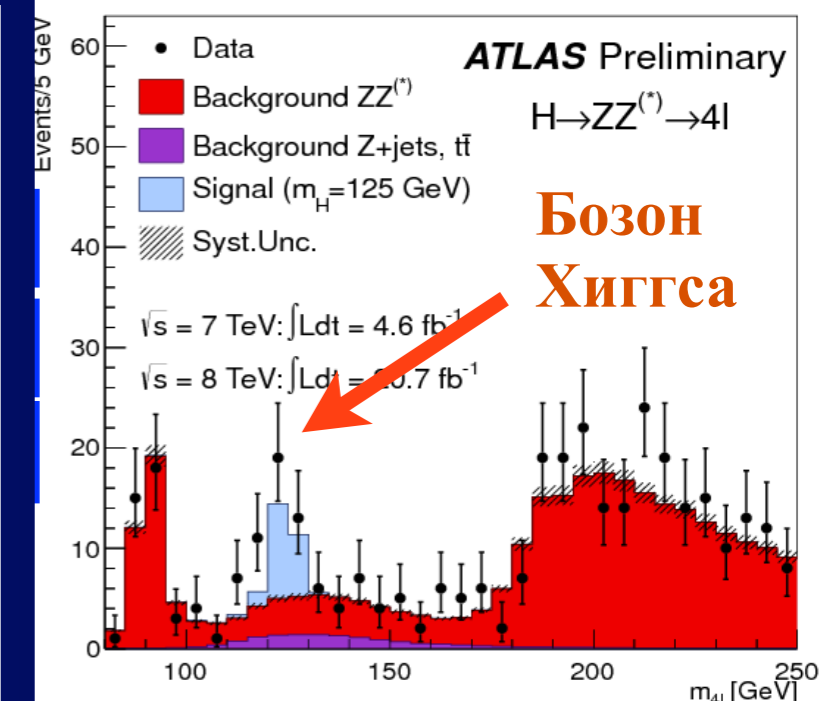
Процессы распада



Бозон Хиггса



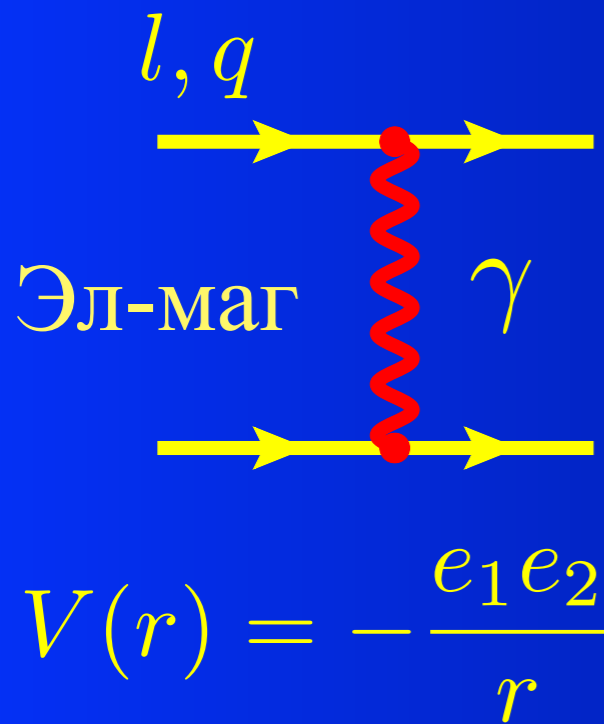
Бозон Хиггса



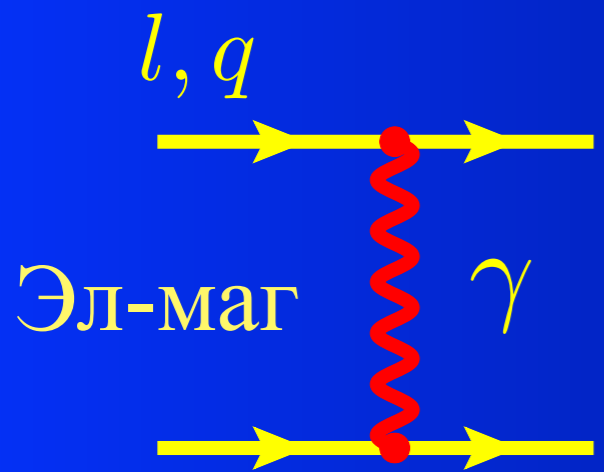
Бозон Хиггса

Пять фундаментальных сил Природы

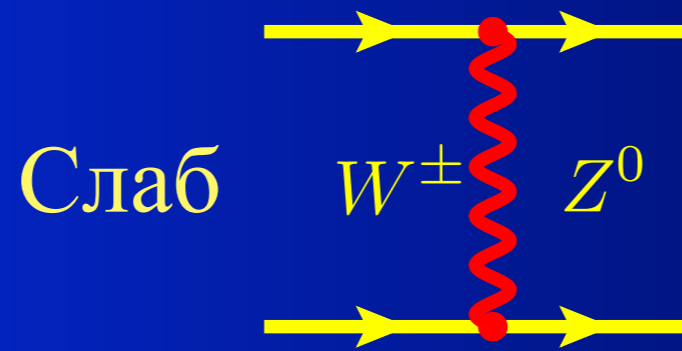
Пять фундаментальных сил Природы



Пять фундаментальных сил Природы

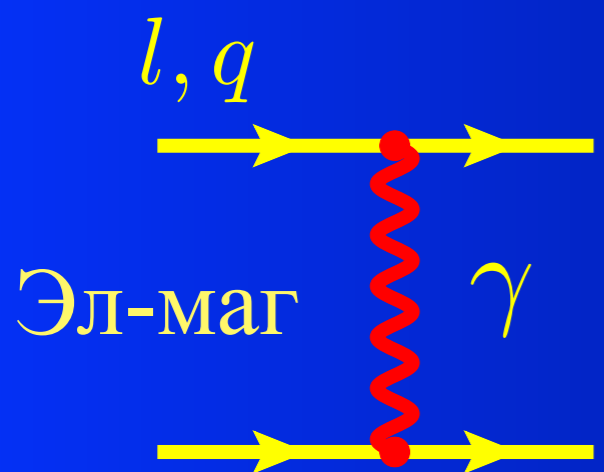


$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$

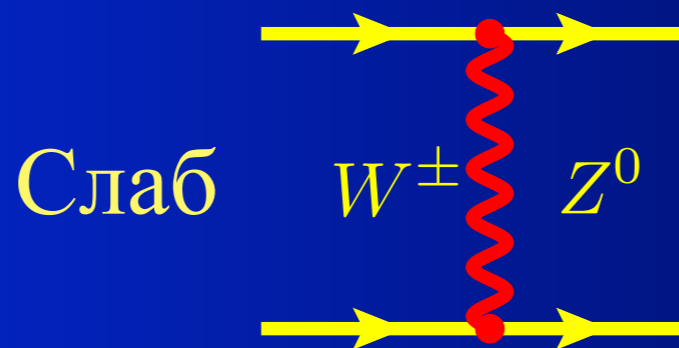


$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$

Пять фундаментальных сил Природы



$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$

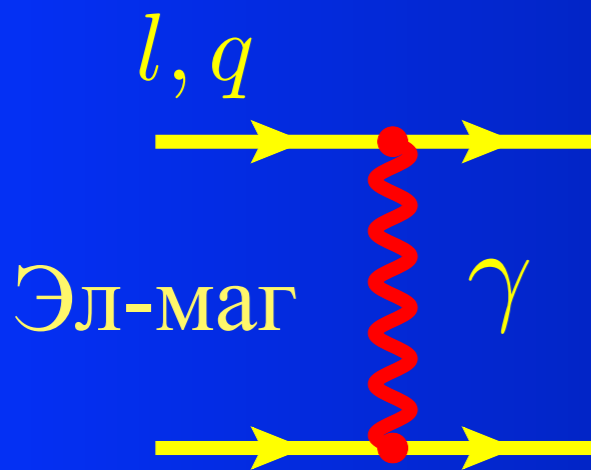


$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$

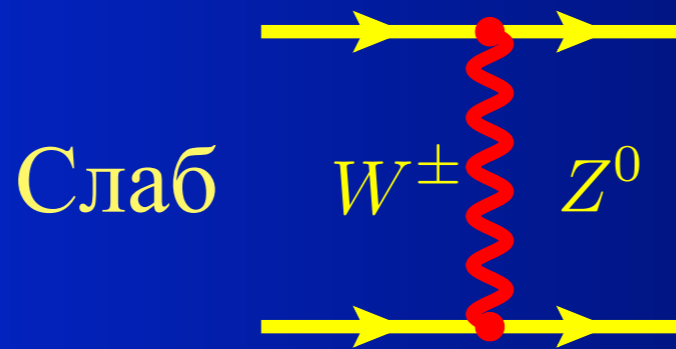


$$V(r) = -\frac{g_s^2}{r} + br$$

Пять фундаментальных сил Природы



