

ФИЗИКА

Элементарных частиц

Часть III

Дмитрий Казаков

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

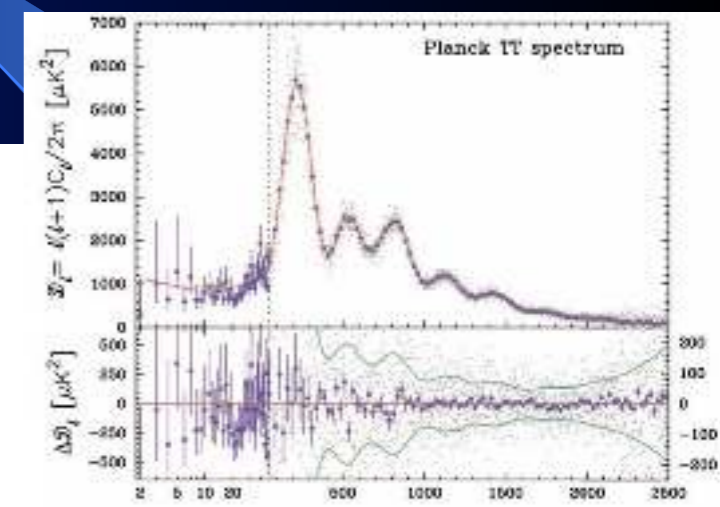
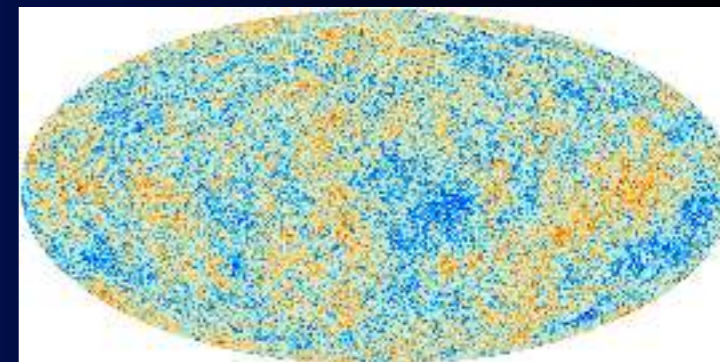
Электромагнитные

Сильные

Слабые

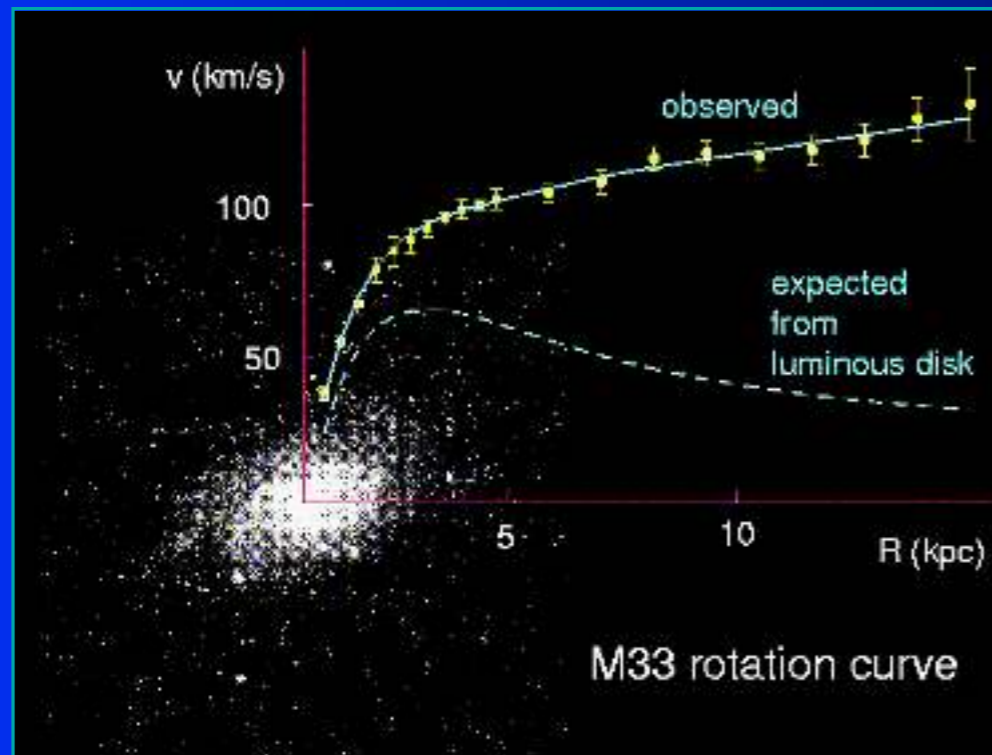
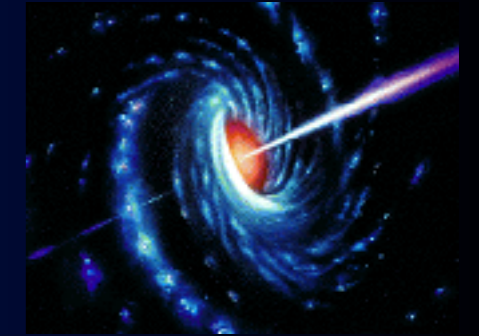
Энергетический баланс Вселенной

