

Три загадки современной физики

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

Загадка № 1:

Почему в природе
понадобились три поколения
элементарных частиц?

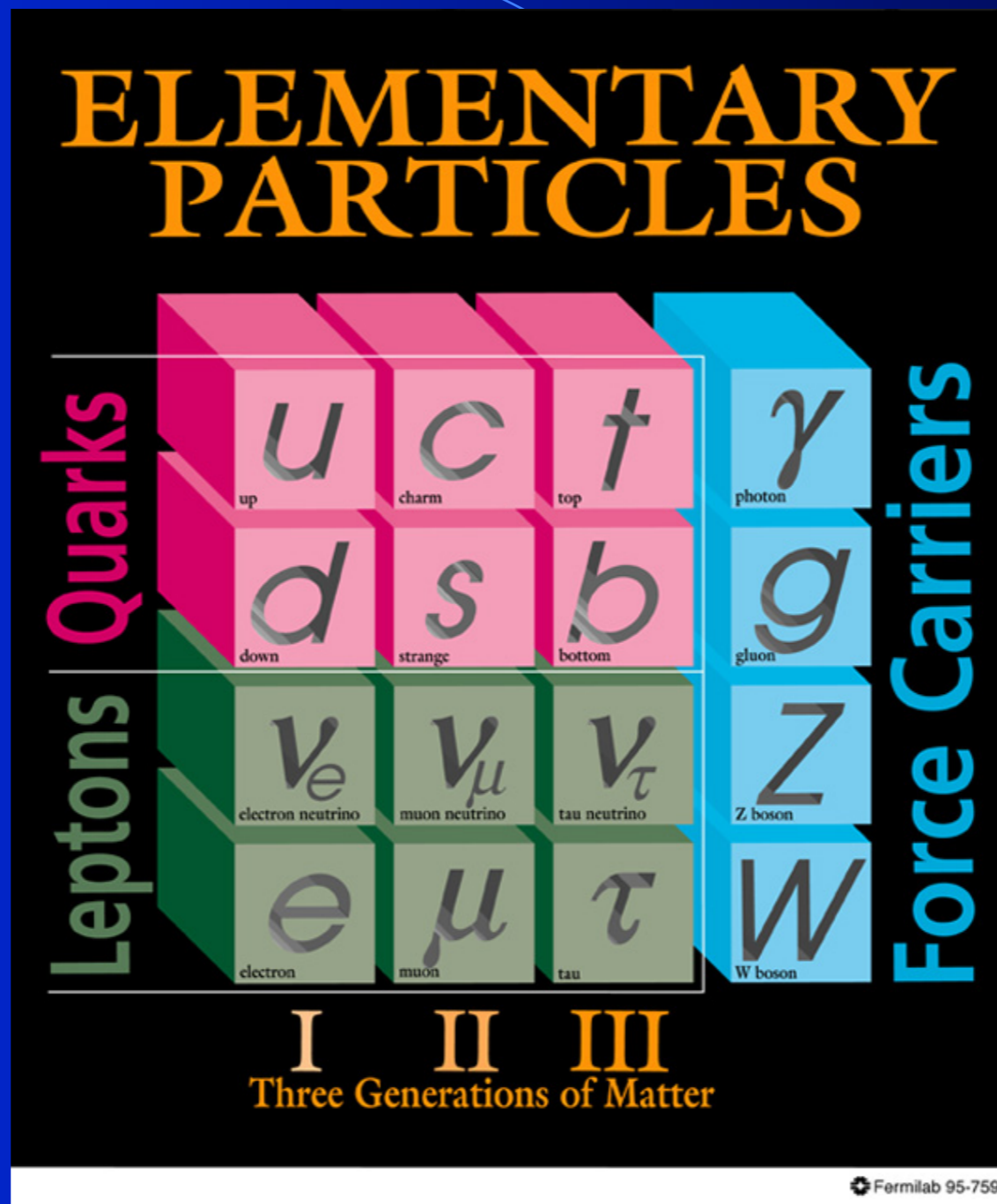
Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

ФЕРМИОНЫ



Силы

Электромагнитные

Сильные

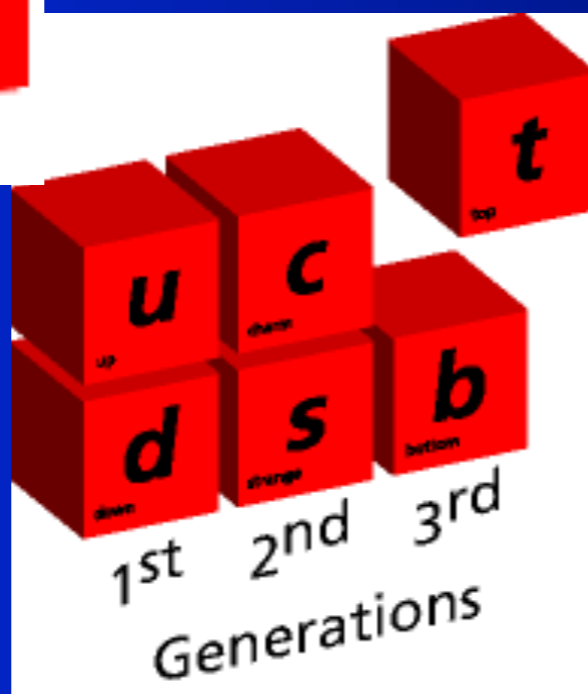
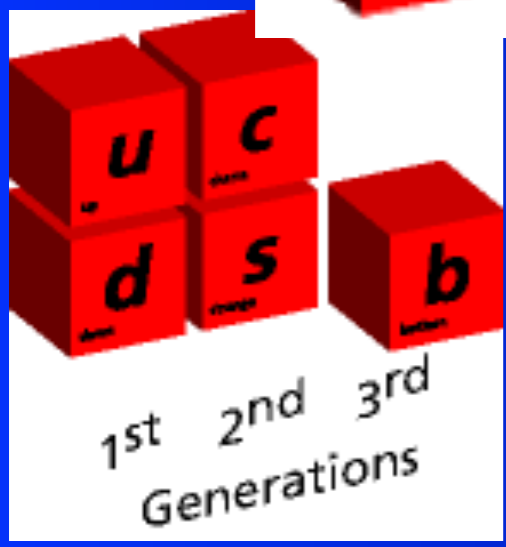
Слабые

H

Хиггсовский бозон

Гравитация

Кварки — “кирпичики мироздания”

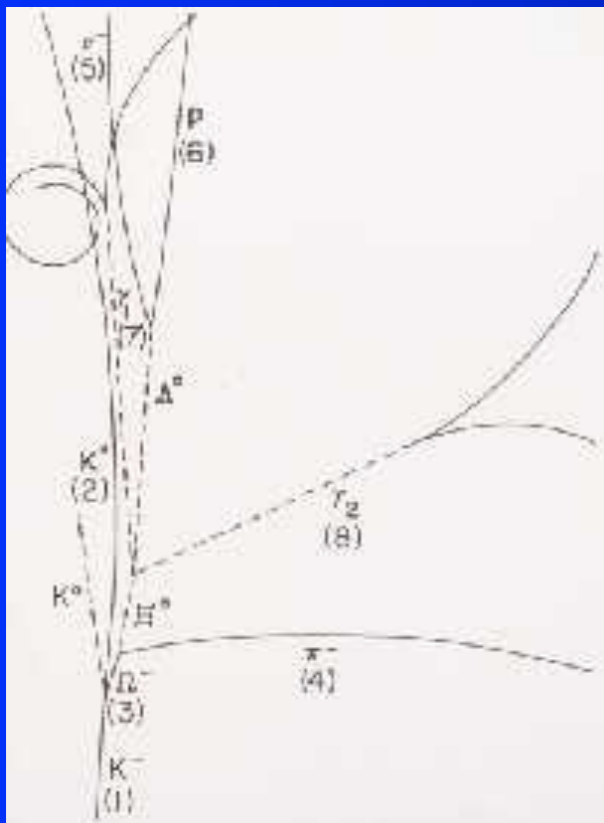


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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

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

Кварковая Модель



- Открытие «омега-минус» в Брукхэйвене в 1964 г. было последним элементом субатомной мозаики.
- Адроны построены из кварков и образуют семейства согласно теории унитарных групп

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

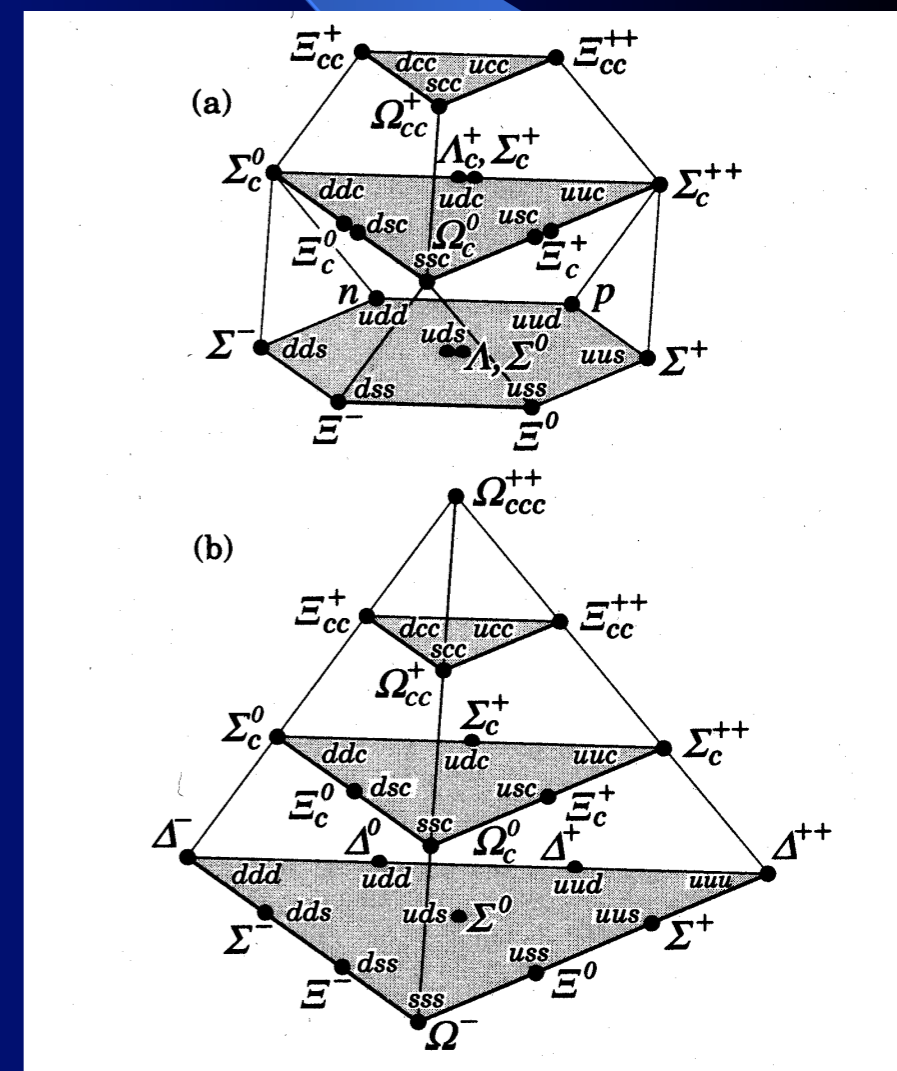
$$\Sigma^0 (d \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

