

Новая физика

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

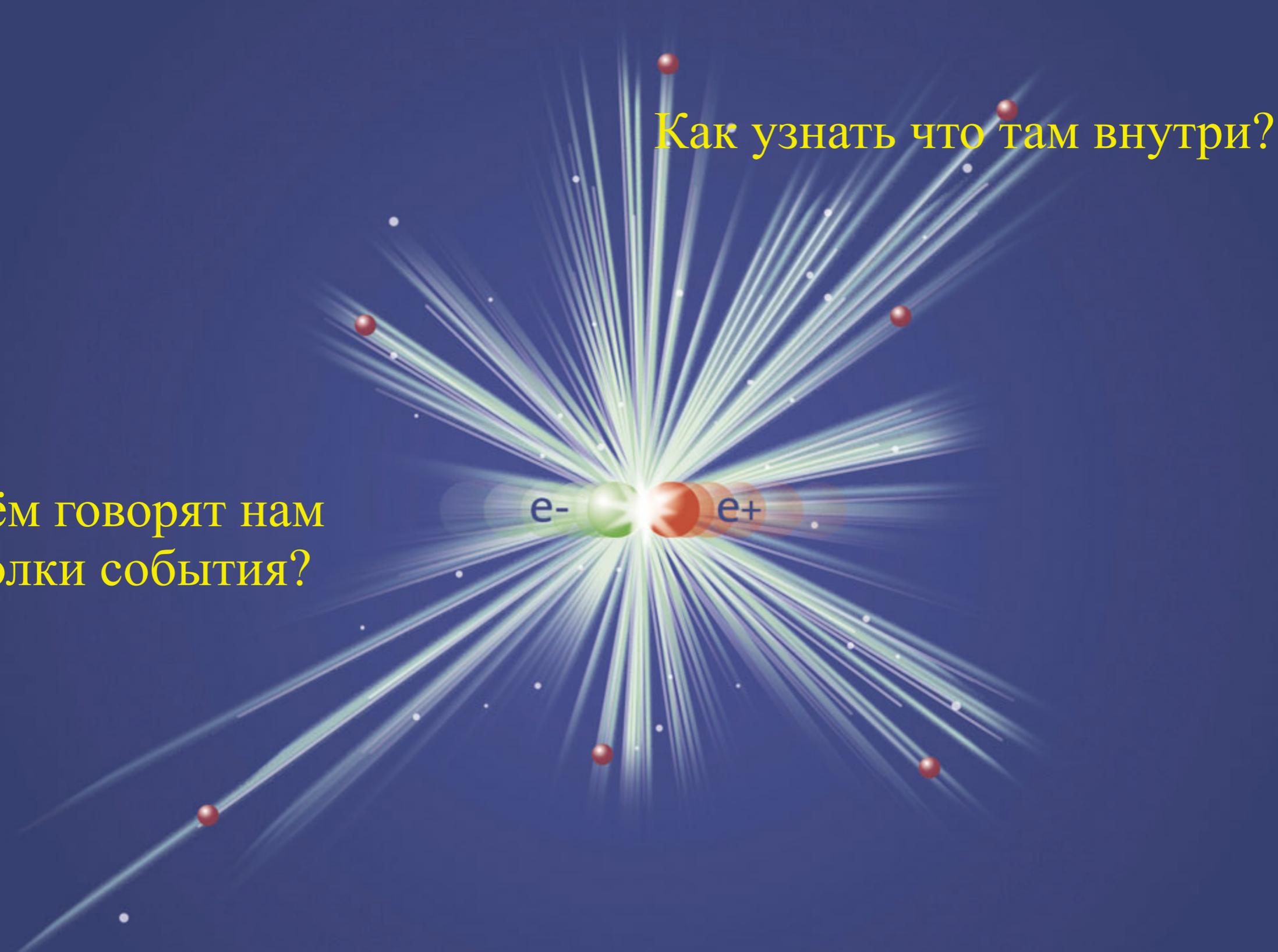
Московский физико-технический институт



Как устроен микромир?

Как узнать что там внутри?

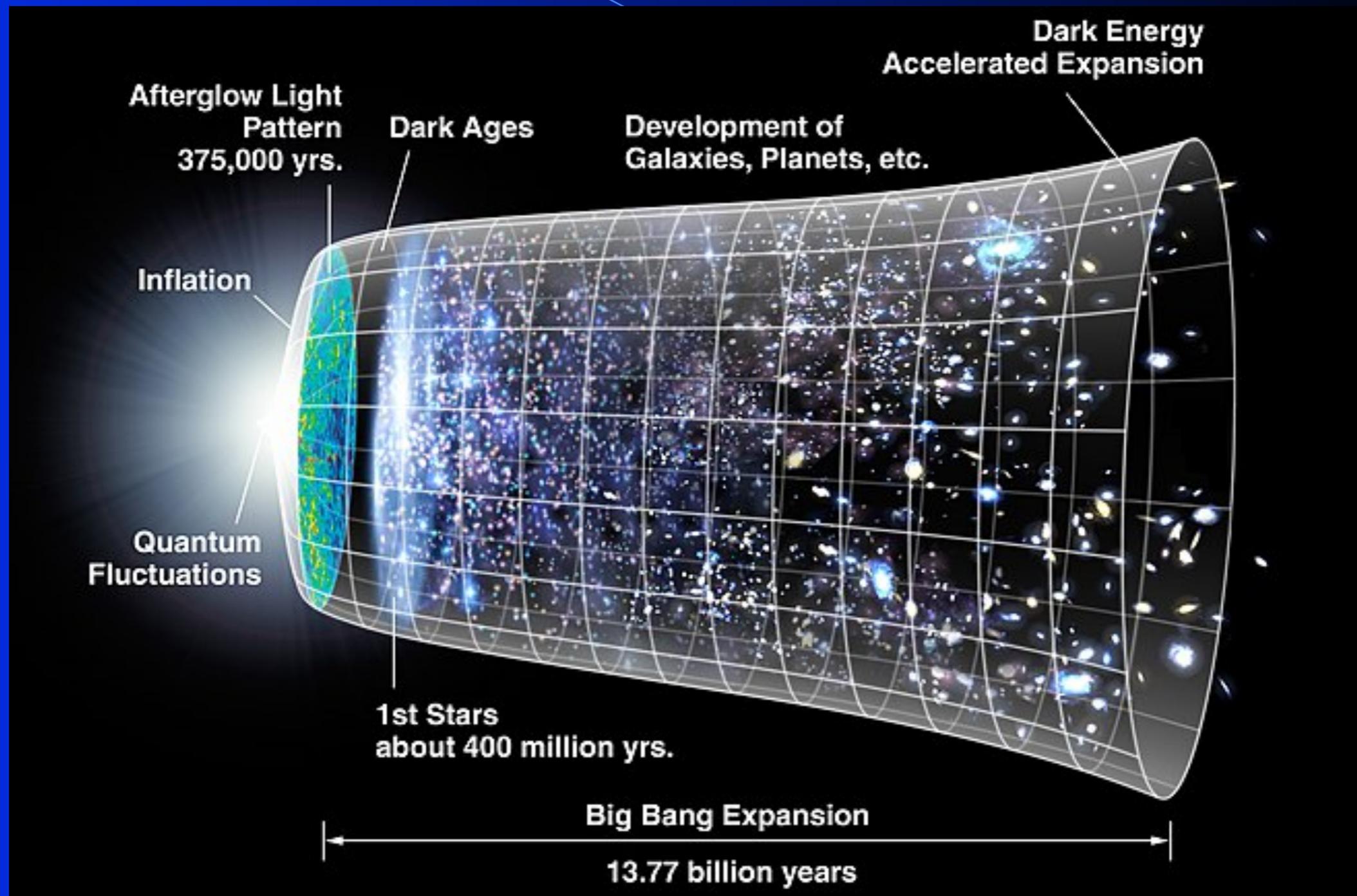
О чём говорят нам
осколки события?



The diagram illustrates a particle collision. At the center, two particles are shown: a green sphere on the left labeled e^- and a red sphere on the right labeled e^+ . They are positioned at the focal point of a starburst of numerous thin, light-colored lines radiating outwards in all directions, representing the products of the collision. Several larger red spheres are scattered among these lines, representing specific particles or debris from the event.

e^- e^+

Эволюция Вселенной



Стандартная Модель

SU(3)

SU(2)

U(1)

ФЕРМИОНЫ

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	Z^0 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^\pm weak force	
					Bosons (Forces)

Силы

Электромагнитные

Сильные

Слабые

Гравитация

История открытий

p
1919

n
1932

u

c
1974

t
1995

ν_e
1956

ν_μ
1963

ν_τ
2000

d

s
1947

b
1977

e
1895

μ
1936

τ
1975

шесть кварков

шесть лептонов

γ

g
1979

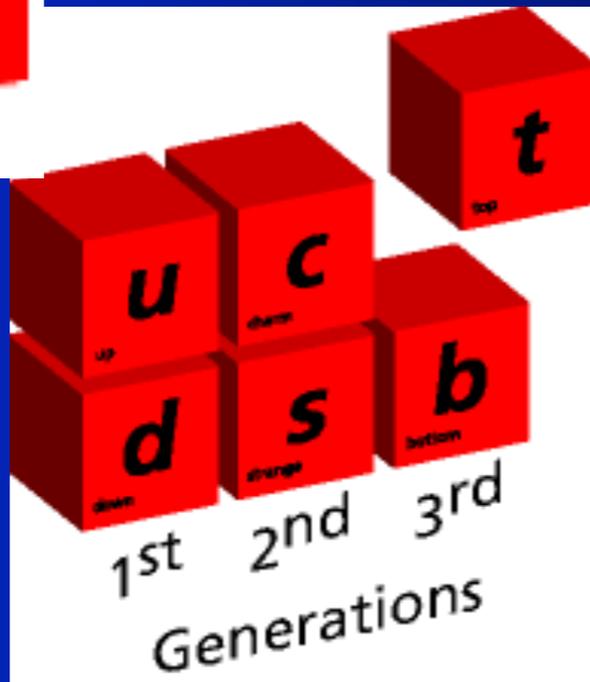
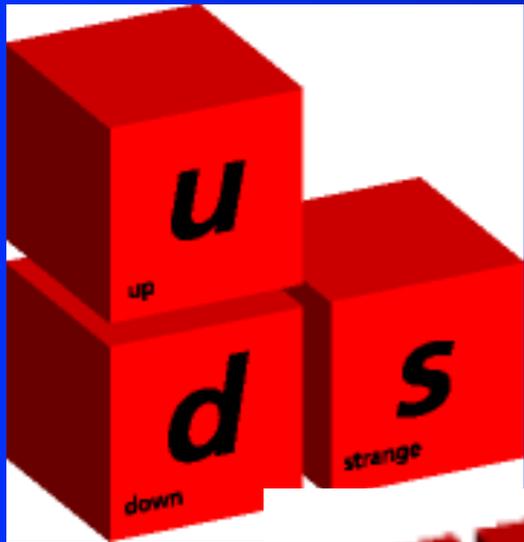
W, Z
1983

H
2012

G

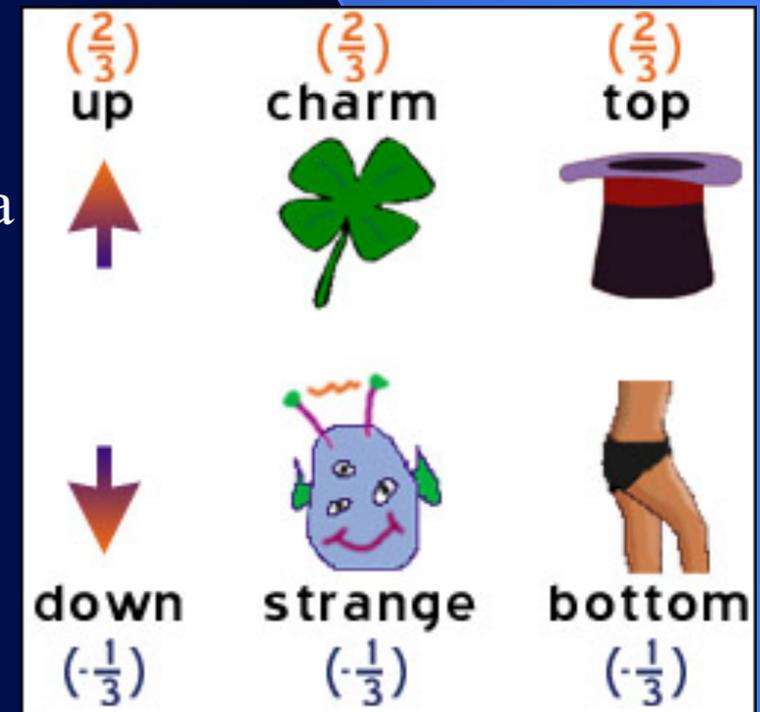
Теперь у нас есть замечательная картина из трёх пар кварков и трёх пар лептонов и пяти переносчиков фундаментальных взаимодействий. Здесь показана также история их открытия.

Кварки — “кирпичики мироздания”

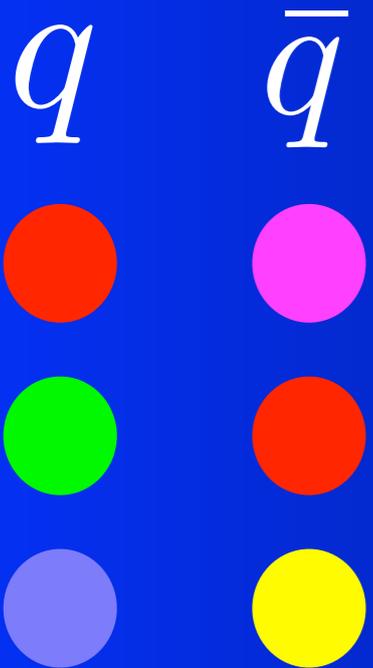


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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



Цветные кварки



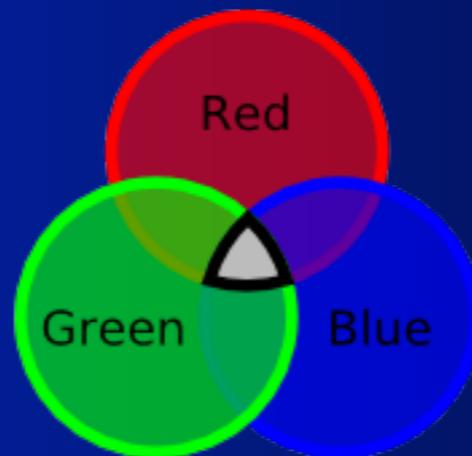
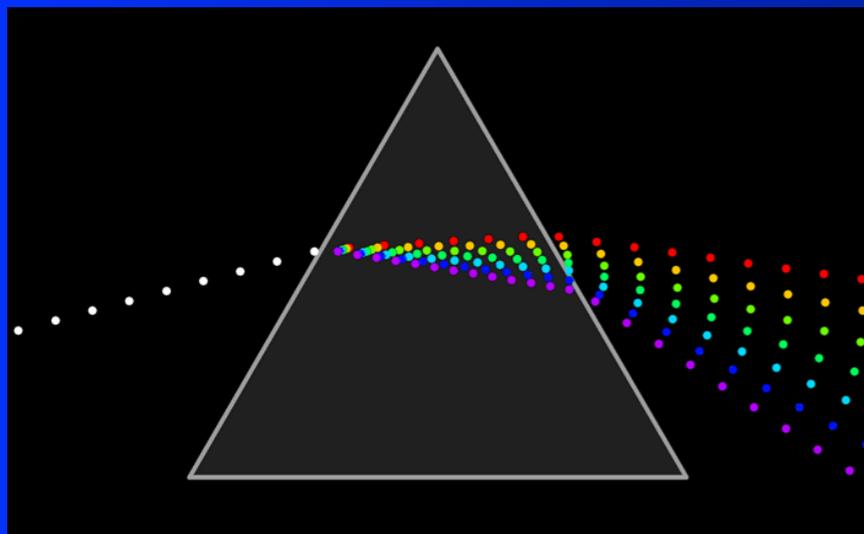
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

Антикварки имеют антицвета: анти**красный** - **фиолетовый**, анти**зелёный** - **красный**, анти**синий** - **жёлтый**

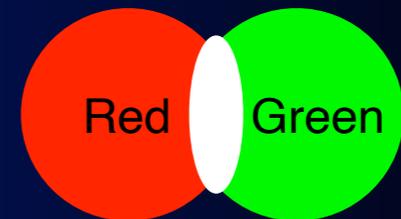
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

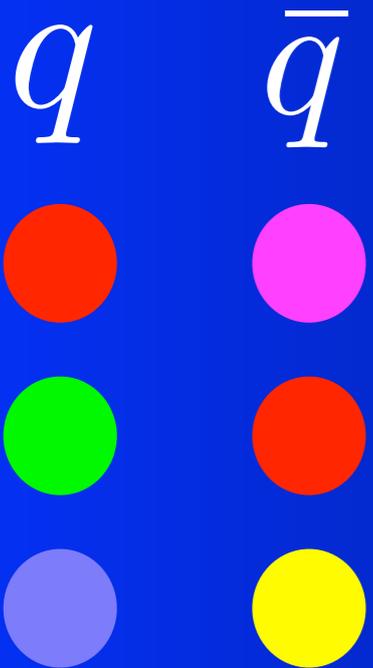


барион



МЕЗОН

Цветные кварки



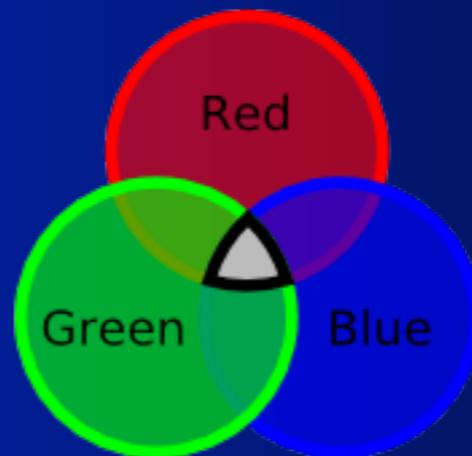
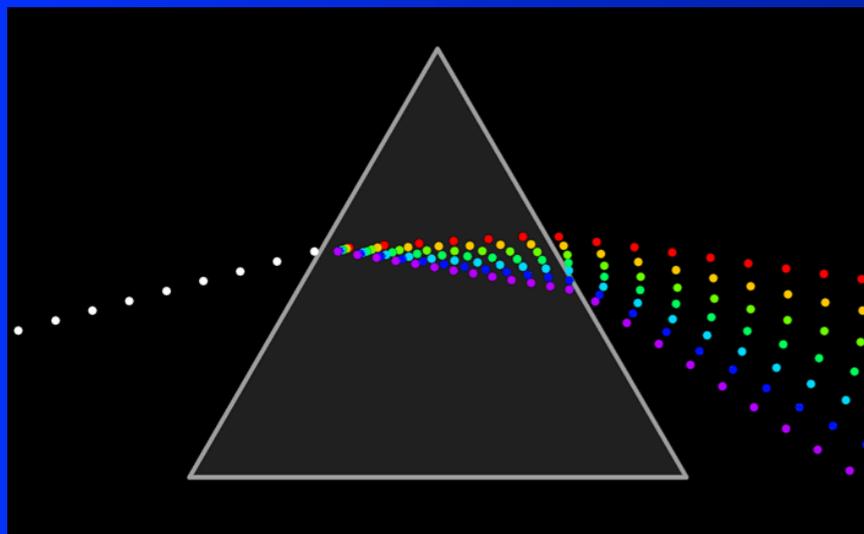
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