- 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

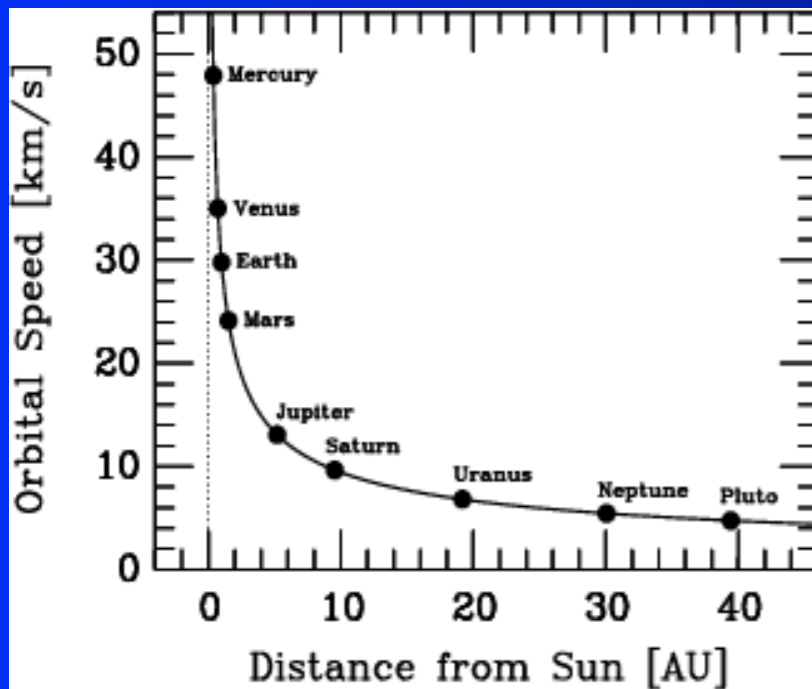


Ротационные кривые звёзд

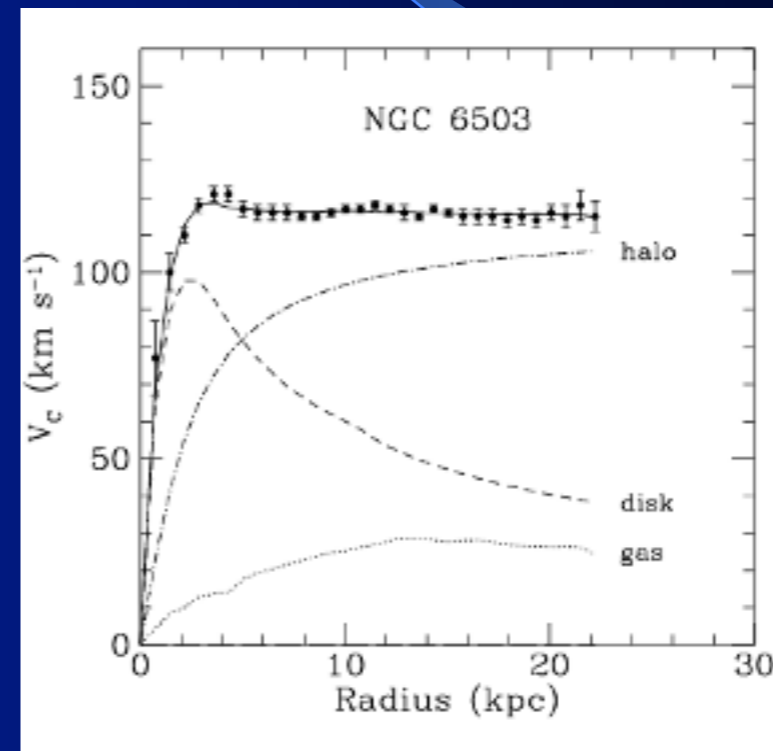
центробежная сила

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

гравитация



Плотность тёмной материи в солнечной системе пренебрежимо мала



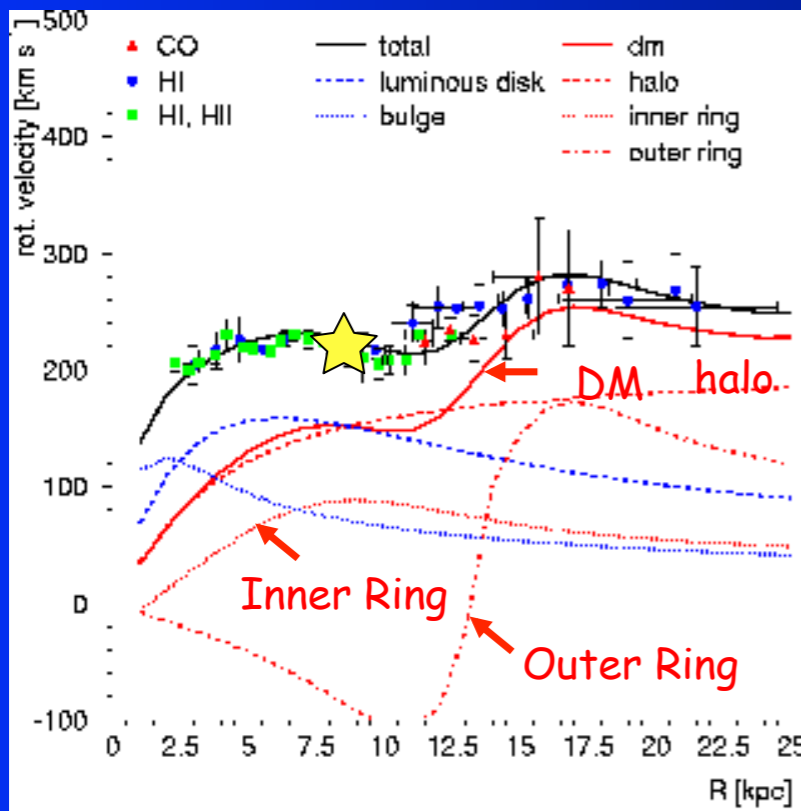
Тёмная материя сосредоточена на галактических масштабах

Солнечная система

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

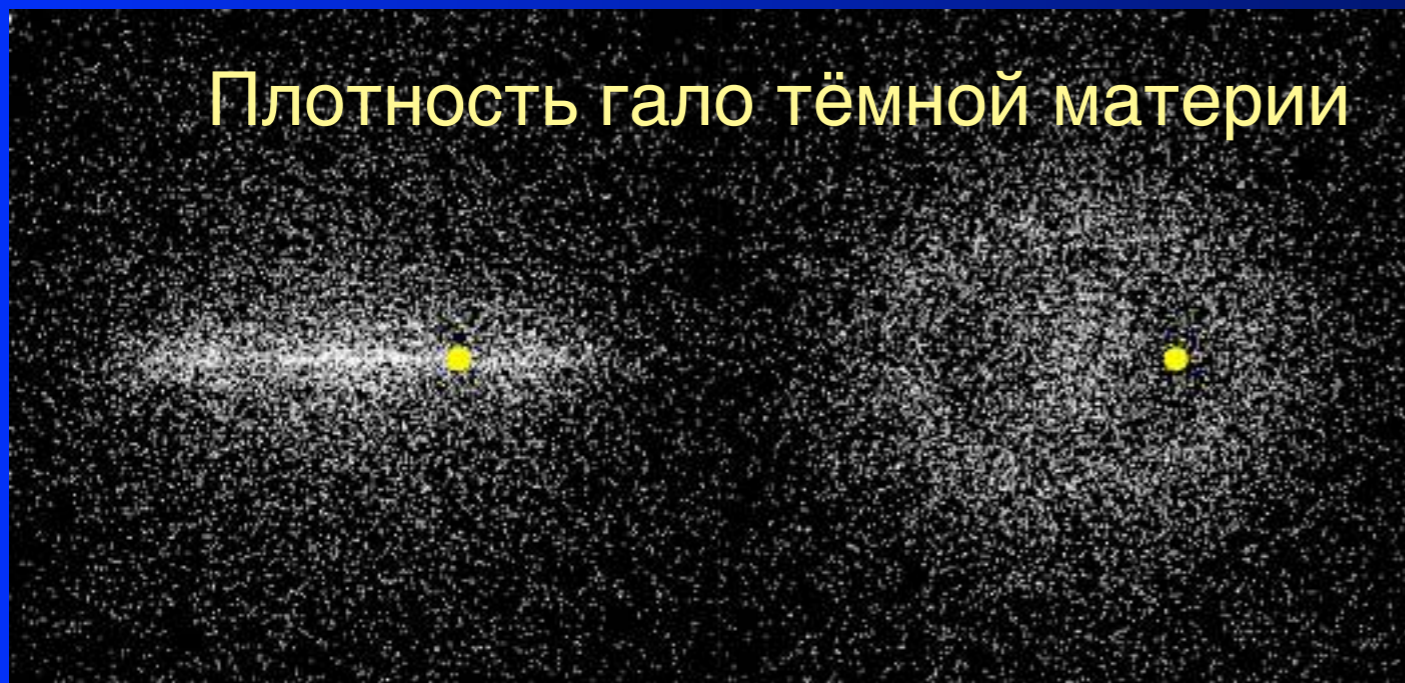
Млечный путь



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/см³

Сталкивающиеся спиральные галактики Арп 271



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

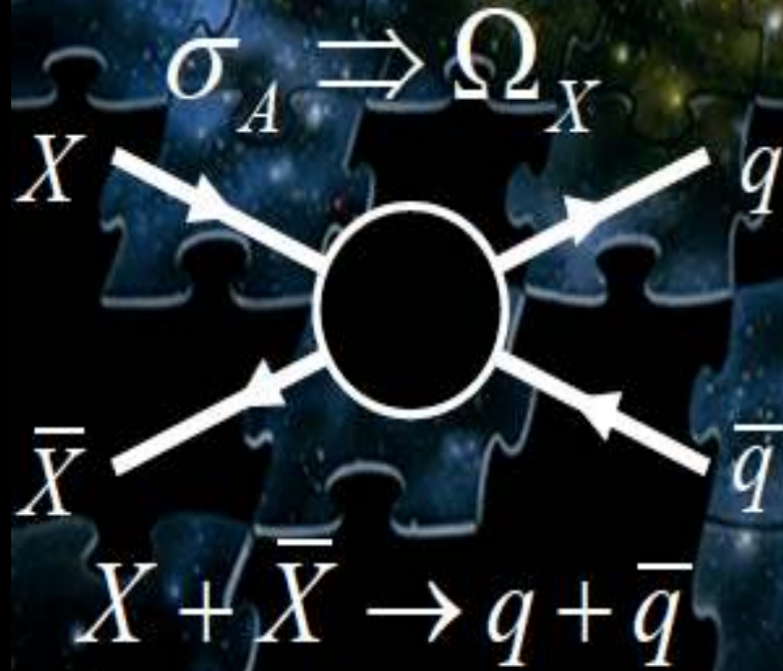


- Частица тёмной материи должна быть нейтральной, стабильной, слабо и/или гравитационно взаимодействующей
- В Стандартной модели нет такой частицы (за исключением возможно тяжёлого правого нейтрино)