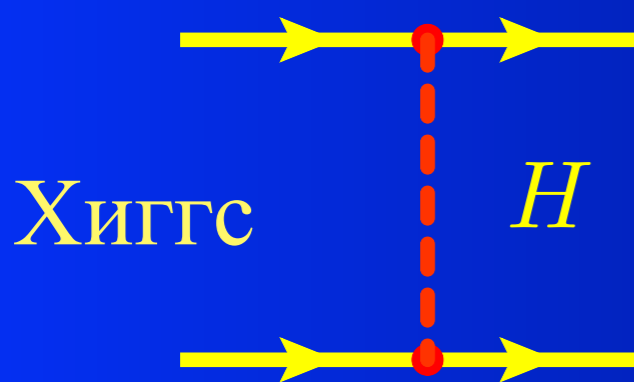
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$

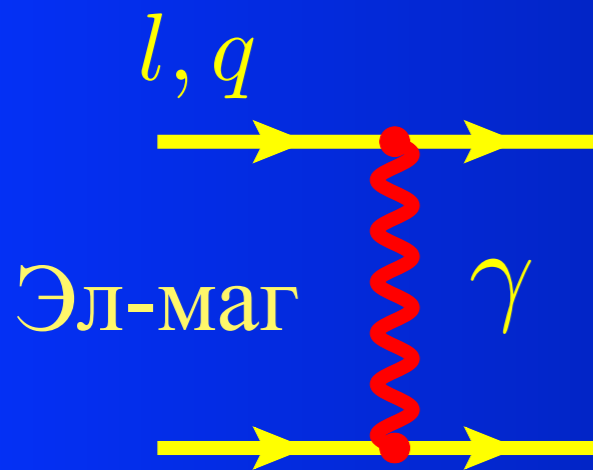


$$V(r) = -\frac{g_s^2}{r} + br$$

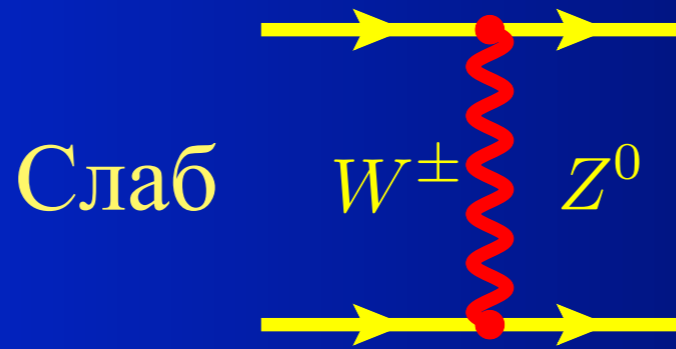


$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{v_H^2 r} e^{-M_H r}$$

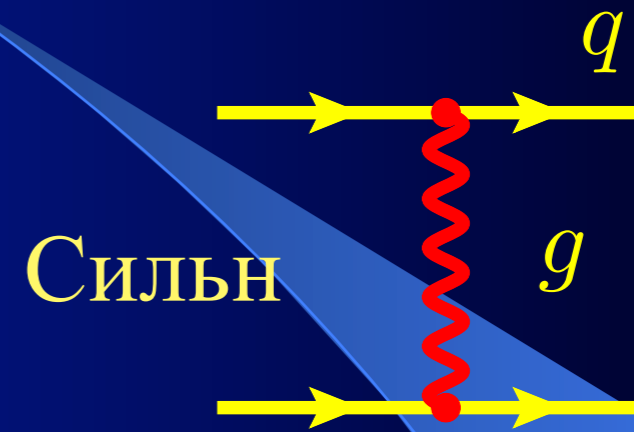
Пять фундаментальных сил Природы



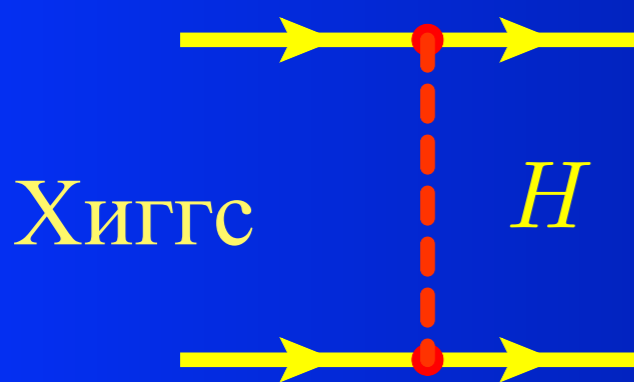
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



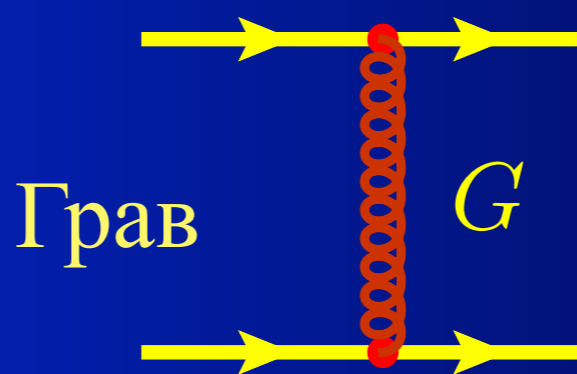
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



$$V(r) = -\frac{g_s^2}{r} + br$$

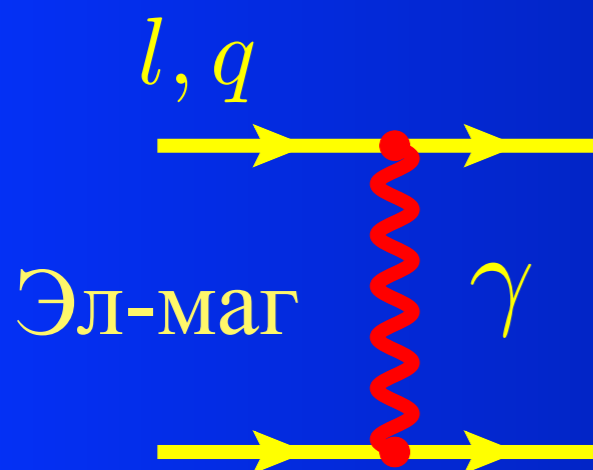


$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{v_H^2 r} e^{-M_H r}$$

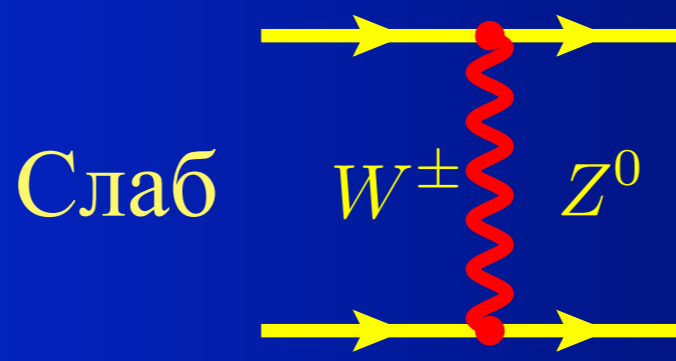


$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Пять фундаментальных сил Природы