Антикварки имеют антицвета: анти**красный** - **фиолетовый**, анти**зелёный** - **красный**, анти**синий** - **жёлтый**

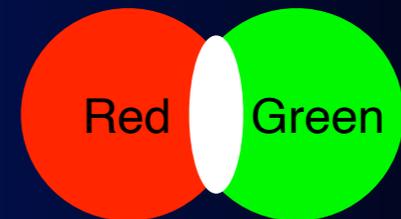
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

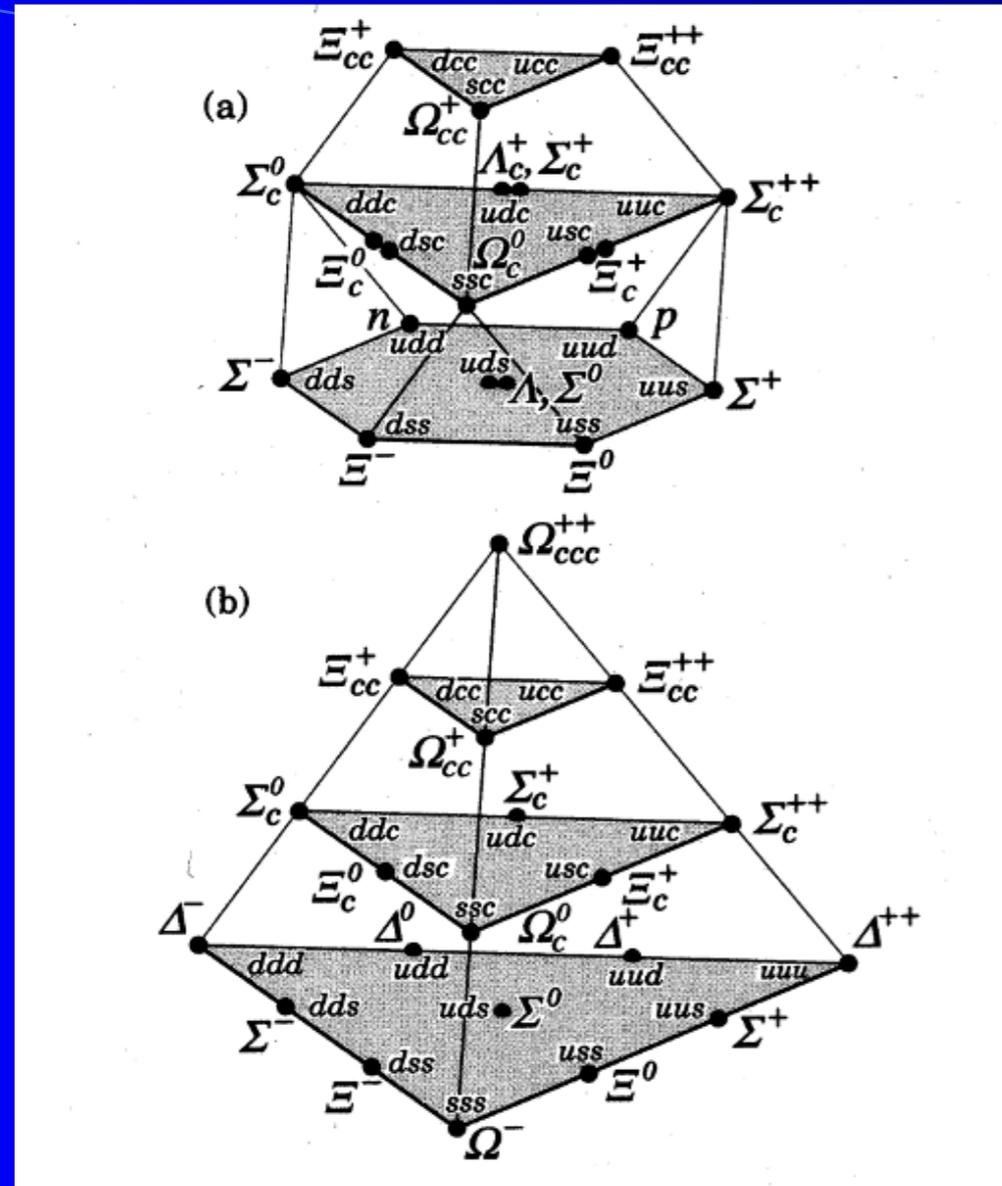


барион



МЕЗОН

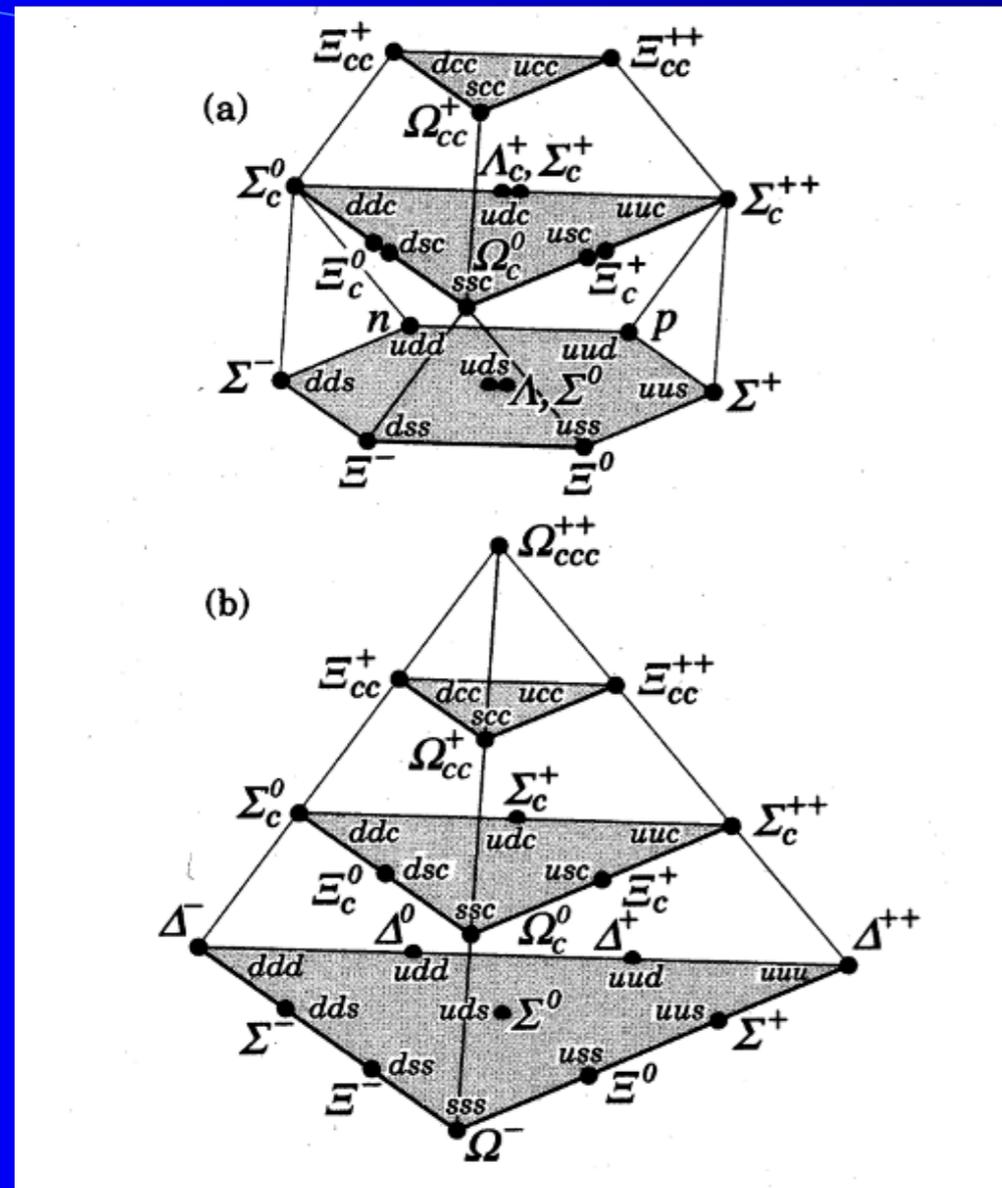
Адроны построенные из кварков



- Постулат конфайнмента: кварки и глюоны не могут наблюдаться в свободном состоянии, наблюдаются только «бесцветные» объекты
- Бесцветные объекты бывают следующих типов:

мезоны : $M = \bar{q}q$ барионы $B = qqq$

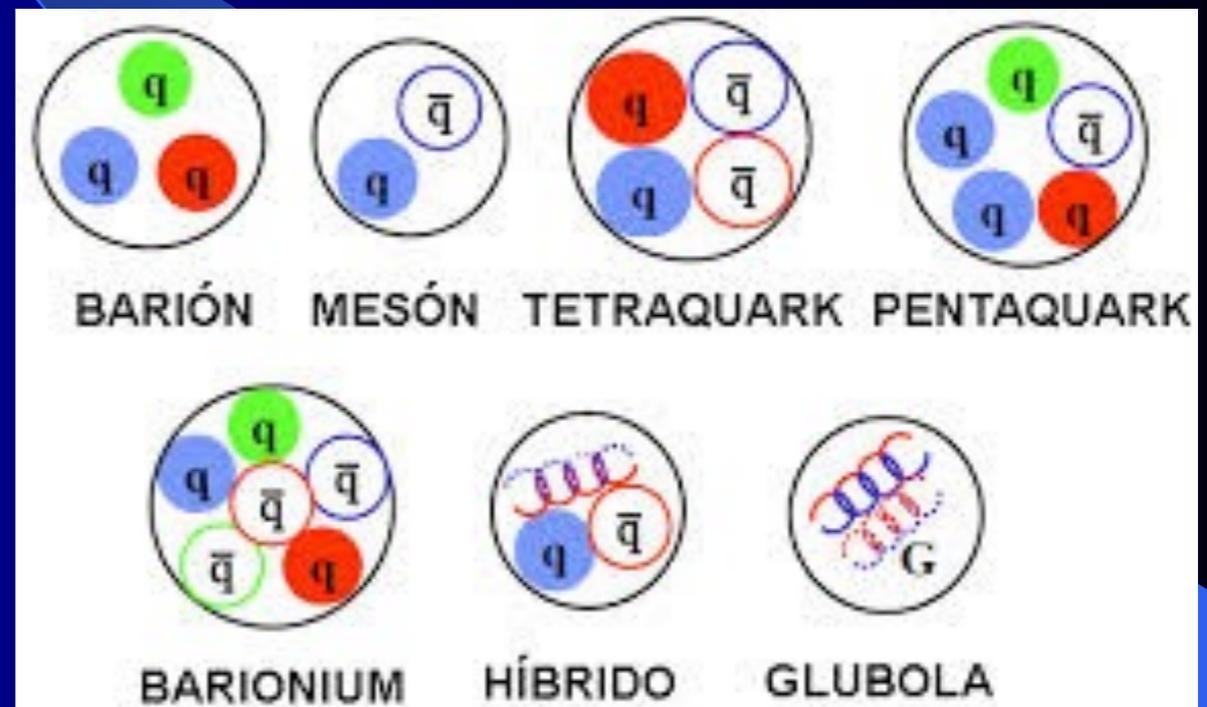
Адроны построенные из кварков



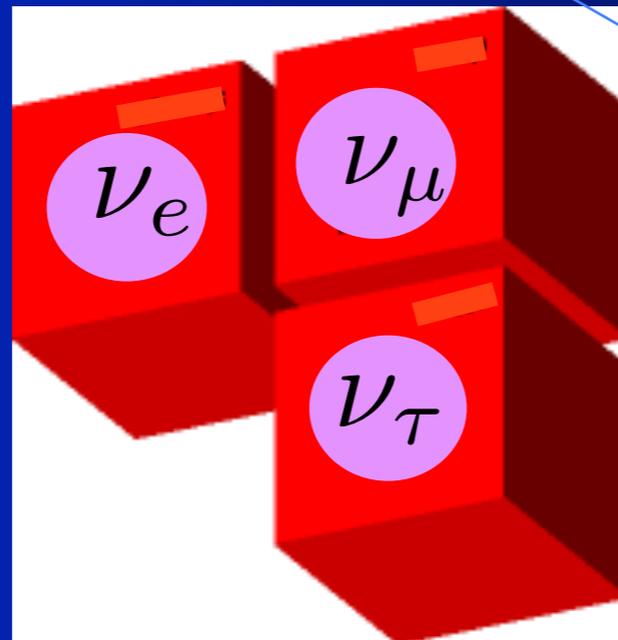
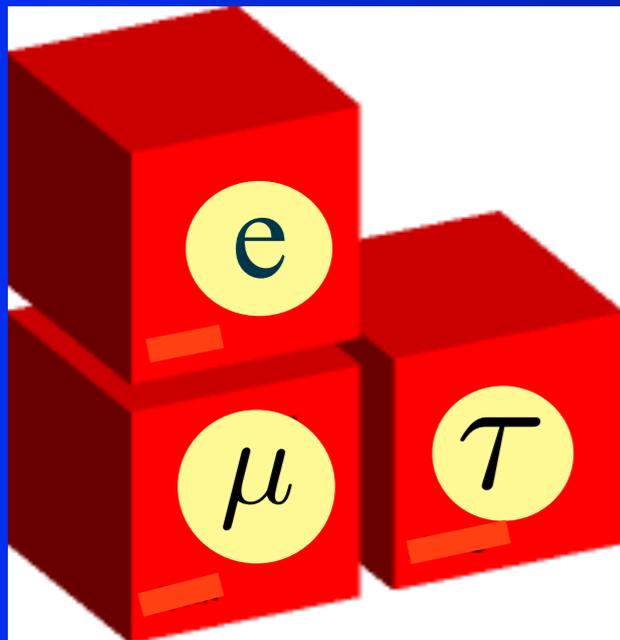
- Постулат конфайнмента: кварки и глюоны не могут наблюдаться в свободном состоянии, наблюдаются только «бесцветные» объекты
- Бесцветные объекты бывают следующих типов:

мезоны : $M = \bar{q}q$ барионы $B = qqq$

экзотические адроны



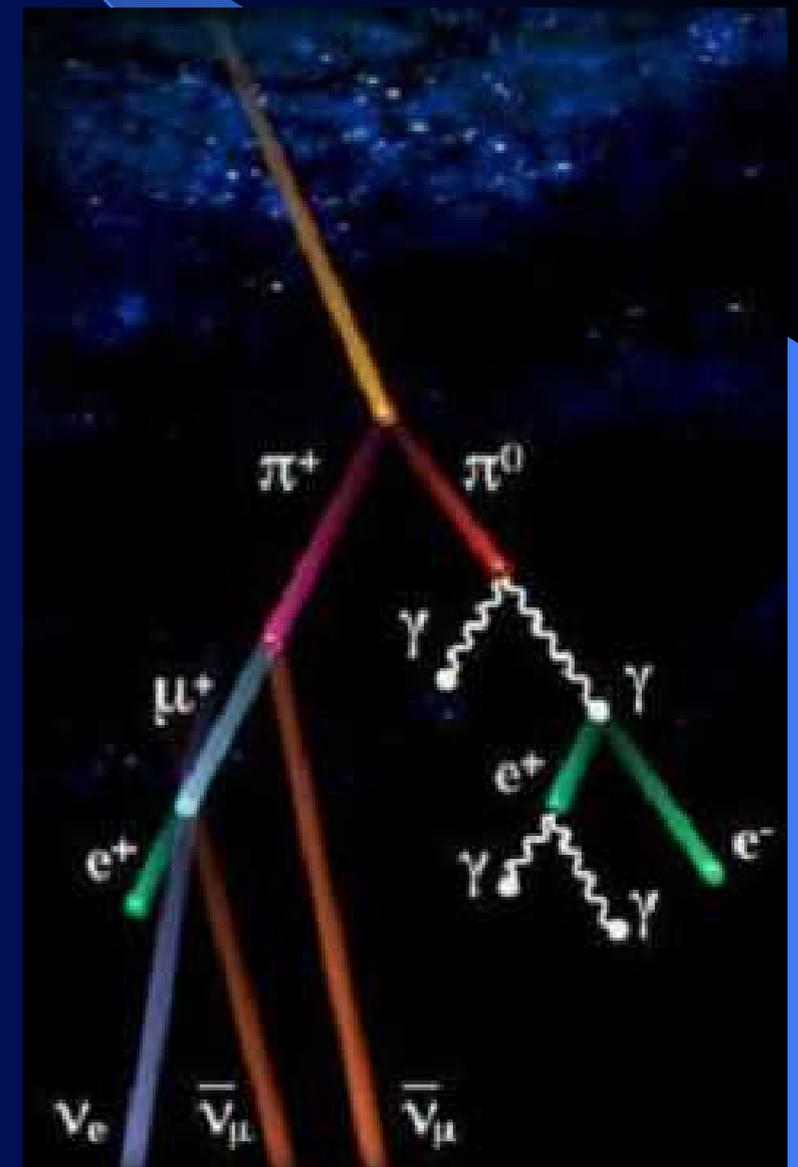
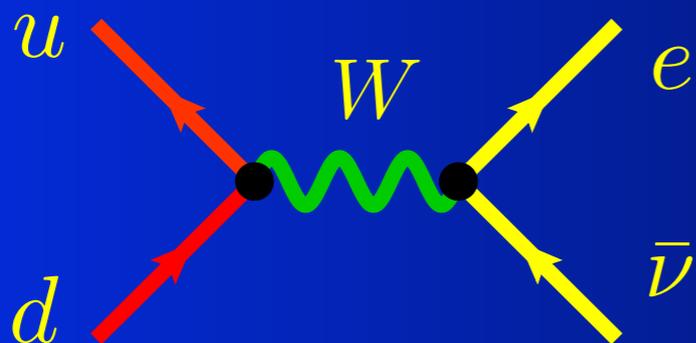
Лептоны от слова ΛΕΤΤΟΪ



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

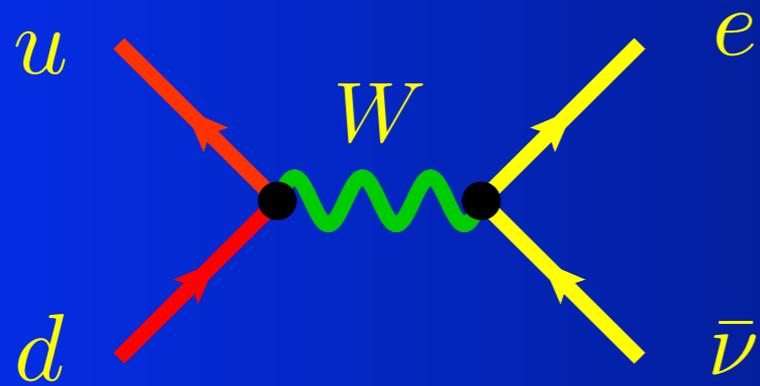
Электроны образуют оболочки атомов и определяют всю химию неживой и живой природы

