



ПОЛИТ.РУ

PRO SCIENCE

Как устроен Мир?

Загадки физики микромира

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?

A central diagram showing a collision between an electron (e-) and a positron (e+). The electron is represented by a green sphere moving from left to right, and the positron is a red sphere moving from right to left. They meet at a central point where a bright white flash occurs. From this point, numerous green and red lines radiate outwards, representing the products of the collision. Some of these lines end in small red spheres, indicating the production of other particles. The background is a dark blue gradient.

e^- e^+

В основе лежит
простая и элегантная
математическая схема

Загадка № 1:

Почему в природе
понадобились три поколения
элементарных частиц?

Стандартная Модель



УДК 537.873.01

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III		
mass→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	125.7 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name→	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
	d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
Leptons	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force	
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force	

Bosons (Forces)

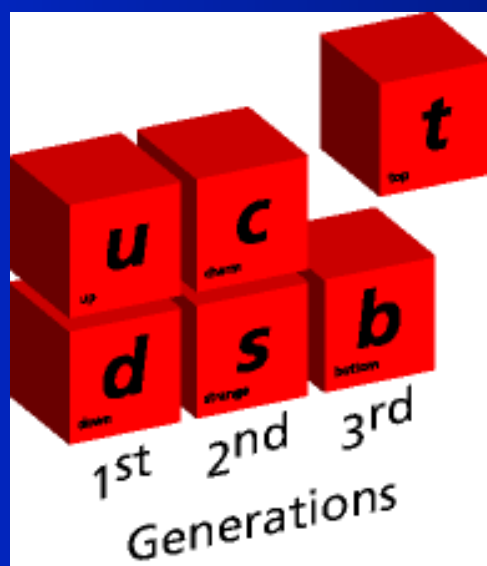
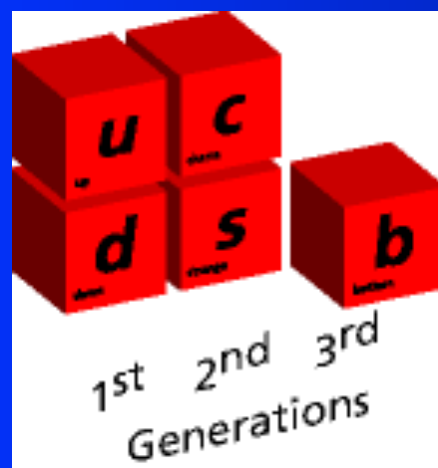
Силы
 Электромагнитные
 Сильные
 Слабые

Хиггс
 Гравитация

Кварки – “кирпичики мироздания”



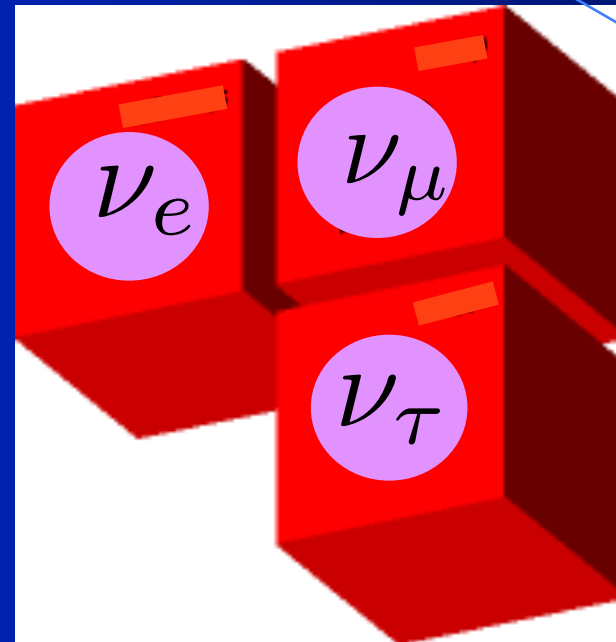
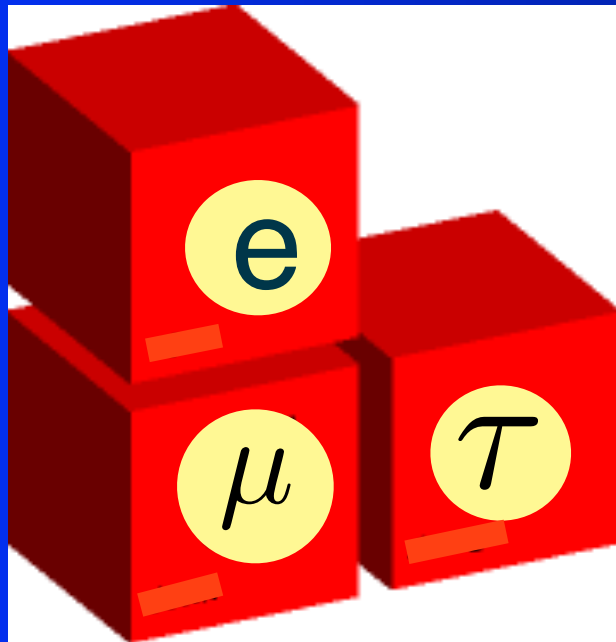
- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **ШЕСТИ**



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



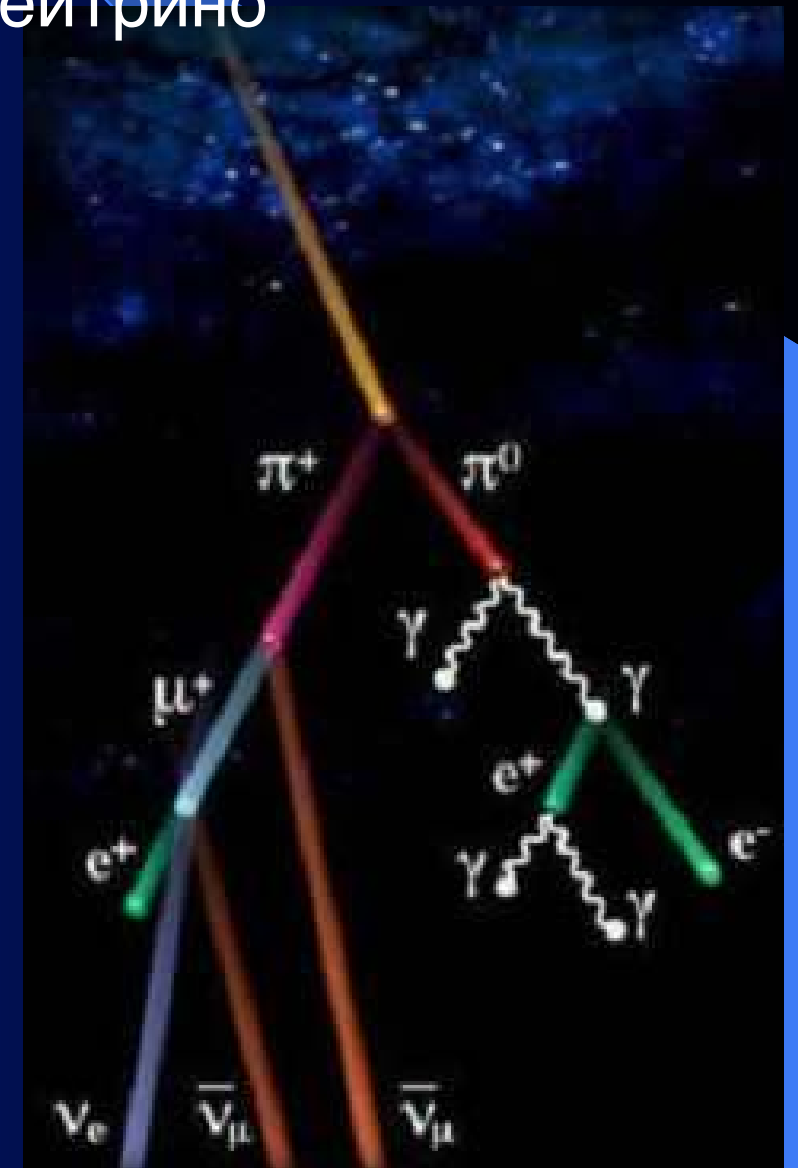
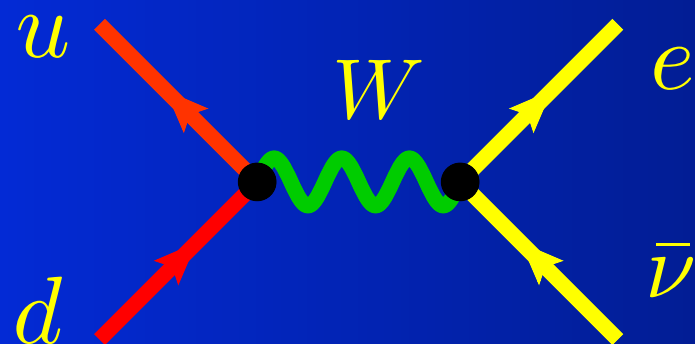
Лептоны от слова λεπτός



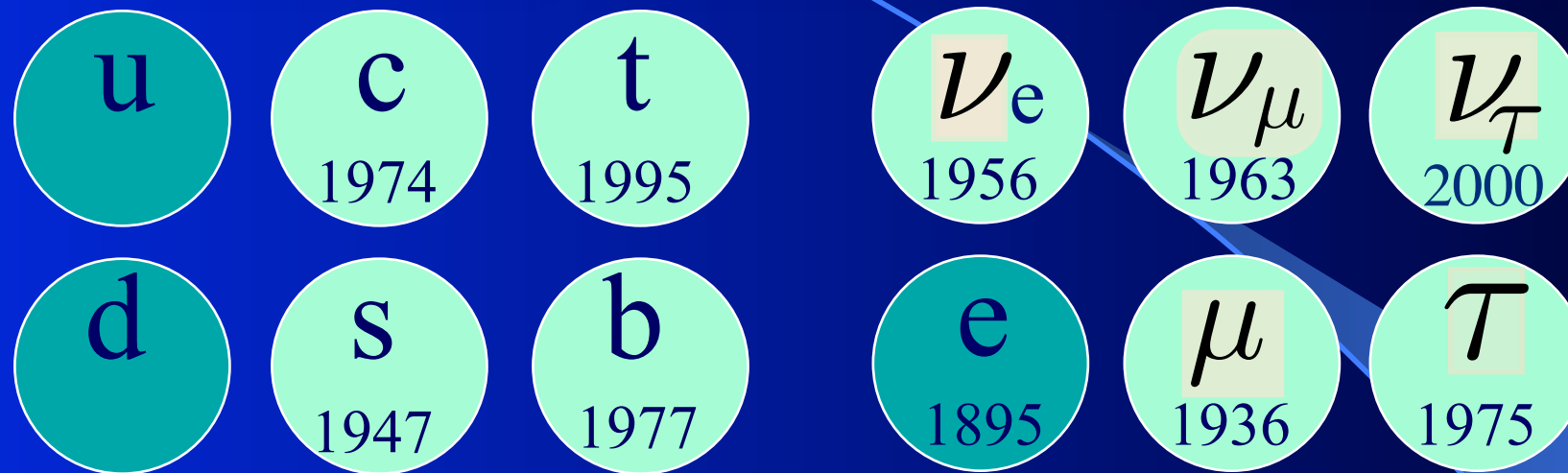
Мюоны рождаются от распада П-мезонов в космических лучах и распадаются на электроны и два нейтрино

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.