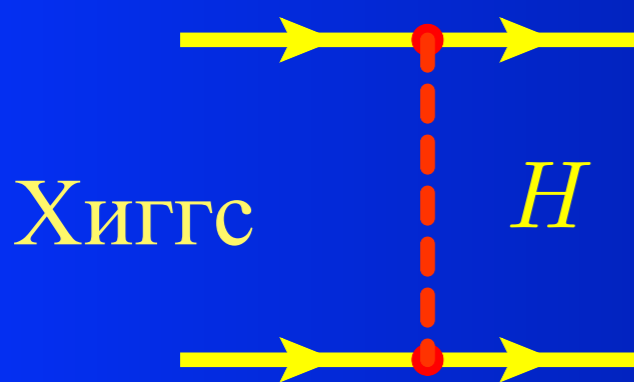
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



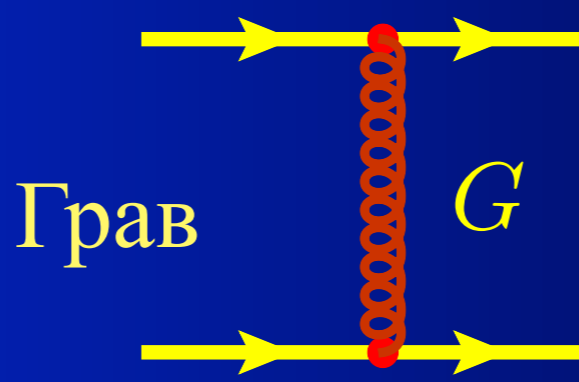
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



$$V(r) = -\frac{g_s^2}{r} + br$$



$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{v_H^2 r} e^{-M_H r}$$

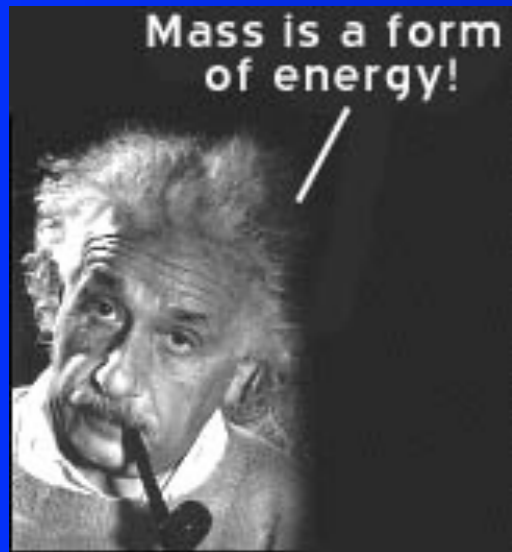


$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Спин

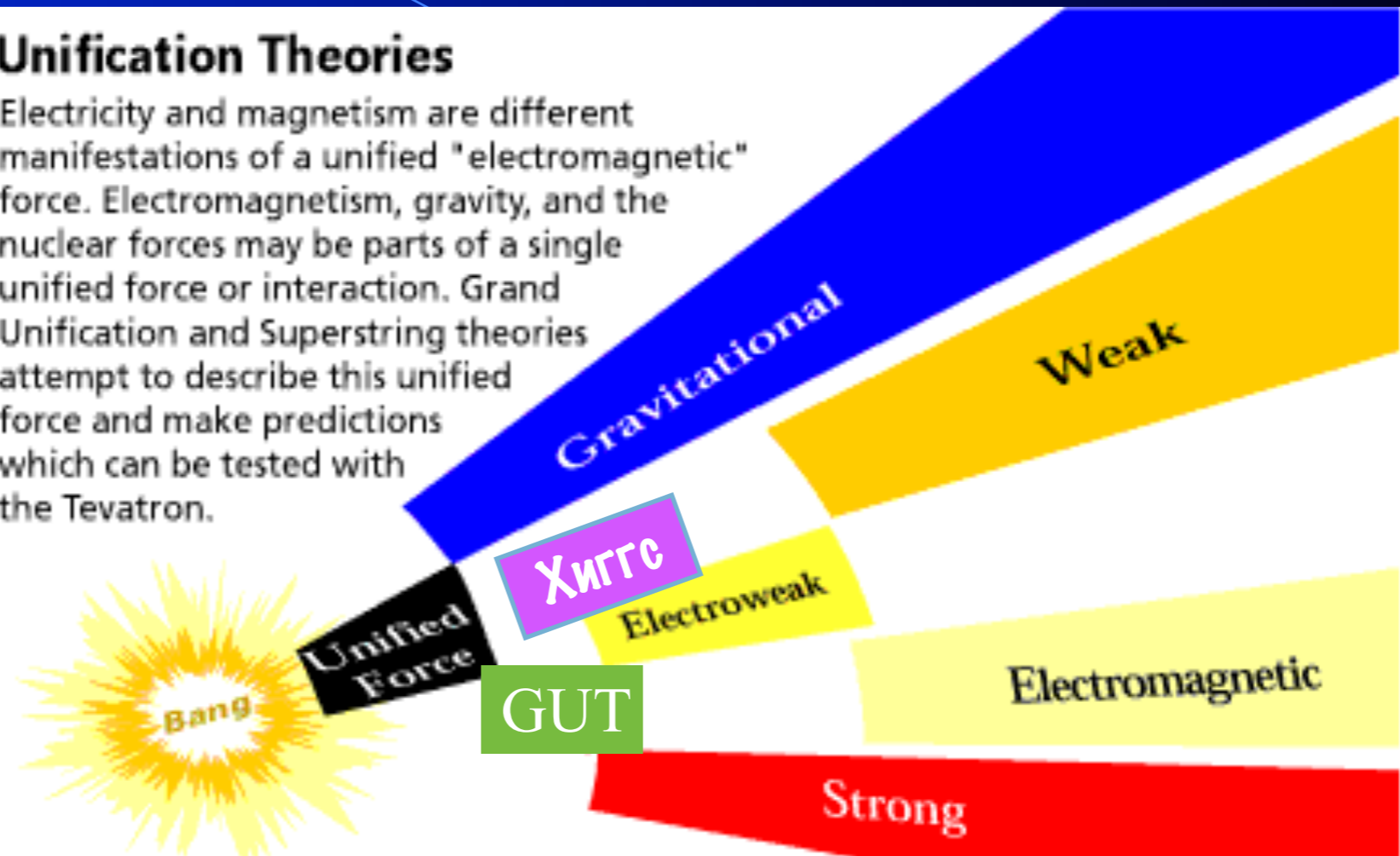
γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

Теория Великого Объединения



Unification Theories

Electricity and magnetism are different manifestations of a unified "electromagnetic" force. Electromagnetism, gravity, and the nuclear forces may be parts of a single unified force or interaction. Grand Unification and Superstring theories attempt to describe this unified force and make predictions which can be tested with the Tevatron.