Нейтрино рождаются в процессах распада адронов



Нейтрино-загадочная частица

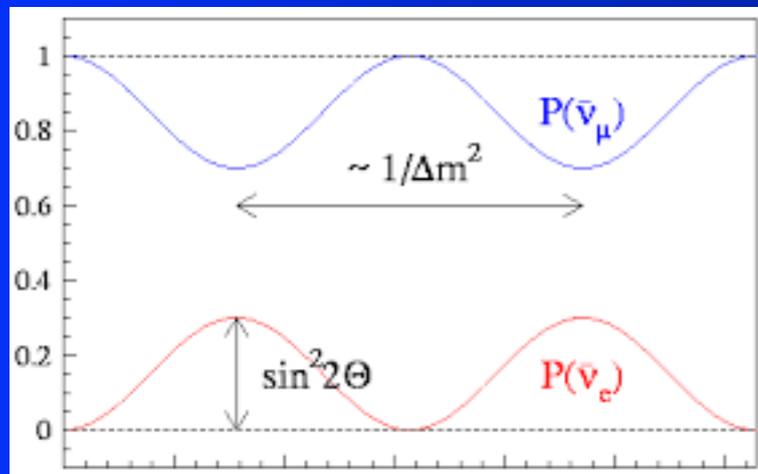
Нейтрино рождаются в процессах слабого распада адронов



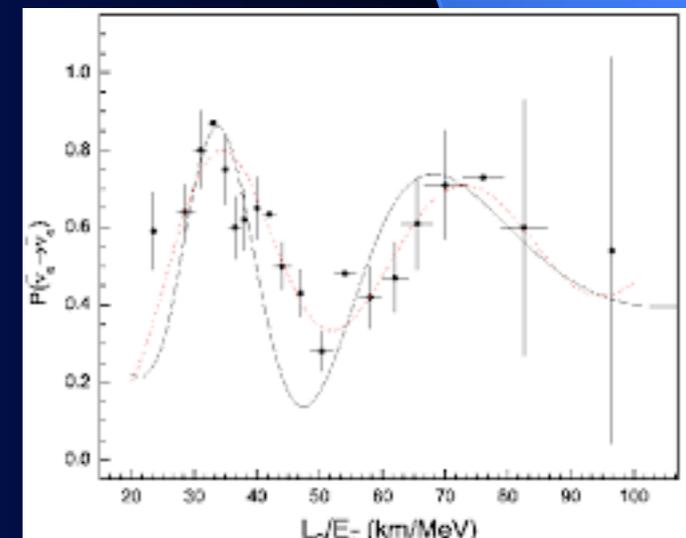
Нейтрино

- не имеют электрического заряда
- не участвуют в эл-маг вз-иях
- не участвуют в сильных вз-иях
- участвуют в слабых вз-иях
- возможно взаимодействуют с полем Хиггса
- имеют очень малую (< 1 eV) массу

Наличия массы у нейтрино следует из наблюдения нейтринных осцилляций



$$P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} = \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\alpha\beta}^2 L}{4E} \right)$$



Нейтрино-загадочная частица

Нейтринные массы



Planck

$$m_{\nu_e} < 2 eV$$



$$m_{\nu_e} < 0.2 eV$$

$$0.06 eV < \sum m_\nu < 0.12 eV$$

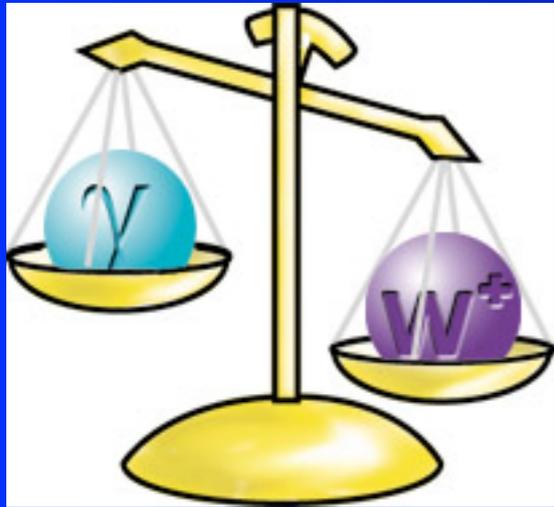
β -распад

KATRIN

Нейтринные
осцилляции

Спектр
реликтового
микроволнового
фона

Троицк-Майнц



Спектр масс части СМ

Массы всех частиц в СМ возникают из взаимодействия с полем Браута-Энглера-Хиггса за счет вакуумного среднего последнего!

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

Все массы пропорциональны константе взаимодействия частиц с хиггсовским (полем) бозоном

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

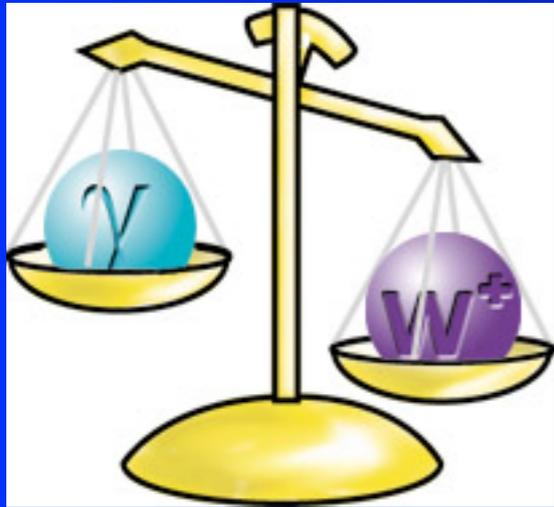
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

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

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

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



Спектр масс частиц СМ

Массы всех частиц в СМ возникают из взаимодействия с полем Браута-Энглера-Хиггса за счет вакуумного среднего последнего!

Массы элементарных частиц в Стандартной Модели

Все массы пропорциональны константе взаимодействия частиц с хиггсовским (полем) бозоном

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

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

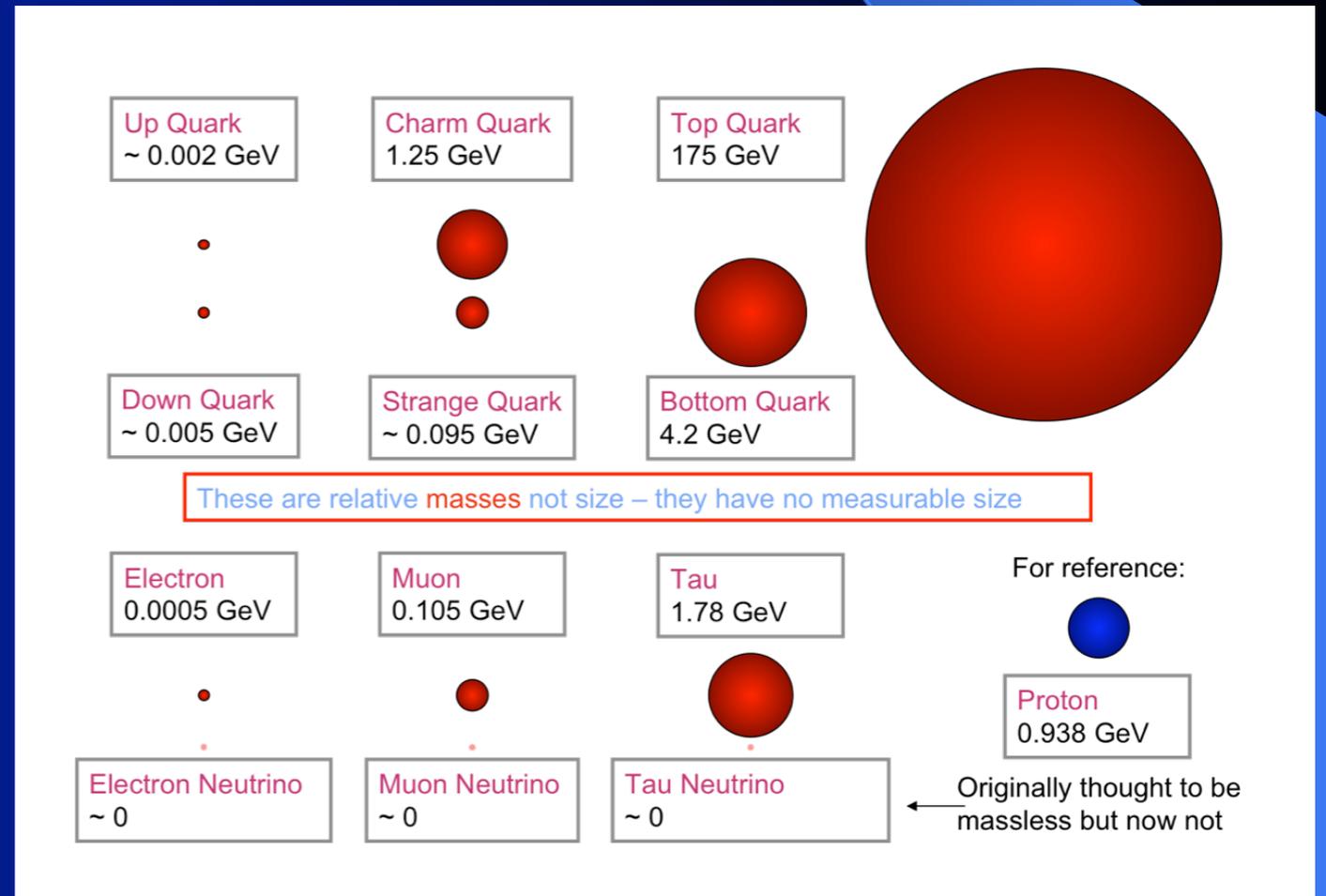
$$m_W = g \cdot v$$

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

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

$$m_\gamma = 0$$

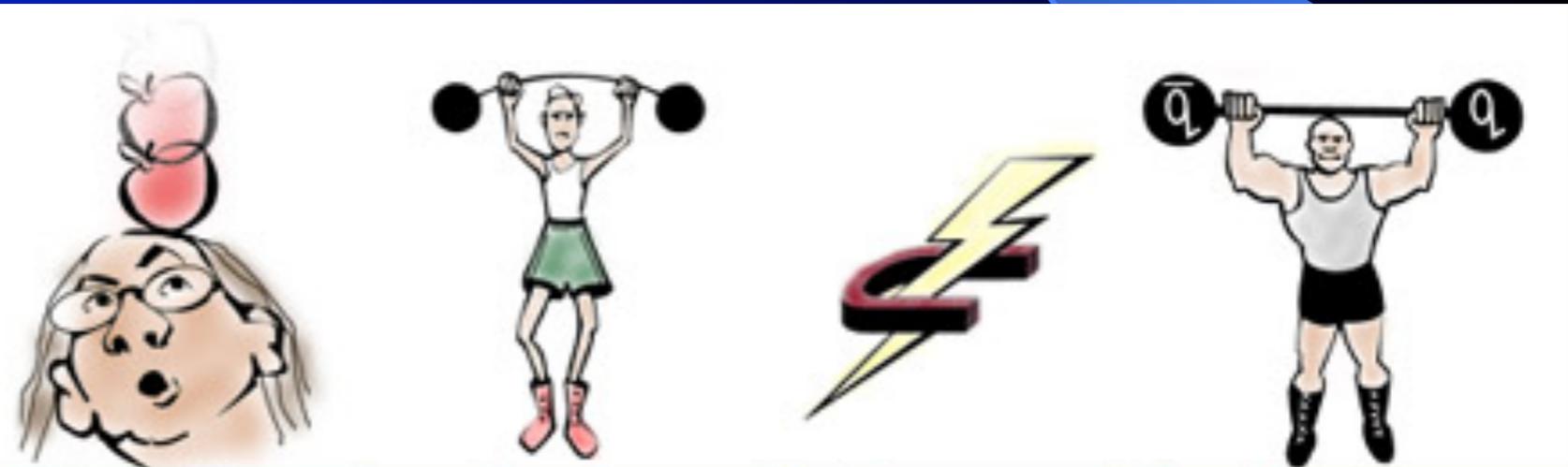
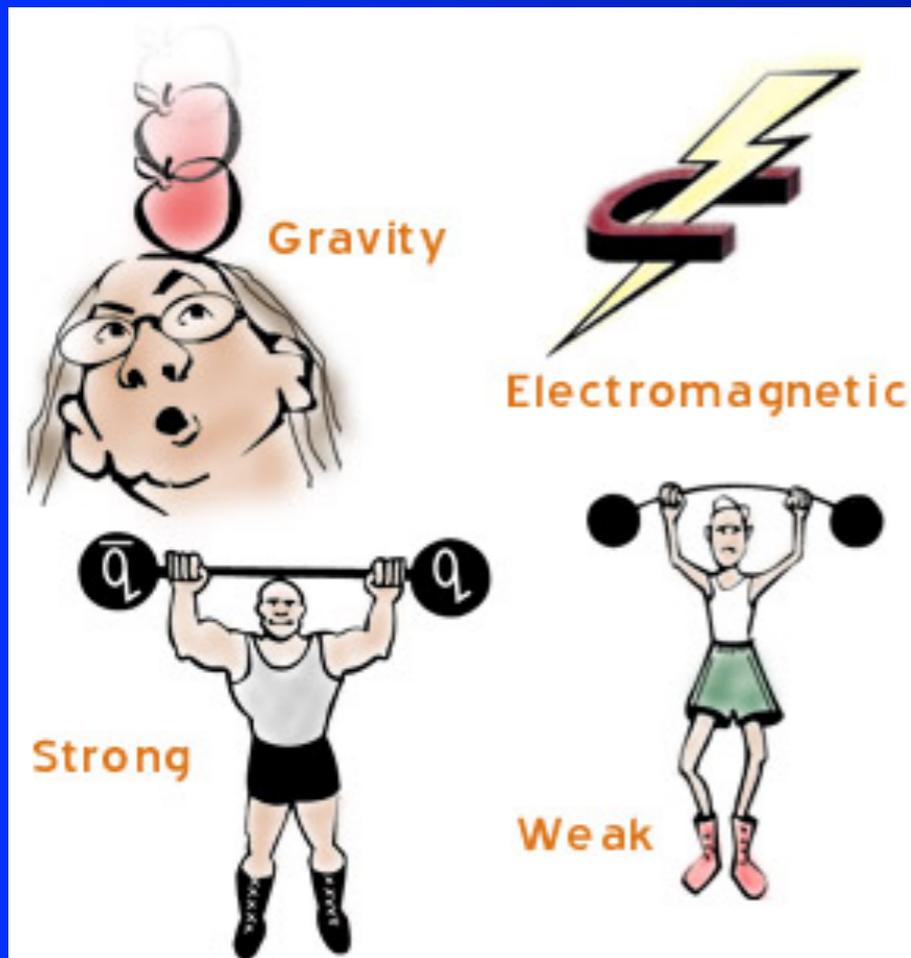
$$m_{gluon} = 0$$



Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе

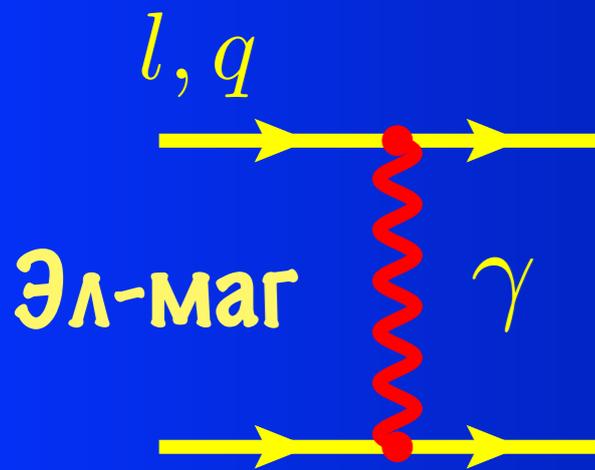


Пятая сила - обмен ХИГГСОВСКИМ БОЗОНОМ

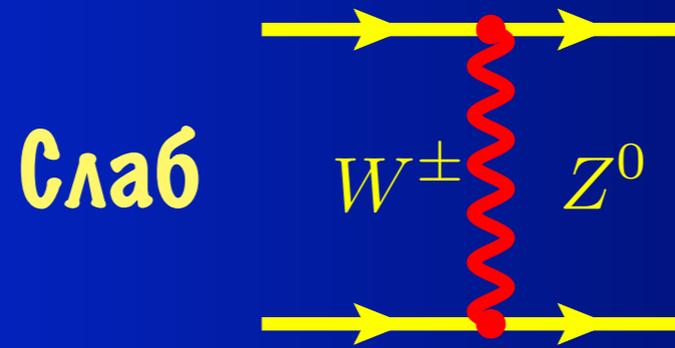


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

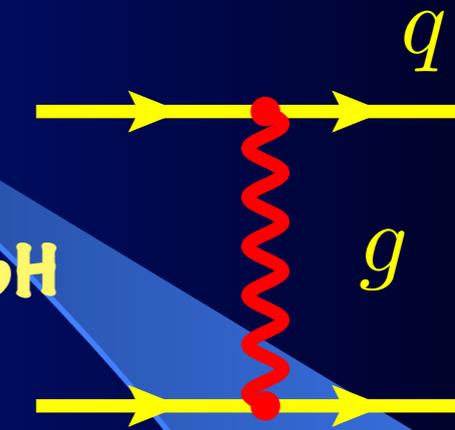
Пять фундаментальных сил Природы



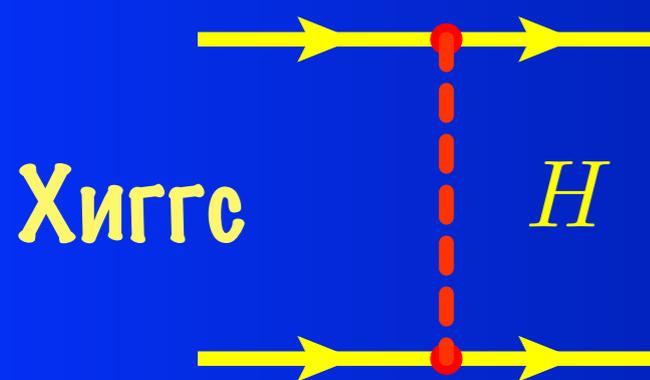
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



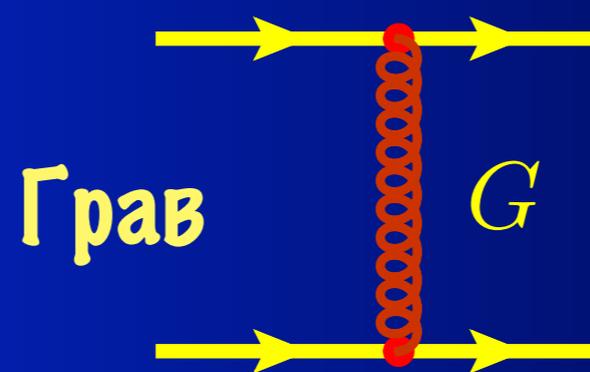
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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



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

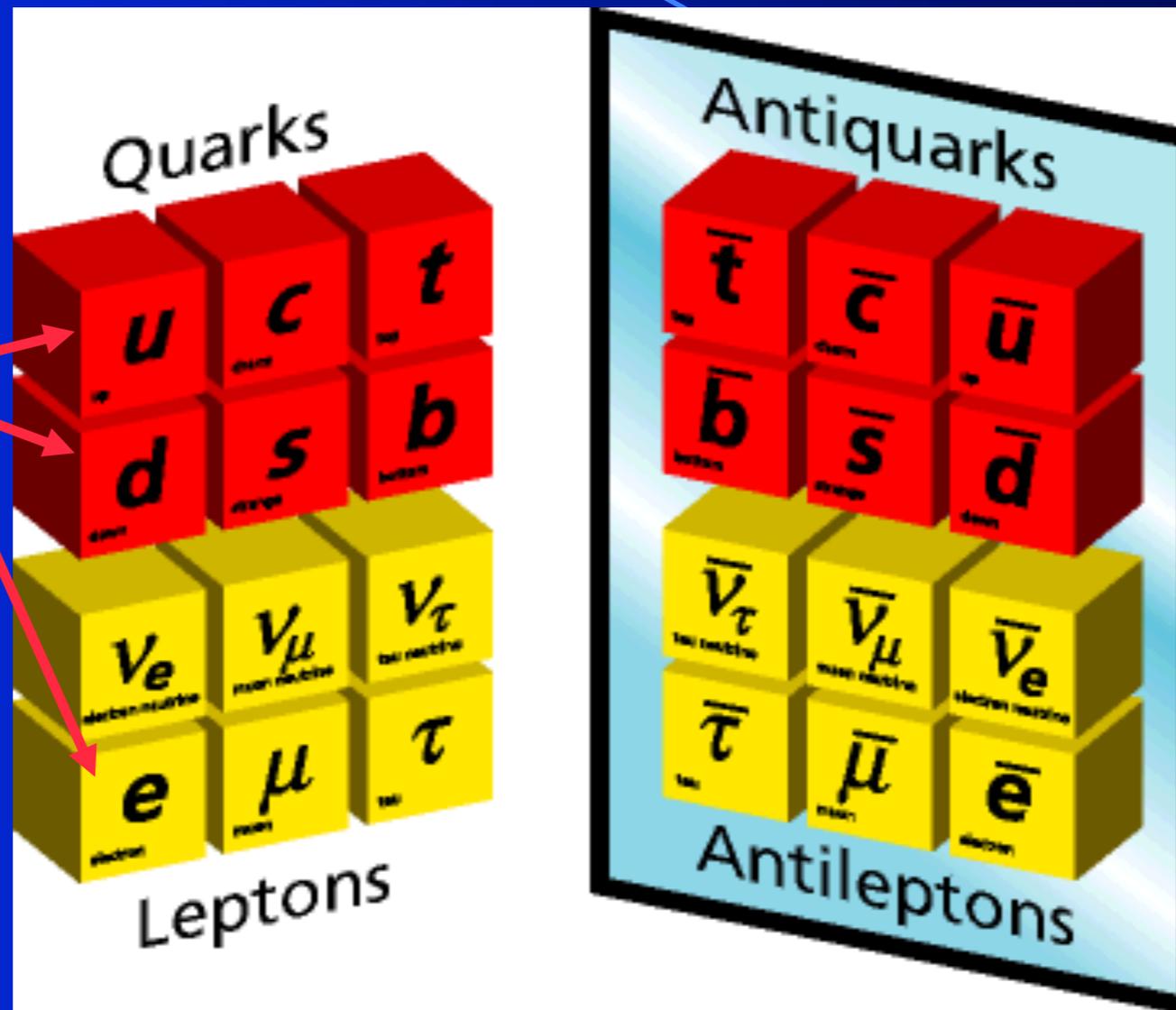
Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

Загадка № 1:

Почему в природе
понадобились три поколения
элементарных частиц?