Хиггсовский Бозон

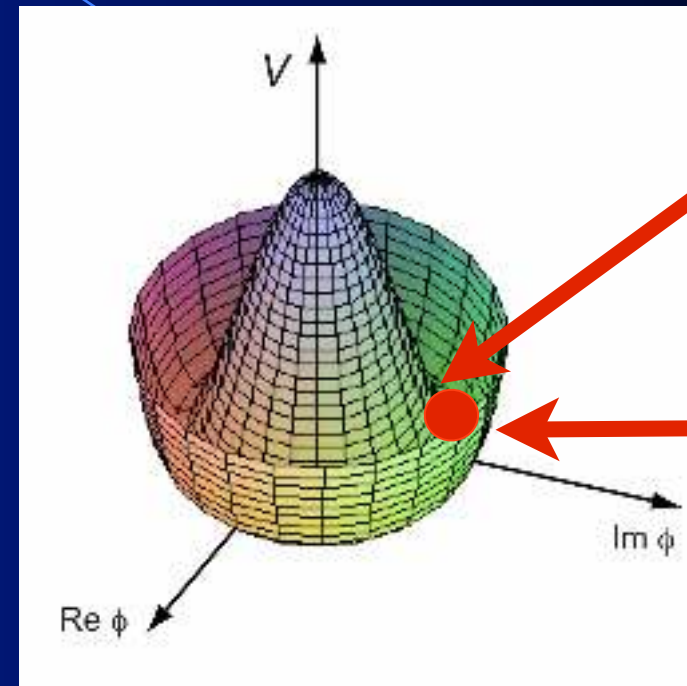


Поле Браута-Энглера-Хиггса

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

среднее значение поля

Потенциал



Основное состояние

Спонтанное нарушение симметрии

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

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

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

$$m_\gamma = 0$$

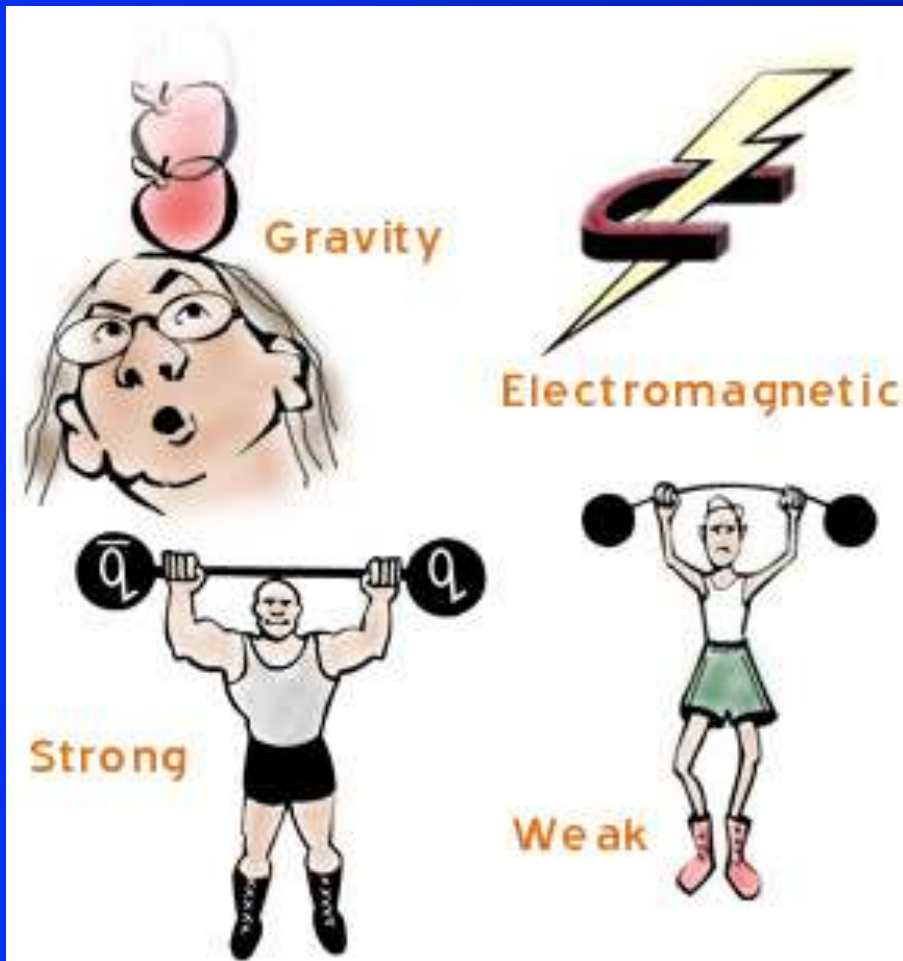
$$m_{gluon} = 0$$

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

Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе

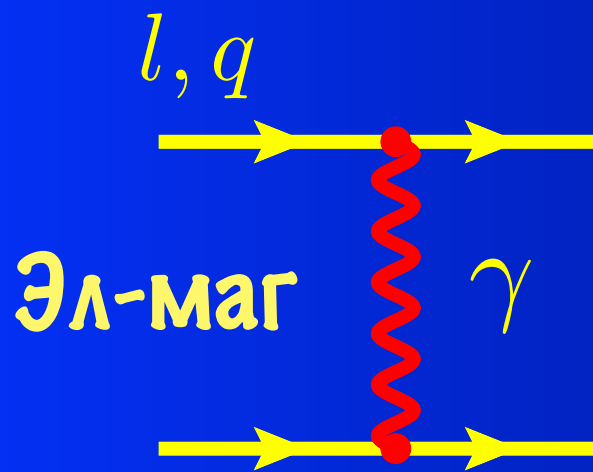


Пятая сила - обмен хиггсовским бозоном

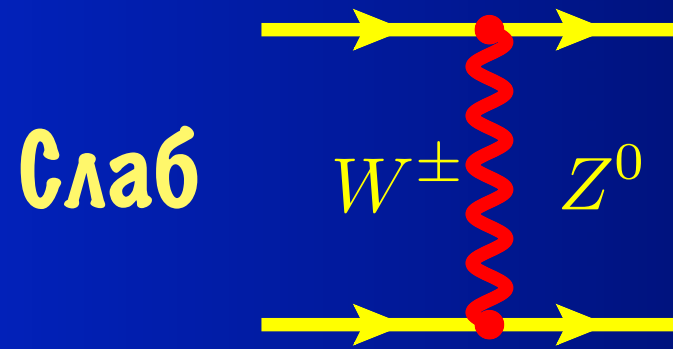


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

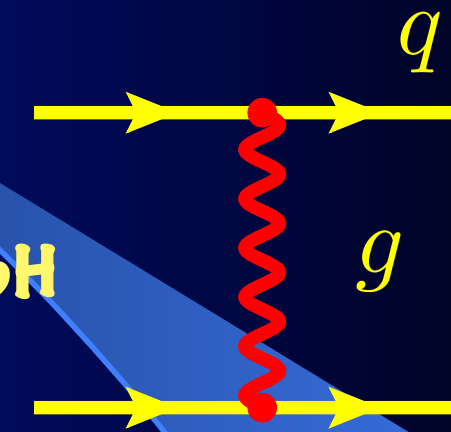
Пять фундаментальных сил Природы



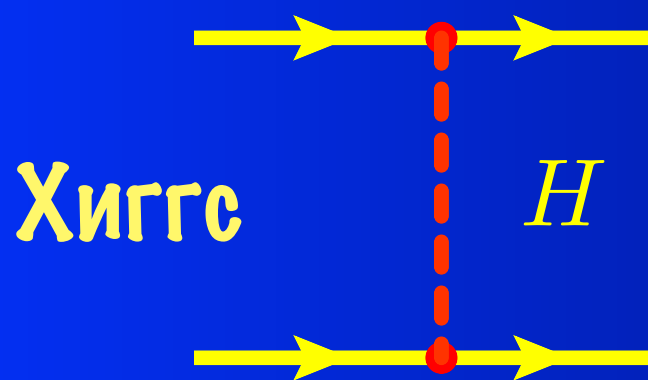
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



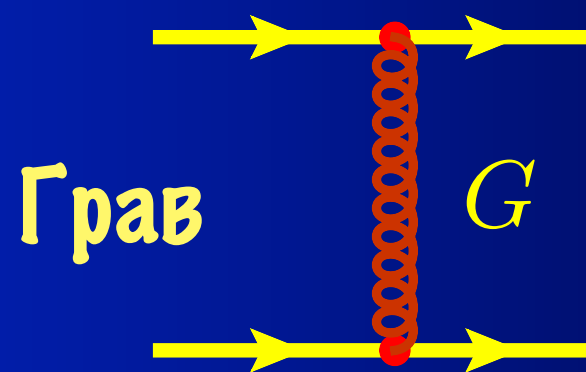
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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