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

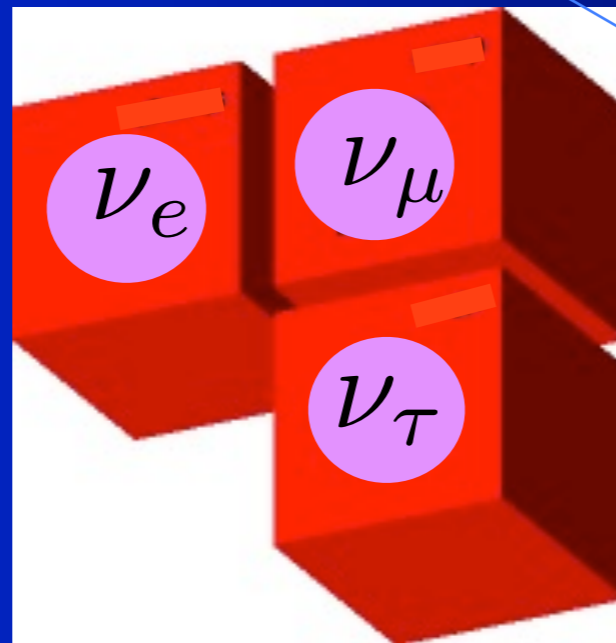
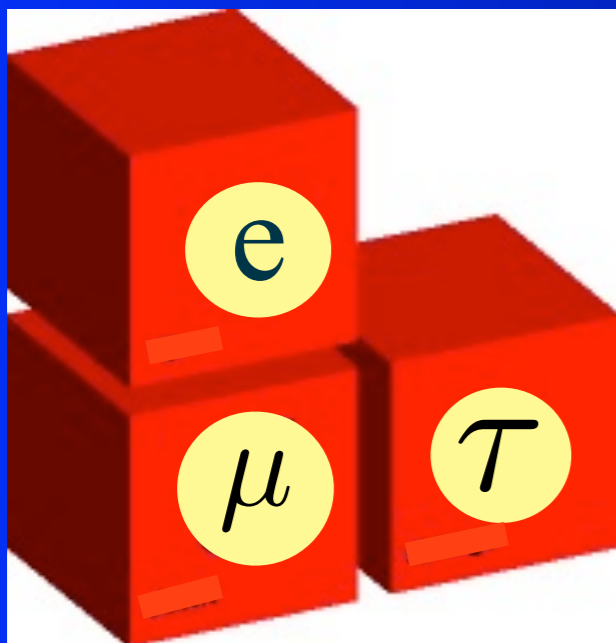
$$\Lambda^+ (u \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

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

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



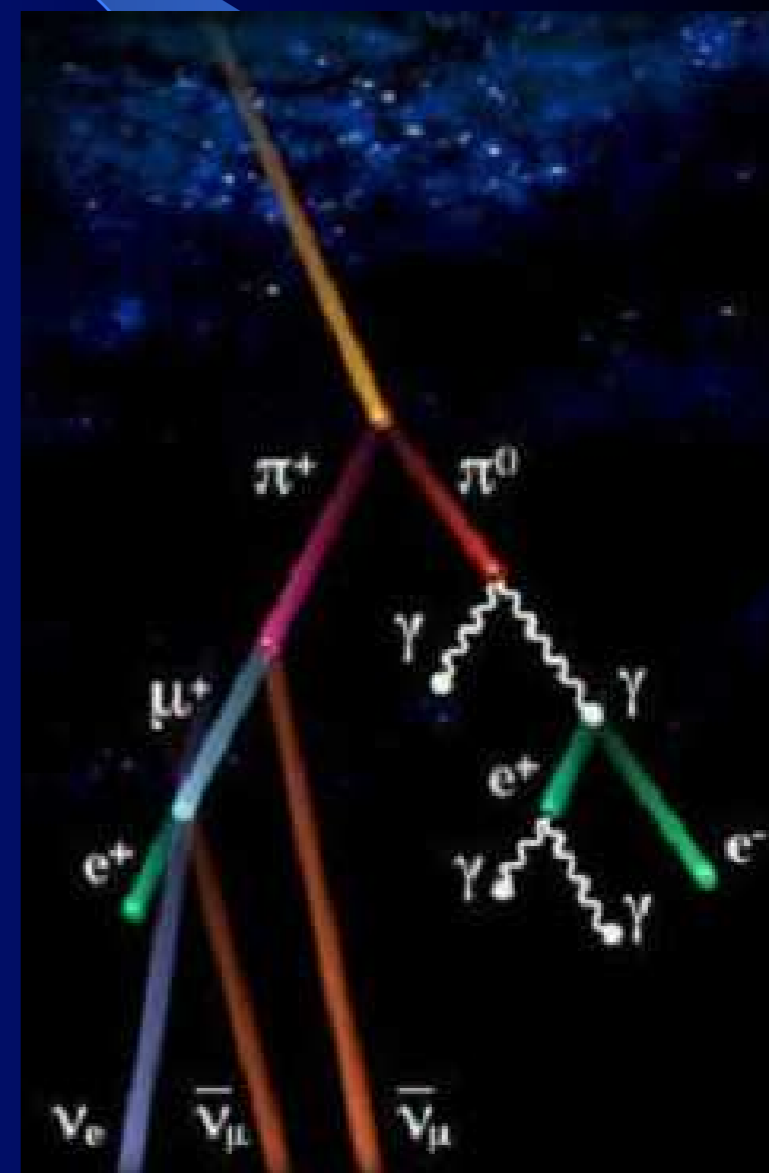
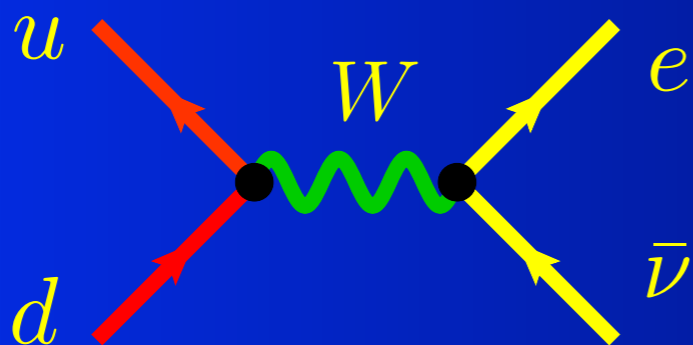
Лептоны от слова ΛΕΤΤΌΣ



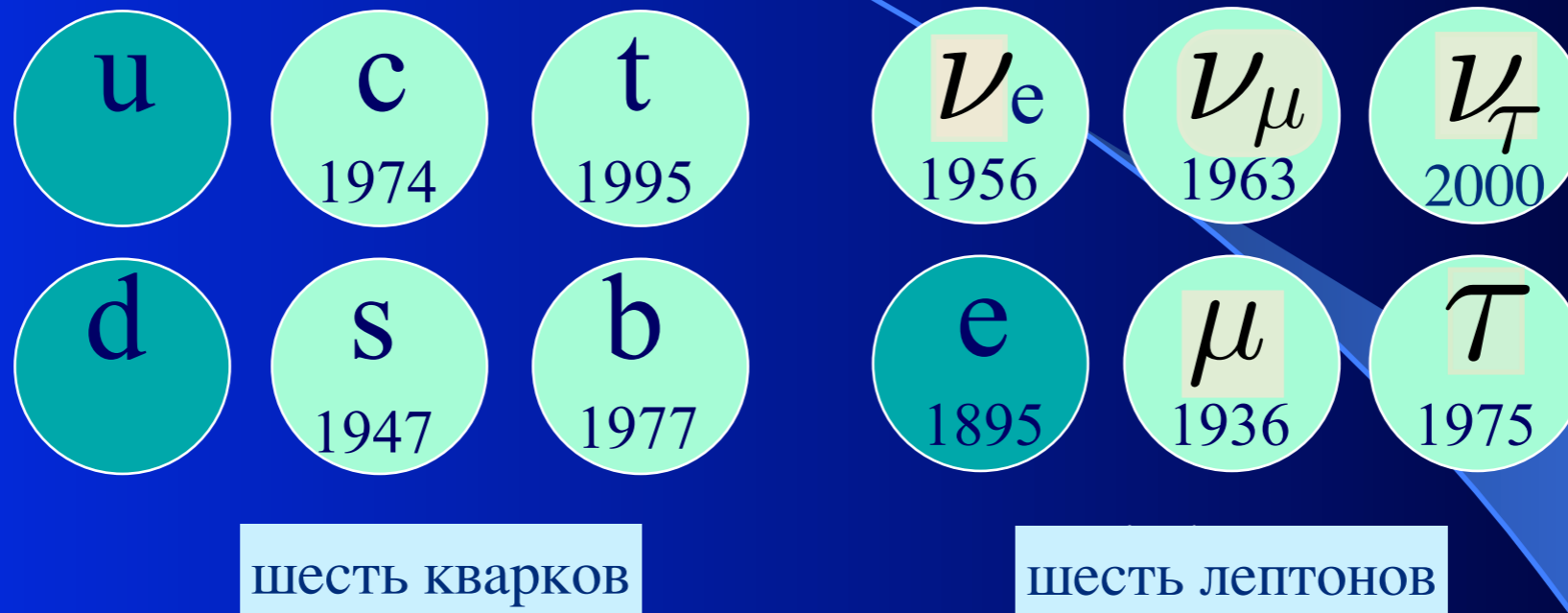
Мюоны рождаются от распада π -мезонов в космических лучах и распадаются на электроны и два нейтрино

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



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.