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

Загадка № 2:

Как объяснить отсутствие антиматерии во 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

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

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

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



СРТ - точная симметрия Природы

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)



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)

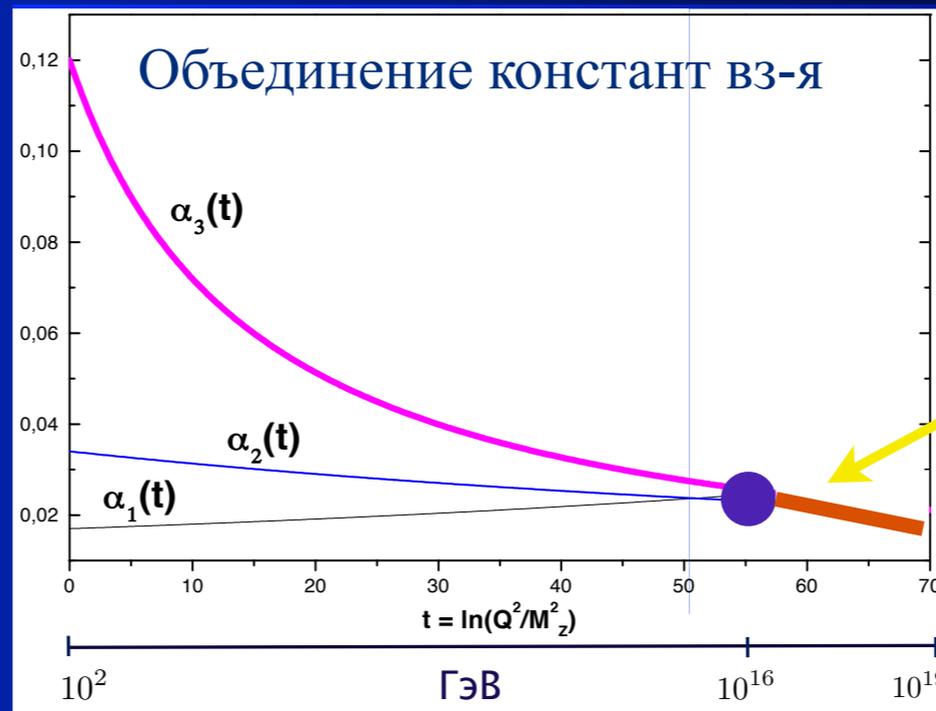
- Три различные силы: сильные, слабые и электромагнитные являются «ветвями» единой силы

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.



ТВО

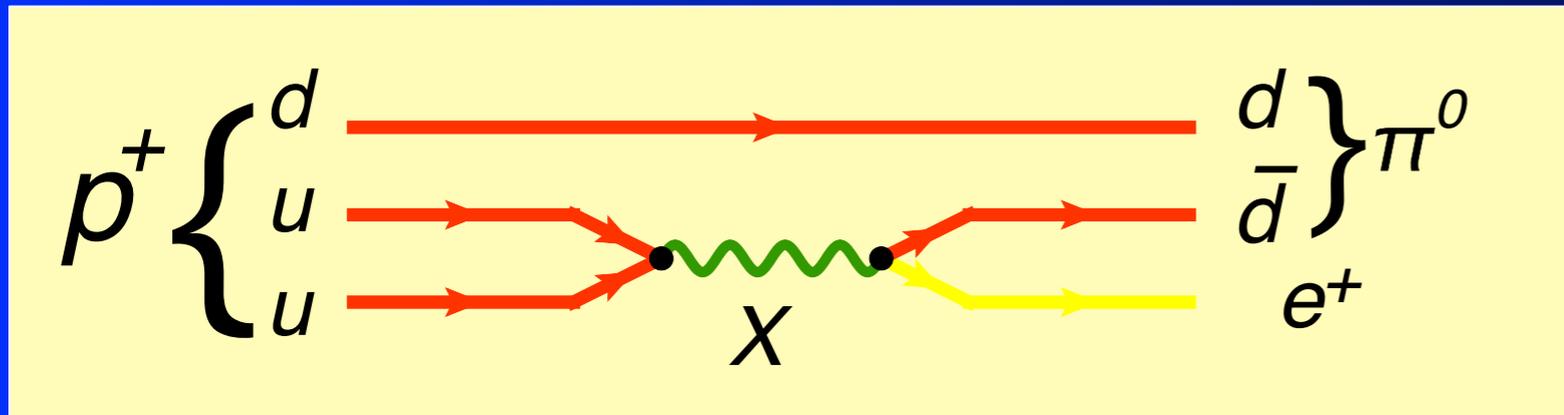
«объединение»
констант вз-я - есть
следствие их
общего
происхождения

Нестабильность протона

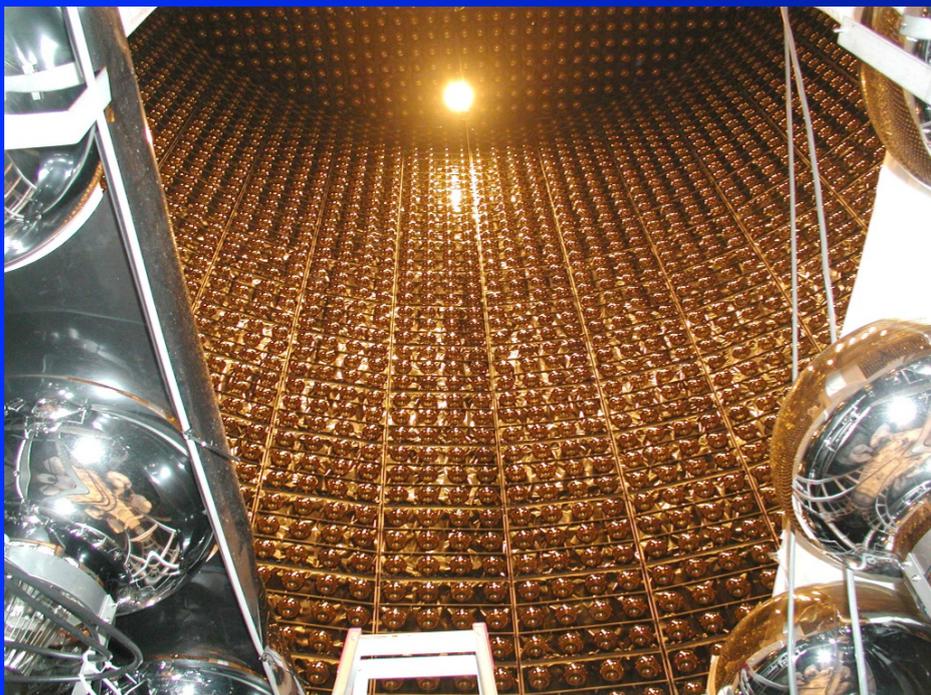
В Теории Великого Объединения кварки и лептоны равноправны и превращаются друг в друга. Это приводит к распаду протона.

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

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



Камиока (Япония)



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

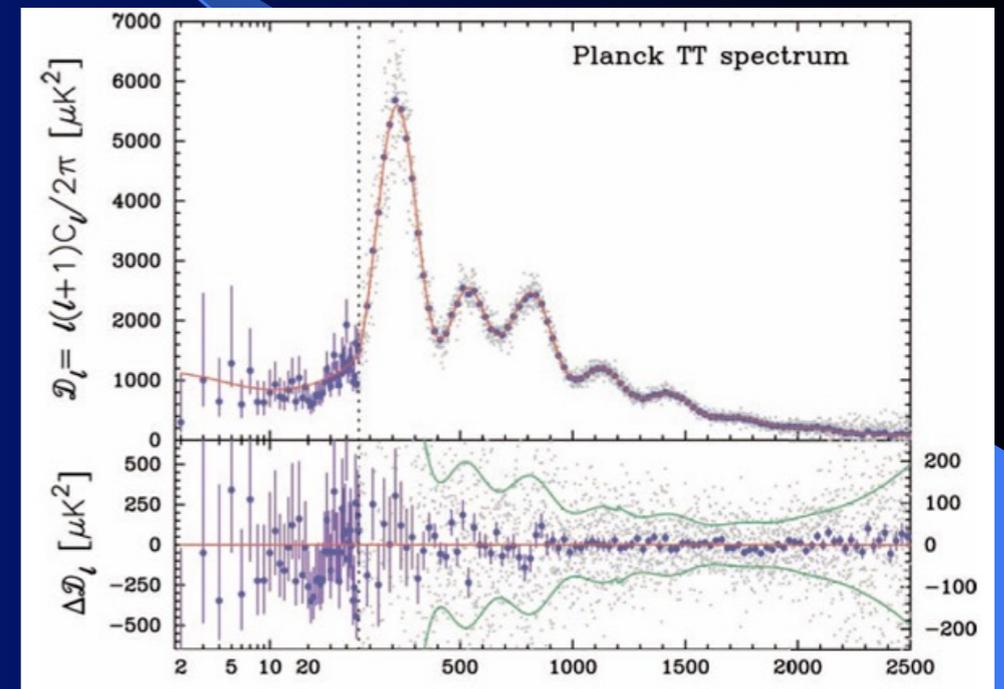
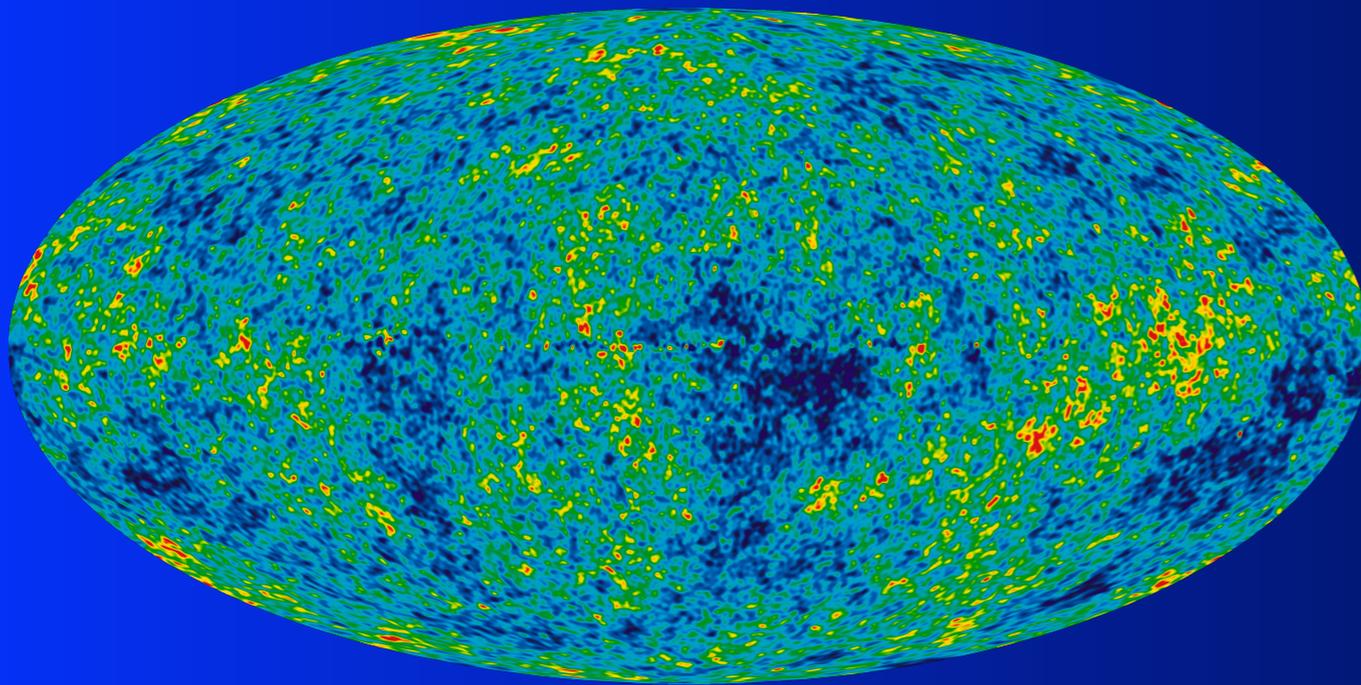
Загадка № 3:

Что такое тёмная
материя и из чего она
состоит?

Реликтовое микроволновое излучение

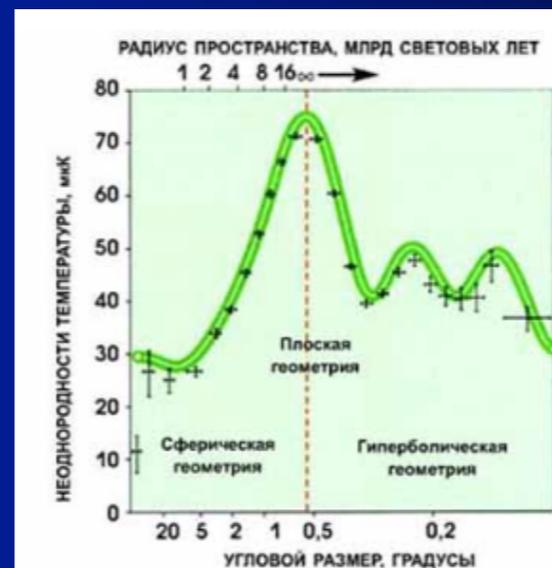
Реликтовое излучение $T \approx 2.7\text{K}^\circ$

Разложение по угловым гармоникам



Температурные флуктуации микроволнового фона

$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



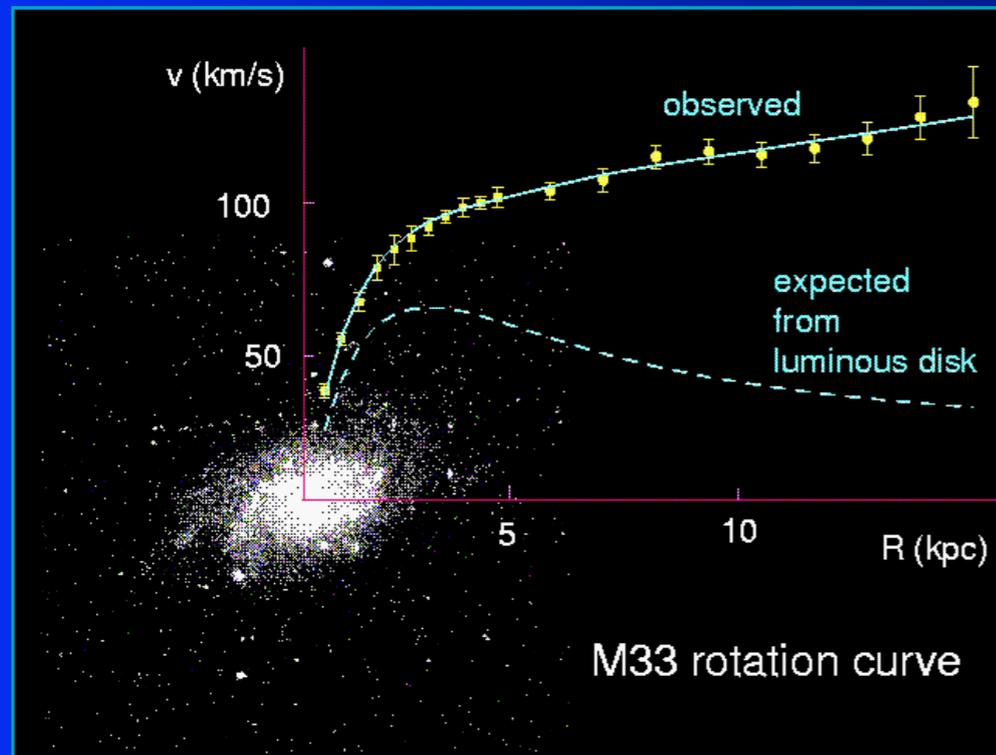
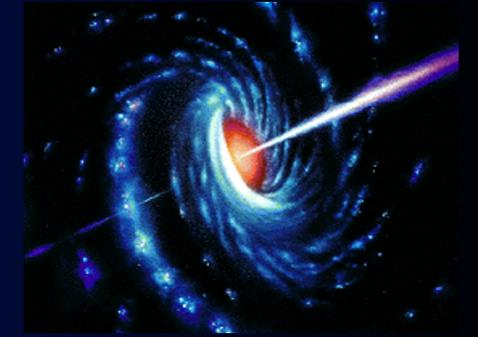
$$\Omega_{UsualMatter} = 4.9\%$$