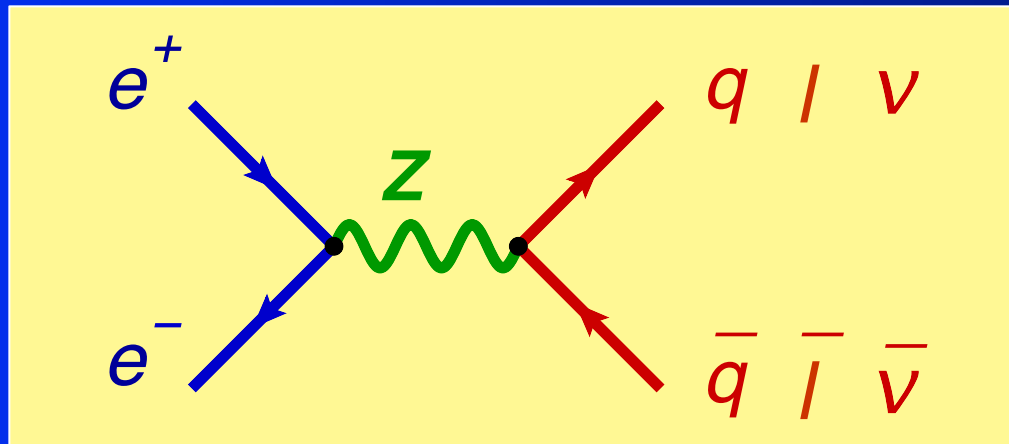


$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

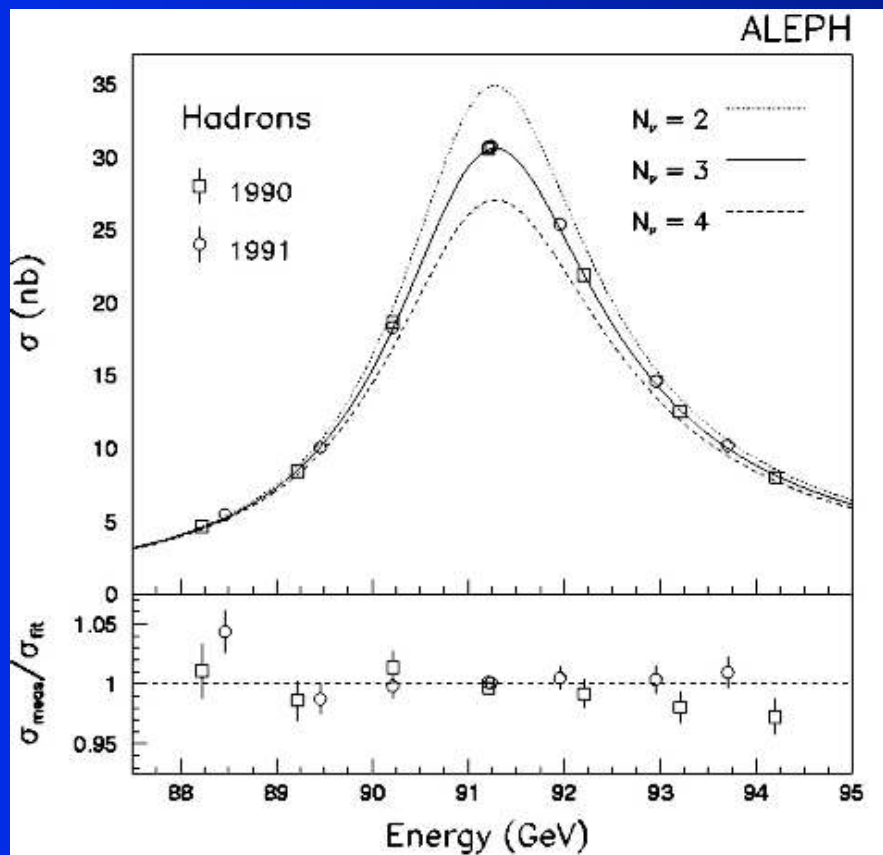
Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

Число поколений в СМ (ускорительные данные)



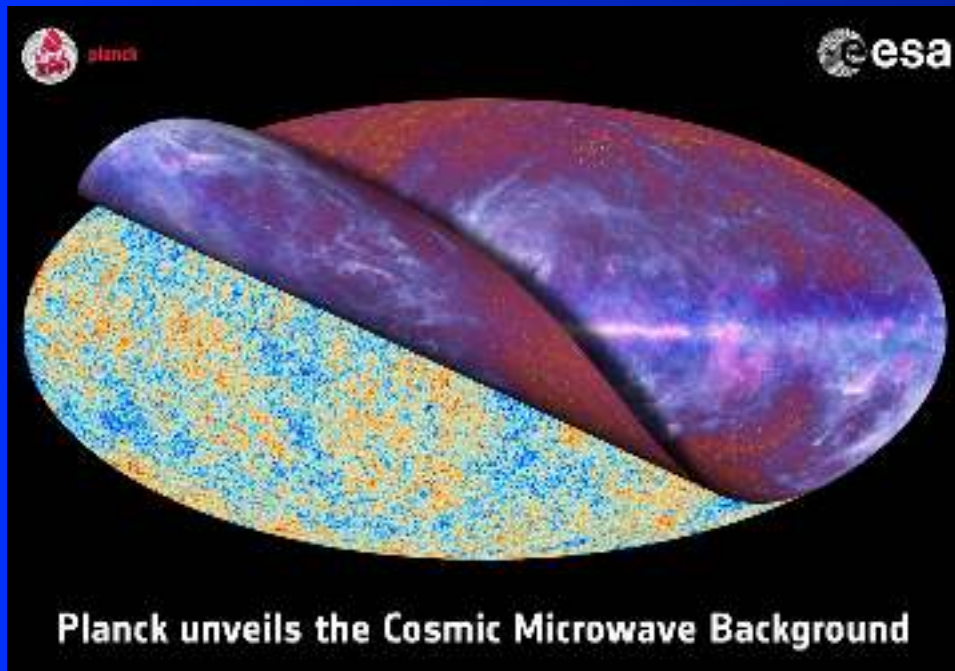
Форма Z-линии полученная на ускорителе LEP зависит от числа поколений и позволяет определить число (лёгких) нейтрино или число поколений в Стандартной Модели