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

The Nobel Prize in Physics 2013

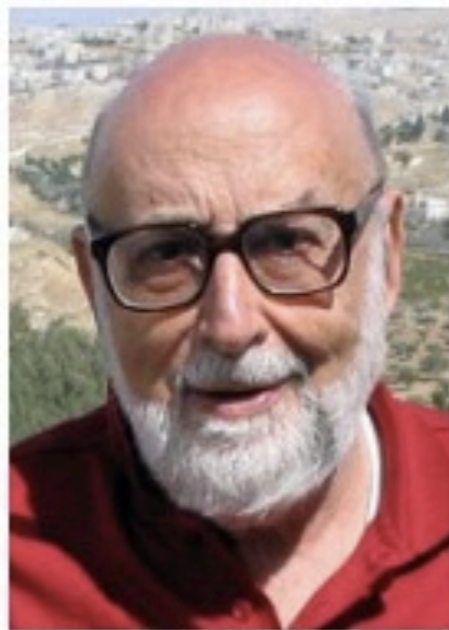


Photo: Pnicolet via Wikimedia Commons

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"*

30Н

Основное состояние

Спонтанное нарушение симметрии

...вое
...нглера-Хиггса,
...астица -

Массы эле
в Станд

m_{quark}
 m_{lepton}

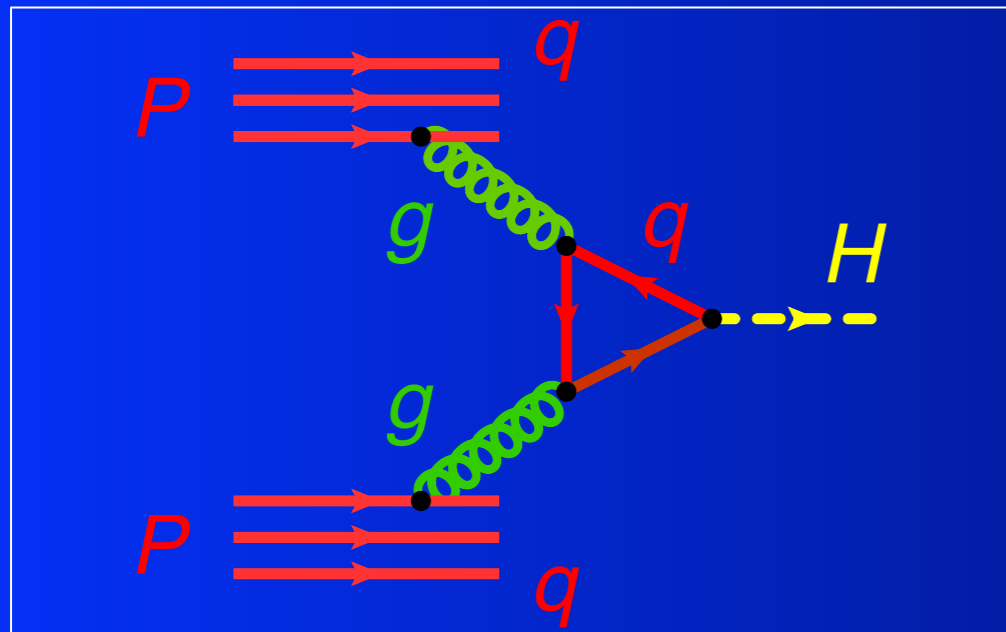
$m_Z =$

m_H

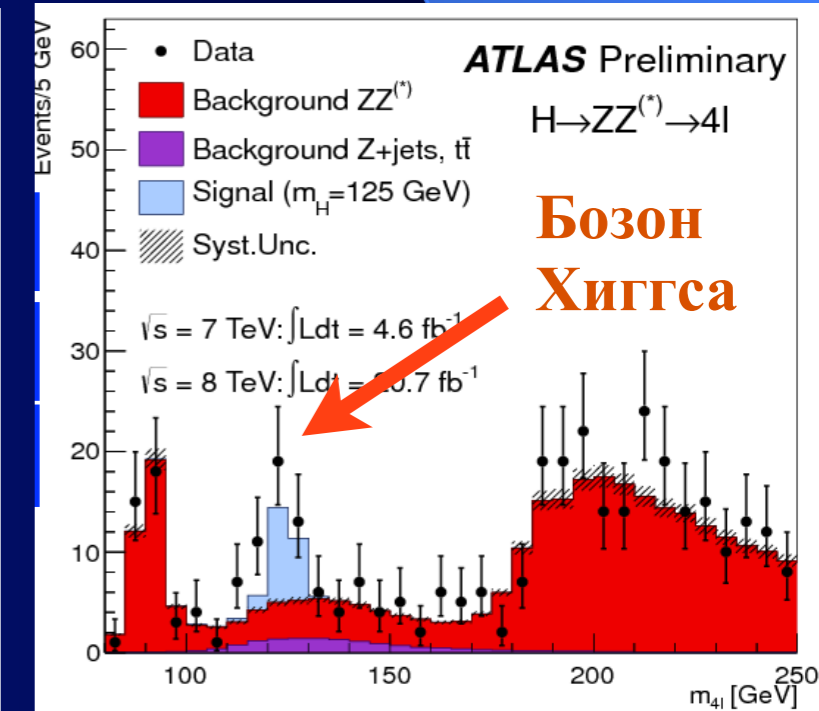
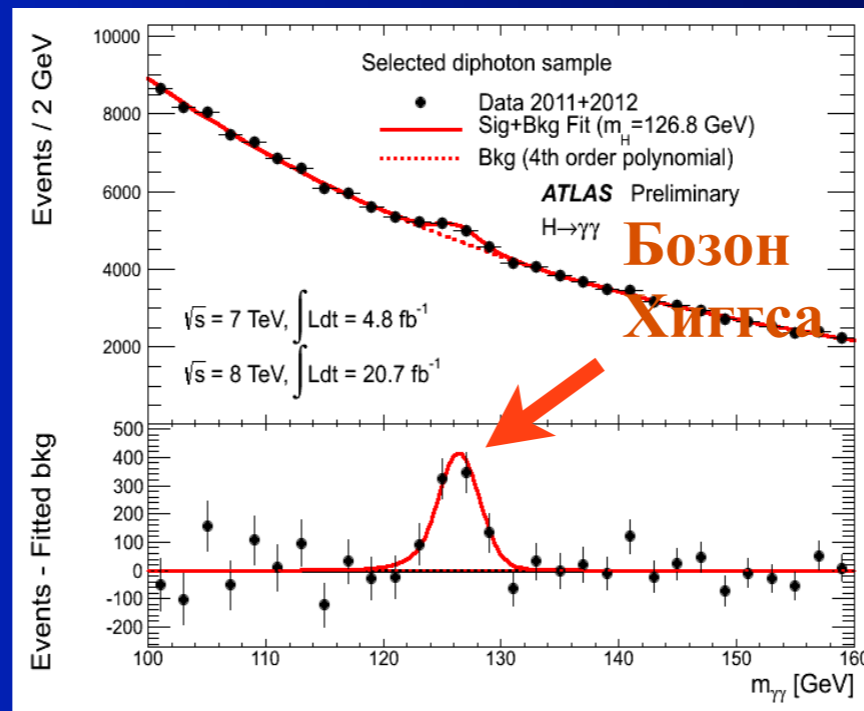
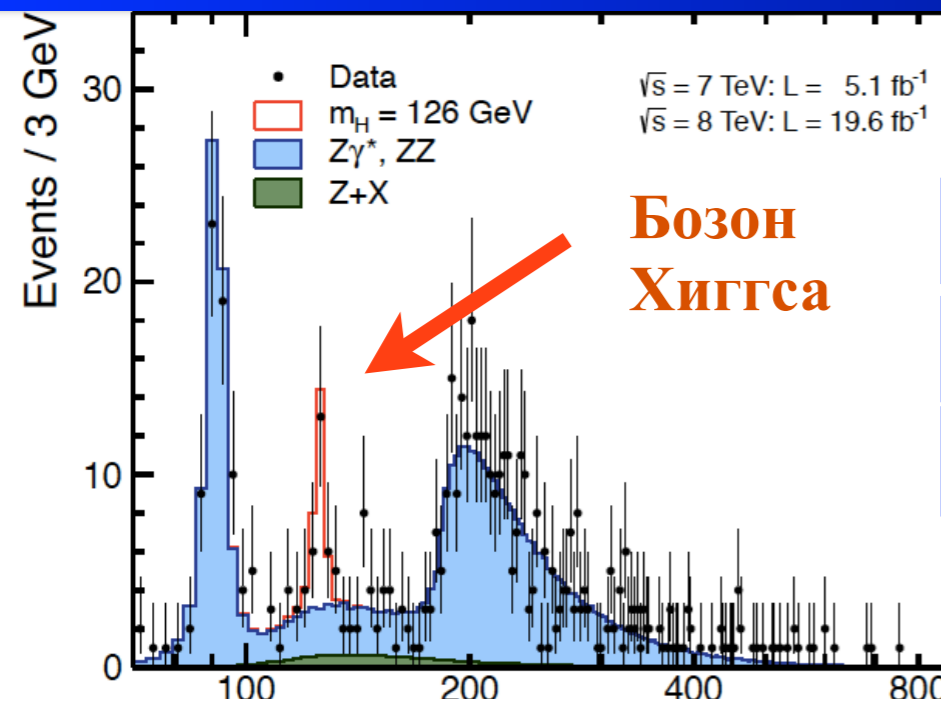
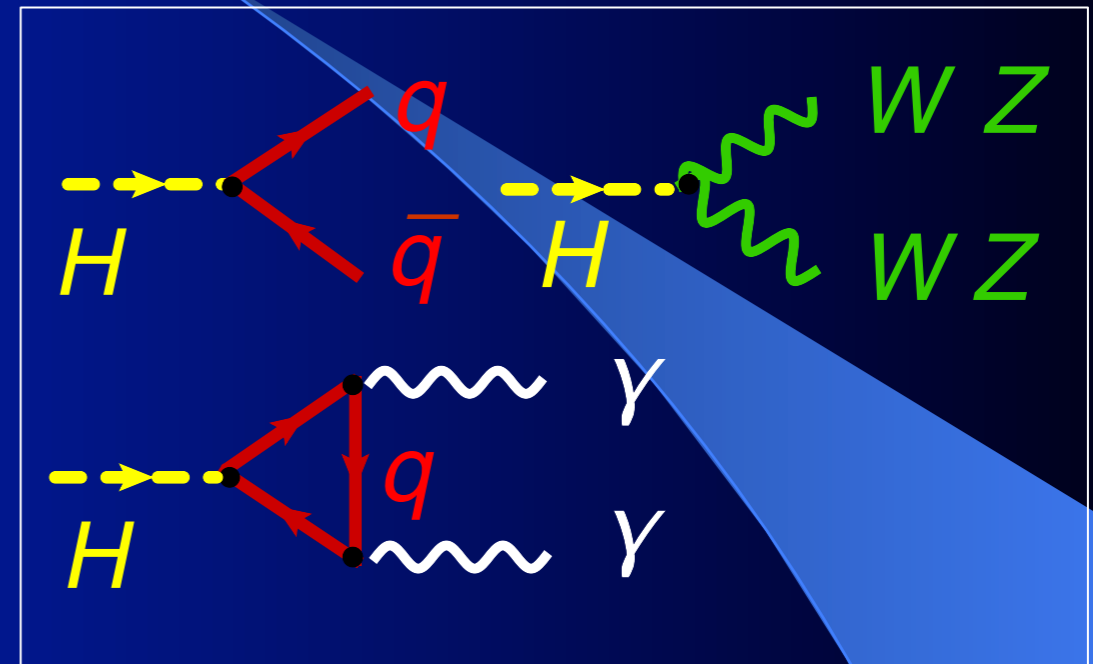
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