$$\Omega_{DarkMatter} = 26.8\%$$

$$\Omega_{DarkEnergy} = 68.3\%$$

$$\Omega = 1.02 \pm_{23} 0.02$$

Тёмная материя

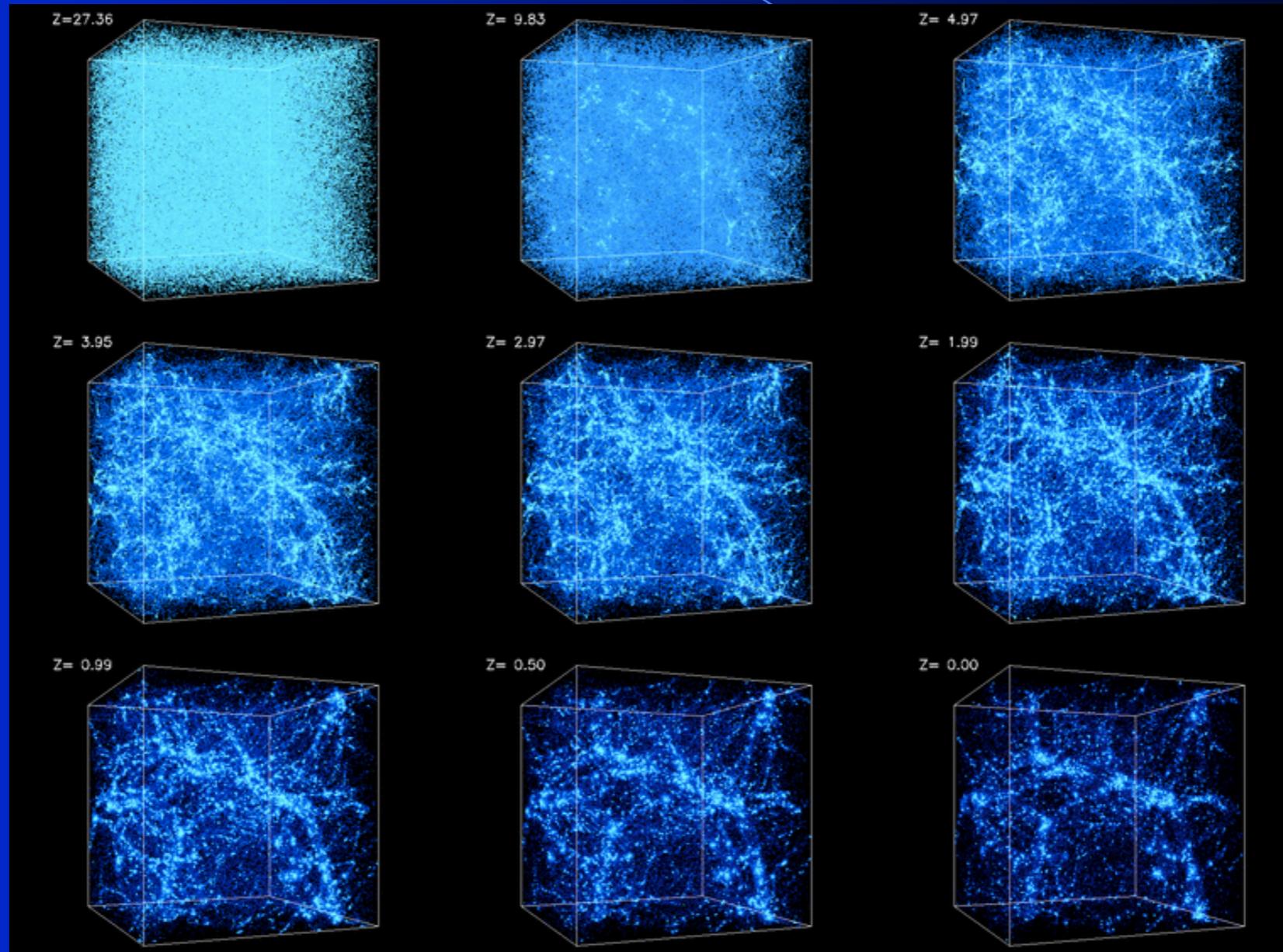


- Плоские ротационные кривые спиральных галактик являются прямым свидетельством наличия большого количества тёмной материи

- 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



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

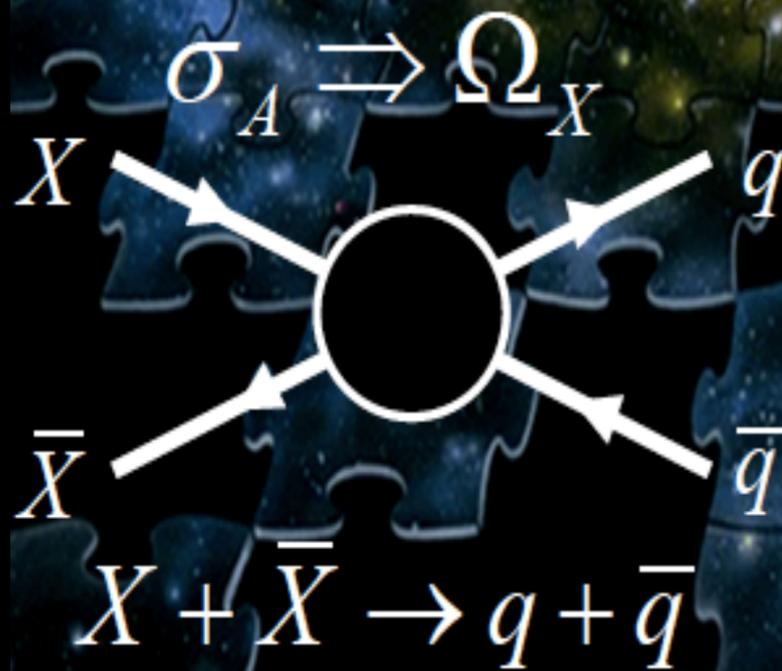


- Частица тёмной материи должна быть нейтральной, стабильной, слабо и/или гравитационно взаимодействующей
- В Стандартной модели нет такой частицы (за исключением возможно тяжёлого правого нейтрино)

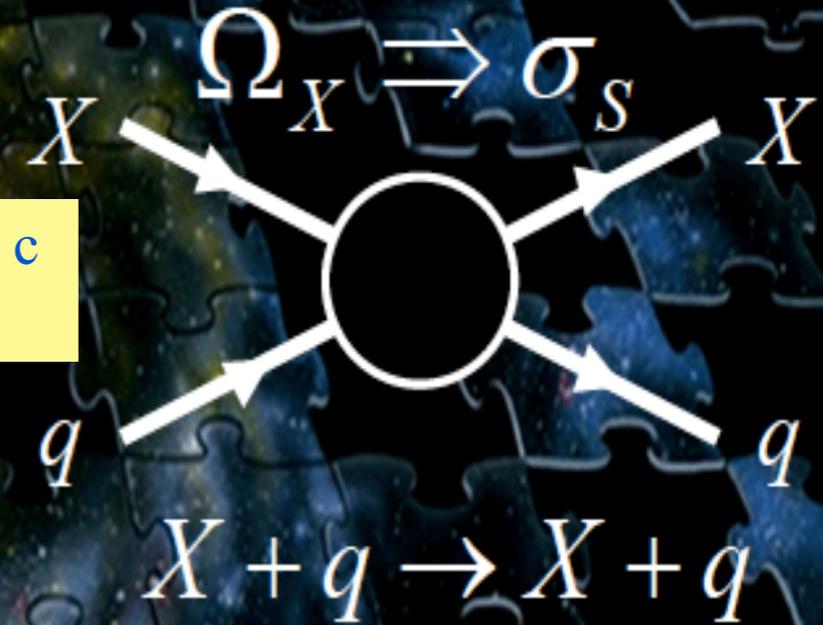
- Частицы ТМ не участвуют в сильных взаимодействиях и не испускают свет.
- В силу этого они не могут образовывать компактных объектов

Поиск частиц тёмной материи

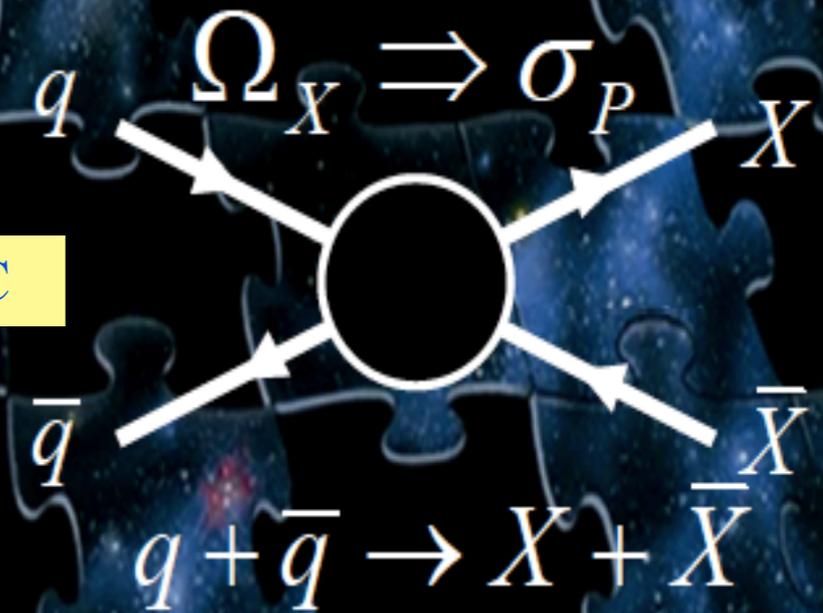
Аннигиляция \rightarrow новая компонента в космических лучах



Прямое вз-е с веществом



Рождение на LHC



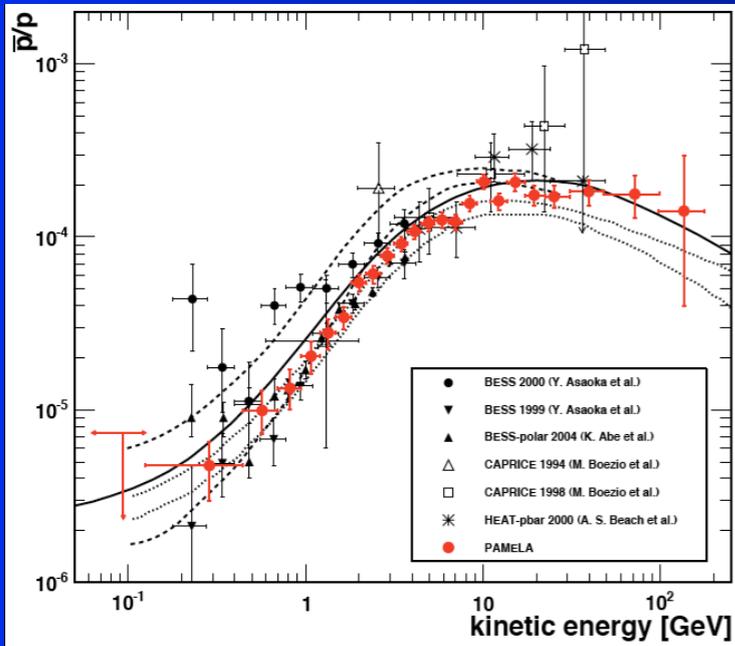
R. Kolb

Сигнал пока отсутствует

Поиск WIMP'ов

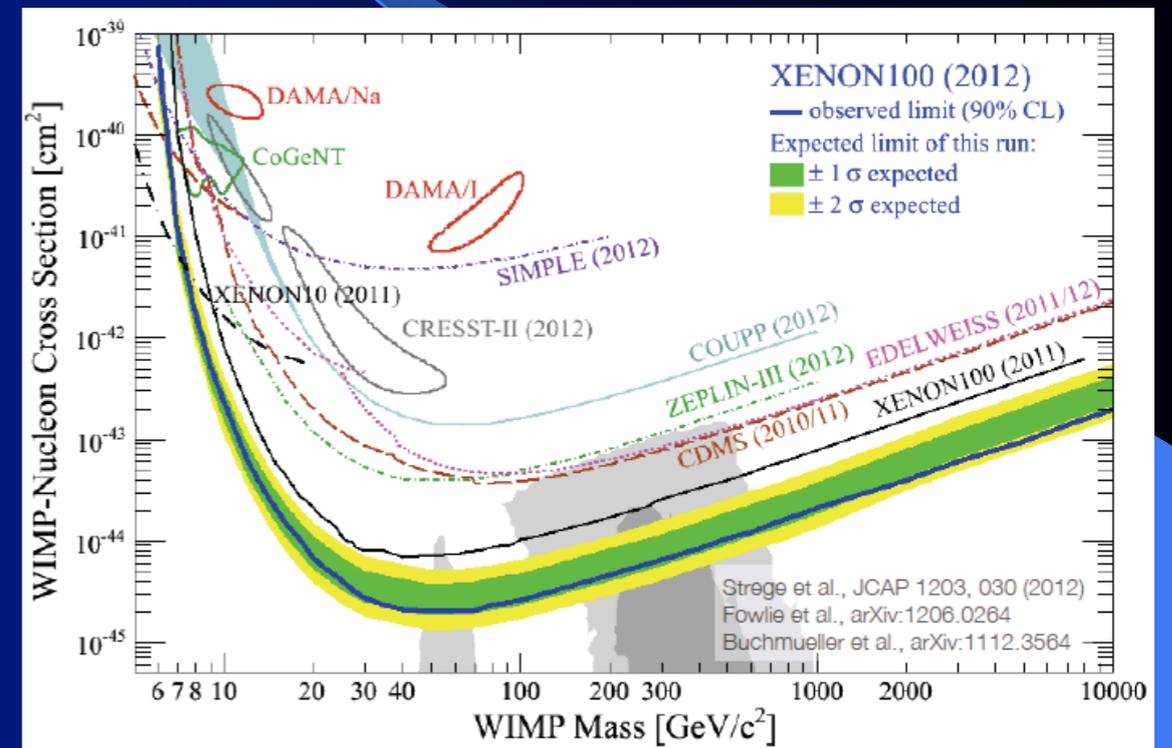
WIMP - Weakly Interactive Massive Particle

Аннигиляция ТМ в гало галактики

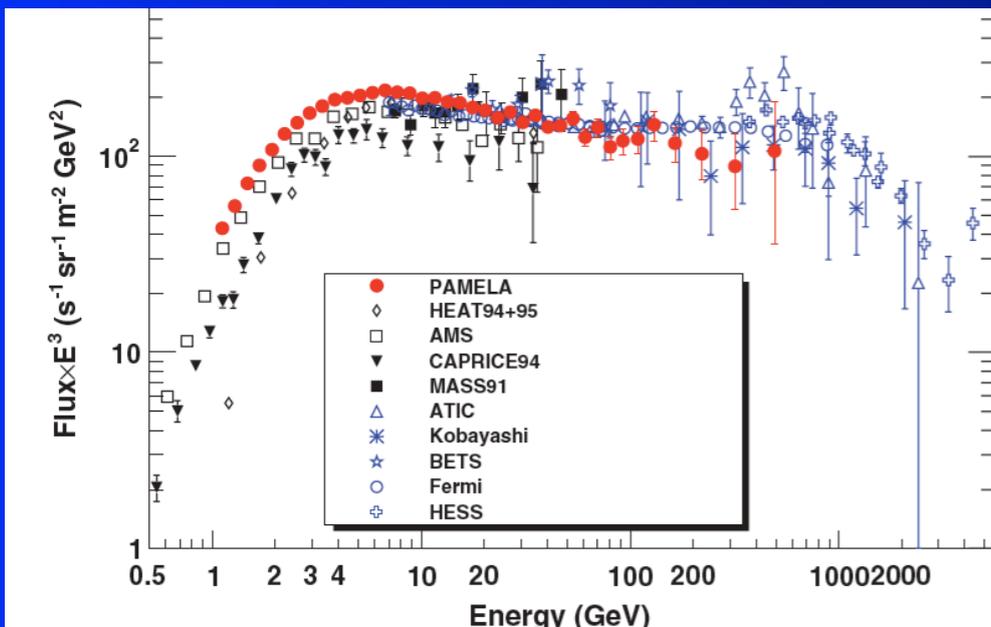


Антипротоны и позитроны
в космических лучах

Взаимодействие ТМ с веществом



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



Симметрии

Поиски новой физики являются поисками новой симметрии Природы!

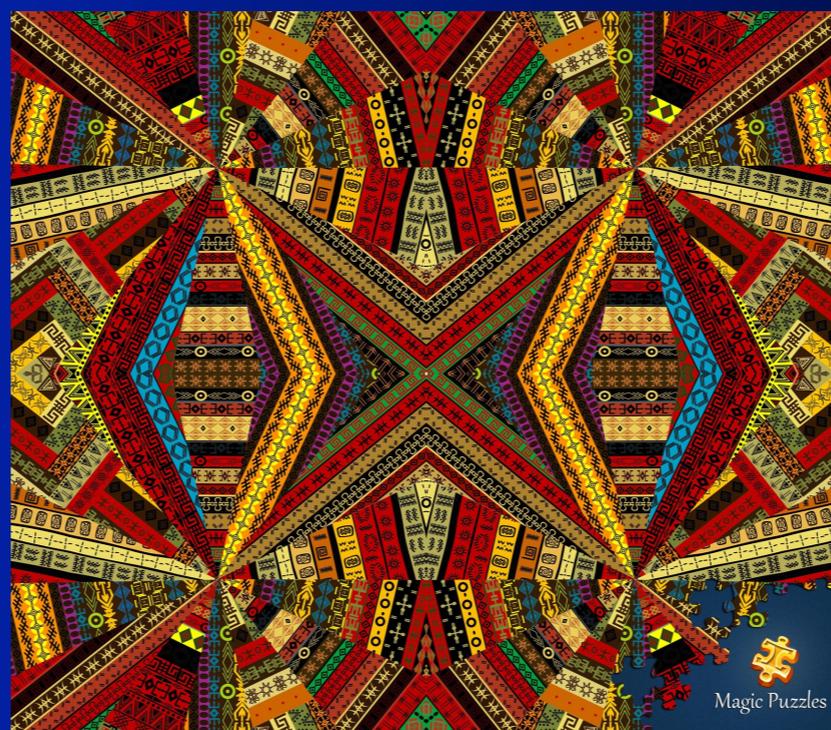
Симметрии

Поиски новой физики являются поисками новой симметрии Природы!