$$N_g = 2.982 \pm 0.013$$

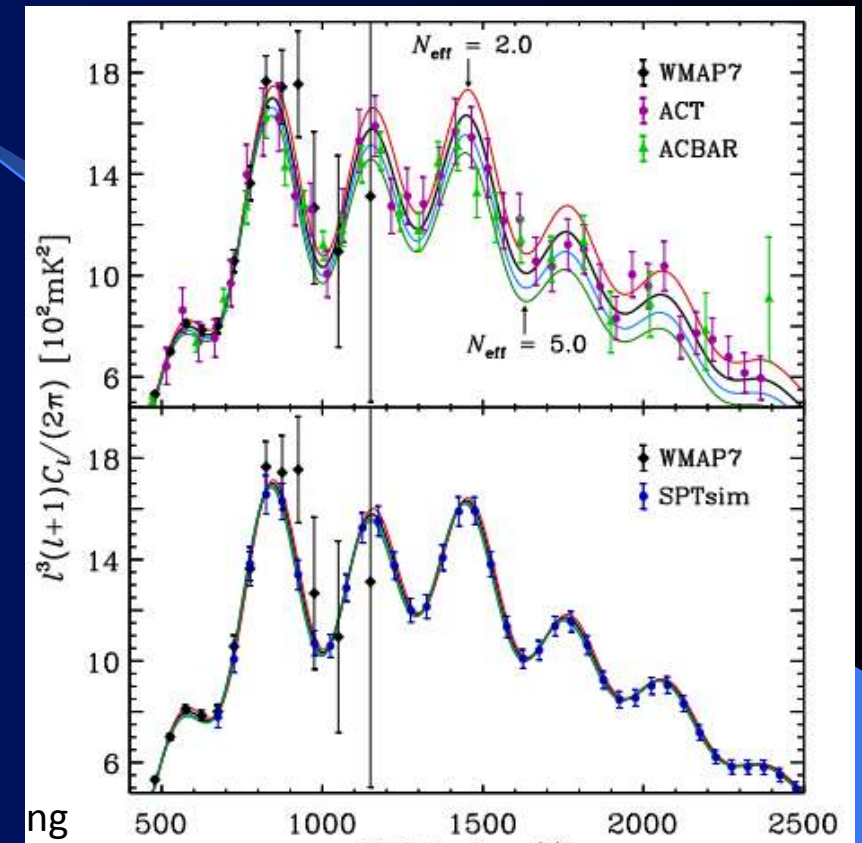
Форма Z-линии

Число поколений в СМ

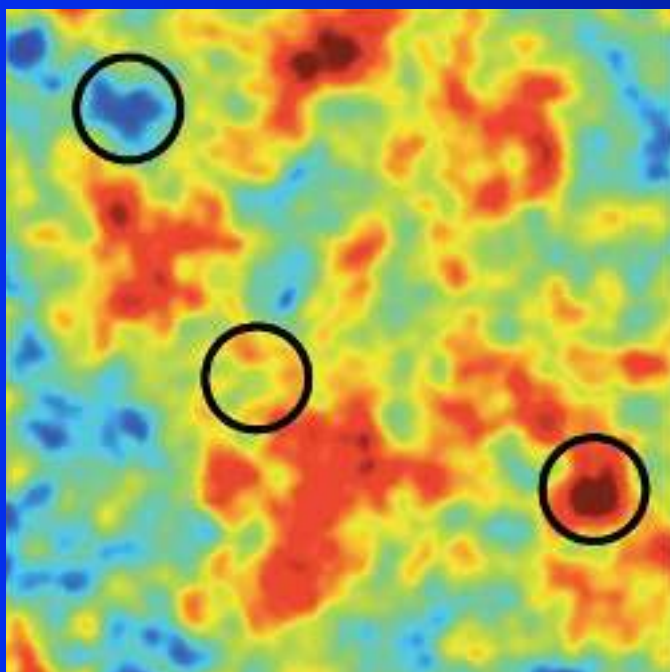


Температурные
флуктуации
микроволнового
фона
реликтового
излучения

Число
сортов
активных
нейтрино



Разложение по гармоникам



CMB + HST

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

CMB + SNLS

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

CMB + Union2

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

CMB + BAO

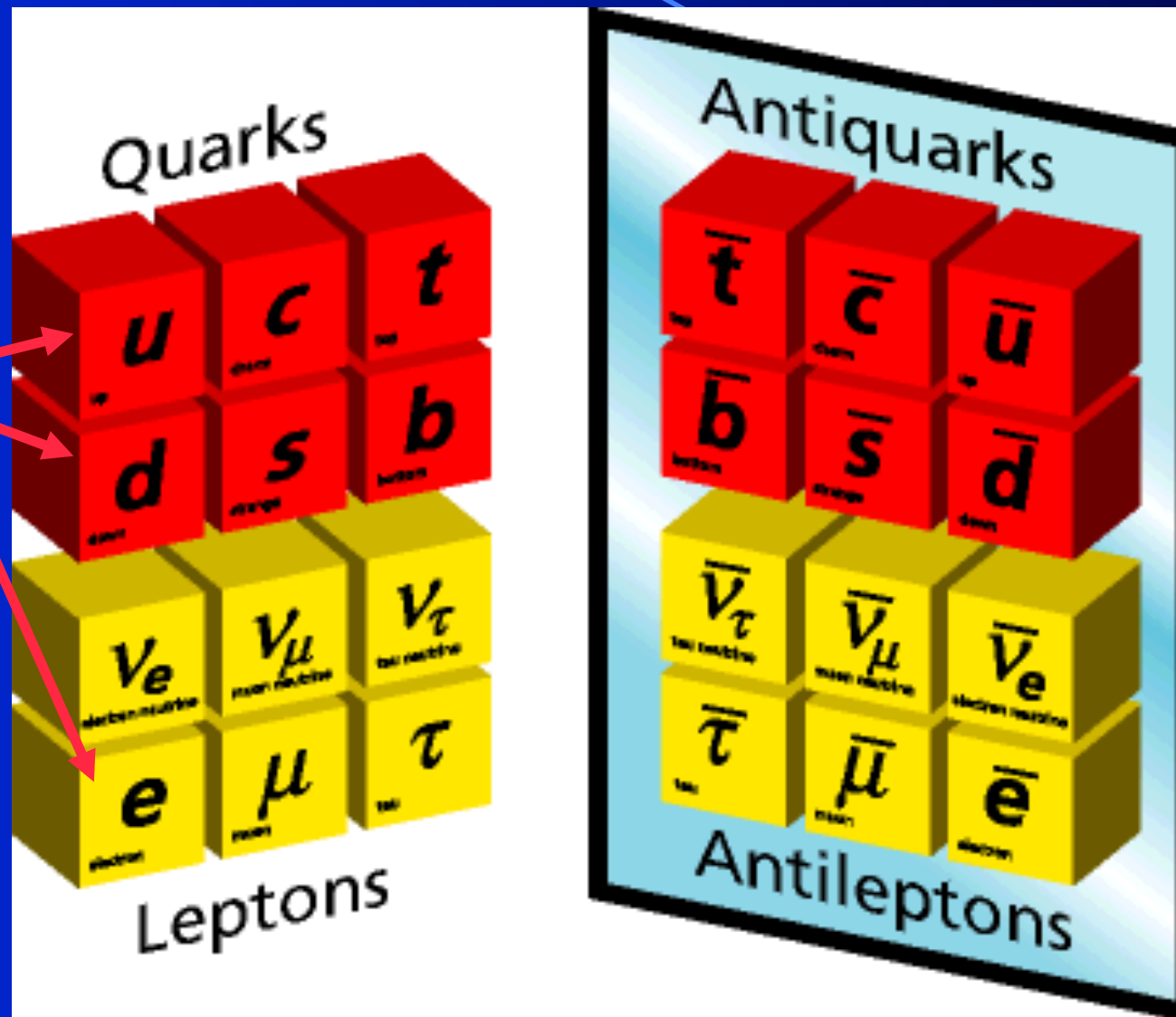
$$N_{eff}^v = 3.30^{+0.54}_{-0.51}$$

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
нарушение T- инвариантности



2. Нарушение сохранения барионного числа

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

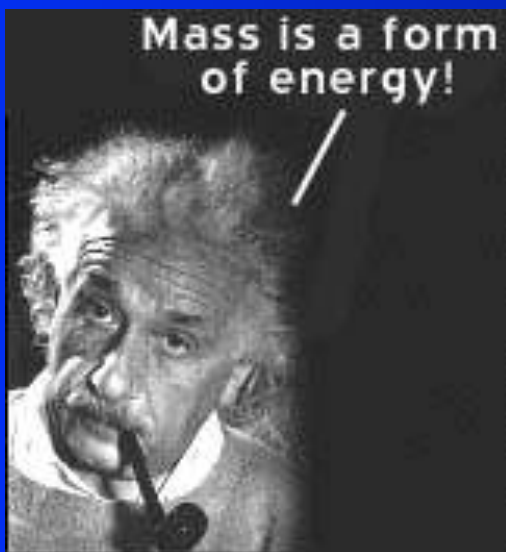
Барионное число B сохраняется в СМ (с экспоненциальной точностью), но нарушается в теориях Великого объединения

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



СРТ - точная
симметрия
Природы

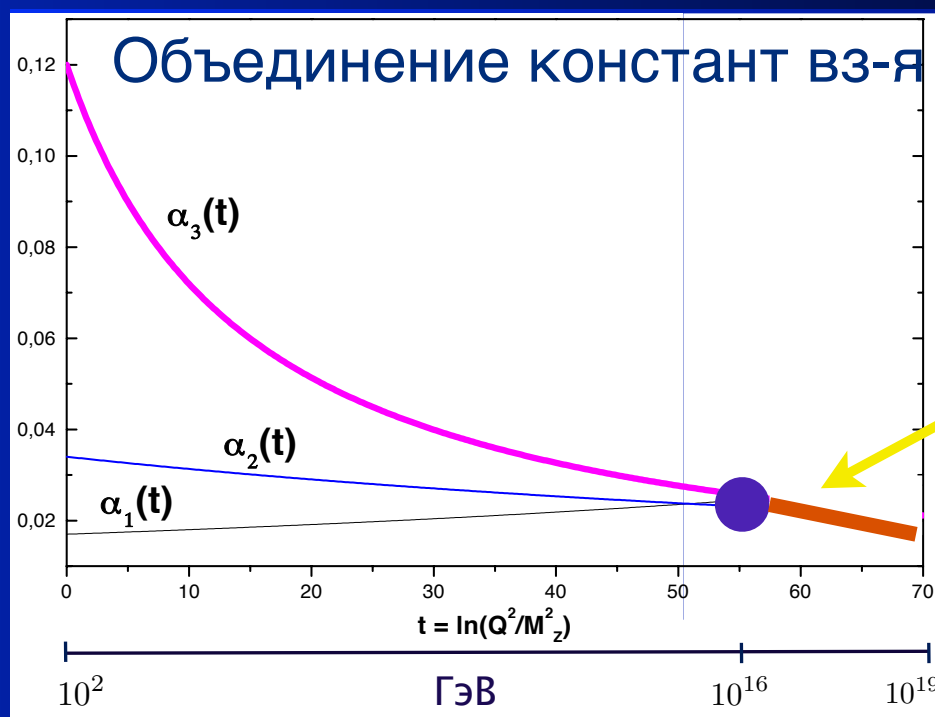
Теории Великого объединения



- 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.



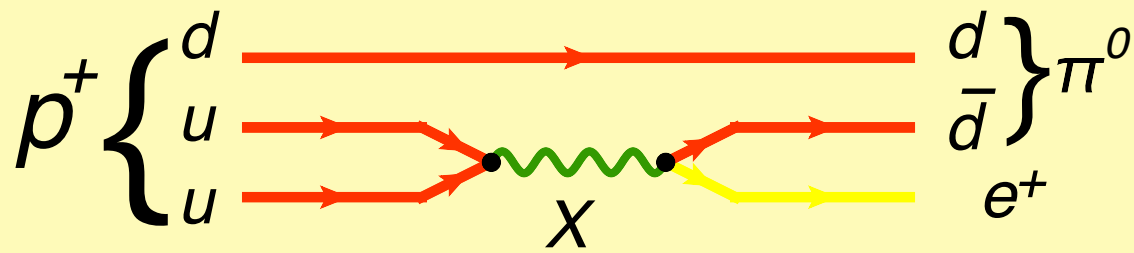
«объединение»
констант вз-я -
есть следствие их
общего
происхождения

Нестабильность протона

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

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

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



Камиока (Япония)



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

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

матрица смешивания

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

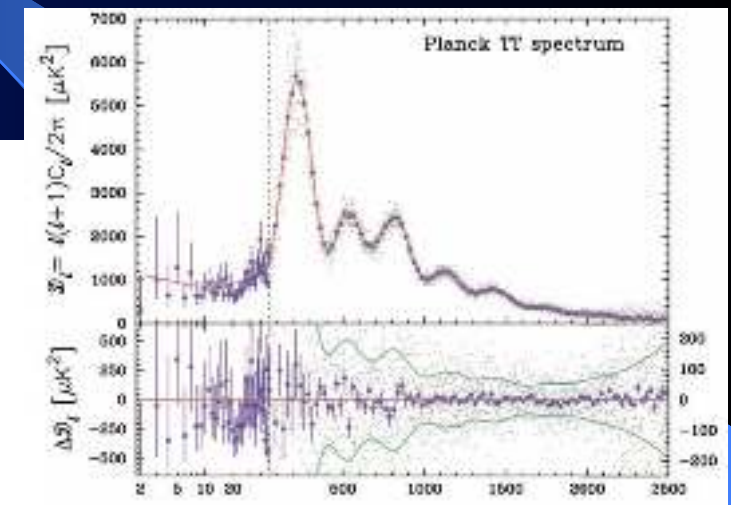
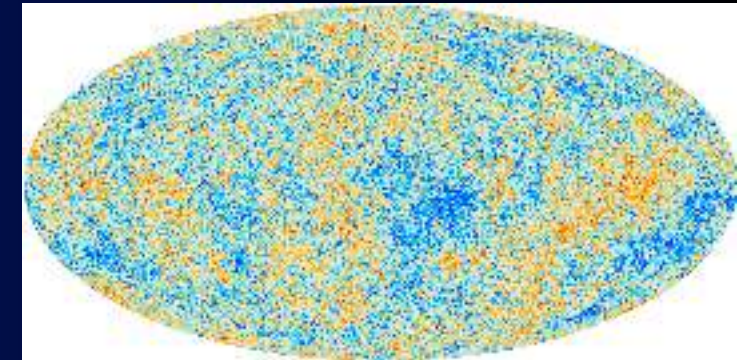
Возможно источником является CP-нарушение в нейтринном секторе

Загадка № 3:

Что такое тёмная
материя и из чего она
состоит?