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

Поиск частиц тёмной материи

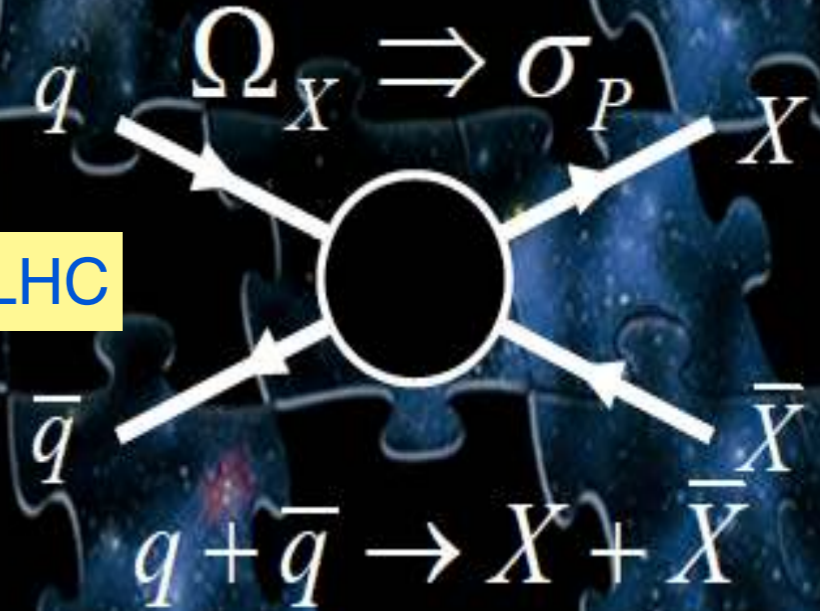
Аннигиляция -> новая компонента в космических лучах



Прямое взаимодействие с веществом



Рождение на LHC



R. Kolb

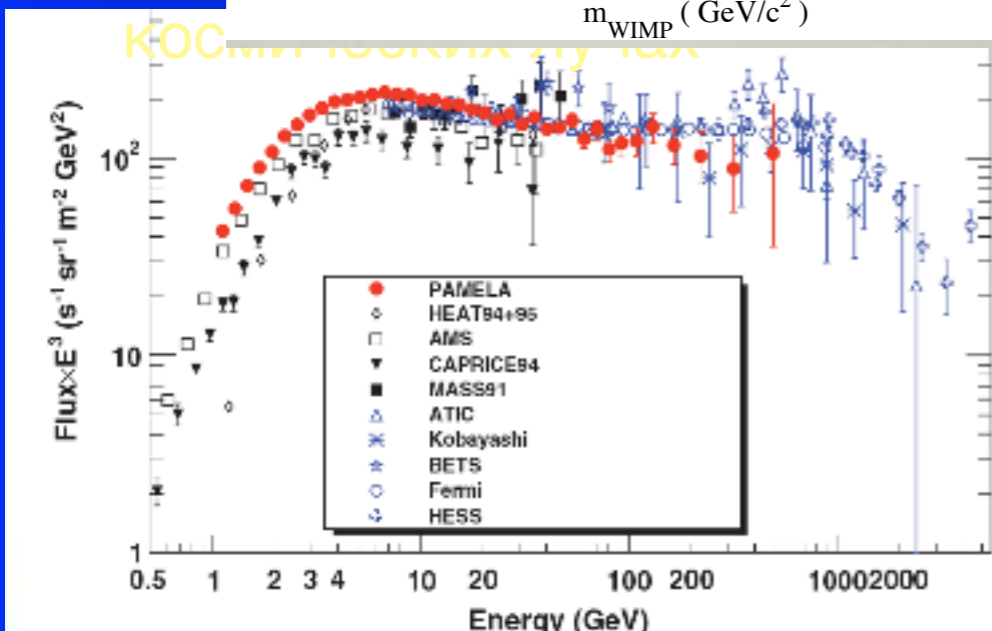
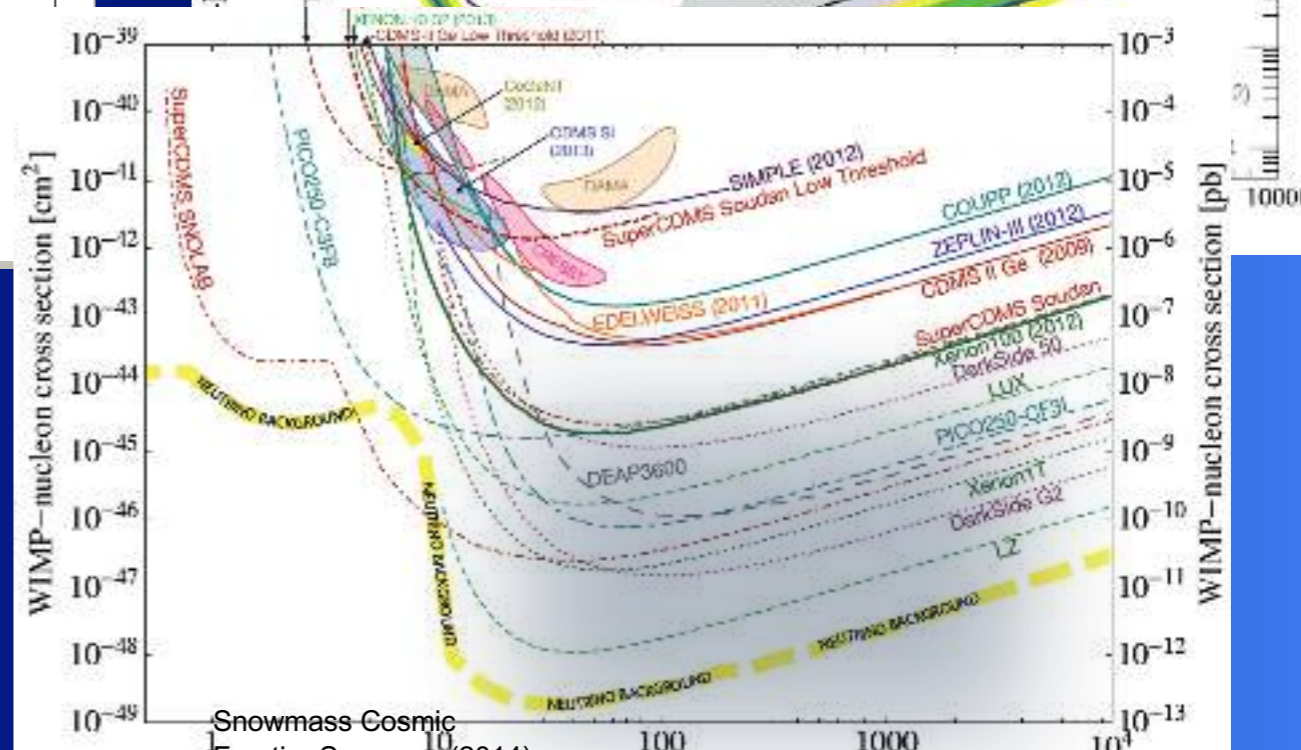
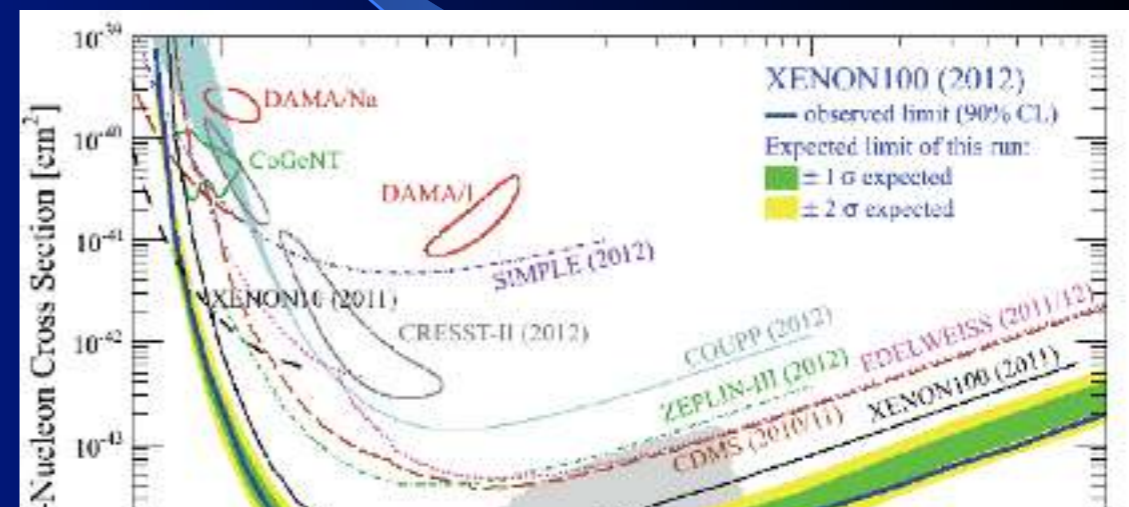
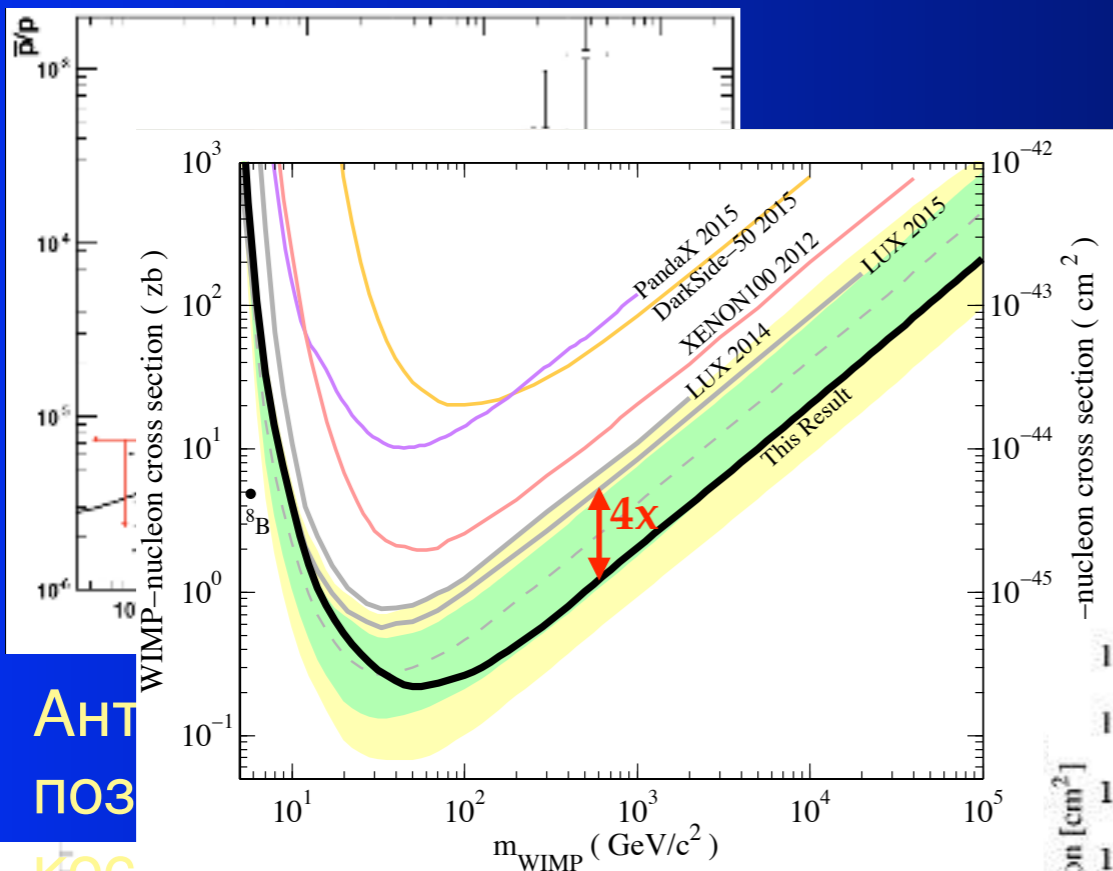
Сигнал пока отсутствует