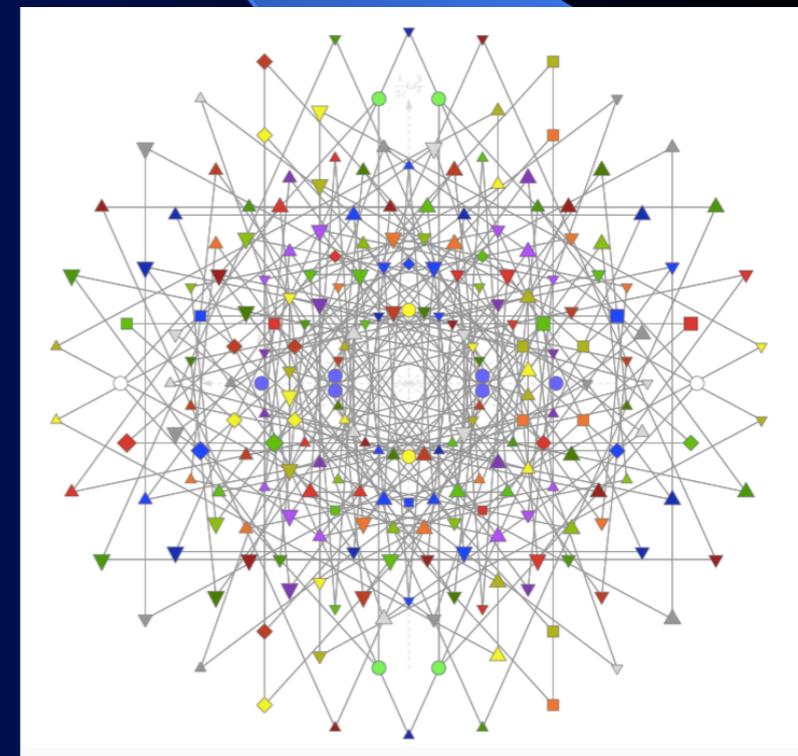
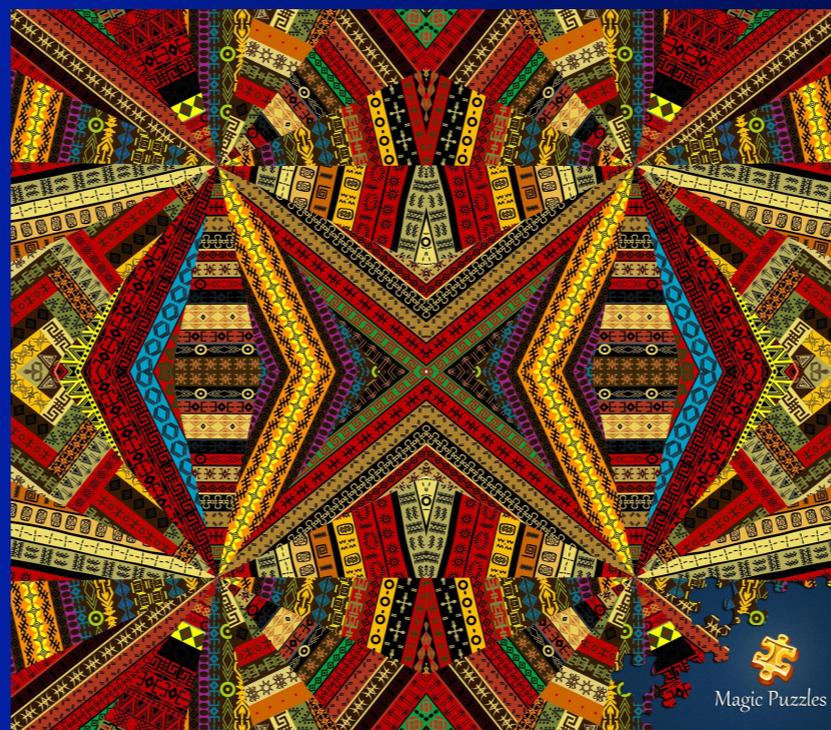
Симметрии

Поиски новой физики являются поисками новой симметрии Природы!



Симметрии

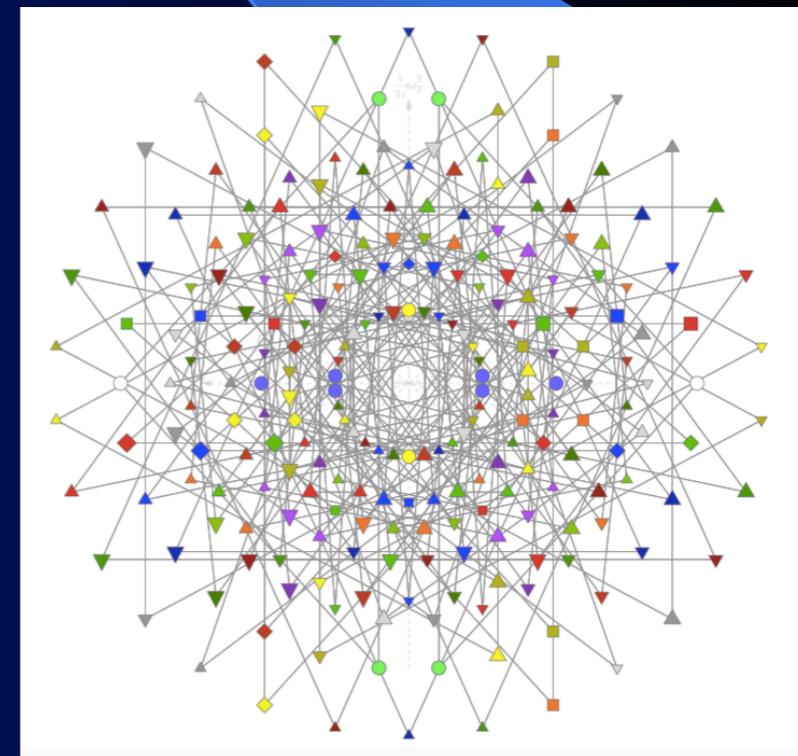
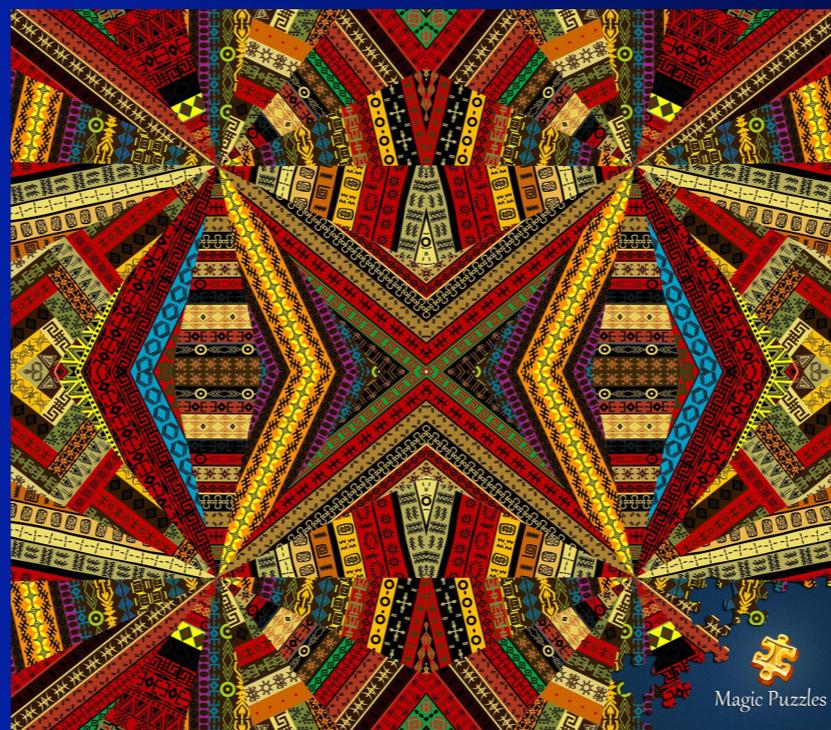
Поиски новой физики являются поисками новой симметрии Природы!



корни группы E_8

Симметрии

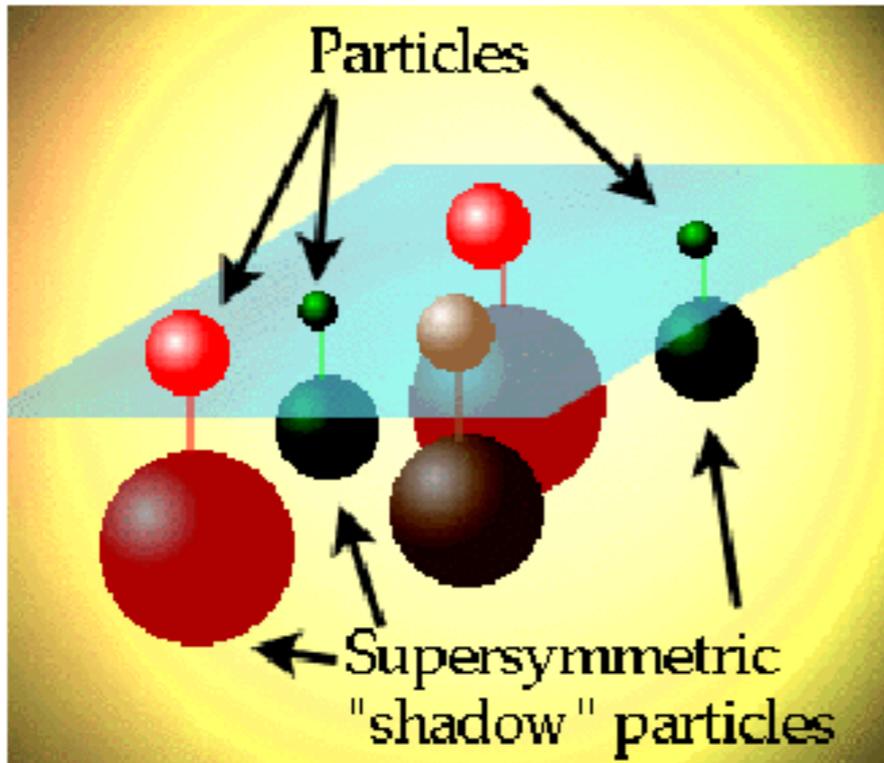
Поиски новой физики являются поисками новой симметрии Природы!



Симметрия может быть весьма сложной

корни группы E_8

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

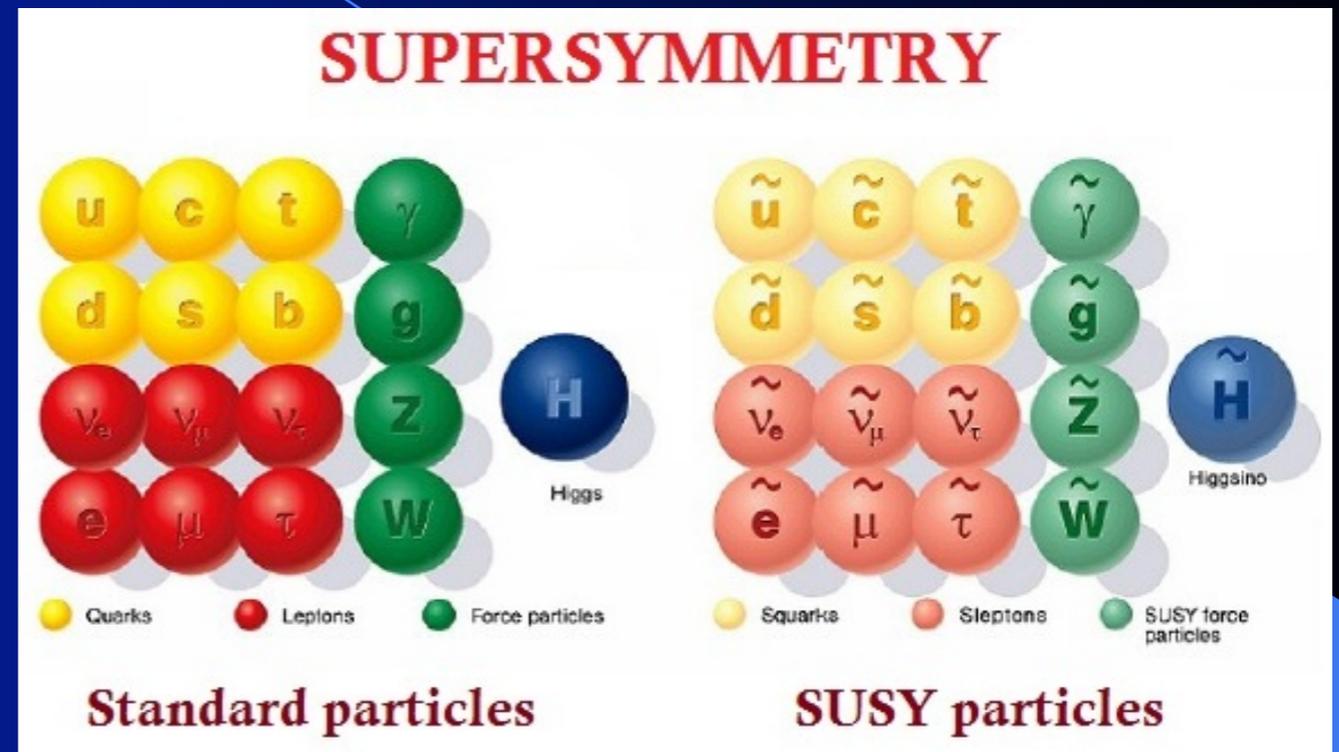
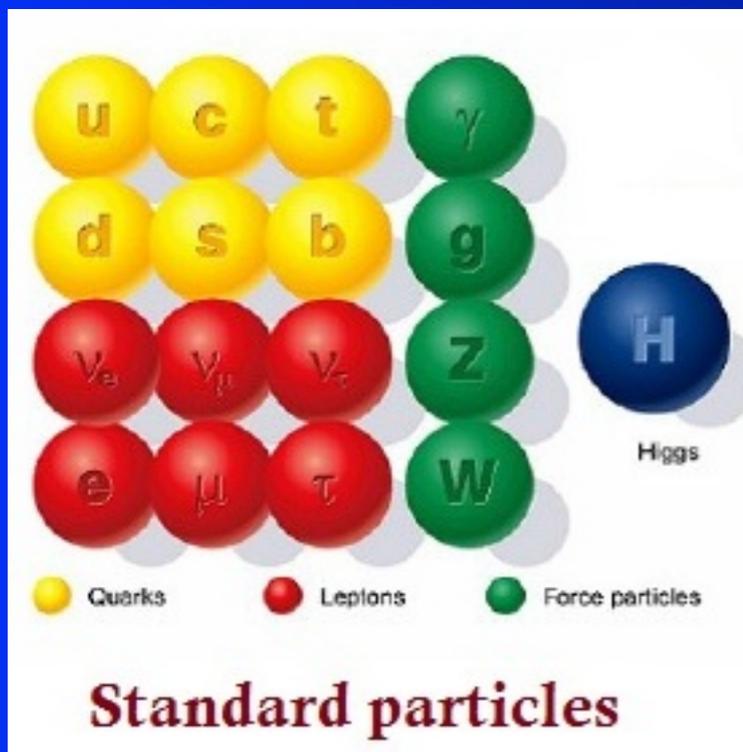
гравитон

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

гравитино

Суперсимметричная СМ

Суперсимметрия - это мечта о единой теории всех частиц и взаимодействий



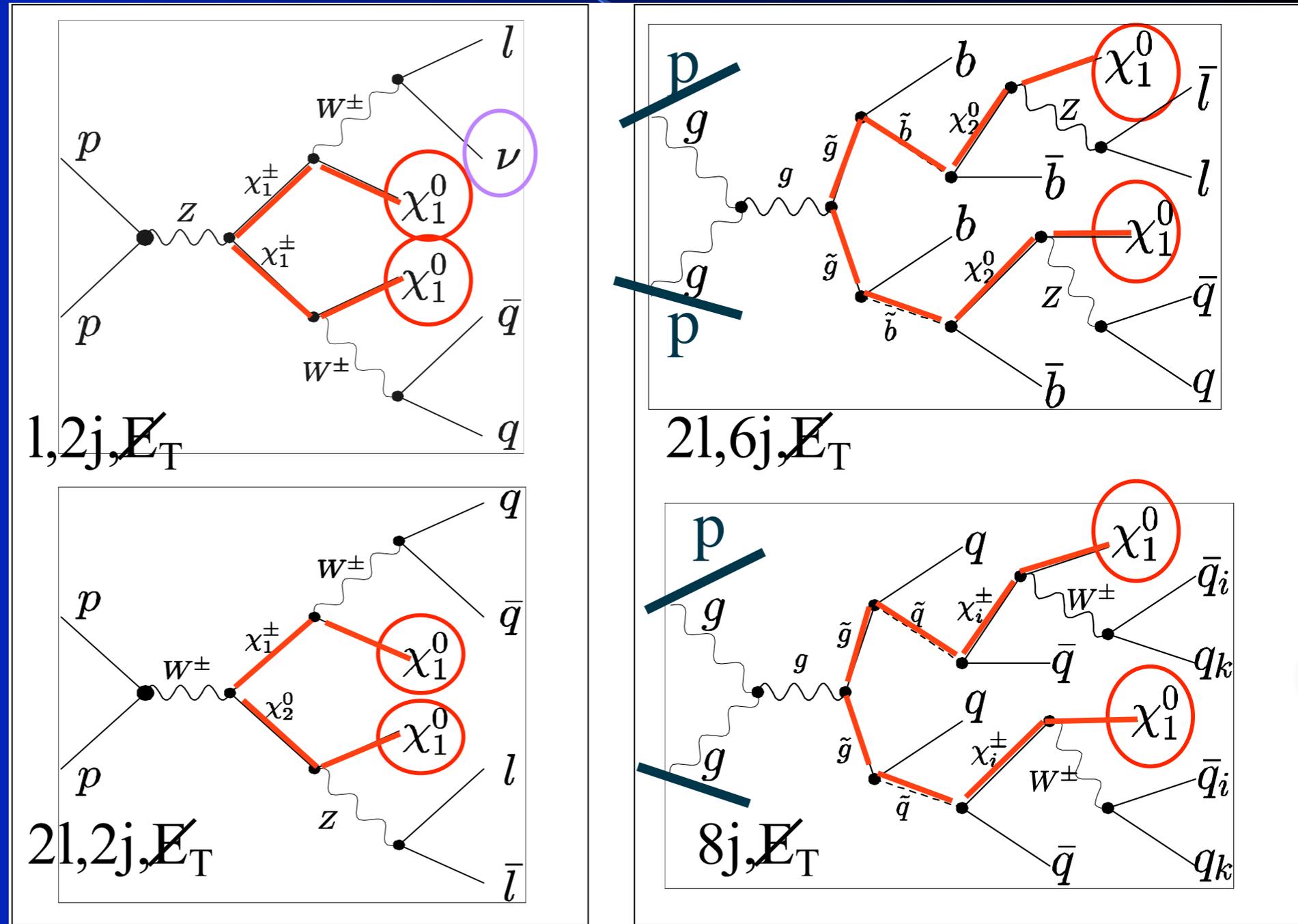
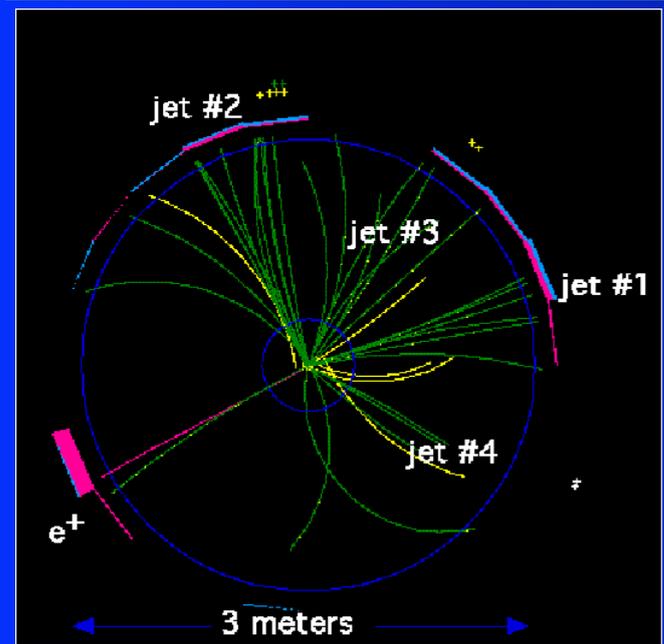
- «суперпартнёры» тяжелее обычных частиц и потому пока не рождаются на ускорителях

- Суперсимметрия остаётся наиболее мотивированным и проработанным расширением СМ в физике частиц

📌 Локальная суперсимметрия - это теория (супер) гравитации!