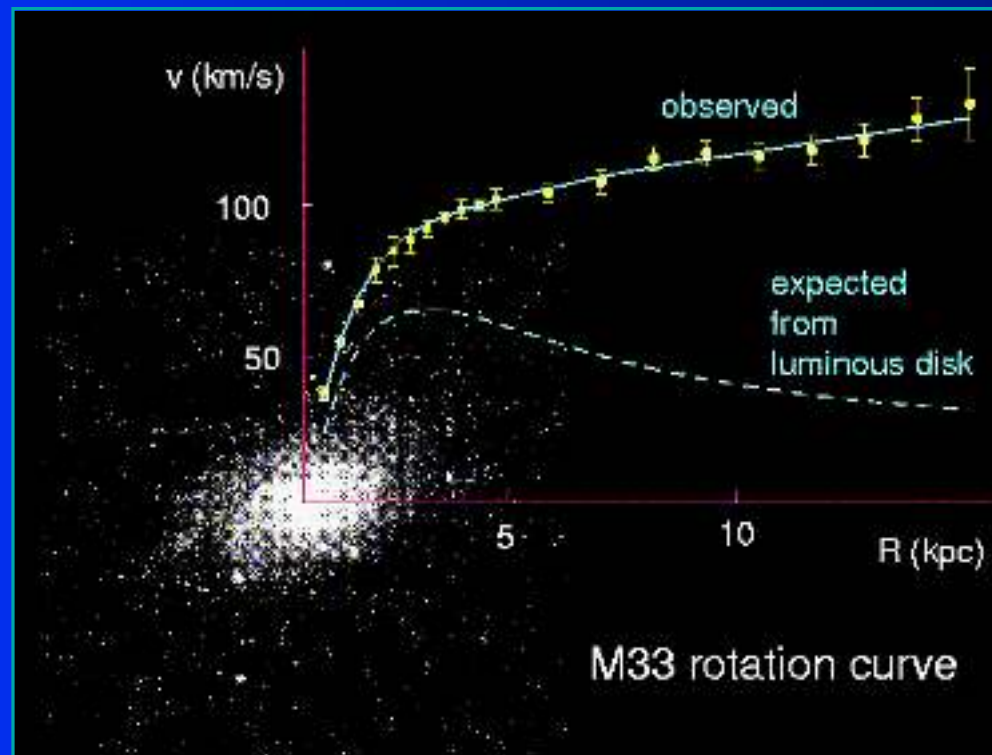
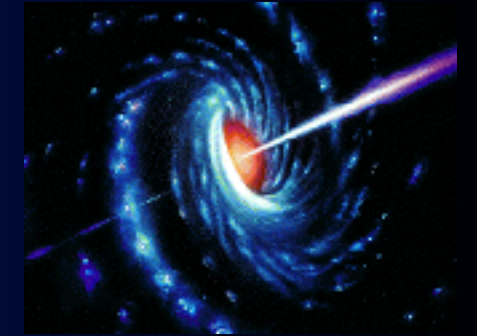
Энергетический баланс Вселенной

- 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

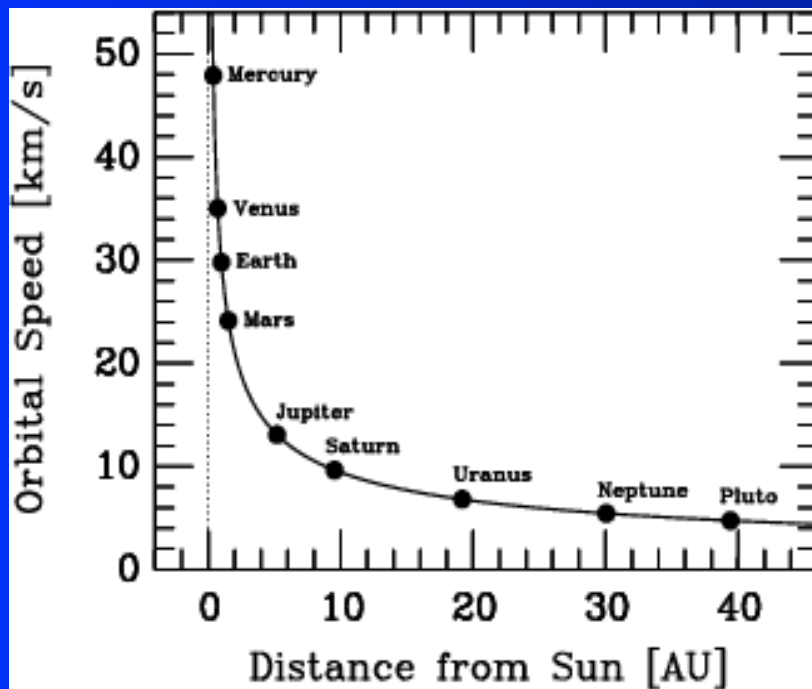


Ротационные кривые звёзд

центробежная сила

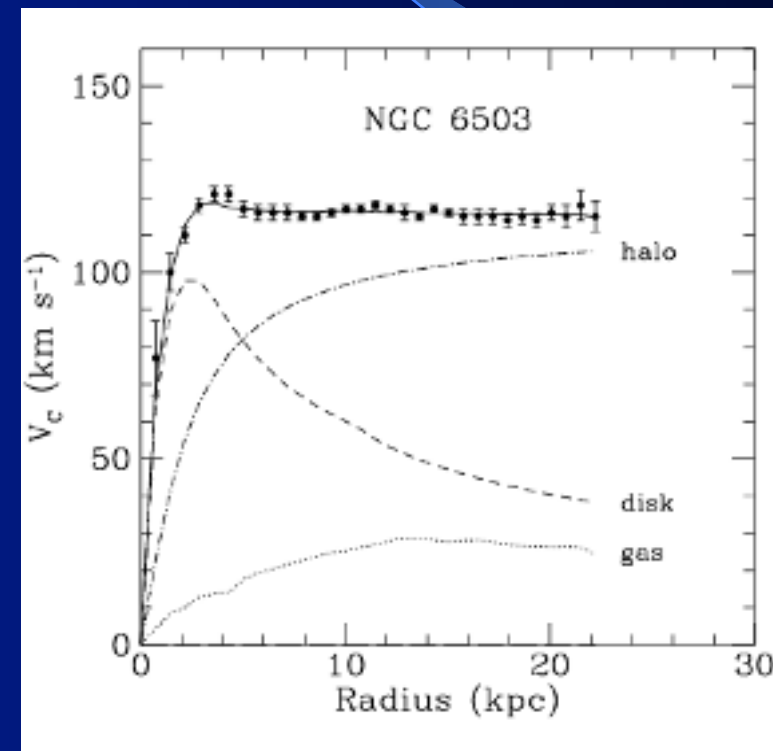
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