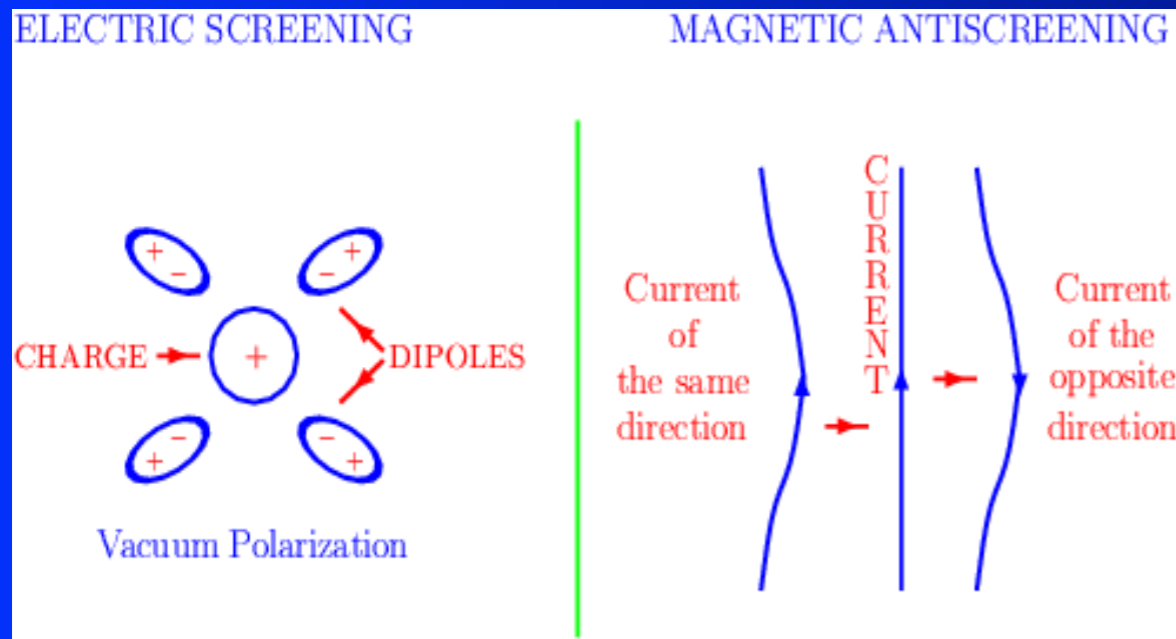
$10^{-34} m$



D=10

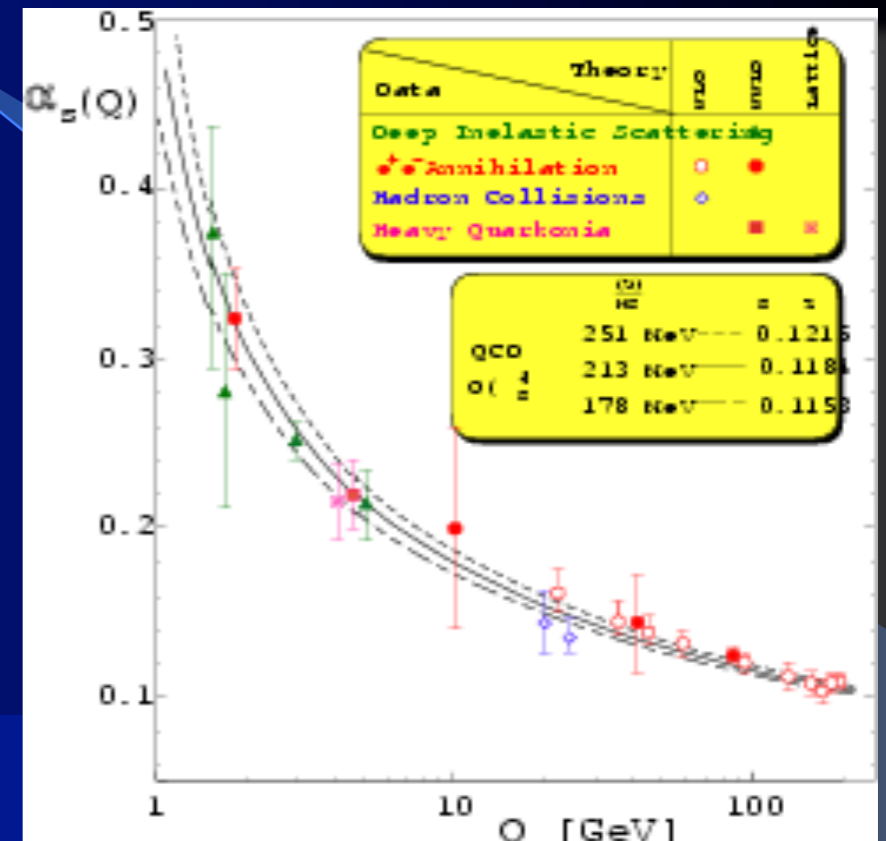
- Объединение сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий в рамках Теории Великого объединения – новый этап в объединении всех сил природы
- Создание единой теории (теории всего сущего) на основе струнной парадигмы кажется возможным

«Бегущие» константы взаимодействия

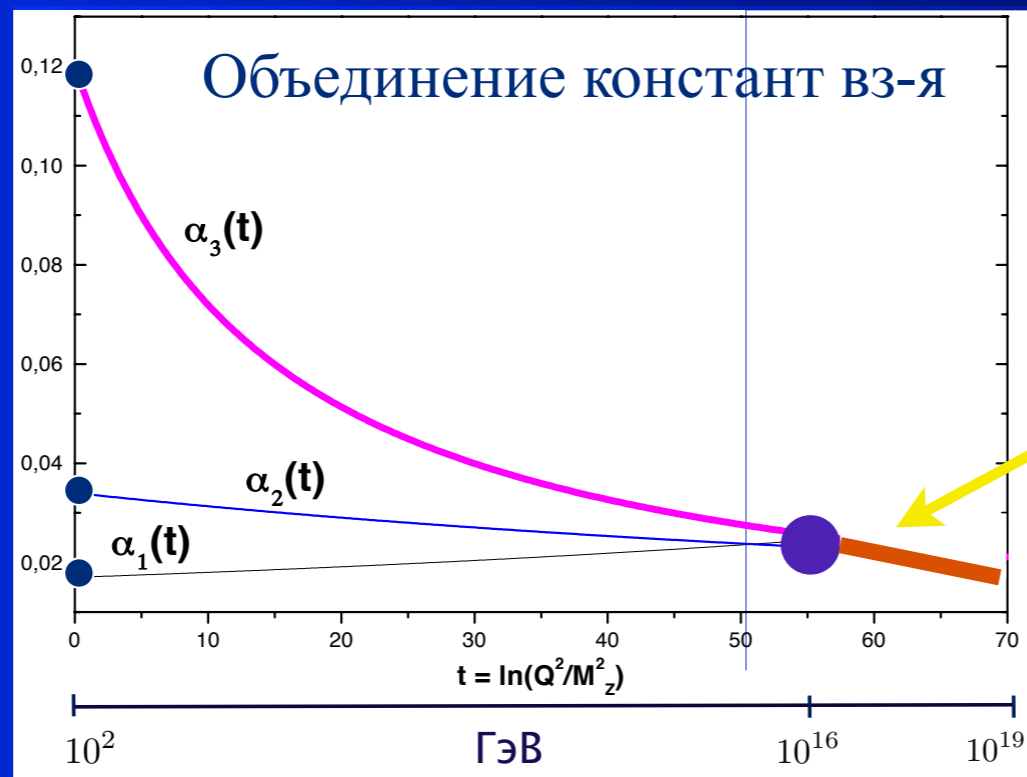


константа ВЗ-я
- есть функция
расстояния

$$\alpha = \alpha(\text{distance})$$



$\alpha_3(M_Z) \approx 0.0118$
 $\alpha_2(M_Z) \approx 0.0034$
 $\alpha_1(M_Z) \approx 0.0017$