- Теория супергравитации включает в себя все известные частицы и взаимодействия

Рождение суперчастиц на коллайдерах



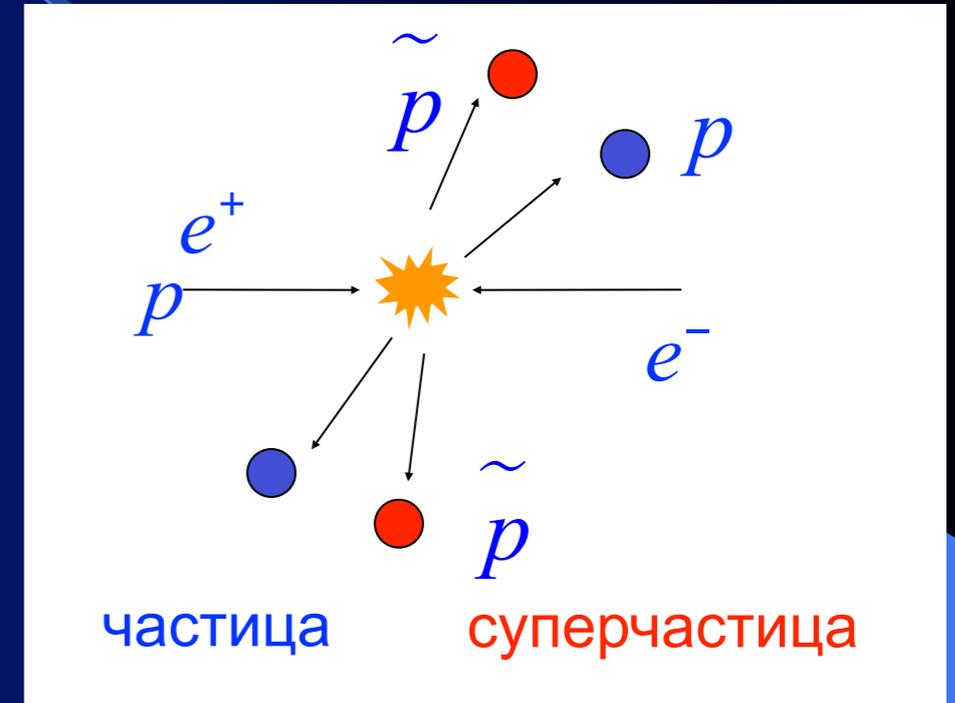
Красным цветом показаны суперпартнёры

Суперсимметричная тёмная материя

- Суперчастицы рождаются парами
- Легчайшая суперчастица - стабильна

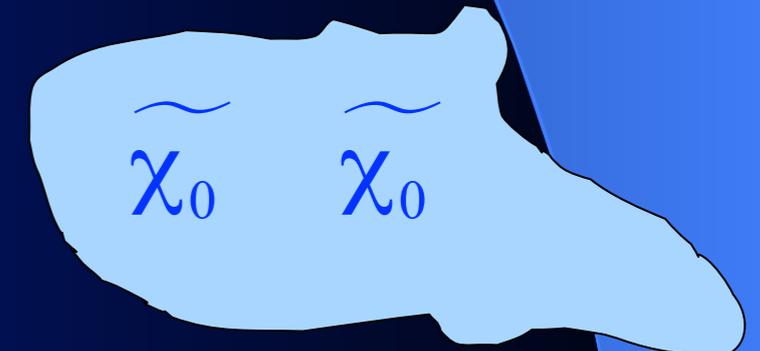


- Легчайшая суперчастица должна быть нейтральна - наилучший кандидат есть нейтралино (фотино или хиггсино)
- Она могла бы выжить со времени Большого взрыва и образовать Тёмную материю во Вселенной



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

↑ фотино
 ↑ зино
 ↑ хиггсино
 ↑ хиггсино

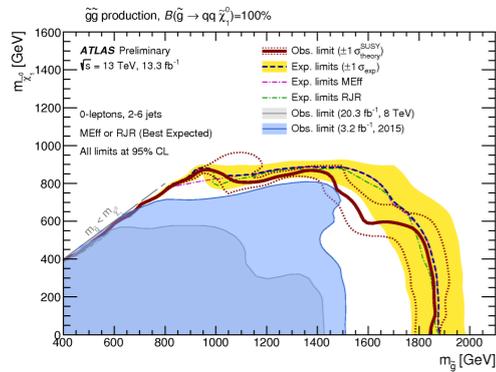
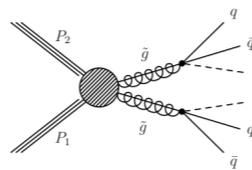


нейтралино - тяжёлая (~ 100 масс протона), нейтральная, стабильная слабо взаимодействующая частица

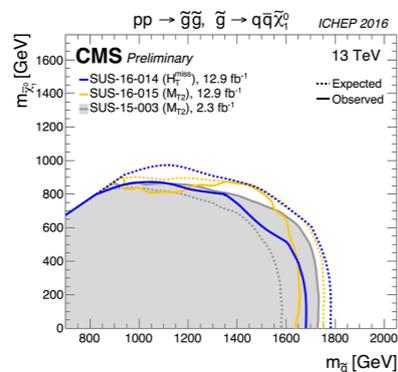
Суперсимметрия на ЛНС

Glauino decays to qq+LSP

Summary of decays to light quarks + LSP



ATLAS-CONF-2016-078



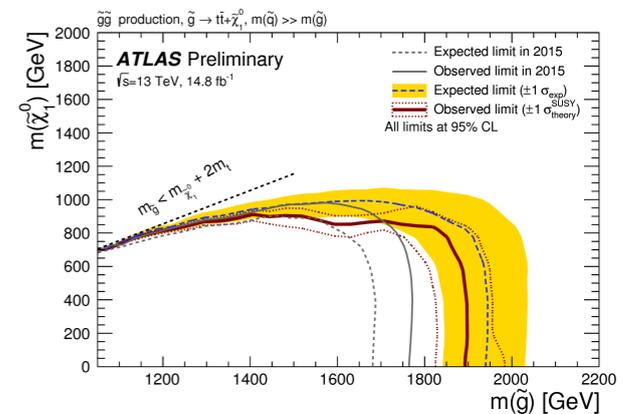
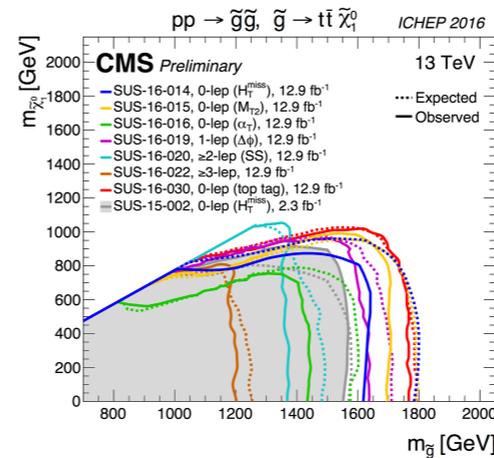
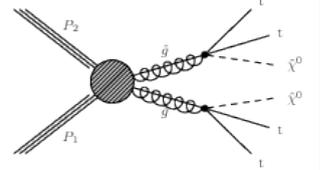
CMS-SUS-16-014
CMS-SUS-16-015

Glauino decays to tt+LSP

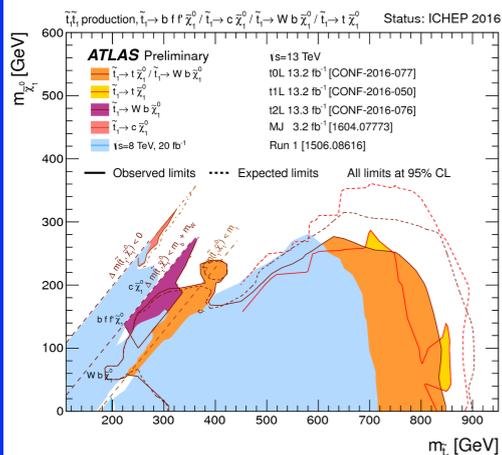
CMS summary

ATLAS multi-b

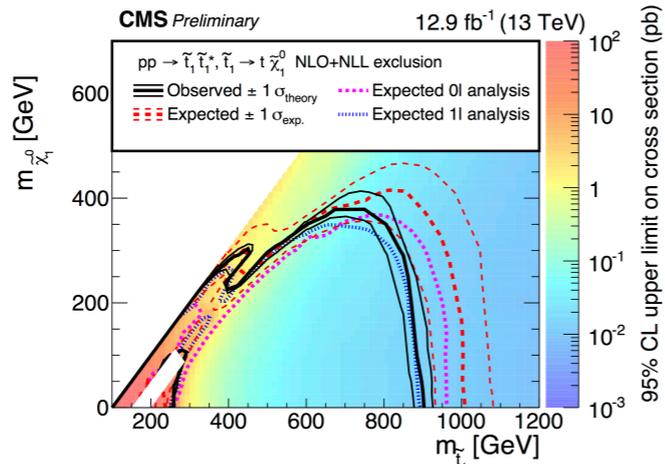
ATLAS-CONF-2016-052



Top squarks - summaries



ATLAS summary



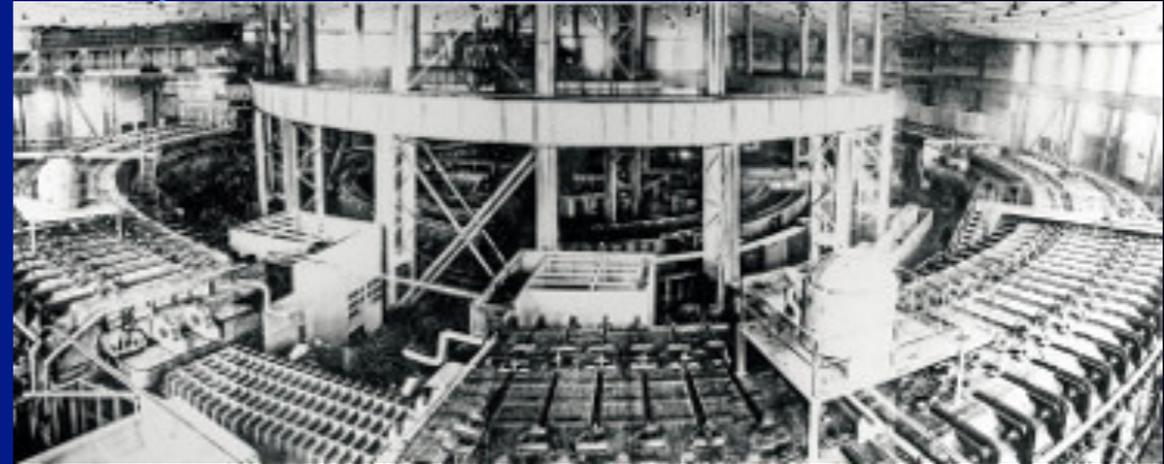
CMS 0l+1l combination
for 2-/3-body decay

- Ограничения на массы сильно взаимодействующих суперпартнёров достигли 1-2 ТэВа,
- Ограничения на массы слабо взаимодействующих суперпартнёров - нескольких сотен ГэВ
- Пока нет никаких признаков суперсимметрии

Ускорители протонов



BNL Cosmotron (1952-1966) 3.3 GeV



Синхрофазотрон Дубна ОИЯИ 1957 10 ГэВ



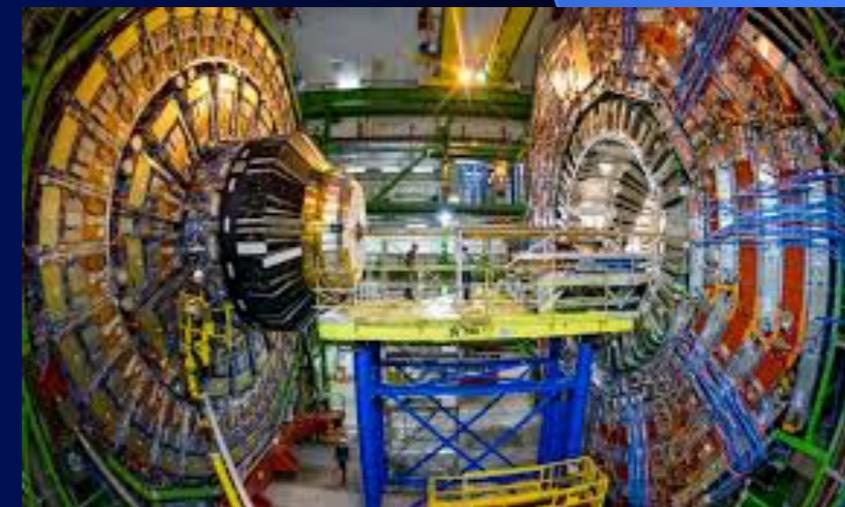
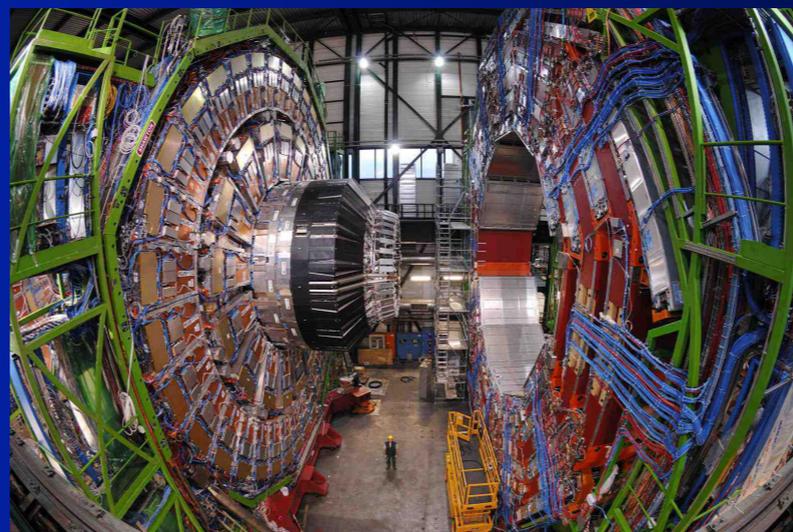
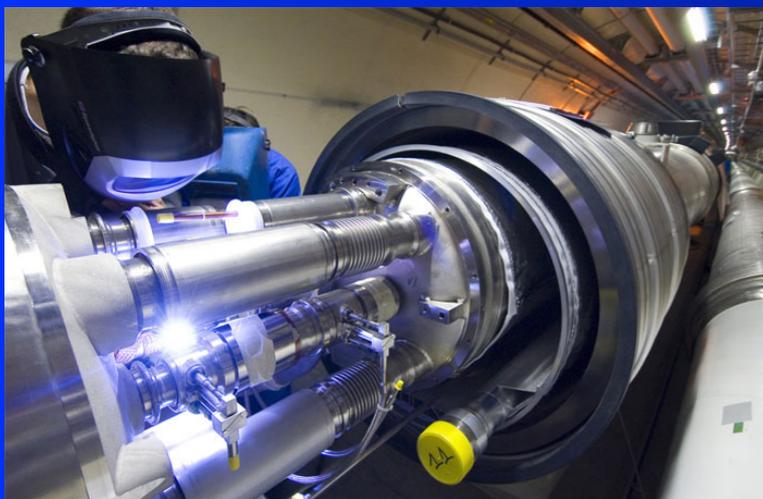
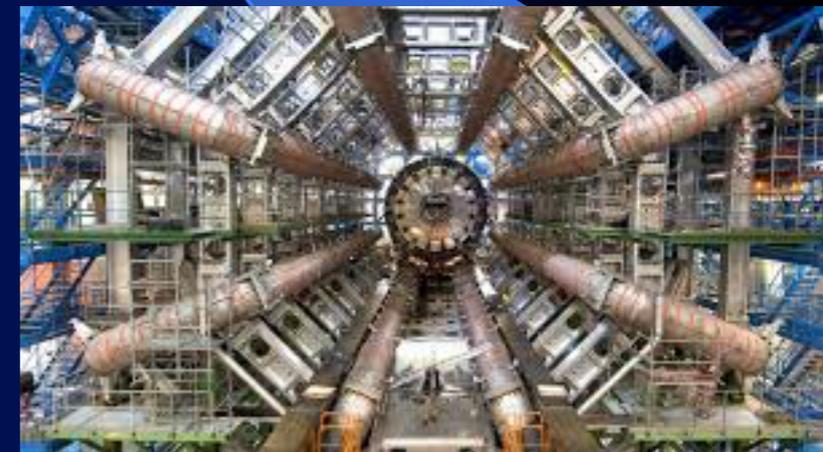
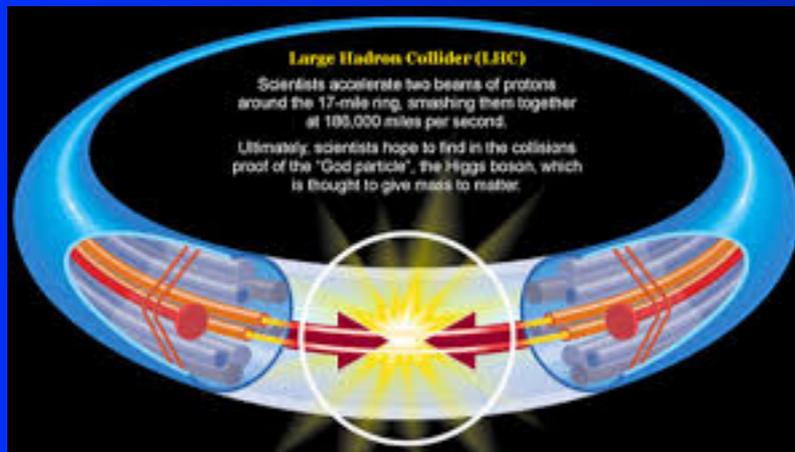
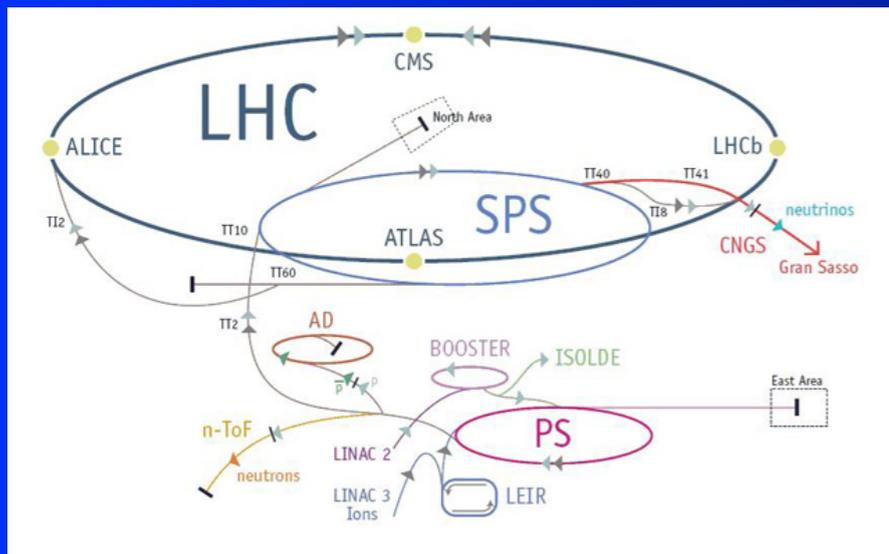
Синхрофазотрон Протвино ИФВЭ 1967 70 ГэВ



Super-proton-synchrotron CERN 1976 450 ГэВ

Большой адронный коллайдер

Большой адронный коллайдер ЦЕРН 2009- 14 000 ГэВ



Новые идеи в физике элементарных частиц

- Новые симметрии:
новые пространственные симметрии (суперсимметрия)
новые внутренние симметрии (теории Великого объединения)
- Новые частицы:
суперпартнеры
хиггсовские бозоны
аксионы
частицы тёмной материи
- Новые измерения пространства:
компактные измерения, браны
- Новые парадигмы:
нелокальные объекты (струны, браны)