гравитация



Солнечная система

Плотность тёмной материи в солнечной системе пренебрежимо мала

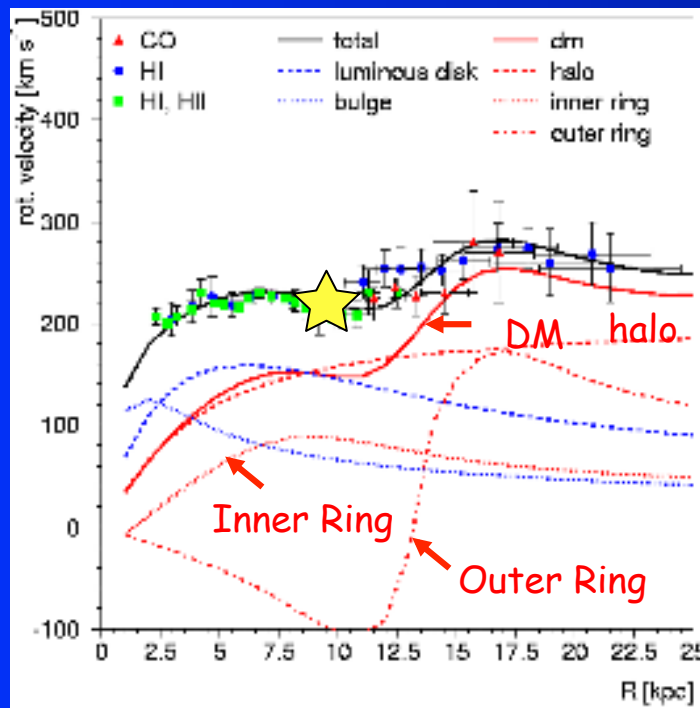


Галактика

Тёмная материя сосредоточена на галактических масштабах

- 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



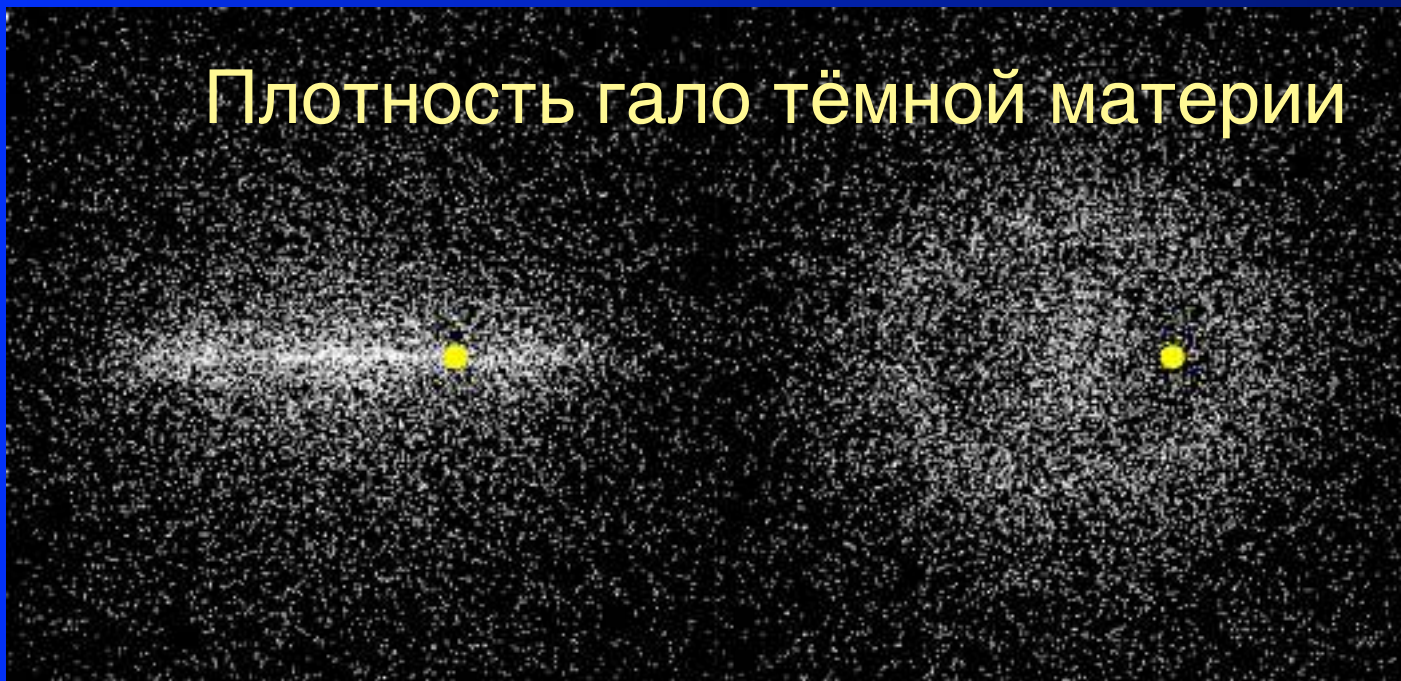
- Скорость вращения Земли вокруг Солнца - 30 км/сек
- Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики - 220 км/сек
- Скорость за счёт притяжения видимой материи - 175 км/сек
- Плотность ТМ в районе Солнца - 0.3 Гэв/см³



Кривая вращения звёзд

Сталкивающиеся спиральные галактики Арп 271

Плотность гало тёмной материи

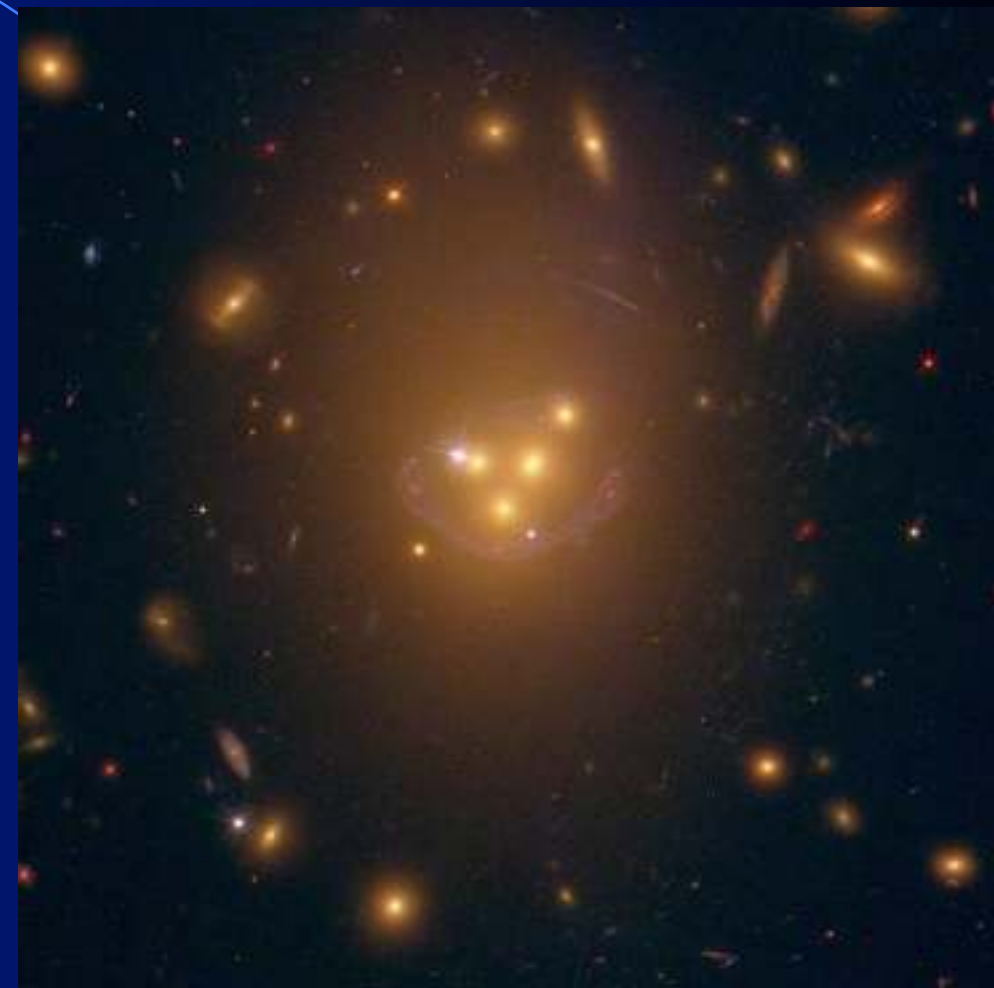
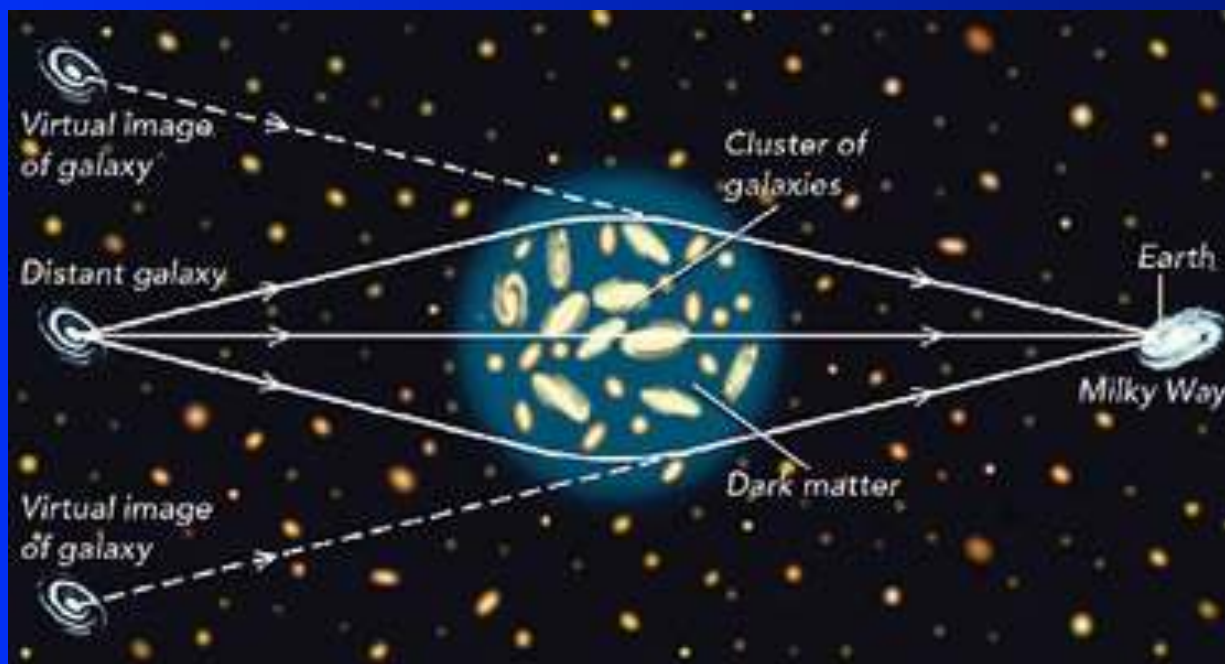