«бег» константы сильного ВЗ-я

«объединение» констант ВЗ-я - есть следствие их общего происхождения

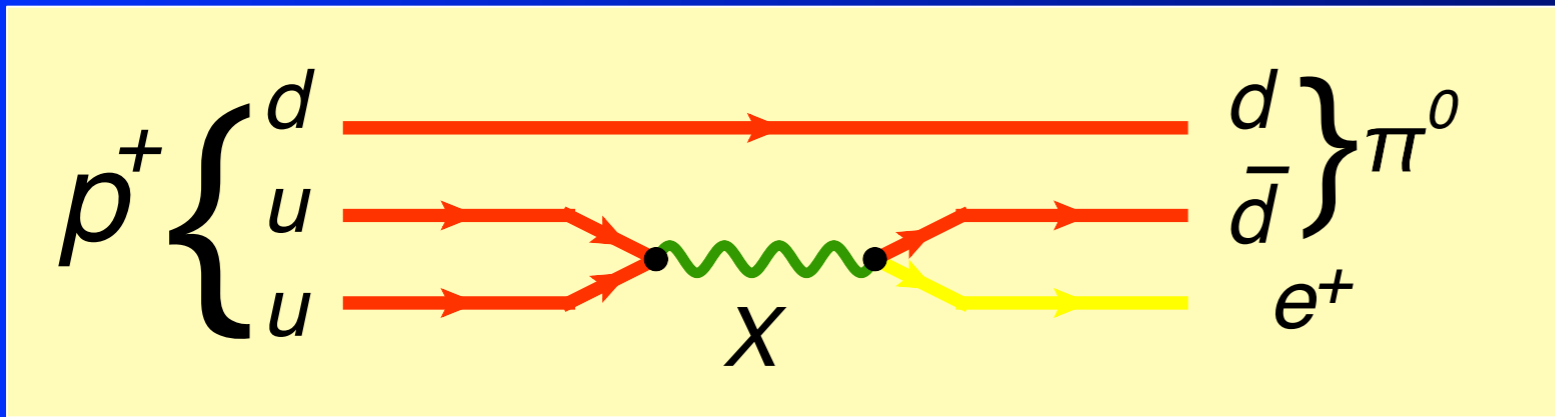
ТВО

Нестабильность протона

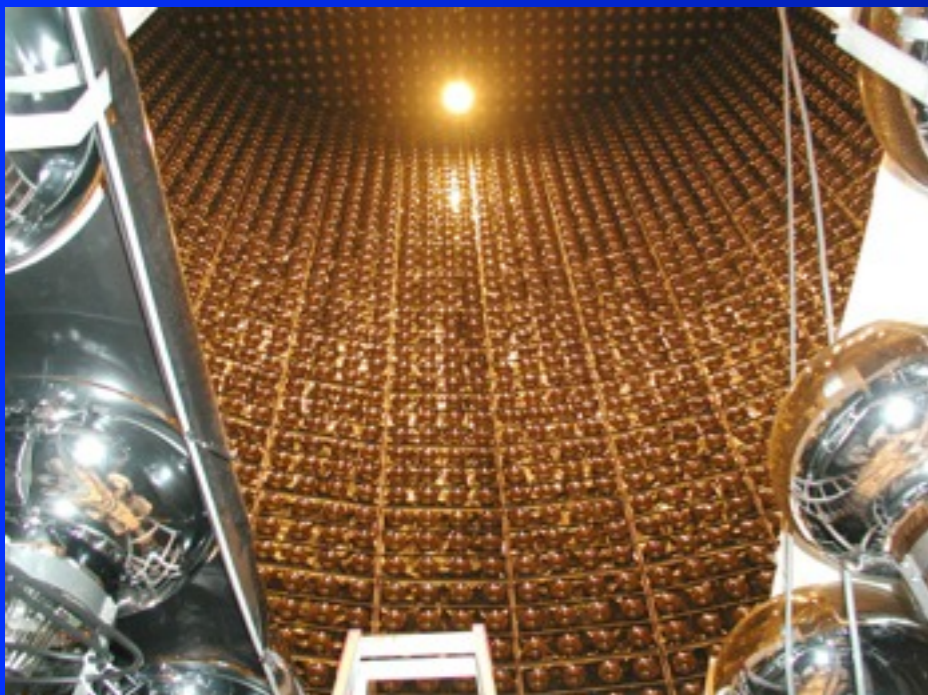
В Теории Великого Объединения кварки и лептоны равноправны и превращаются друг в друга. Это приводит к распаду протона.

$$\tau_{proton} \sim 10^{32} \text{ years}$$

$$\tau_{Universe} \approx 14 \cdot 10^9 \text{ years}$$

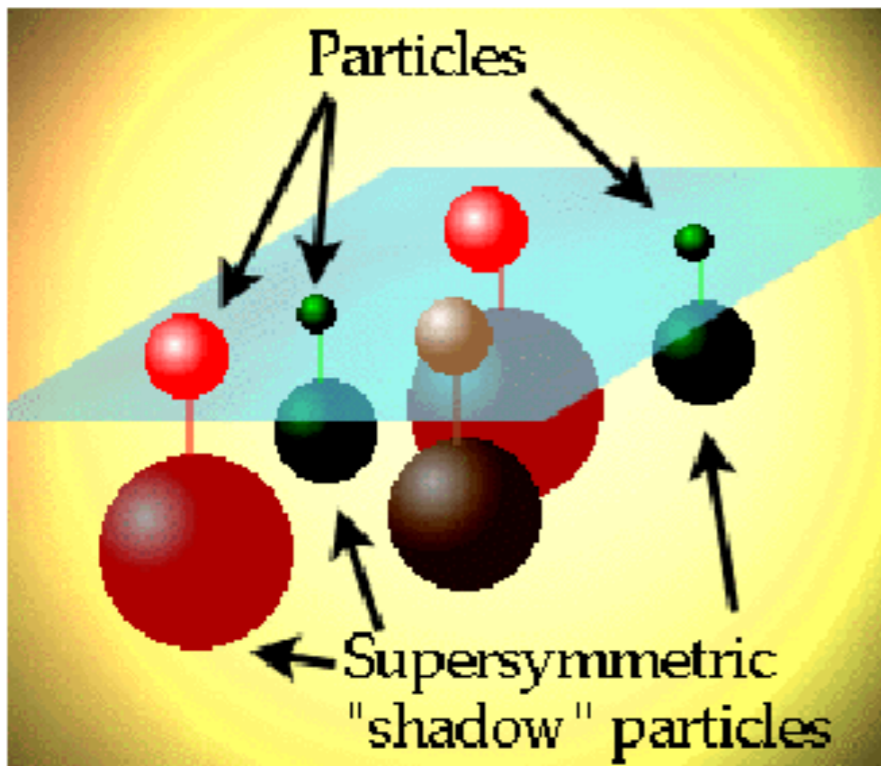


Камиока (Япония)



Эксперимент в Камиока не нашёл распада протона, но обнаружил переход нейтрино одного сорта в другое - нейтринные осцилляции

Суперсимметрия



- Новый вид симметрии между частицами с целым спином – **бозонами** и частицами с полуцелым спином – **фермионами**
- Каждая частица имеет тяжёлого партнёра отличающегося лишь значением спина на $1/2$

- «суперпартнёры» тяжелее обычных частиц и потому пока не рождаются на ускорителях
- Теория супергравитации включает в себя все известные частицы и взаимодействия