Будущие большие проекты в физике элементарных частиц

Будущие ускорители

Коллайдеры тяжёлых ионов

Relativistic Heavy Ion Collider at Brookhaven National Laboratory (BNL), USA

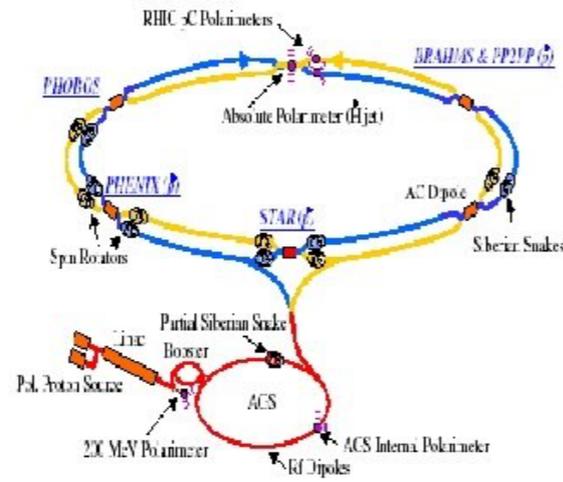
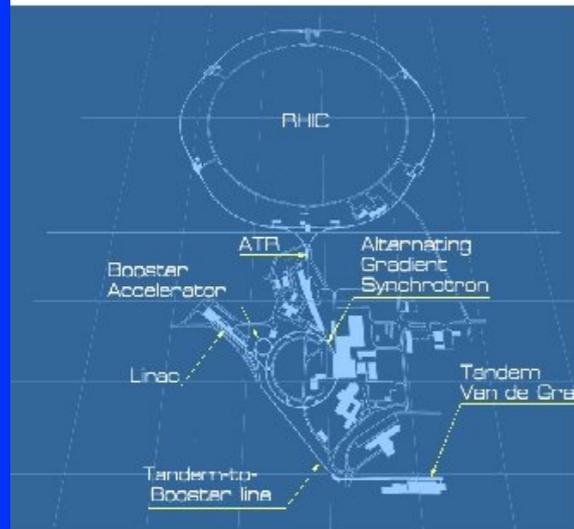
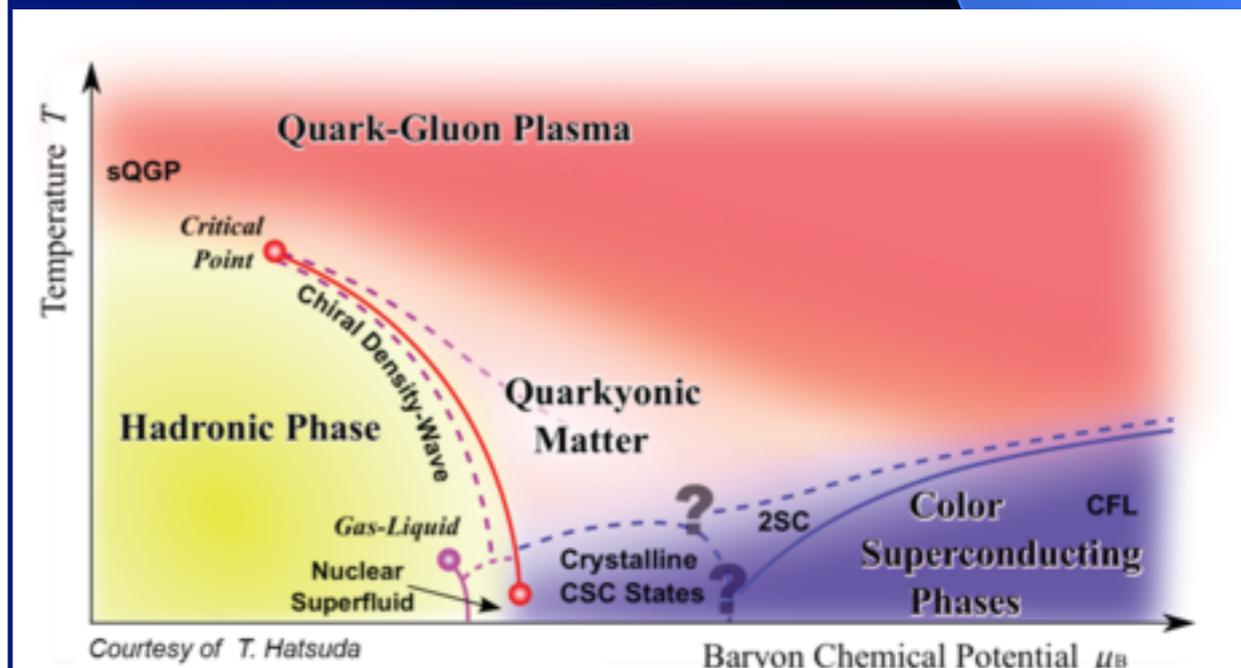
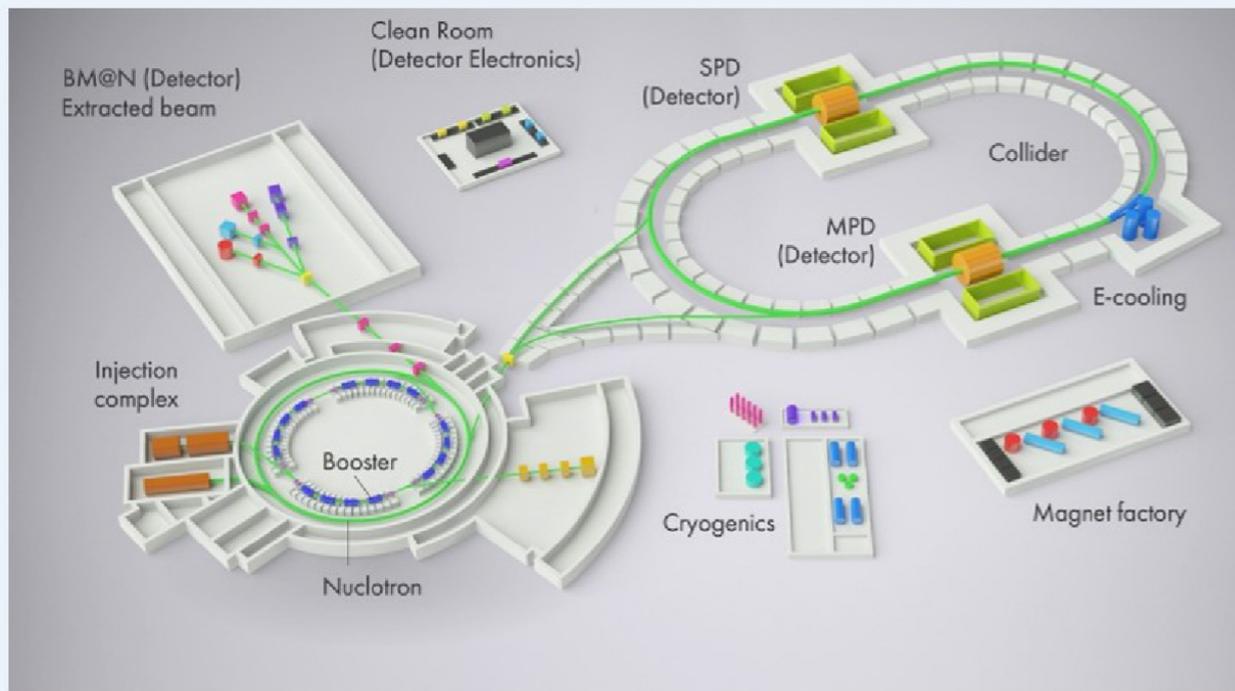
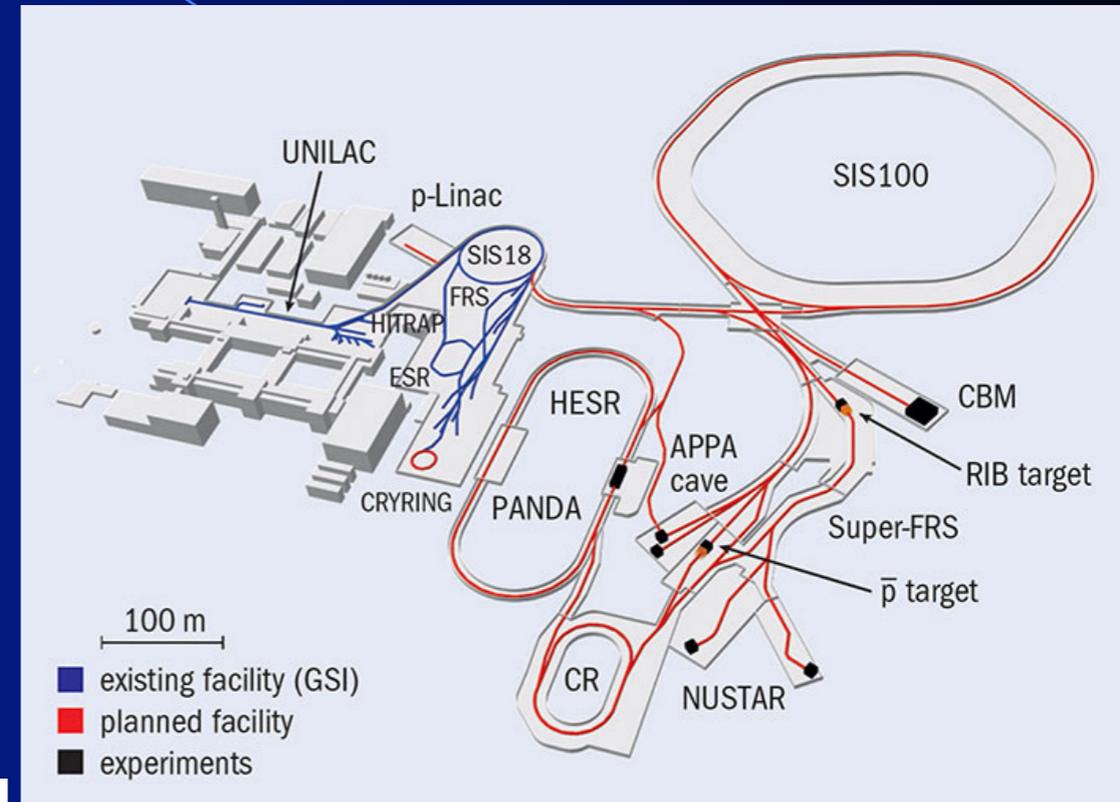
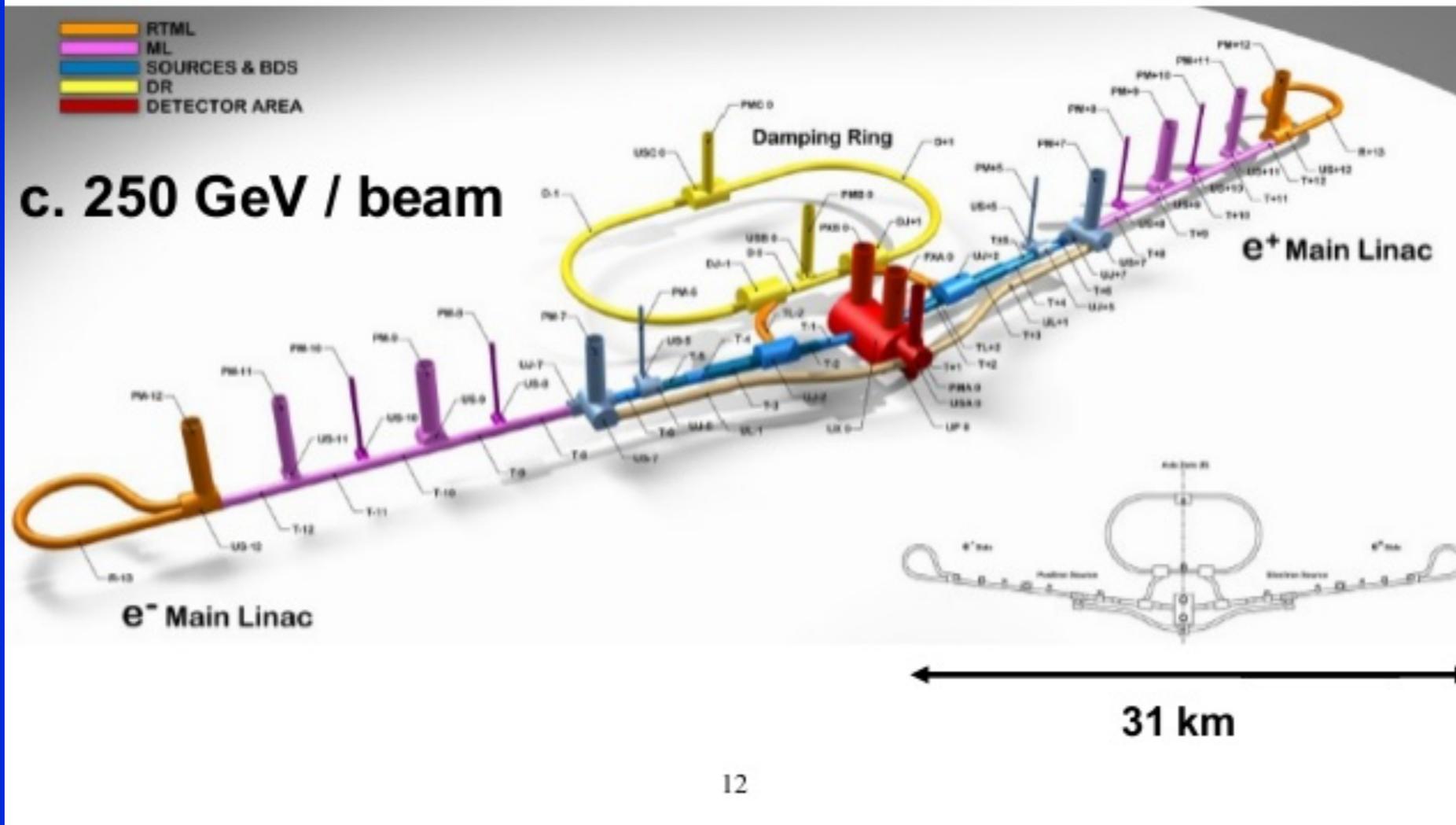


Figure 1. Schematic layout of ENL complex for polarized proton operations. Courtesy of MacKay (private communication) and BNL Collider Accelerator Department.



Electron-Positron Linear Collider (JAPAN)

International Linear Collider (ILC)





Future Circular Colliders (FCC)

Conceptual design study of a ~100 km ring:

❑ **pp collider (FCC-hh):** ultimate goal

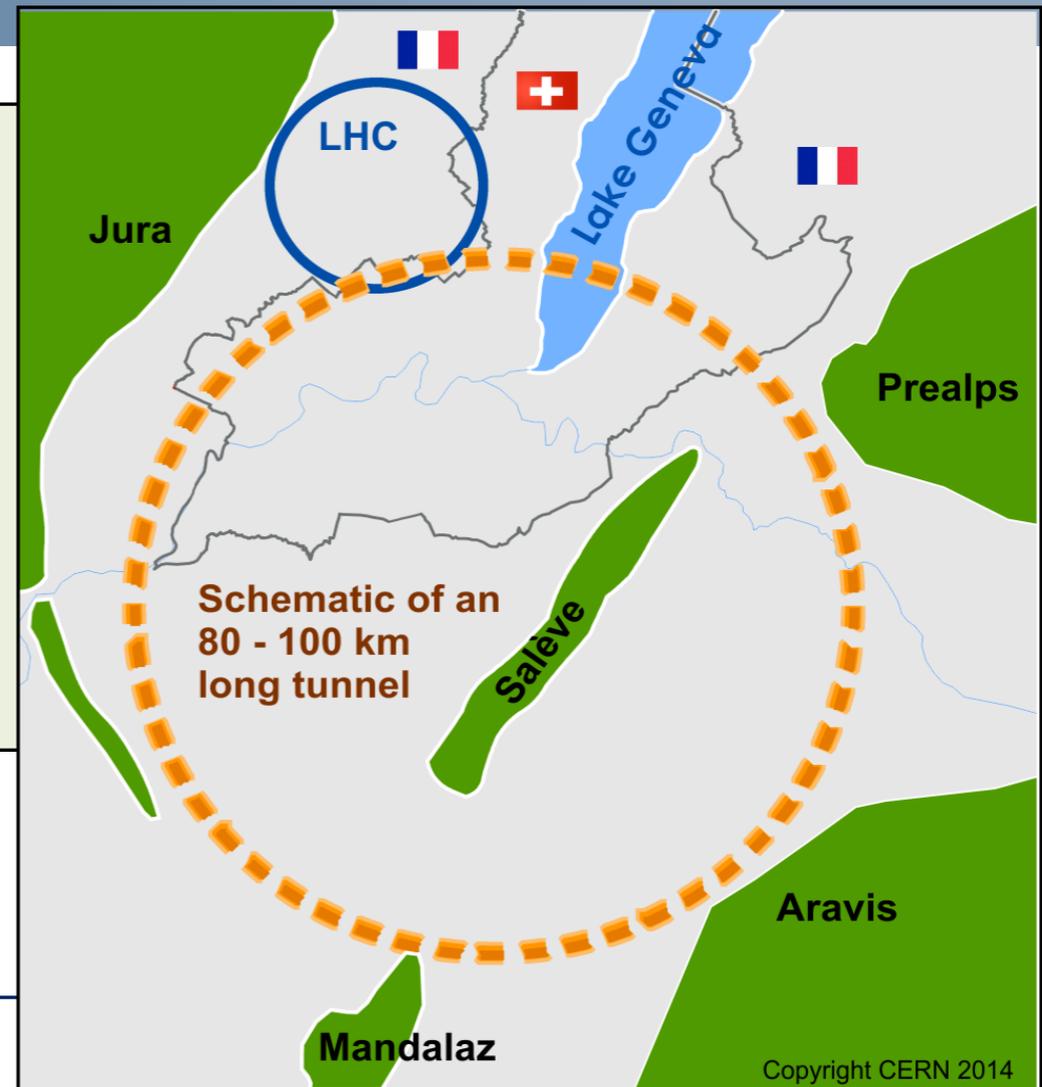
$\sqrt{s} \sim 100 \text{ TeV}$, $L \sim 2 \times 10^{35}$; 4 IP, $\sim 20 \text{ ab}^{-1}/\text{expt}$

❑ **e⁺e⁻ collider (FCC-ee):** possible first step

$\sqrt{s} = 90\text{-}350 \text{ GeV}$, $L \sim 200\text{-}2 \times 10^{34}$; 2 IP

❑ **pe collider (FCC-he):** option $\sqrt{s} \sim 3.5 \text{ TeV}$, $L \sim 10^{34}$

Main technology challenge: ~ 16 T magnets



FCC-hh: a ~100 TeV pp collider is expected to:

- ❑ explore directly the 10-50 TeV E-scale
- ❑ conclusive exploration of EWSB dynamics
- ❑ say the final word about heavy WIMP dark matter

FCC-ee: 90-350 GeV

- ❑ measure many Higgs couplings to few permill
- ❑ indirect sensitivity to E-scale up to $O(100 \text{ TeV})$ by improving by ~20-200 times the precision of EW parameters measurements, $\Delta M_W < 1 \text{ MeV}$, $\Delta m_{\text{top}} \sim 10 \text{ MeV}$

Поиски Новой физики: По какому пути пойти?

Поиски Новой физики: По какому пути пойти?



Поиски Новой физики: По какому пути пойти?