Поиск WIMP`ов

WIMP - Weakly Interactive Massive Particle

Аннигиляция ТМ в гало галактики

Взаимодействие ТМ с веществом

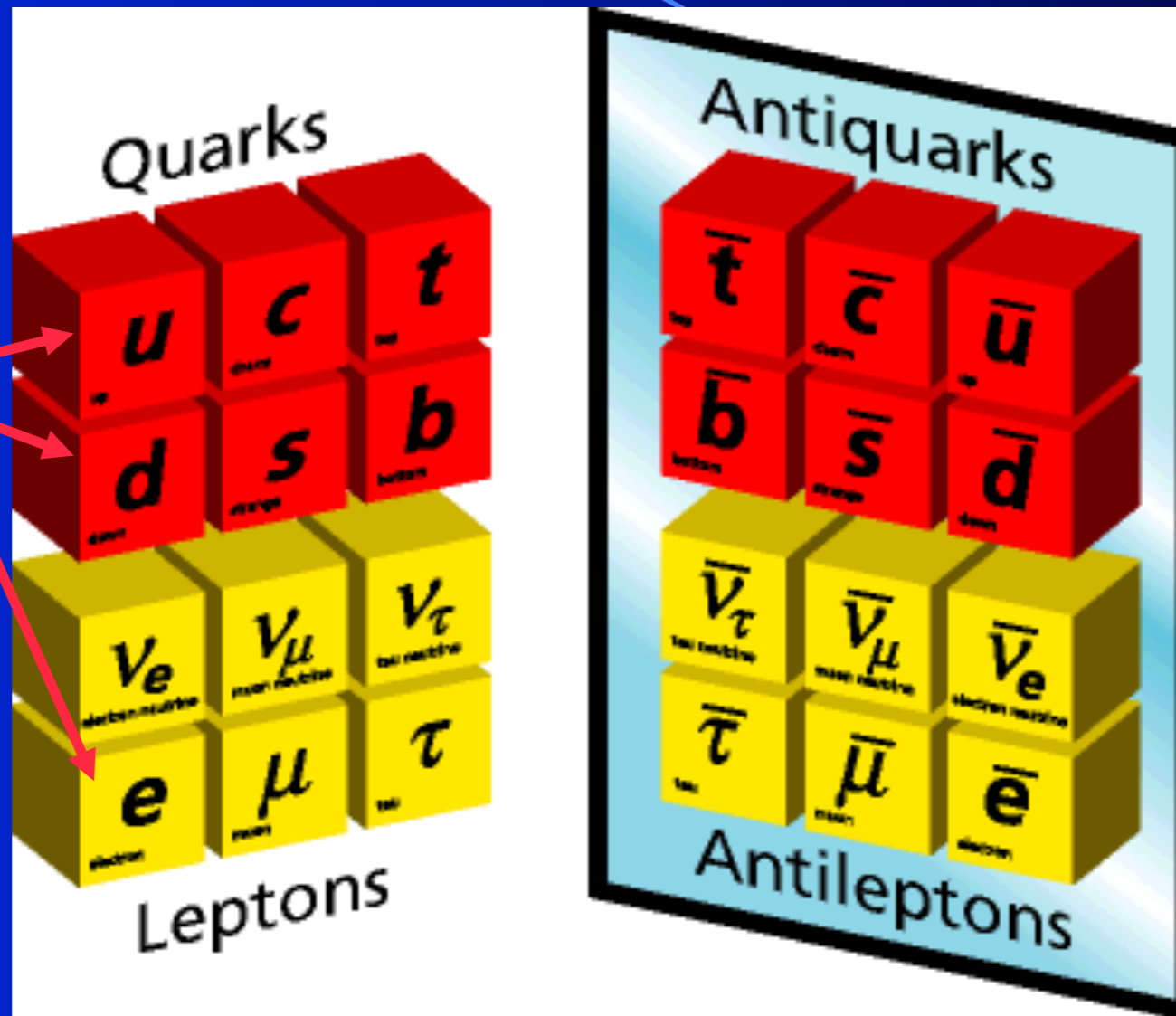


АНТ
ПОЗ

КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

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

- 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

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

среднее число барионов в единице объёма

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

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

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

Реализуется в ТВО, но возможны и другие механизмы в СМ

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

СРТ - точная симметрия Природы

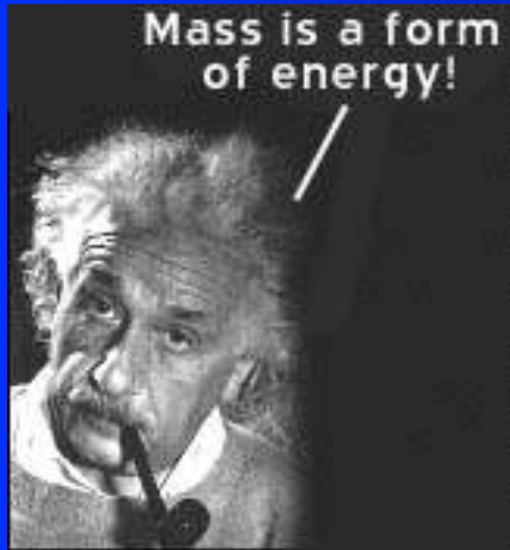
3. Нарушение CP-симметрии (инвариантности по отношению к отражению пространства и замене частицы на античастицу)