кварк

$$q \rightarrow \tilde{q}$$

скварк

лептон

$$l \rightarrow \tilde{l}$$

слептон

W-бозон

$$W \rightarrow \tilde{W}$$

вино

Z-бозон

$$Z \rightarrow \tilde{Z}$$

зино

глюон

$$g \rightarrow \tilde{g}$$

глюино

фотон

$$\gamma \rightarrow \tilde{\gamma}$$

фотино

Хиггс

$$H \rightarrow \tilde{H}$$

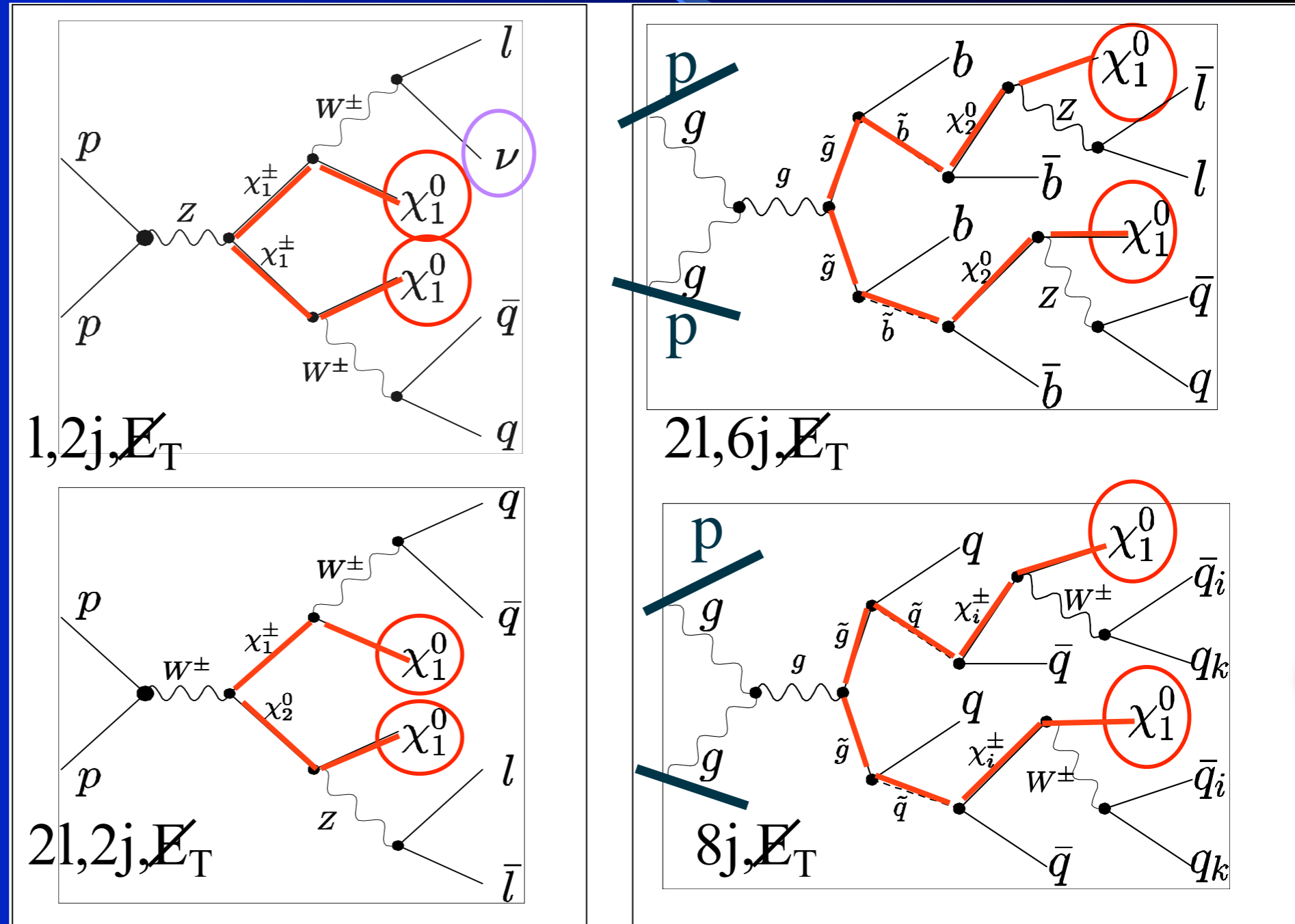
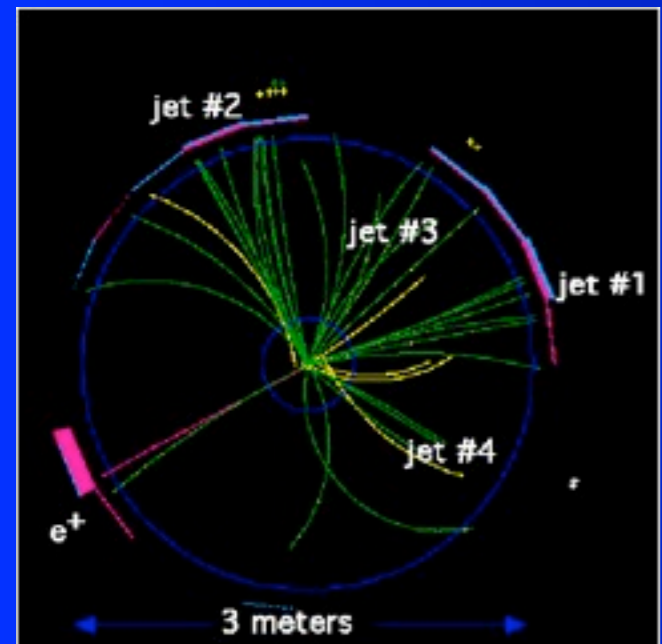
Хиггсино

гравитон

$$G \rightarrow \tilde{G}$$

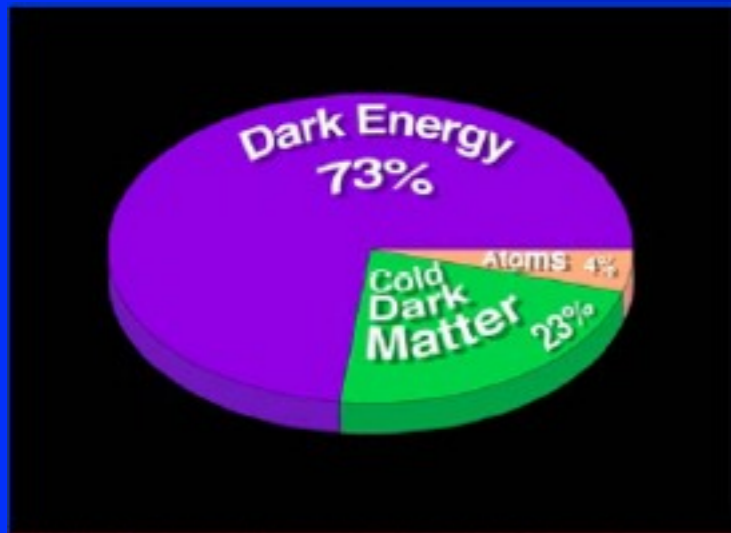
гравитино

Рождение суперчастиц на коллайдере



Красным цветом показаны суперпартнёры

Тёмная материя



HEAVY ELEMENTS	0.03 %
MASSIVE NEUTRINOS	0.3 %
STARS	0.5 %
H AND He	4 %
DARK MATTER	23 %
DARK ENERGY	72 %

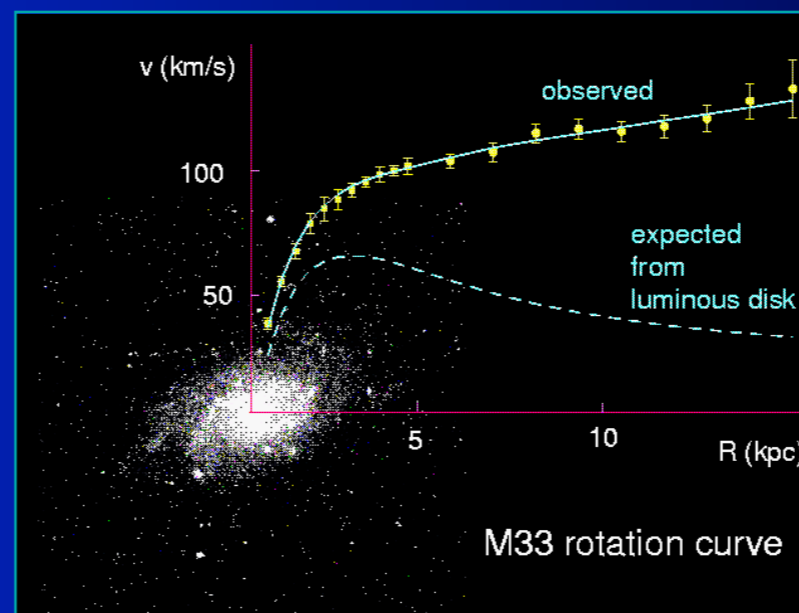
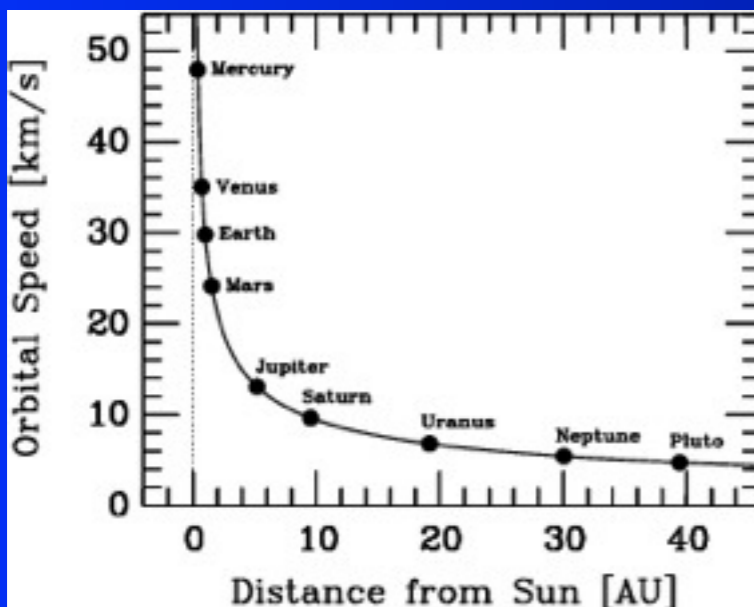
Температурные флуктуации микроволнового фона
Взрывы сверхновых