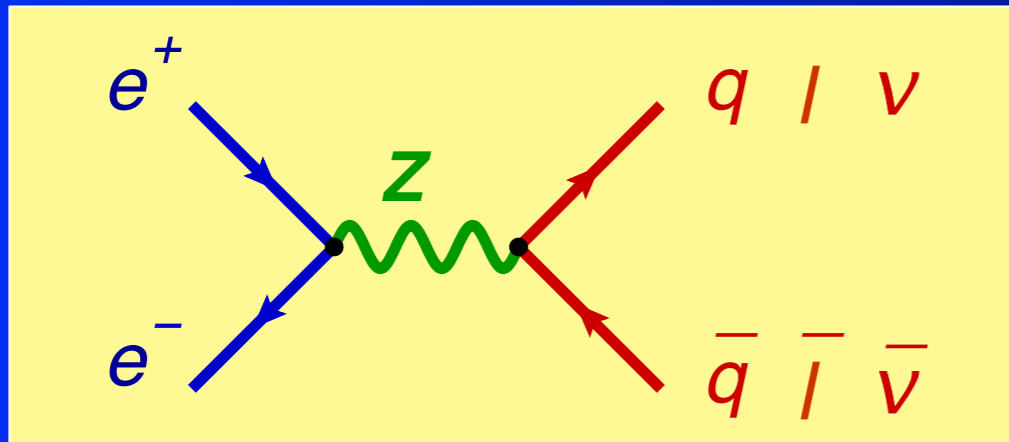
Рождение на протонном коллайдере



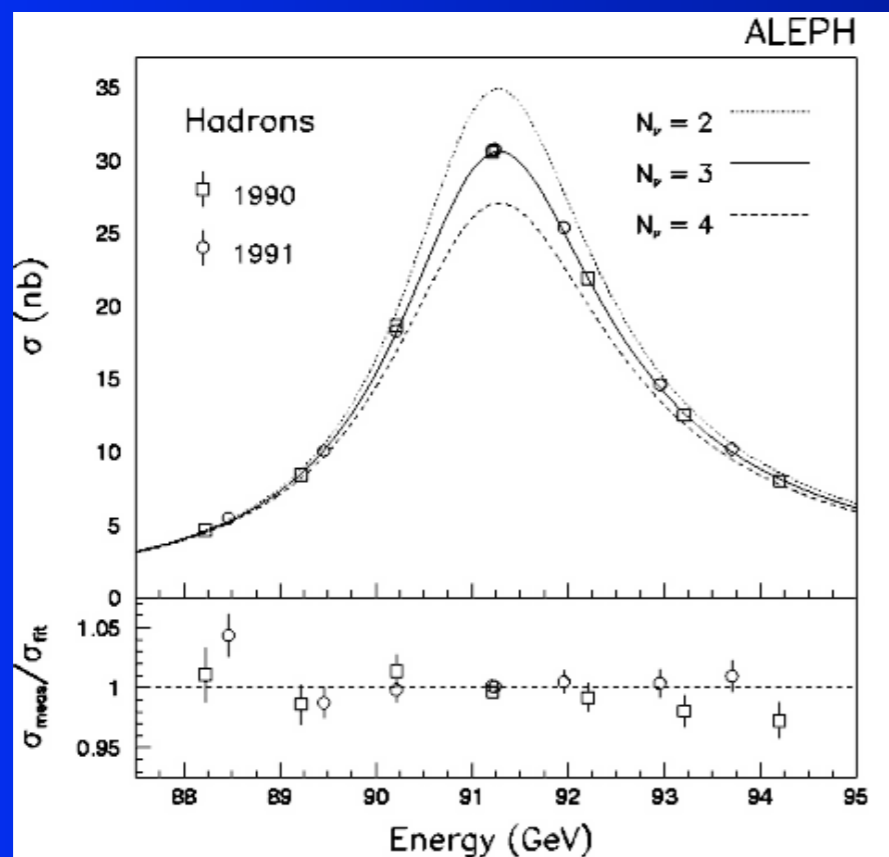
Процессы распада



Число поколений в СМ (ускорительные данные)



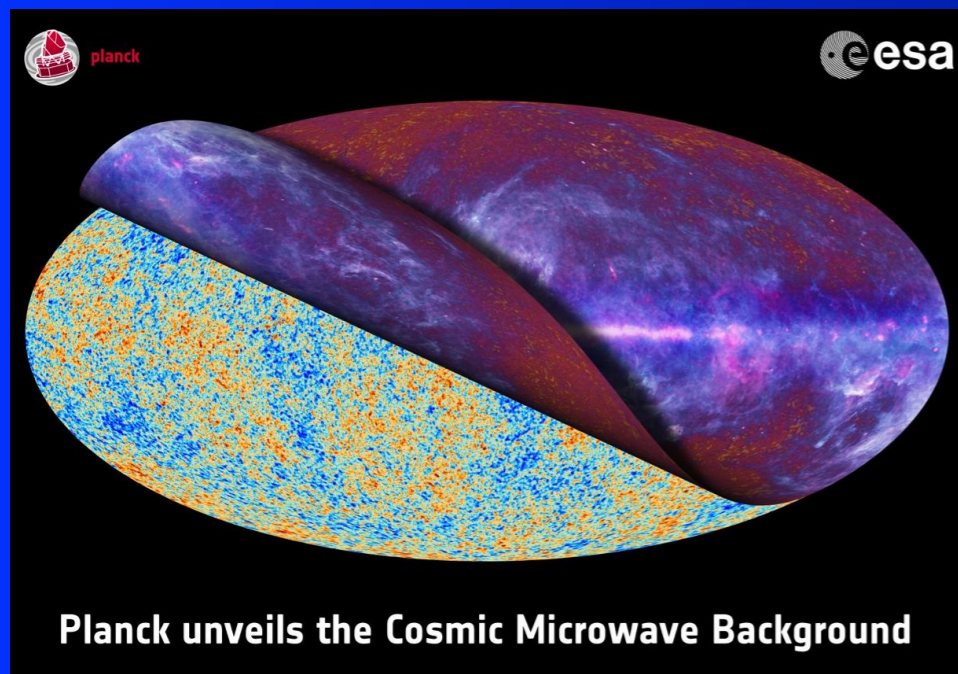
Форма Z-линии полученная на ускорителе LEP зависит от числа поколений и позволяет определить число (лёгких) нейтрино или число поколений в Стандартной Модели



$$N_g = 2.982 \pm 0.013$$

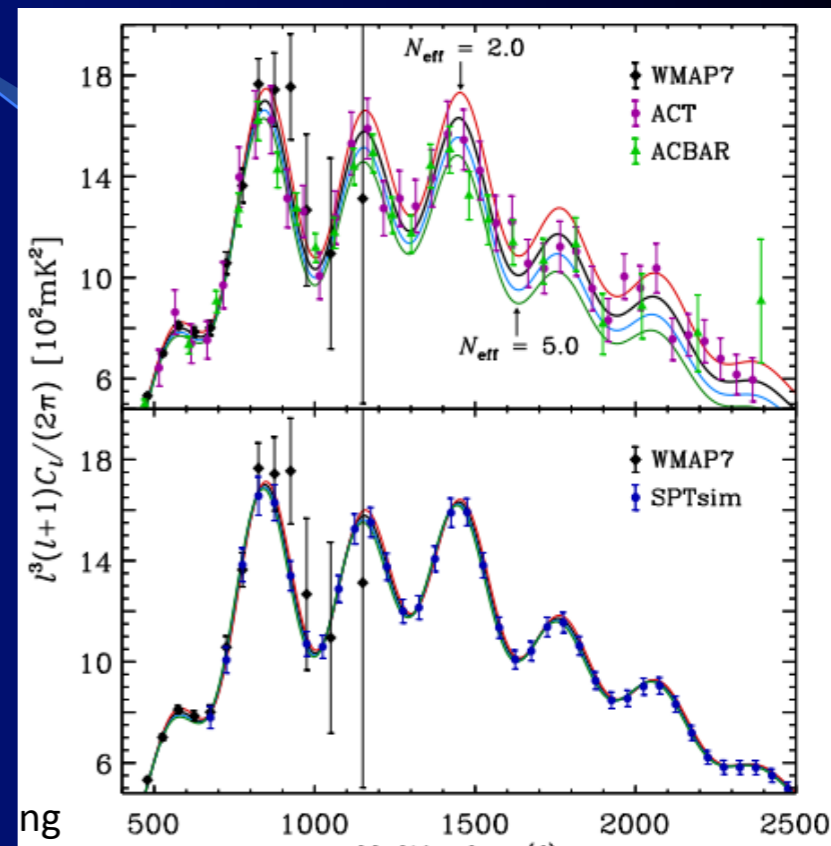
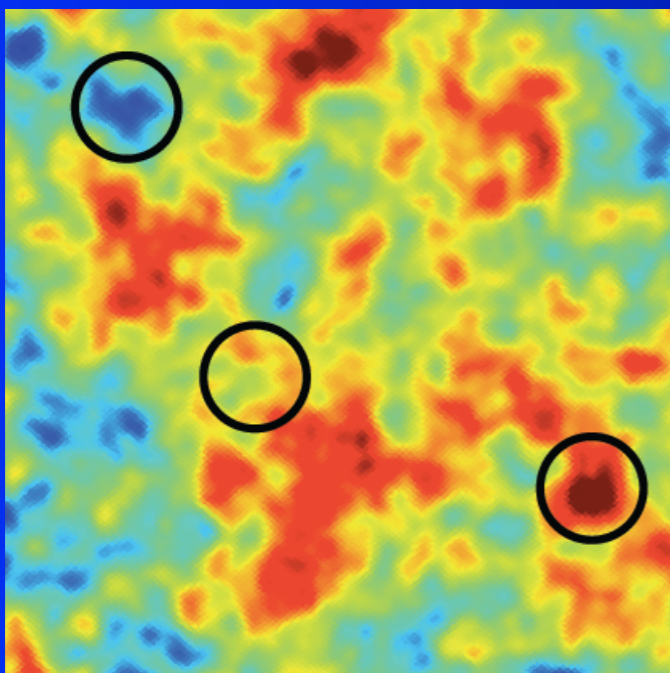
Форма Z-линии

Число поколений в СМ (космологические данные)