Вид сбоку

Вид сверху



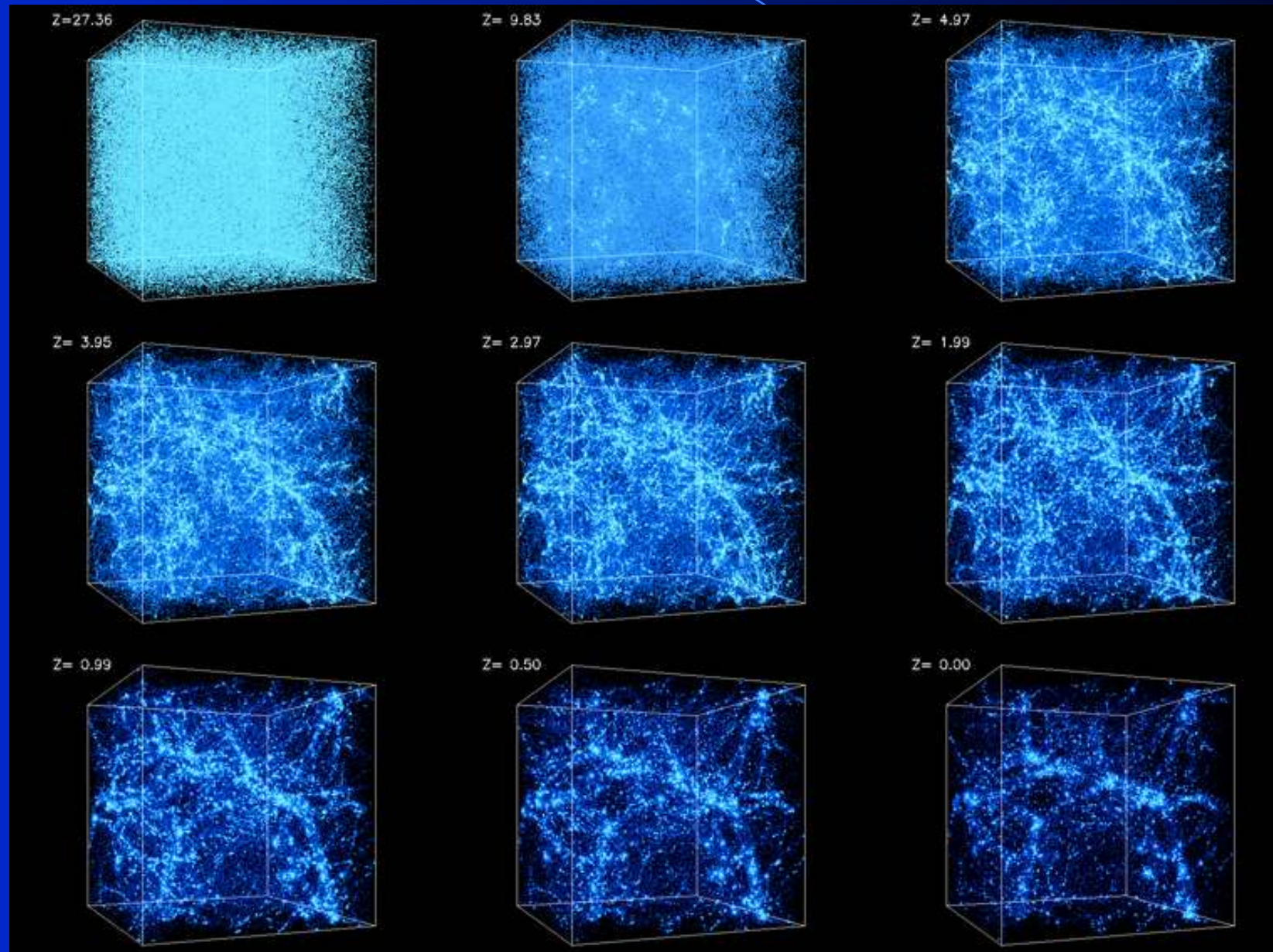
Гравитационные линзы



Следствие ОТО: отклонение света в гравитационном поле

Образования виртуального изображения удалённой галактики за счёт отклонения световых лучей тёмной материей находящейся между галактикой и наблюдателем

Образование крупномасштабных структур во Вселенной



Сначала происходит образование структур из тёмной материи, а потом в гравитационном потенциале образованным тёмной материей происходит концентрация обычной материи

Что есть тёмная материя?



Тёмная материя сделана из:

- Макро объектов - не наблюдаются
- Новых нейтральных частиц

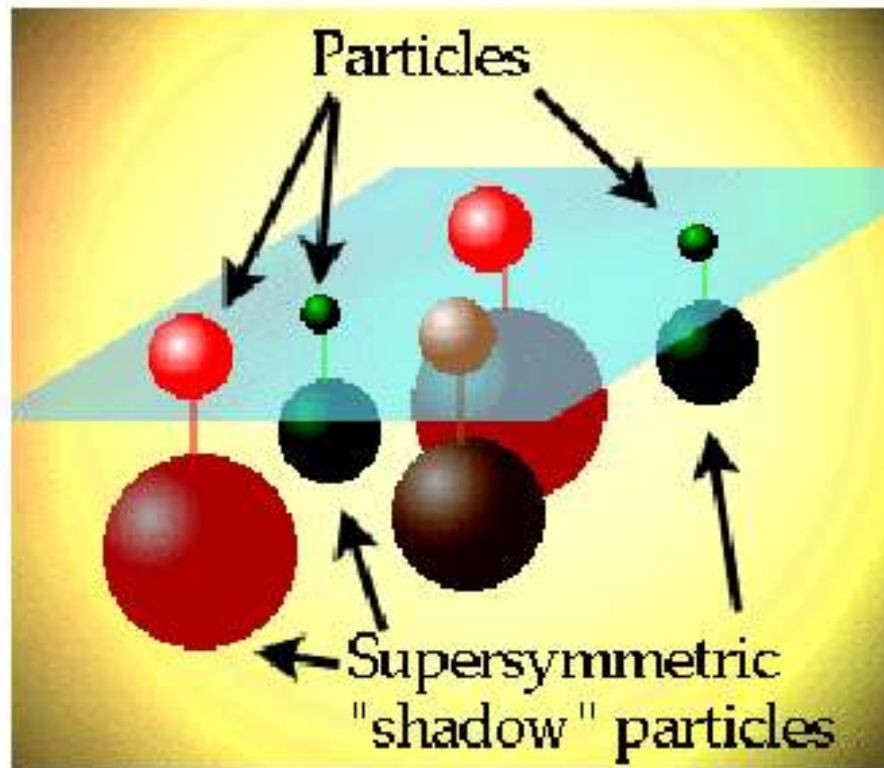
- правые нейтрино
- нейтралино
- снейтрино
- аксион (аксино)
- гравитино
- тяжёлый фотон
- лёгкий стерильный хиггс



- 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

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

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

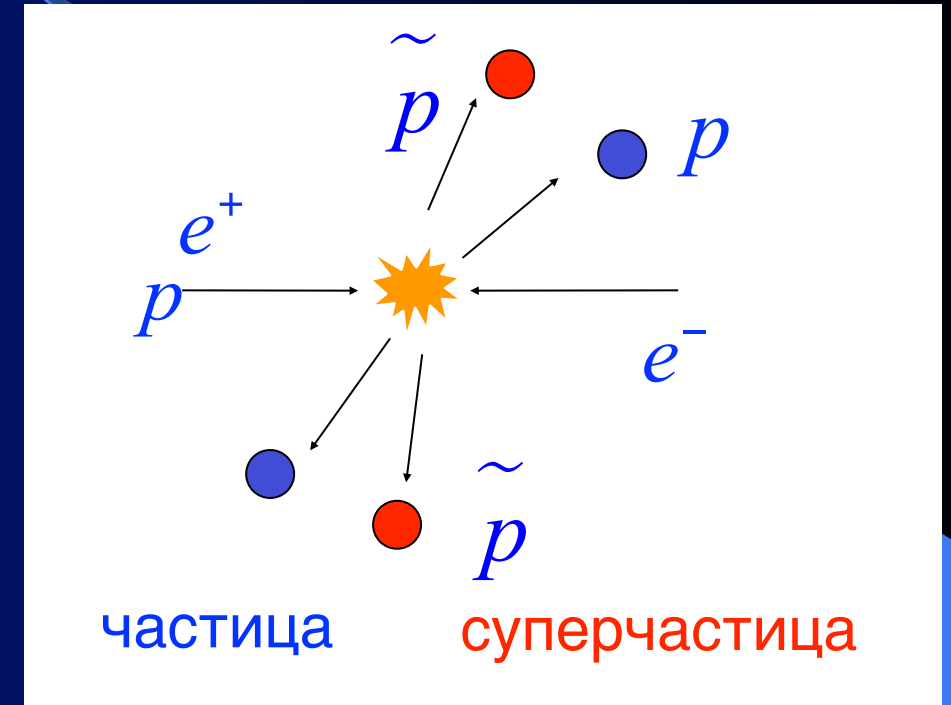
гравитино

Суперсимметричная тёмная материя

- Суперчастицы рождаются парами
- Легчайшая суперчастица - стабильна

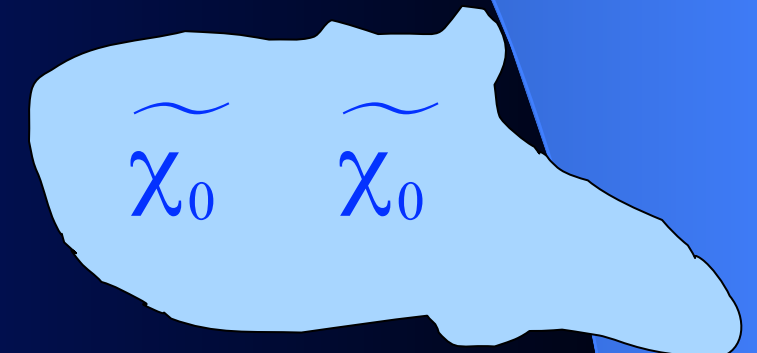


- Легчайшая суперчастица должна быть нейтральна - наилучший кандидат есть нейтралино (фотино или хиггсино)
- Она могла бы выжить со времени Большого взрыва и образовать Тёмную материю во Вселенной



$$\tilde{\chi}_0 = N_{11}\tilde{\gamma} + N_{12}\tilde{Z} + N_{13}\tilde{H}_1^0 + N_{14}\tilde{H}_2^0$$