- Плоские ротационные кривые спиральных галактик являются прямым свидетельством наличия большого количества тёмной материи

центробежная сила

$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

гравитация



- В настоящее время известны тысячи ротационных кривых и все они свидетельствуют в пользу существования массы в гало галактики десятикратно превышающей массу звёзд в диске

Что есть тёмная материя?



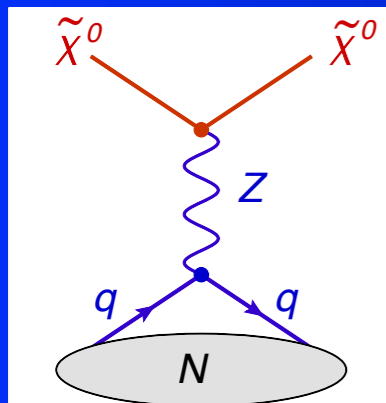
- Спиральные галактики состоят из центрального ядра и очень тонкого диска и окружены приблизительно сферическим гало из тёмной материи

Тёмная материя сделана из:

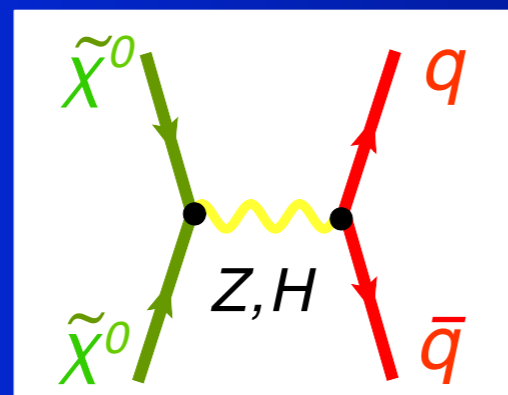
- ⊙ Макро объектов - не наблюдаются
- ⊙ Новых нейтральных частиц

Поиск частиц тёмной материи

Прямое вз-е с веществом



Аннигиляция -> новая компонента в космических лучах



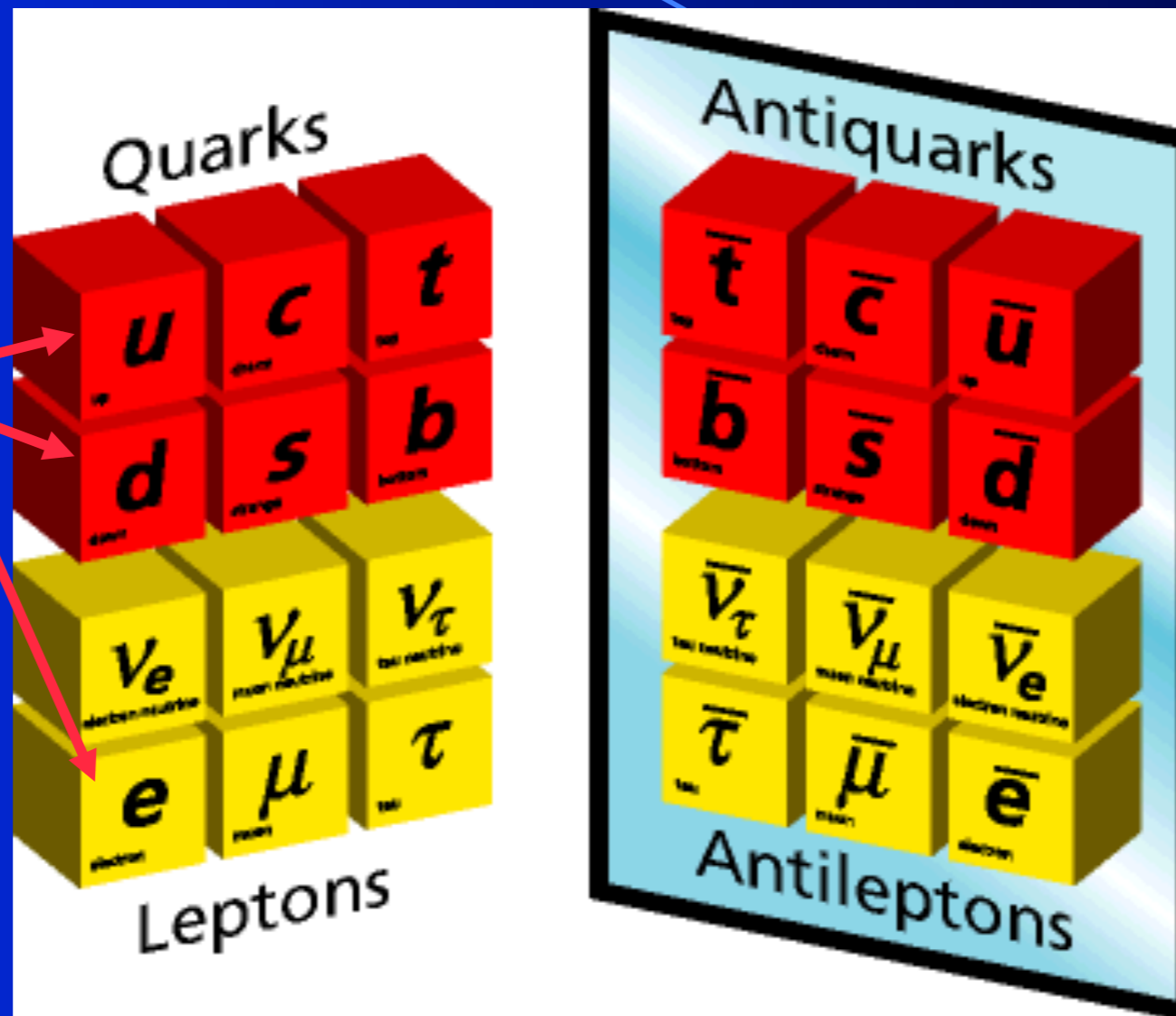
- правые нейтрино
- нейтралино
- снейтрино
- аксион (аксино)
- гравитино
- тяжёлый фотон
- лёгкий стерильный хиггс



Сигнал пока отсутствует

Материя и Антиматерия

Первое поколение - это то из чего мы состоим



Антиматерия родилась вместе с материей во время «Большого взрыва»

Античастицы рождаются вместе с частицами на ускорителях, но мир вокруг нас не содержит антивещества

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_\gamma = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_\gamma} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_{\gamma} = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_{\gamma}} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_{\gamma} = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_{\gamma}} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение CP-симметрии

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_{\gamma} = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_{\gamma}} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение CP-симметрии
2. Нарушение сохранения барионного числа

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_{\gamma} = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_{\gamma}} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение CP-симметрии
2. Нарушение сохранения барионного числа
3. Нарушение теплового равновесия в ранней Вселенной