Температурные
флуктуации
микроволнового
фона реликтового
излучения

Число сортов
активных
нейтрино



Разложение по гармоникам

CMB + HST

$$N_{eff}^{\nu} = 3.62^{+0.50}_{-0.48}$$

CMB + SNLS

$$N_{eff}^{\nu} = 3.51^{+0.67}_{-0.63}$$

CMB + Union2

$$N_{eff}^{\nu} = 3.40^{+0.67}_{-0.63}$$

CMB + BAO

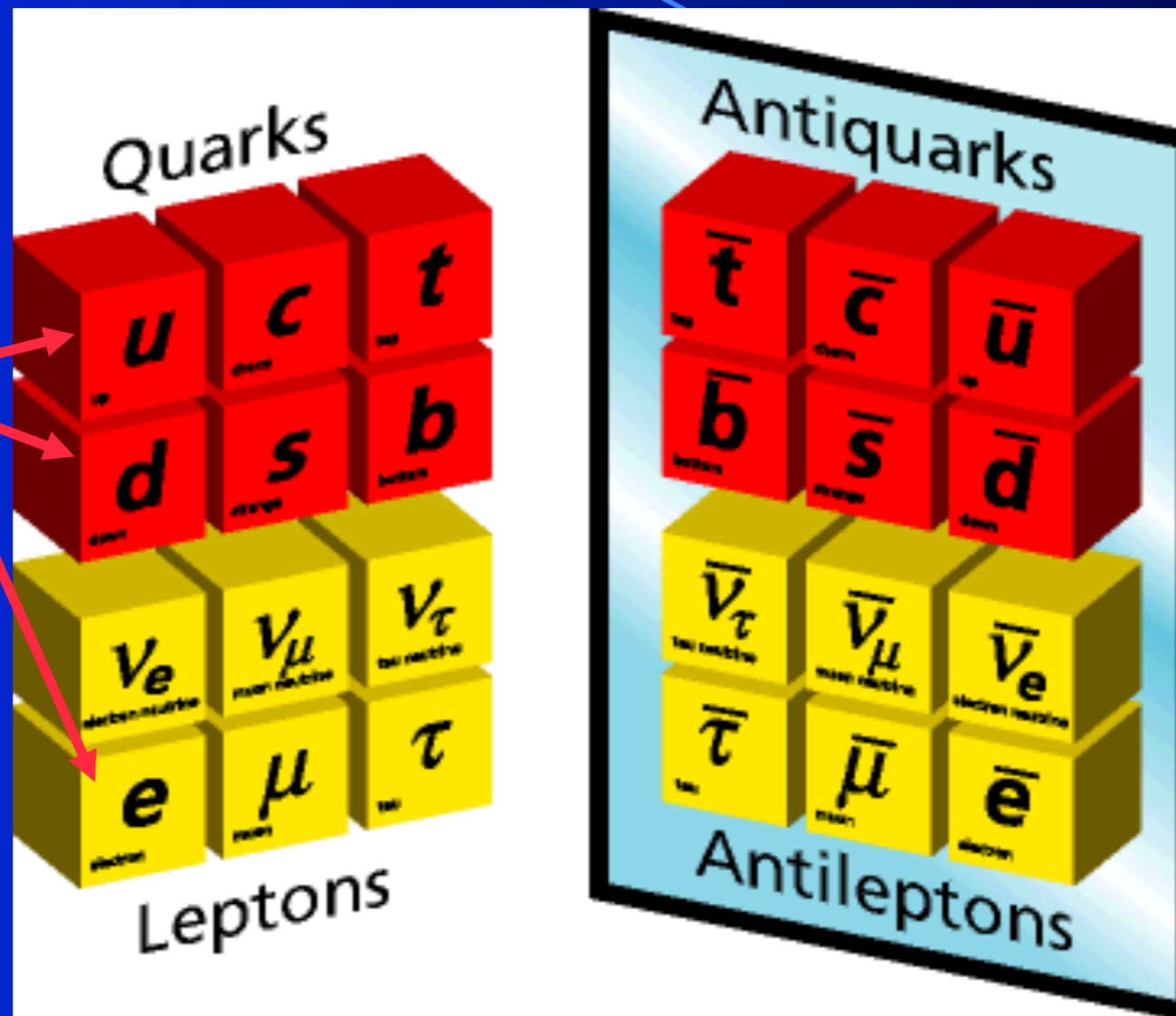
$$N_{eff}^{\nu} = 3.30^{+0.54}_{-0.51}$$

Загадка № 2:

Как объяснить отсутствие антиматерии во Вселенной?

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

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

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

Остаток после взаимной аннигиляции

- 📌 Что является источником барионной асимметрии?
- 📌 Где нарушается симметрия между частицами и античастицами?

Всё ещё не разгаданная загадка!

Источник БАВ

Возможное объяснение:

А.Д.Сахаров

1. Нарушение теплового равновесия в ранней Вселенной

Вполне возможный сценарий в ранней Вселенной, когда частицы «выпадают» из теплового равновесия \longleftrightarrow
нарушение T- инвариантности

2. Нарушение сохранения барионного числа

$$B = \frac{N_q - N_{\bar{q}}}{3}$$

Барионное число B сохраняется в СМ (с экспоненциальной точностью), но нарушается в теориях Великого объединения

3. Нарушение CP-симметрии
(инвариантности по отношению к отражению пространства и замене частицы на античастицу)



СРТ -
точная
симметрия
Природы

Теории Великого объединения

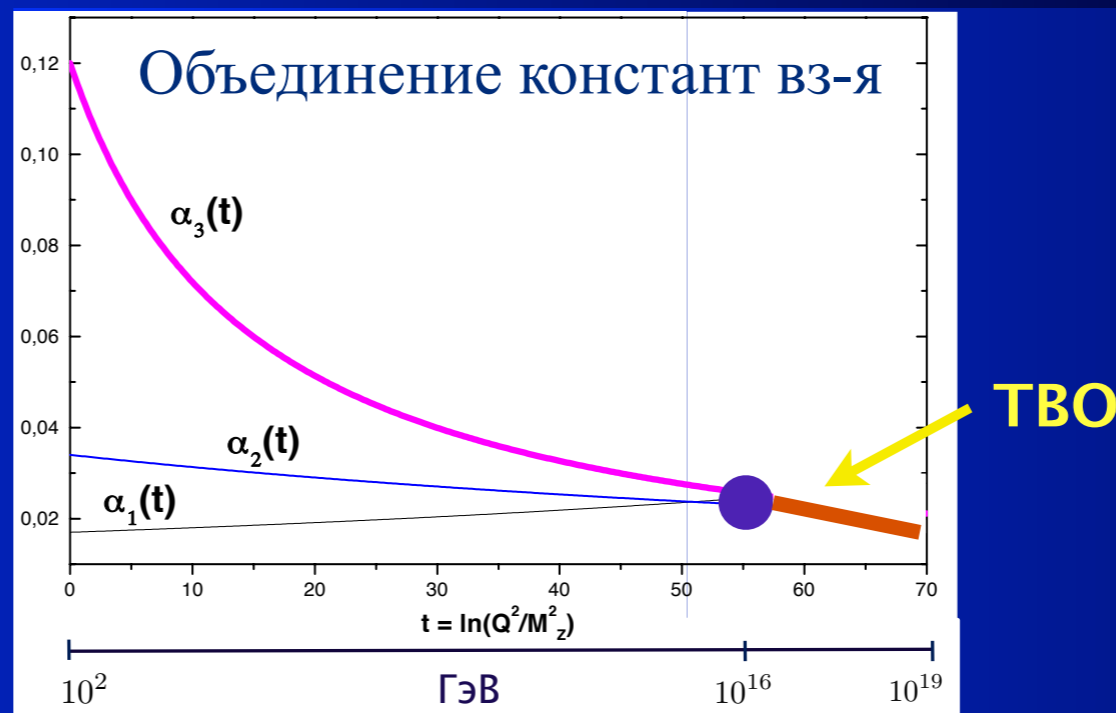
- Группа симметрии ТВО включает группу симметрии СМ $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ как подгруппу
- Частицы одного поколения СМ принадлежат представлению группы ТВО (кварки становятся неразличимы от лептонов)
- Три различные силы: сильные, слабые и электромагнитные являются «ветвями» единой силы

Объединённые теории

Электричество и магнетизм есть различные проявления одной электромагнитной силы.

Электромагнетизм, слабые и сильные взаимодействия могут быть проявлениями одной единой силы.

Единая теория может включать и гравитацию.



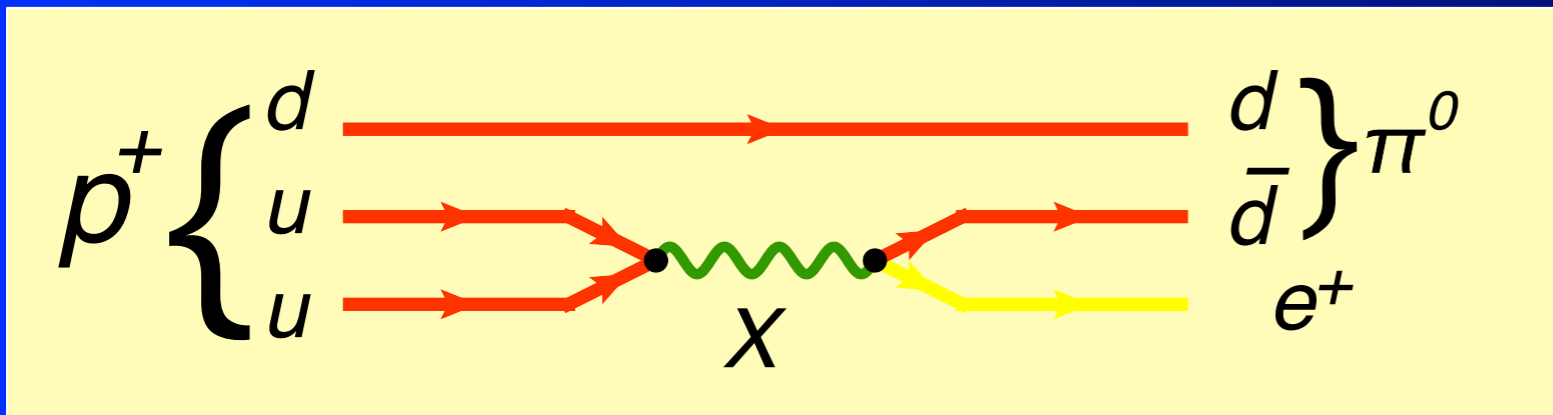
«объединение» констант вз-я - есть следствие их общего происхождения

Нестабильность протона

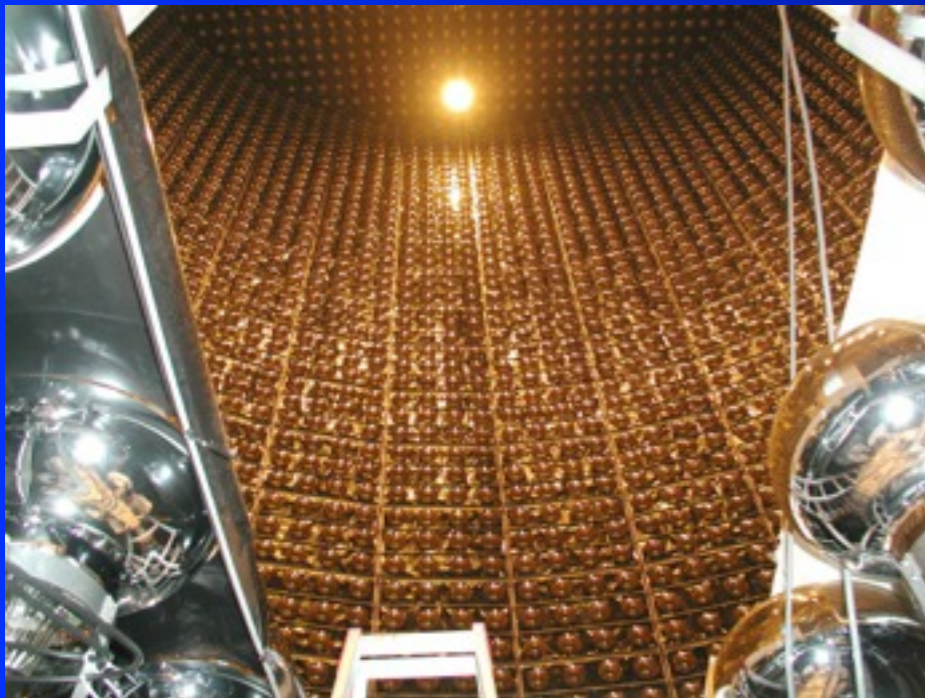
В Теории Великого Объединения кварки и лептоны равноправны и превращаются друг в друга. Это приводит к распаду протона.