Требует как минимум 3 поколения частиц в СМ

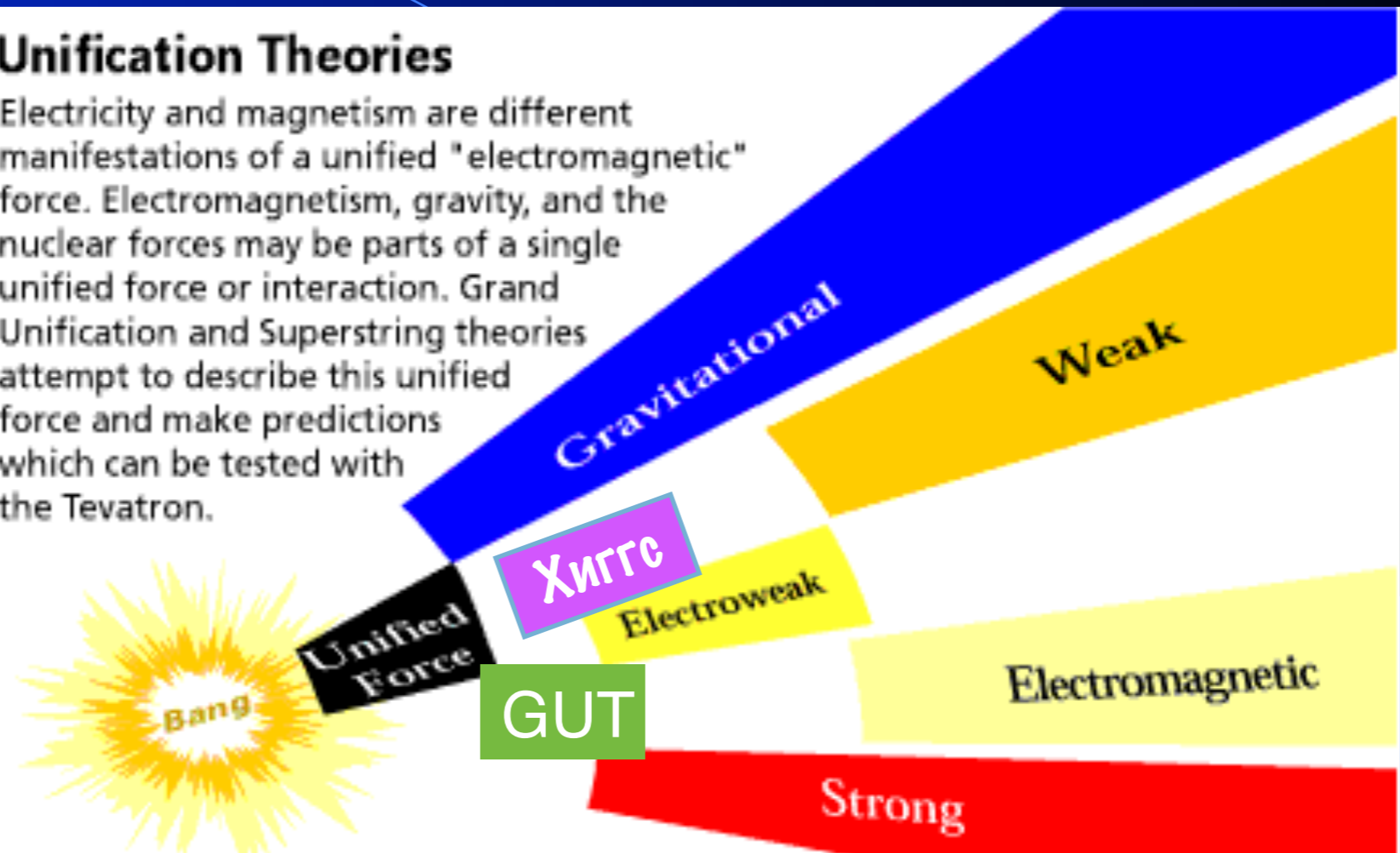
Возможно источником является CP-нарушение в нейтринном секторе

Теория Великого



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.



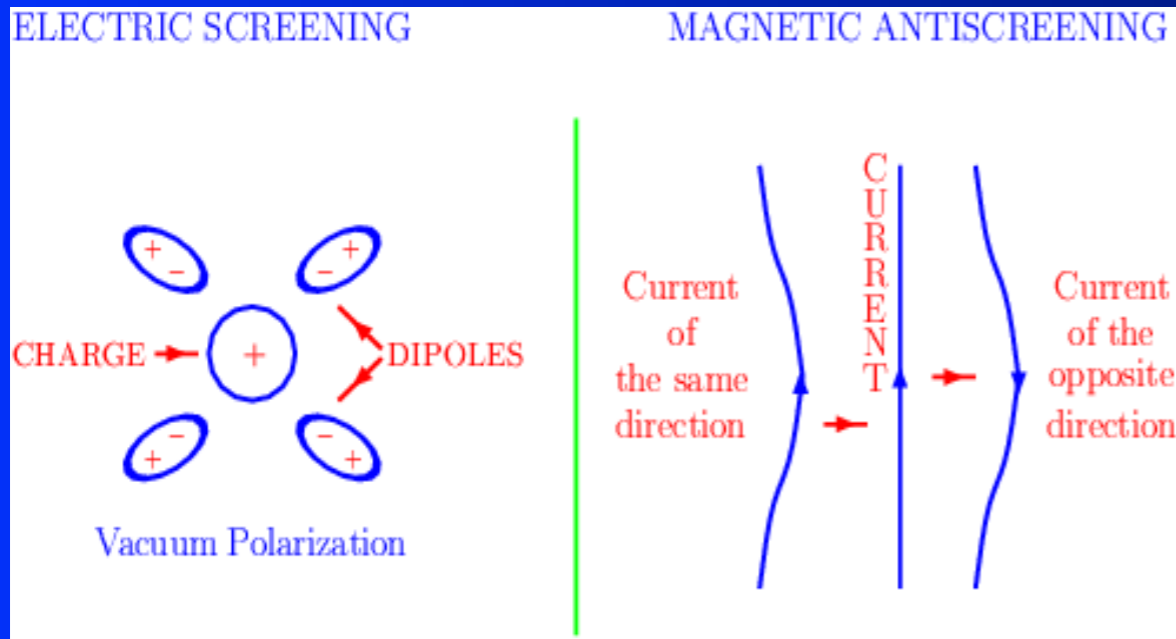
$10^{-34} m$



D=10

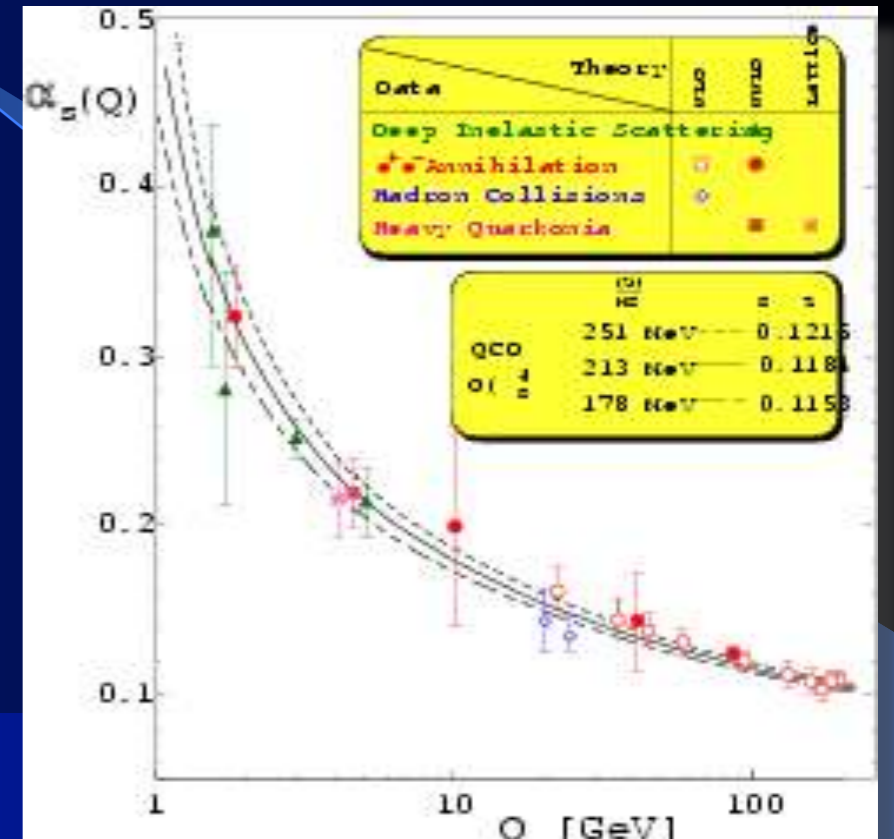
- Объединение сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий в рамках Теории Великого объединения – новый этап в объединении всех сил природы
- Создание единой теории (теории всего сущего) на основе струнной парадигмы кажется возможным