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_{\gamma} = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_{\gamma}} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение CP-симметрии
2. Нарушение сохранения барионного числа
3. Нарушение теплового равновесия в ранней Вселенной

Требует как минимум 3 поколений частиц в СМ

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_\gamma = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_\gamma} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение CP-симметрии
2. Нарушение сохранения барионного числа
3. Нарушение теплового равновесия в ранней Вселенной

Требует как минимум 3 поколений частиц в СМ

Возможно источником является CP-нарушение в нейтринном секторе

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_\gamma = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_\gamma} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение CP-симметрии
2. Нарушение сохранения барионного числа
3. Нарушение теплового равновесия в ранней Вселенной

Требует как минимум 3 поколений частиц в СМ

Возможно источником является CP-нарушение в нейтринном секторе

Реализуется в ТВО, но возможны и другие механизмы в СМ

Барионная асимметрия Вселенной

- Если бы не было барионной асимметрии, не было бы вещества во Вселенной!
- Она указывает на существование фундаментального нарушения симметрии между частицами и античастицами



среднее число фотонов в единице объёма

$$n_\gamma = 410.4 \pm 0.9 \text{ см}^{-3}$$

среднее число барионов в единице объёма

$$n_B = 0.25 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-3}$$

$$\frac{n_B}{n_\gamma} = \frac{0.25 \cdot 10^{-6}}{410.4} = 6.1 \cdot 10^{-10}$$

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение CP-симметрии
2. Нарушение сохранения барионного числа
3. Нарушение теплового равновесия в ранней Вселенной

Всё ещё не разгаданная загадка!

Требует как минимум 3 поколений частиц в СМ

Возможно источником является CP-нарушение в нейтринном секторе

Реализуется в ТВО, но возможны и другие механизмы в СМ

Простые истины

Простые истины

- Мир состоит из атомов

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны
- Адроны построены из кварков

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны
- Адроны построены из кварков
- Существует шесть кварков и шесть лептонов

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны
- Адроны построены из кварков
- Существует шесть кварков и шесть лептонов
- Существует пять фундаментальных сил природы

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны
- Адроны построены из кварков
- Существует шесть кварков и шесть лептонов
- Существует пять фундаментальных сил природы
- Силы переносятся квантами полей

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны
- Адроны построены из кварков
- Существует шесть кварков и шесть лептонов
- Существует пять фундаментальных сил природы
- Силы переносятся квантами полей
- Масса фундаментальных частиц возникают от взаимодействия с полем Браута-Энглера-Хиггса

Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны
- Адроны построены из кварков
- Существует шесть кварков и шесть лептонов
- Существует пять фундаментальных сил природы
- Силы переносятся квантами полей
- Масса фундаментальных частиц возникают от взаимодействия с полем Браута-Энглера-Хиггса
- Материя состоит из видимой и невидимой составляющих

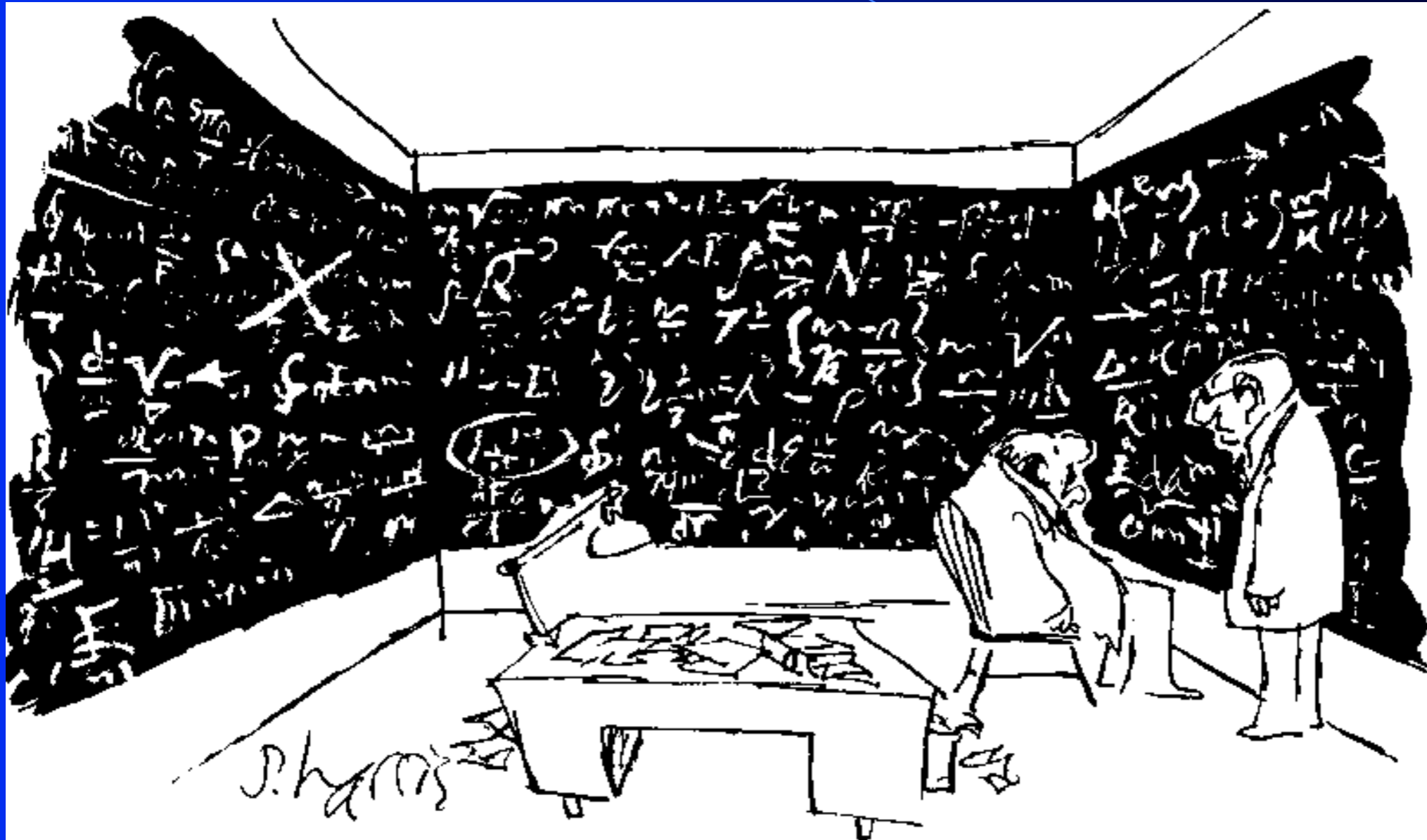
Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны
- Адроны построены из кварков
- Существует шесть кварков и шесть лептонов
- Существует пять фундаментальных сил природы
- Силы переносятся квантами полей
- Масса фундаментальных частиц возникают от взаимодействия с полем Браута-Энглера-Хиггса
- Материя состоит из видимой и невидимой составляющих
- Всё это описывается квантовой теорией калибровочных полей основанной на специальной унитарной группе симметрии


Простые истины

- Мир состоит из атомов
- Внутри атома находится ядро
- Оболочки атомов состоят из электронов
- Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов
- Частицы подразделяются на адроны и лептоны
- Адроны построены из кварков
- Существует шесть кварков и шесть лептонов
- Существует пять фундаментальных сил природы
- Силы переносятся квантами полей
- Масса фундаментальных частиц возникают от взаимодействия с полем Браута-Энглера-Хиггса
- Материя состоит из видимой и невидимой составляющих
- Всё это описывается квантовой теорией калибровочных полей основанной на специальной унитарной группе симметрии $SU_c(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$

Простые истины




"Whatever happened to *elegant* solutions?"



Что ждёт нас за пределами
Стандартной теории?

СТ



If it turns out there is a simple ultimate law which explains everything, so be it — that would be very nice to discover. If it turns out it's like an onion with millions of layers... then that's the way it is. R.Feynman

Что ждёт нас за пределами
Стандартной теории?

СТ