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

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



Камиока (Япония)



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

CP нарушение в SM

Источник CP нарушения в SM - смешивание кварков (и лептонов)

Если существует несколько поколений кварков, то они могут переходить друг в друга при взаимодействии с W-бозоном

Два поколения

$$(\bar{u} \ \bar{c}) \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} W \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

матрица смешивания

фаза - источник CP

Три поколения

$$K = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава

Точно также и в лептонном секторе

Требует как минимум 3 поколений частиц в SM

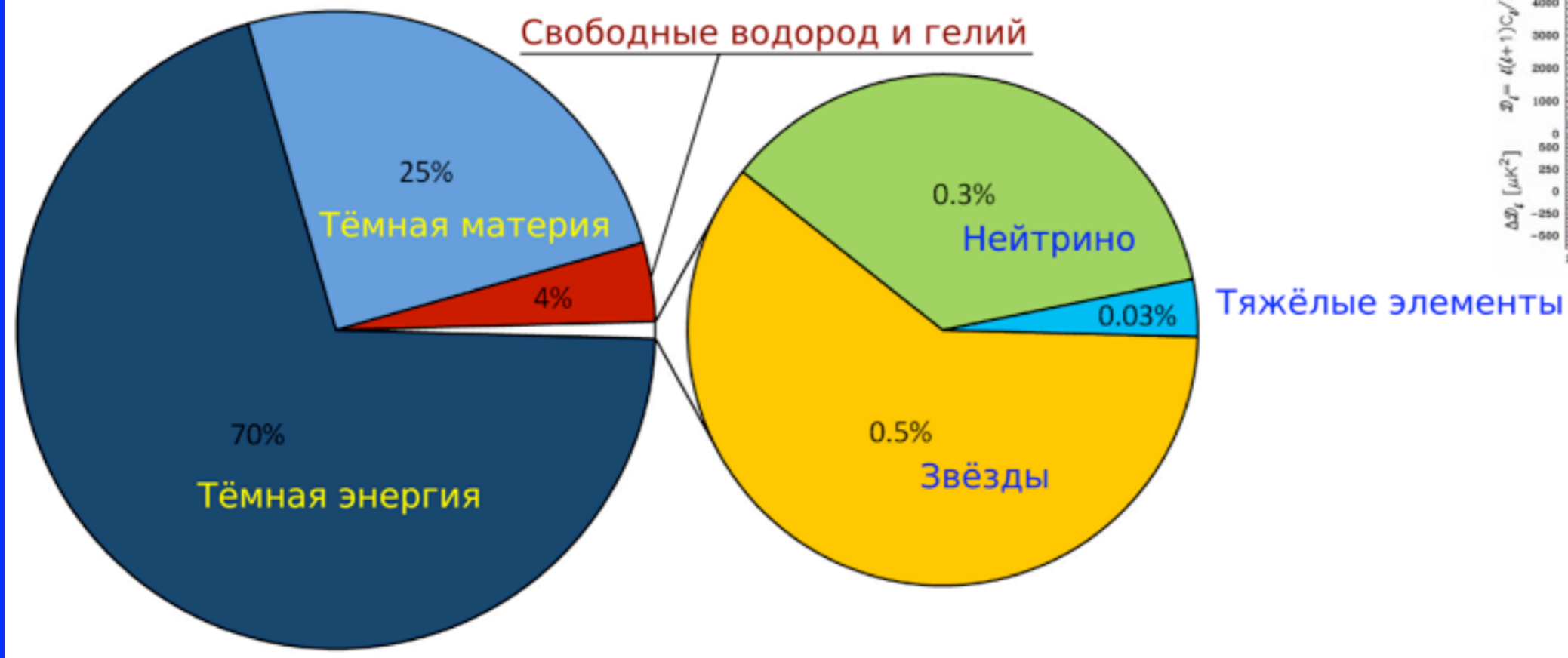
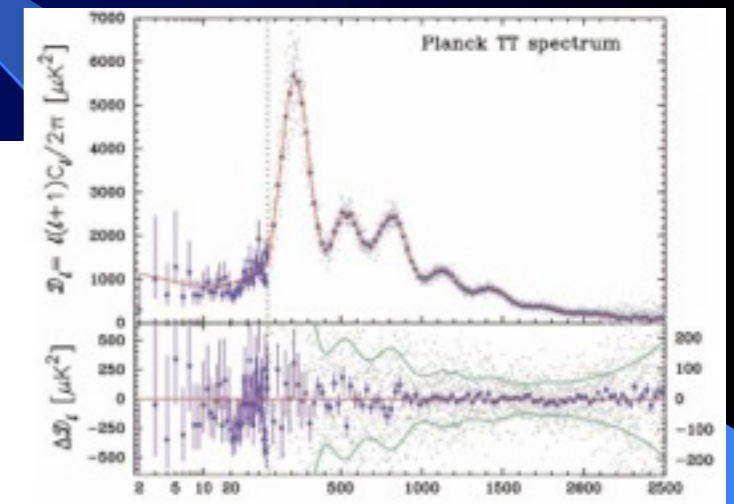
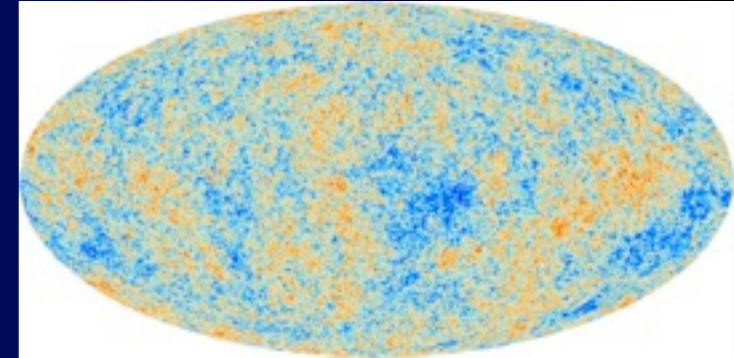
Возможно источником является CP-нарушение в нейтринном секторе

Загадка № 3:

Что такое тёмная
материя и из чего она
состоит?

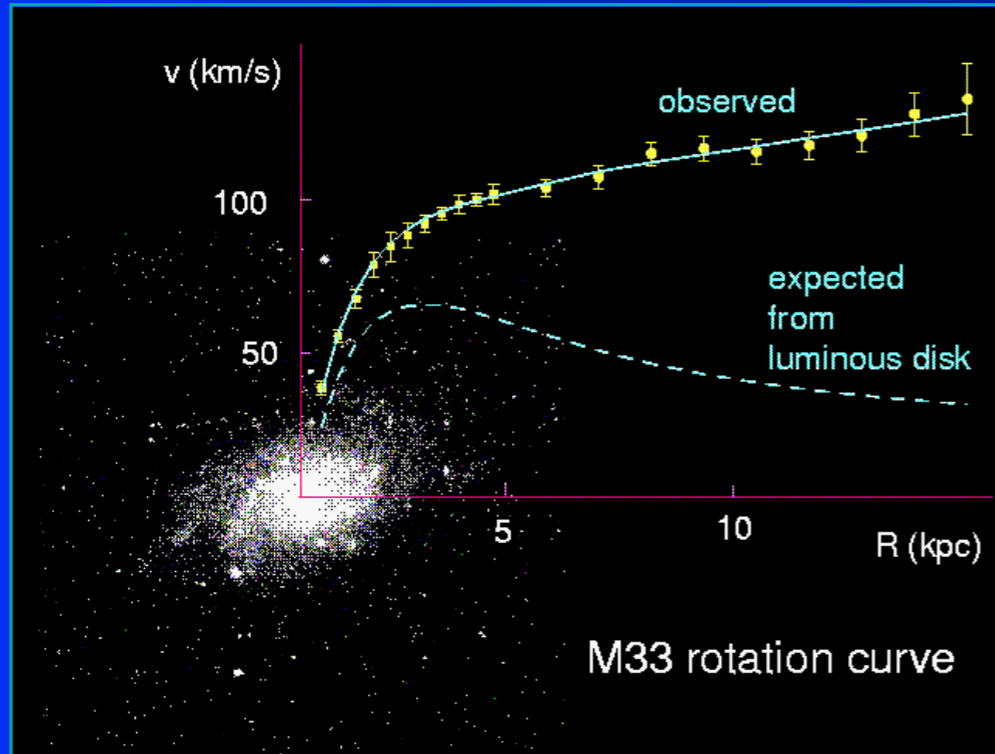
Энергетический баланс Вселенной

- Температурные флуктуации микроволнового фона
- Взрывы сверхновых



Наше знание касается лишь малой части Вселенной, однако возможно нам известны 99% (50%) элементарных частиц

Тёмная материя



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

- Спиральные галактики состоят из центрального ядра и очень тонкого диска и окружены приблизительно сферическим гало из тёмной материи. Скорость движения частиц гало ~ 300 км/сек