«Бегущие» константы

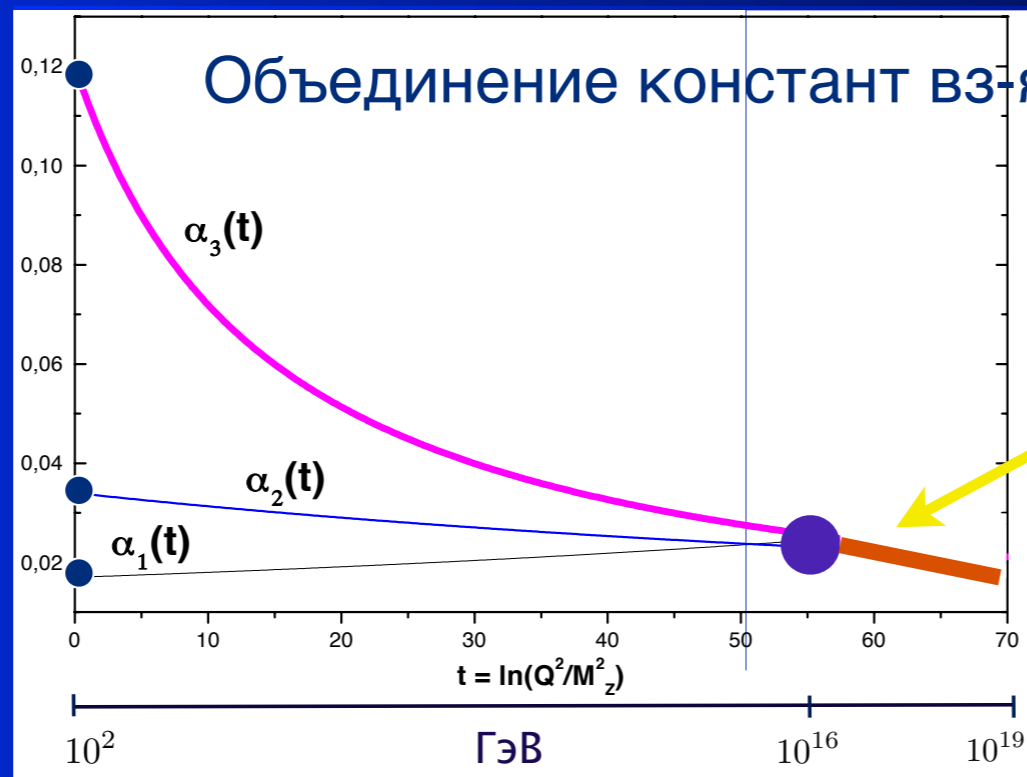


константа вз-я - есть функция расстояния

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



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



«бег» константы сильного вз-я

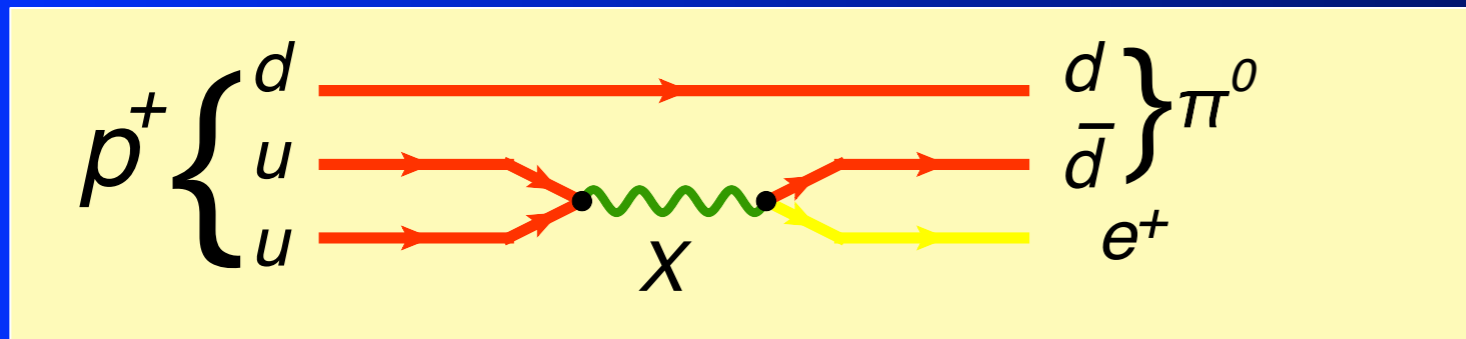
«объединение» констант вз-я - есть следствие их общего происхождения

Нестабильность протона

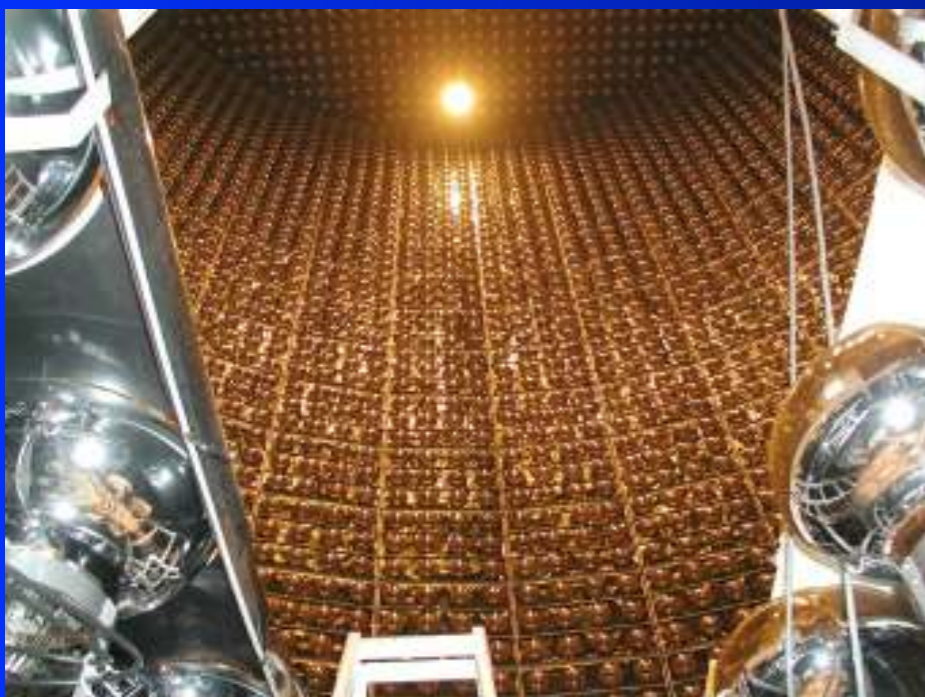
В Теории Великого Объединения кварки и лептоны равноправны и превращаются друг в друга. Это приводит к распаду протона.

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

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

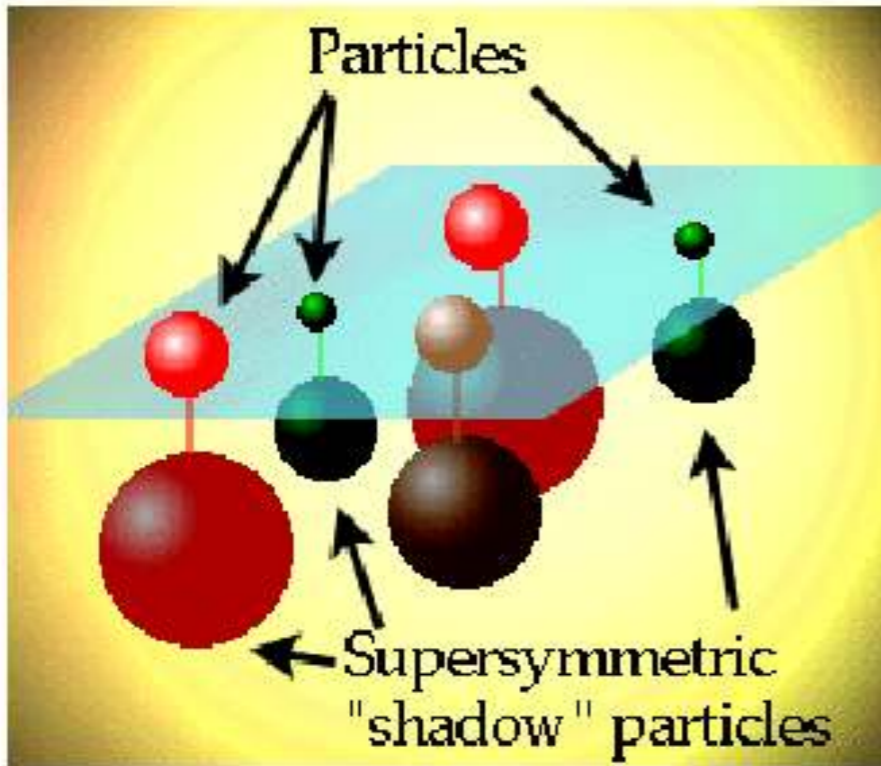


Камиока (Япония)