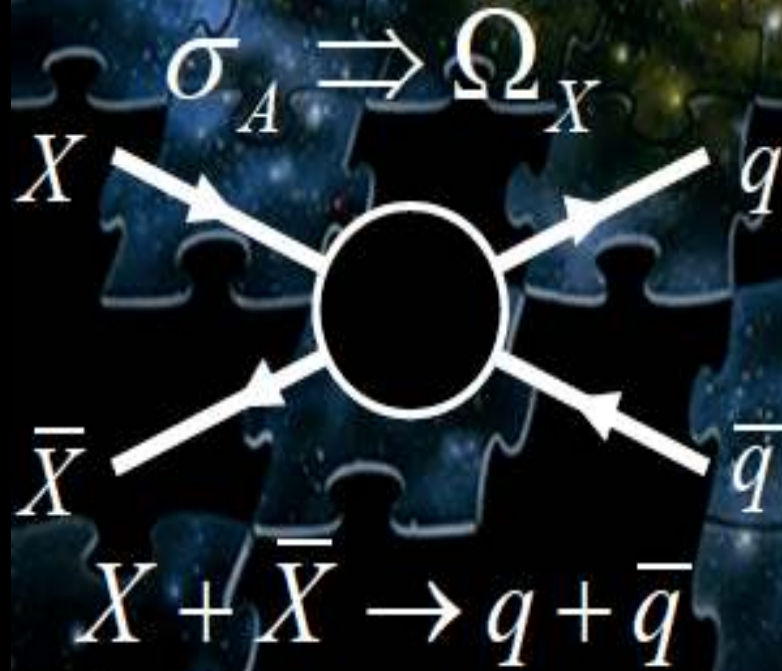
↑ фотино
 ↑ зино
 ↑ хиггсино
 ↑ хиггсино



нейтралино - тяжёлая (~ 100 масс протона), нейтральная, стабильная слабо взаимодействующая частица

Поиск частиц тёмной материи

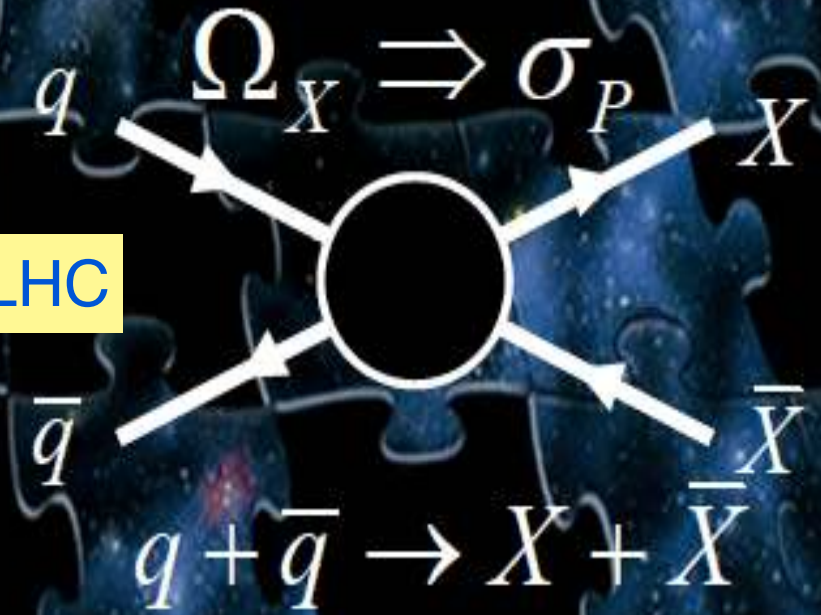
Аннигиляция -> новая компонента в космических лучах



Прямое взаимодействие с веществом



Рождение на LHC



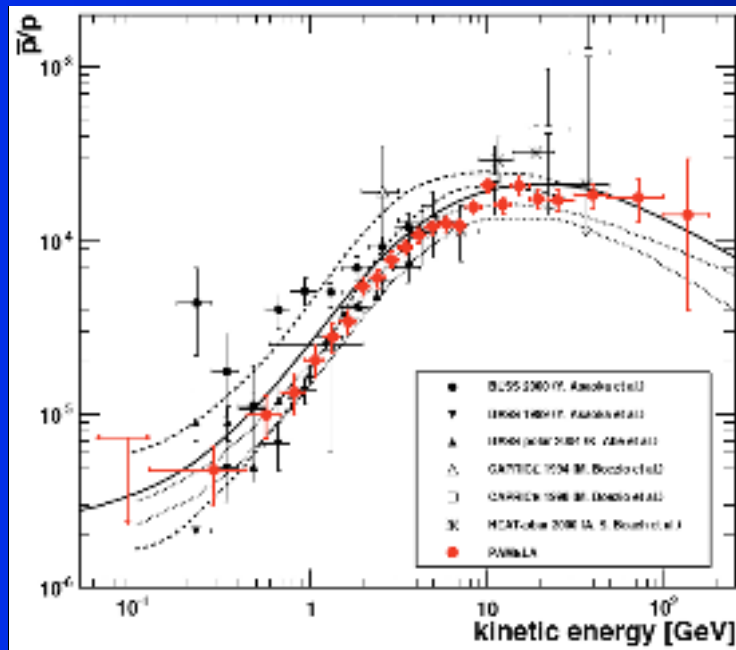
R. Kolb

Сигнал пока отсутствует

Поиск WIMP`ов

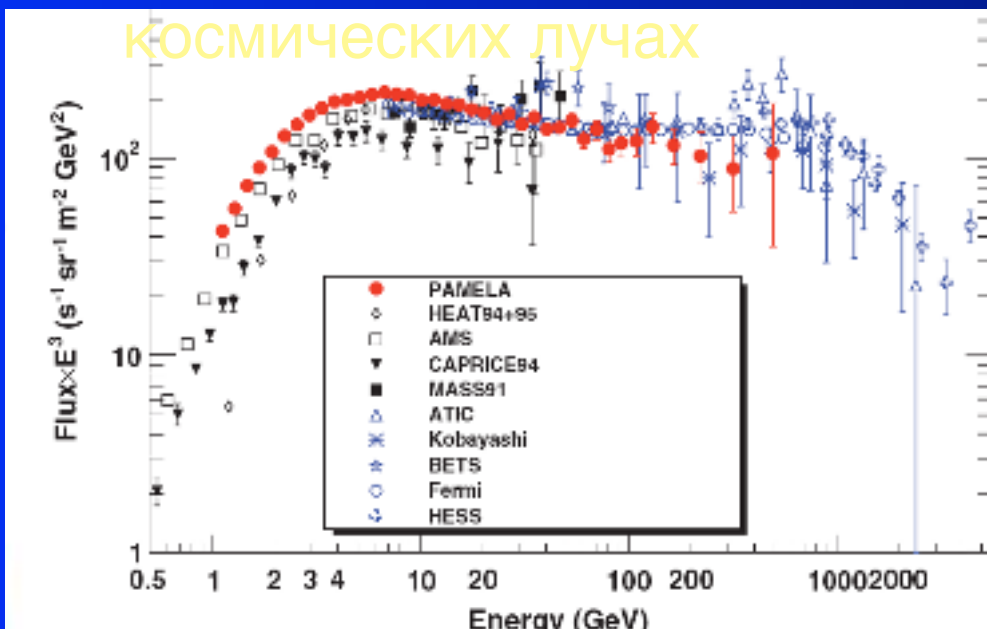
WIMP - Weakly Interactive Massive Particle

Аннигиляция ТМ в гало галактики

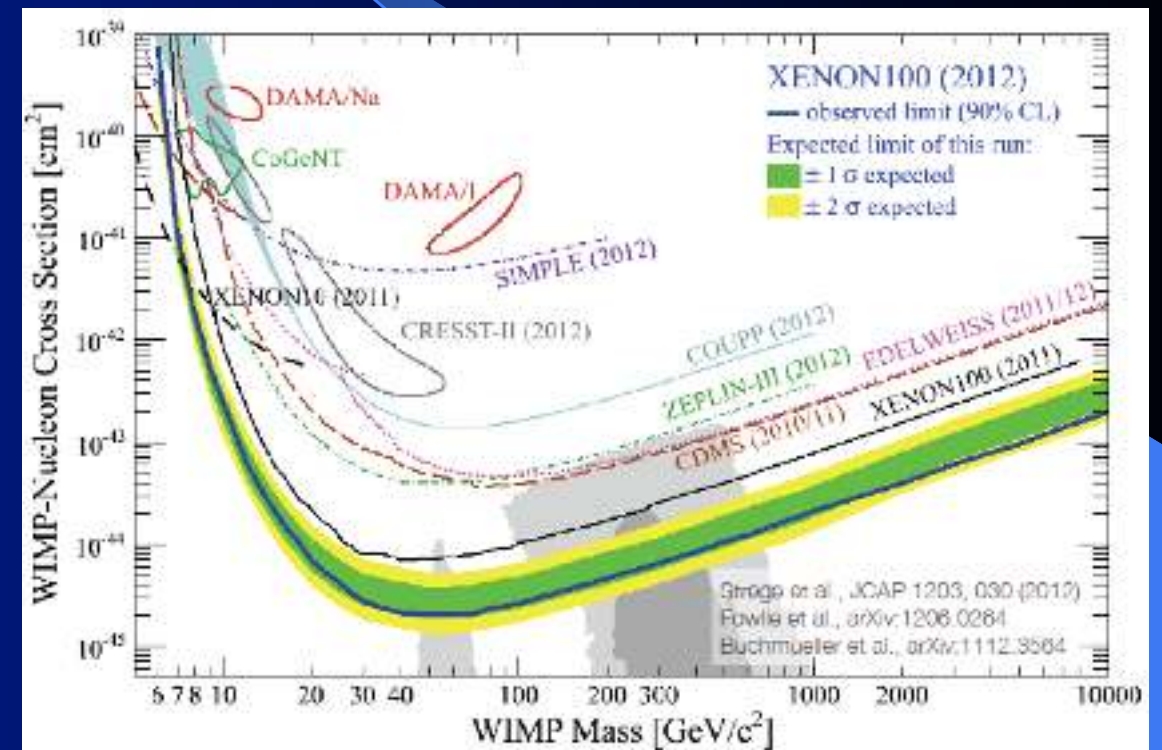


Антипротоны и
позитроны в

космических лучах




Взаимодействие ТМ с веществом



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

Каков же итог?

- Тёмная материя - загадка, которую предстоит разрешить
- Это может быть всего лишь одна частица, а может быть новый скрытый сектор Вселенной
- Если нам повезёт и это WIMP, то ответ может быть найден очень скоро
- Загадка тёмной энергии концептуально гораздо сложнее
- Решение этих проблем лежит на стыке физики элементарных частиц, астрофизики и космологии



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

СТ