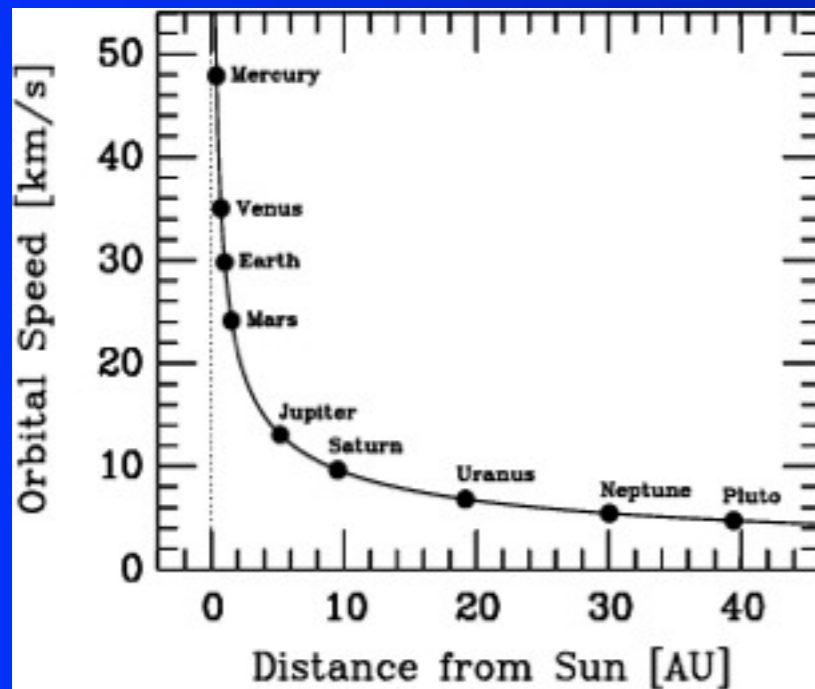


Ротационные кривые звёзд

центробежная сила

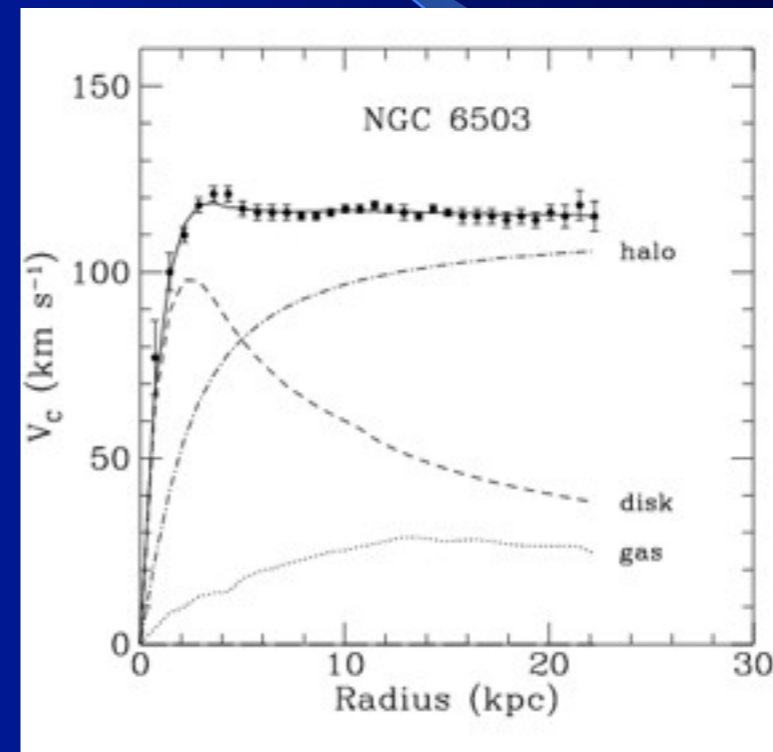
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

гравитация



Плотность
тёмной
материи в
солнечной
системе
пренебрежи
мо мала

Солнечная система

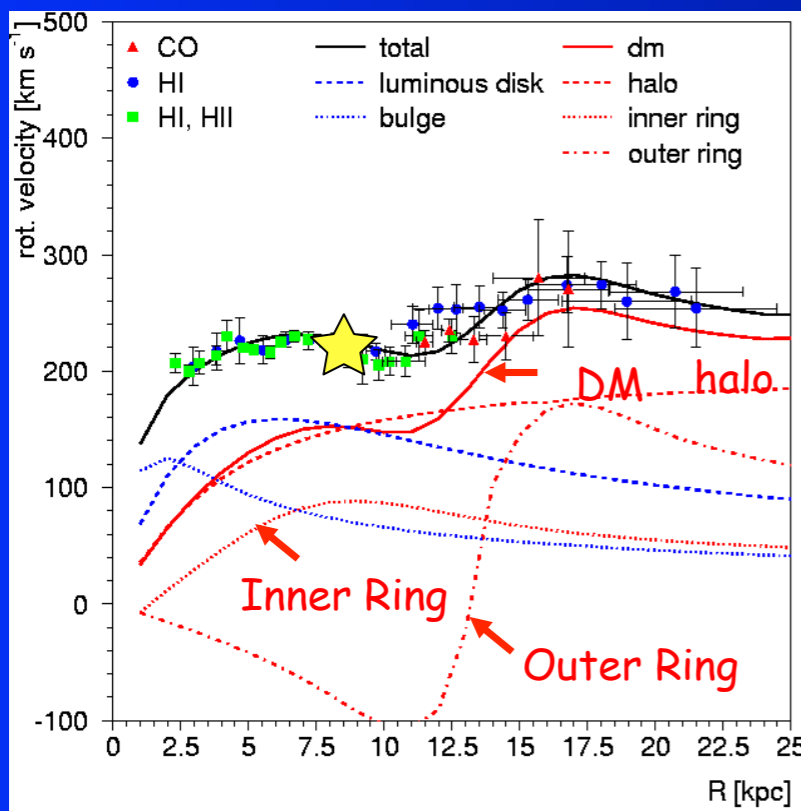


Тёмная
материя
сосредоточена
на
галактических
масштабах

Галактика

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

Млечный путь



Кривая вращения звёзд

- Скорость вращения Земли вокруг Солнца - 30 км/сек
- Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики - 220 км/сек
- Скорость за счёт притяжения видимой материи - 175 км/сек
- Плотность ТМ в районе Солнца - 0.3 ГэВ/см^3

Сталкивающиеся спиральные галактики Арп 271

Плотность гало тёмной материи



Вид сбоку

Вид сверху



Что есть тёмная материя?



Тёмная материя сделана из:

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

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

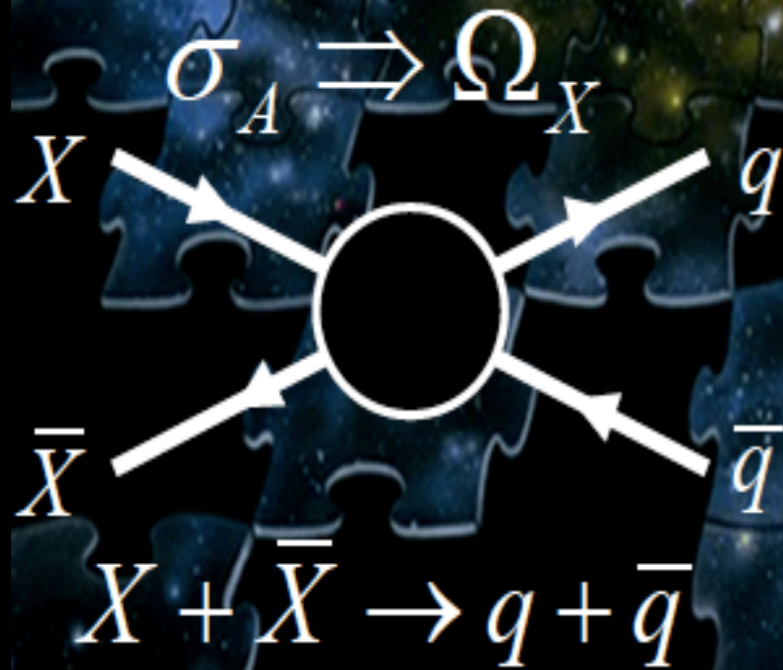
?

- Частица тёмной материи должна быть нейтральной, стабильной, слабо и/или гравитационно взаимодействующей
- В Стандартной модели нет такой частицы (за исключением возможно тяжёлого правого нейтрино)

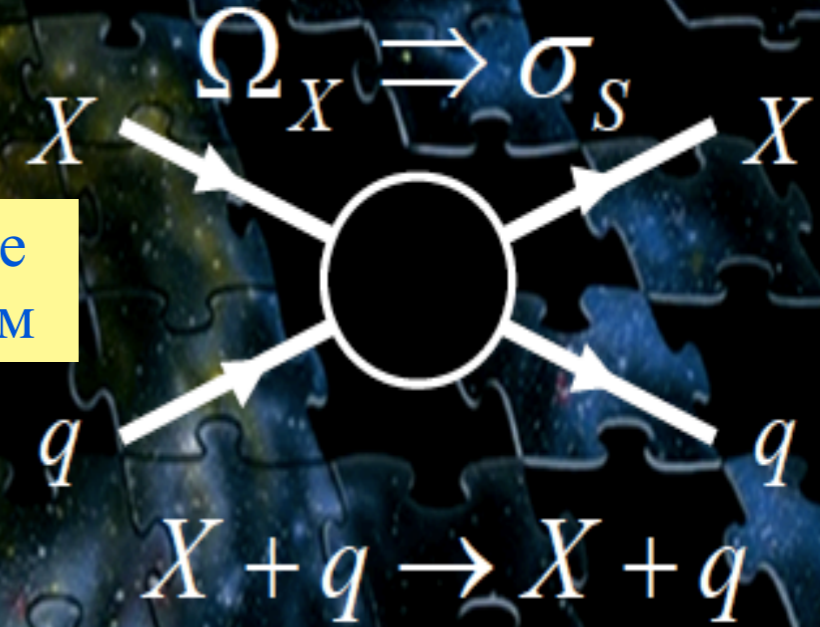
- Частицы ТМ не участвуют в сильных взаимодействиях и не испускают свет.
- В силу этого они не могут образовывать компактных объектов

Поиск частиц тёмной материи

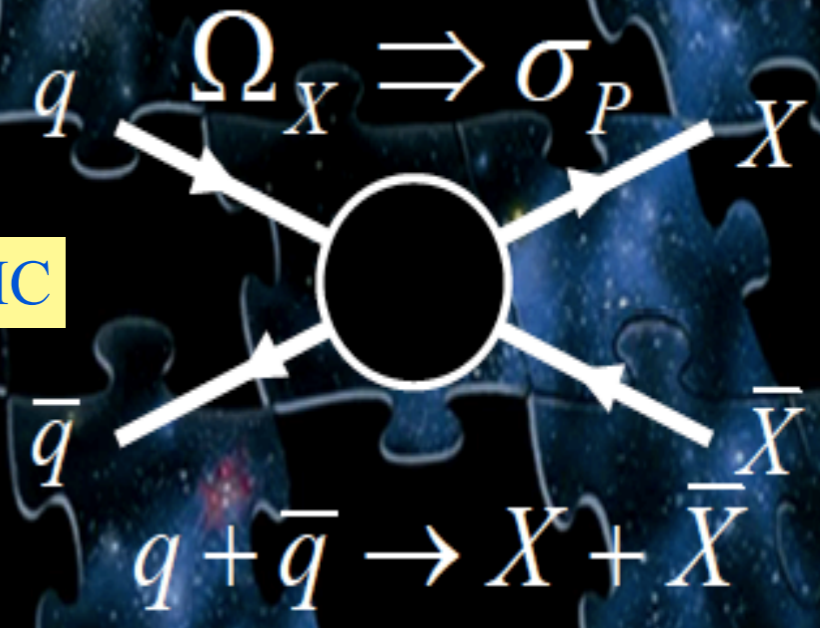
Аннигиляция -> новая компонента в космических лучах