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

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

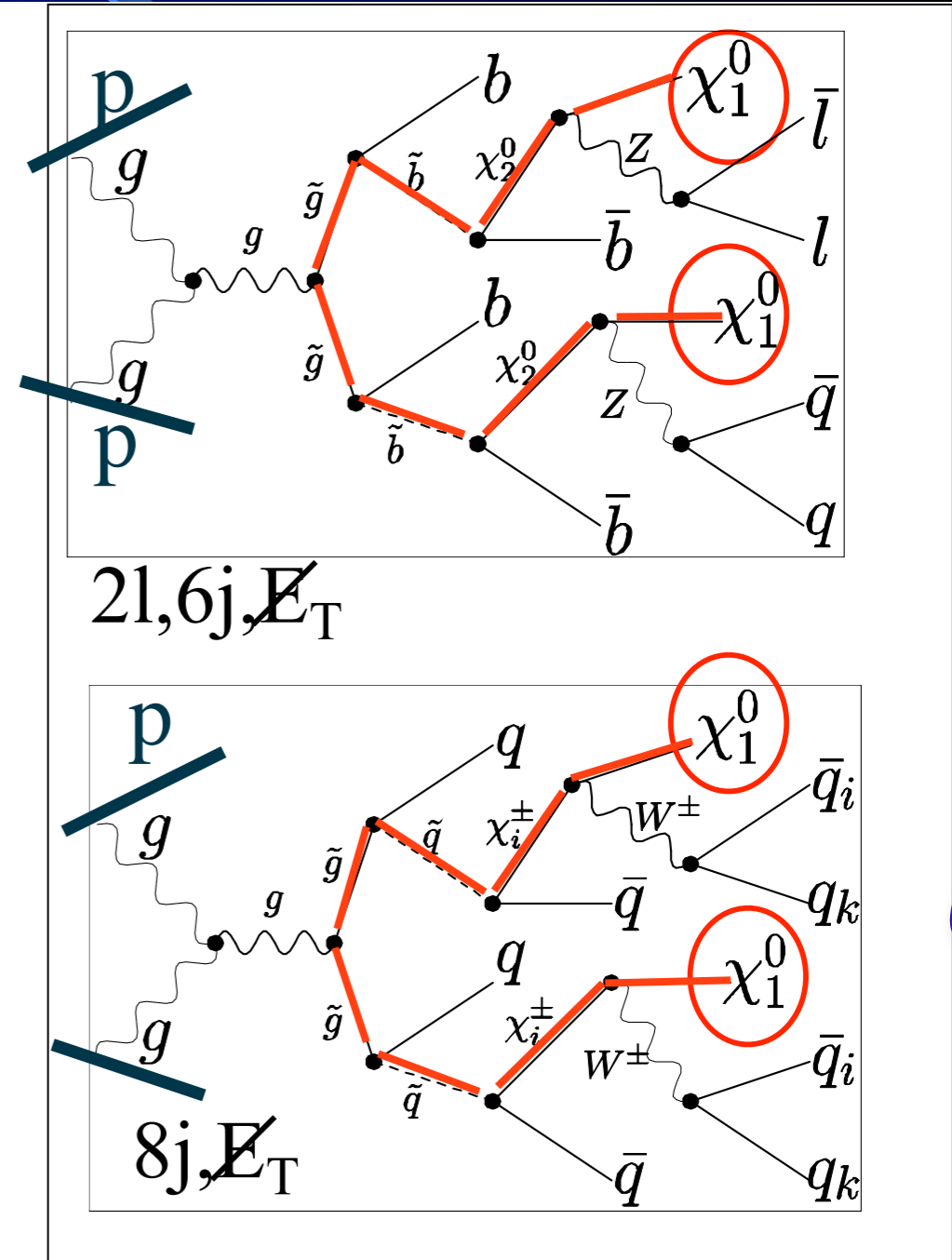
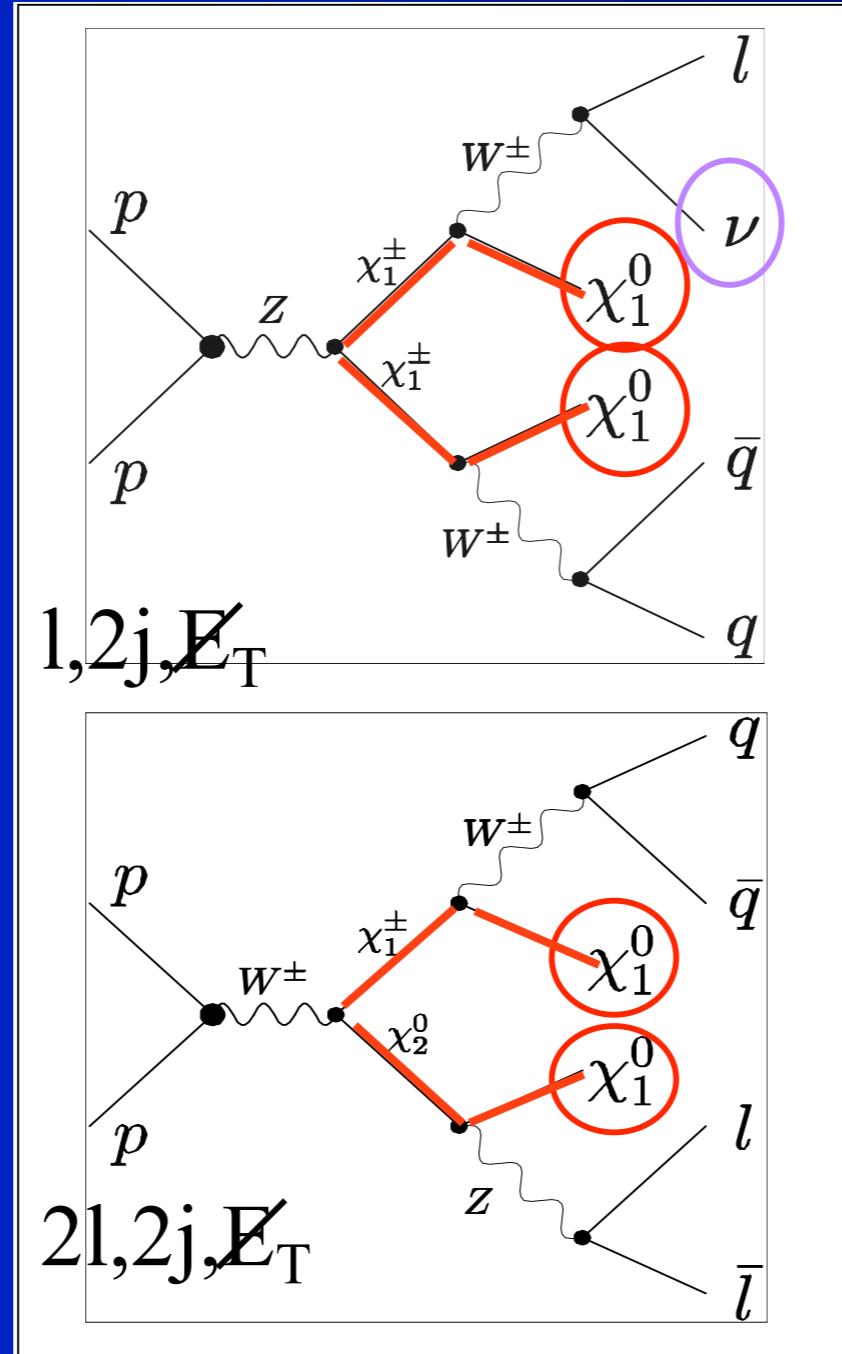
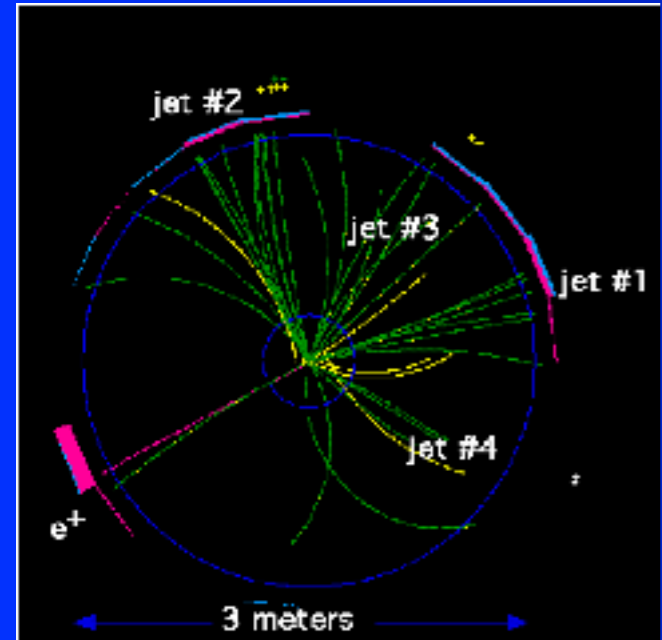
Хиггсино