Прямое вз-е с веществом



Рождение на LHC



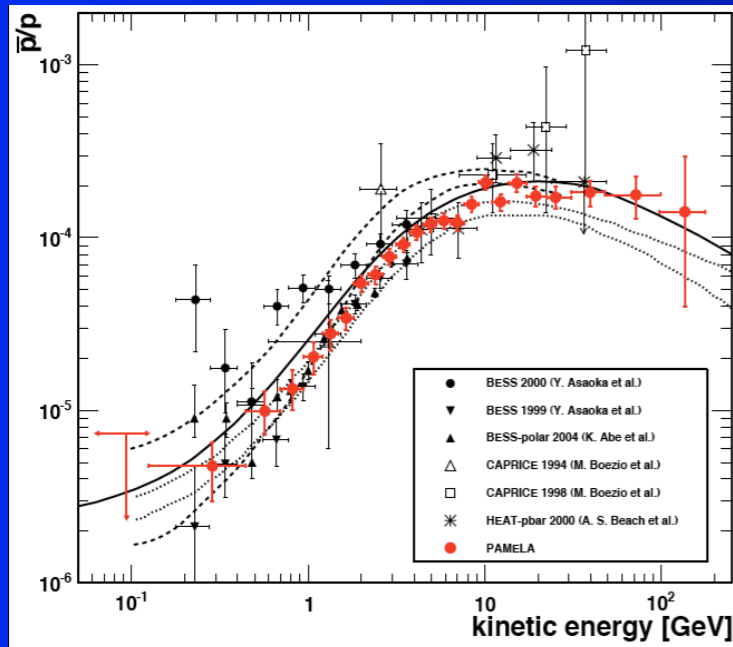
R. Kolb

Сигнал пока отсутствует

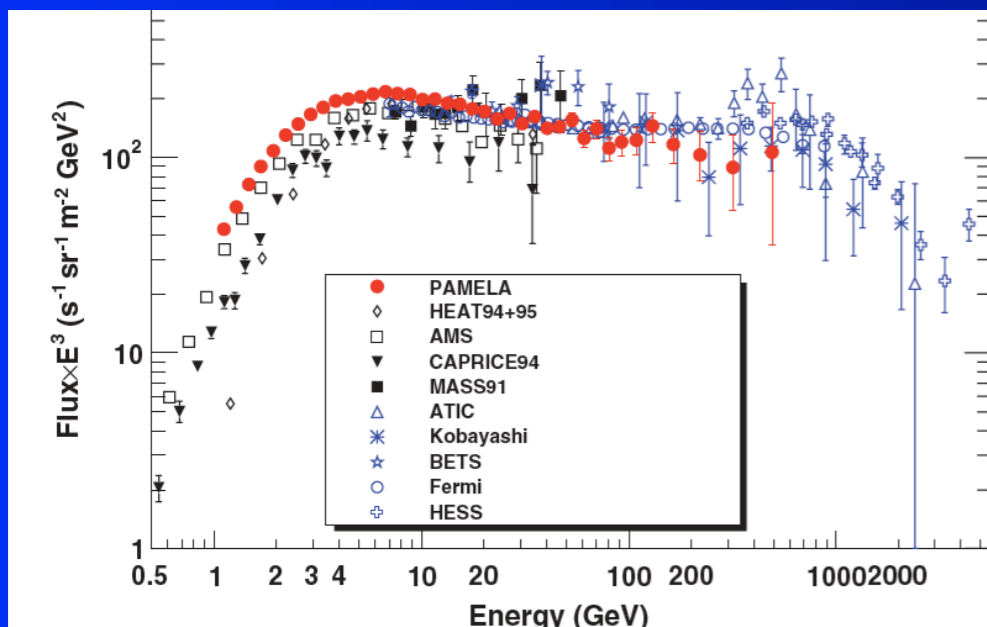
Поиск WIMP'ов

WIMP - Weakly Interactive Massive Particle

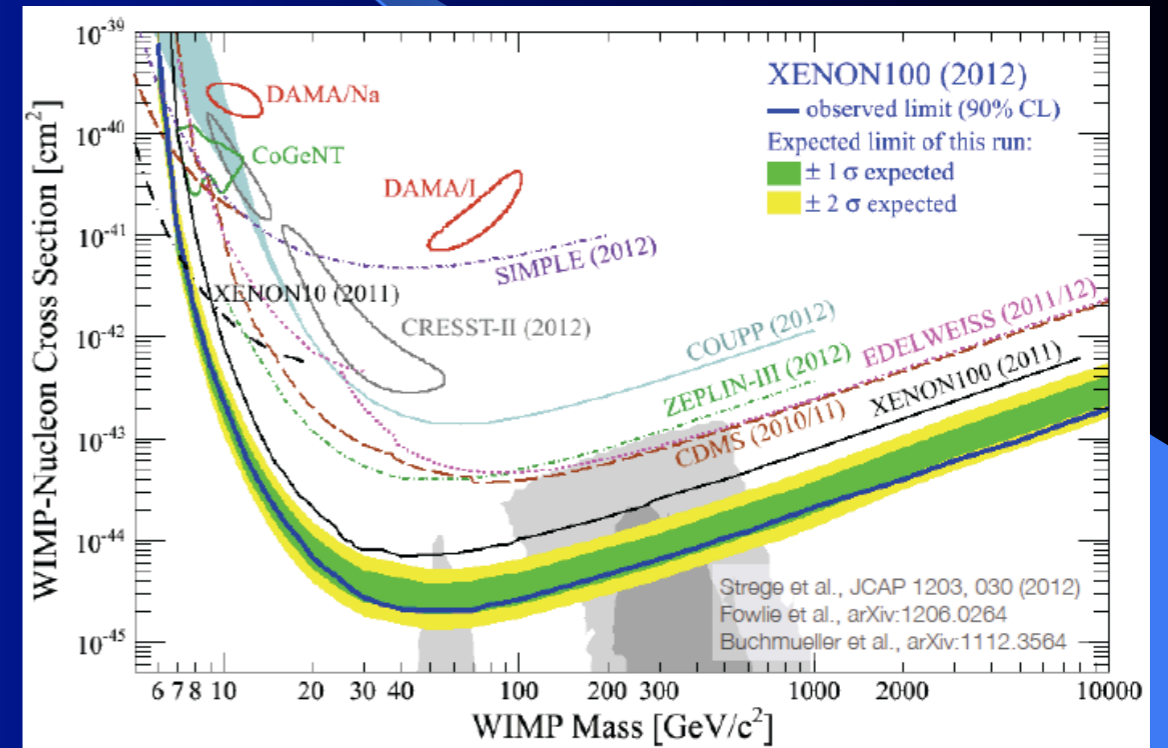
Аннигиляция ТМ в гало галактики



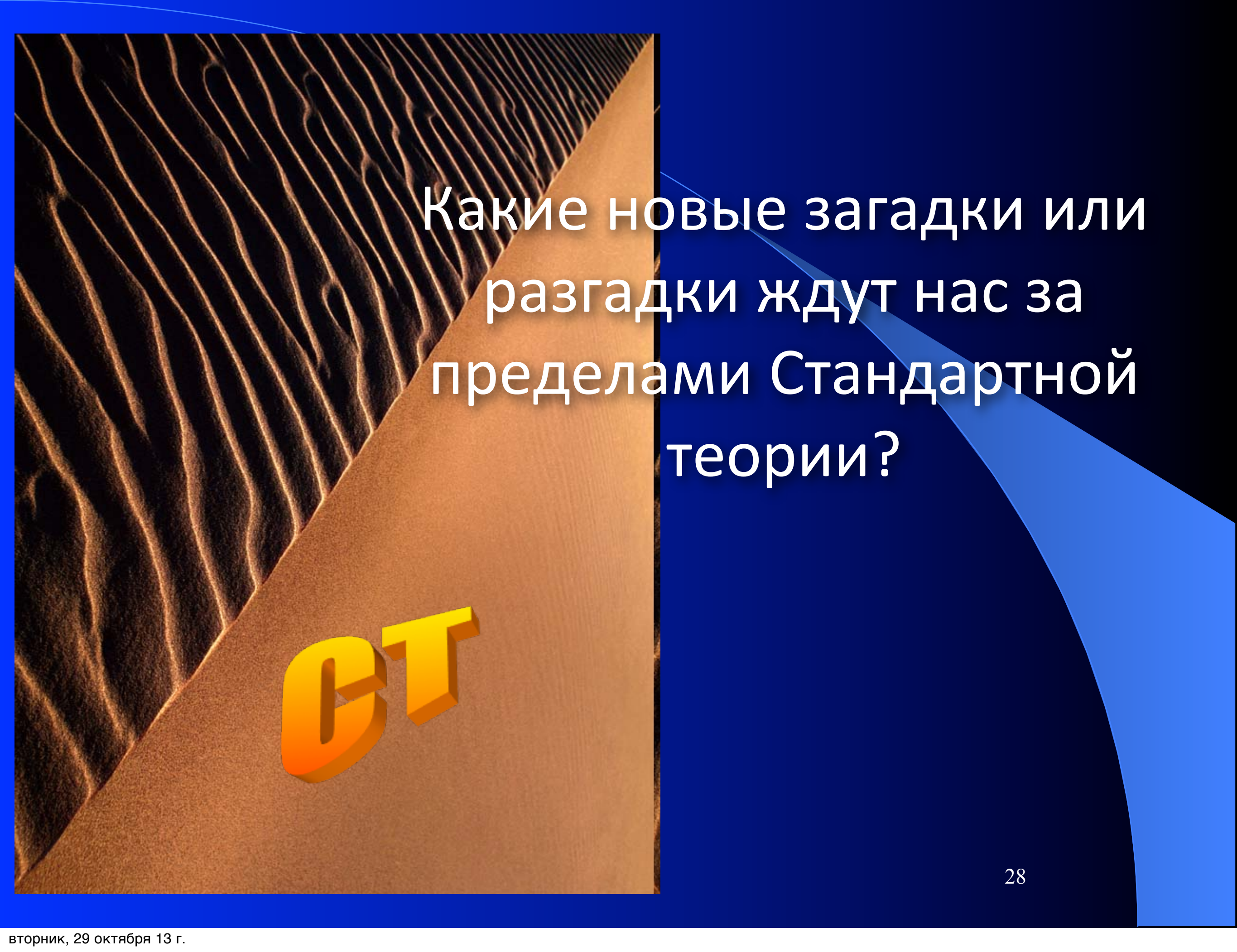
Антипротоны и позитроны в космических лучах



Взаимодействие ТМ с веществом



Как в спектре космических лучей, так и в реакции взаимодействия с веществом - нет превышения над фоном



Какие новые загадки или
разгадки ждут нас за
пределами Стандартной
теории?

СТ