гравитон

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

гравитино

Рождение суперчастиц на коллайдере

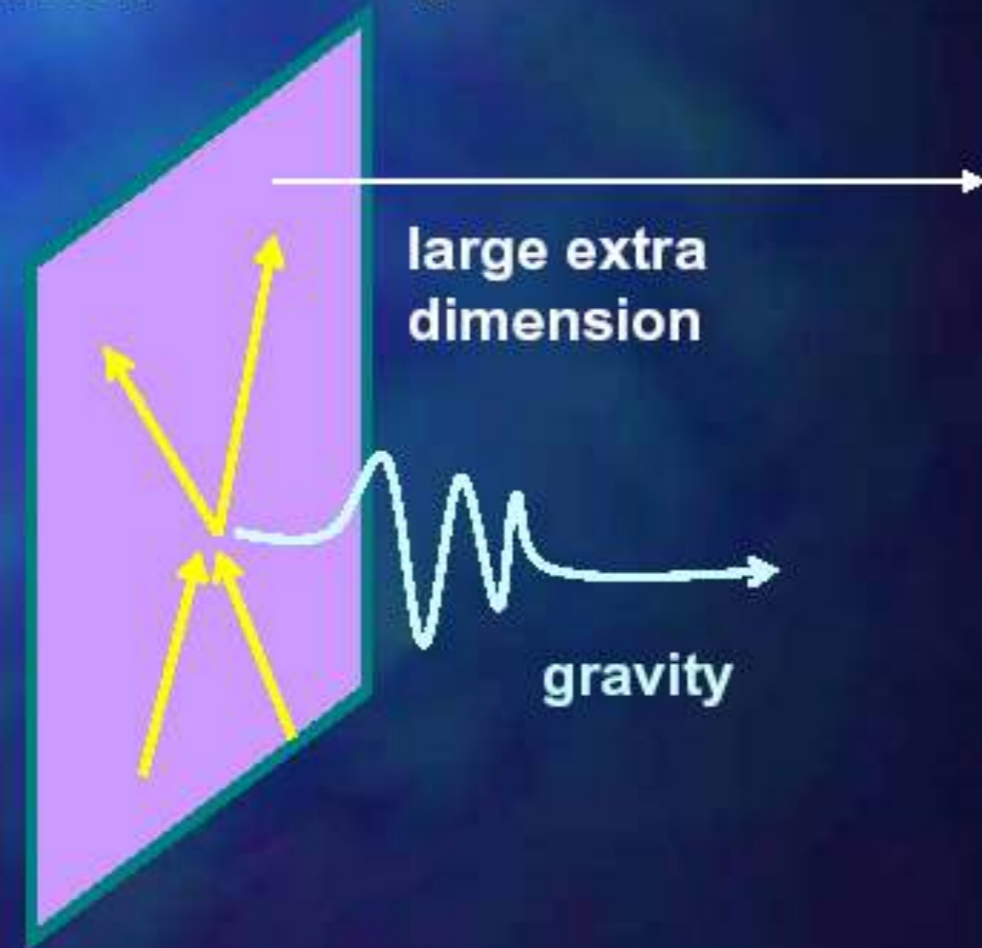


Многомерный мир

- **conventional Kaluza-Klein idea:**
internal extra dimension too small to be seen



- **discovery of D-brane**
 - **matter fields** restricted to lower dimensional brane
 - external bulk felt only through **gravity**
 - extra dimension bigger



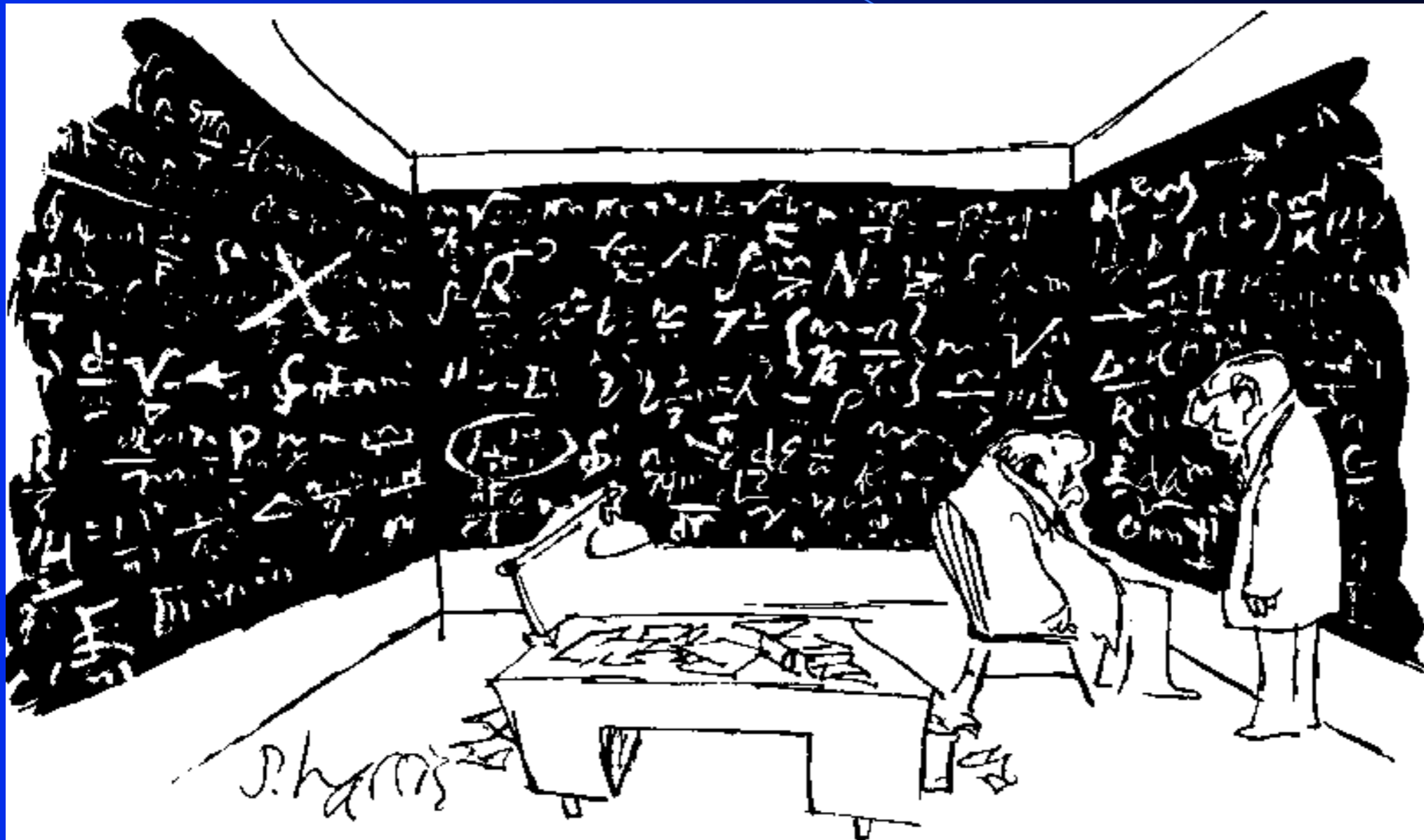
Экспериментального подтверждения пока не получено

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?"