

Новая физика

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт



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?



e^- e^+

В основе лежит простая и
элегантная
математическая схема

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	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)

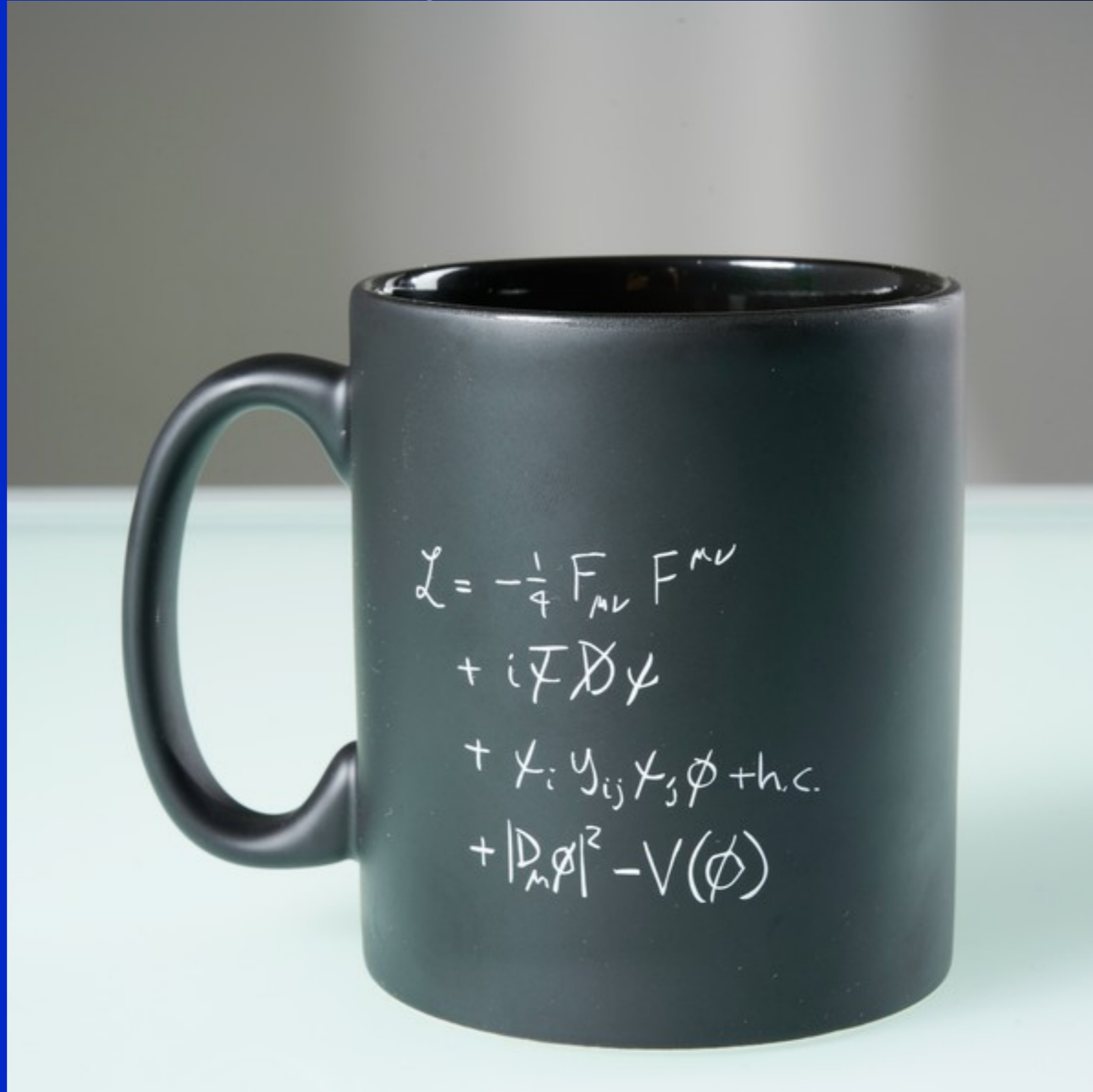
Силы

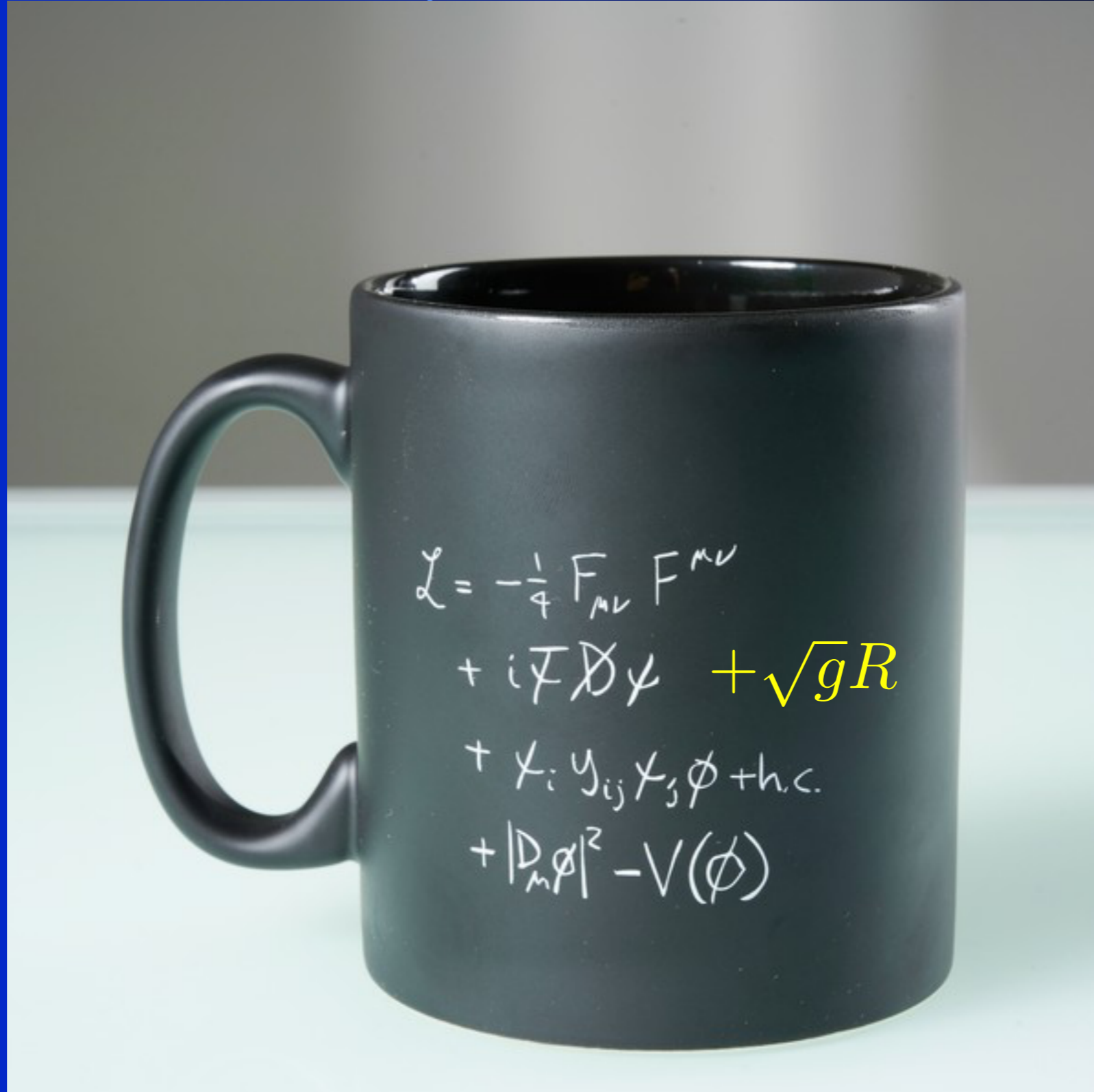
Электромагнитные

Сильные

Слабые

Гравитация





$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \sqrt{g}R \\ & + \chi_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_m \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

Стандартная Модель

ЛАГРАНЖИАН

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{Yukawa} + \mathcal{L}_{Higgs},$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{gauge} = & -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_{\mu\nu}^a - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_{\mu\nu}^i - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B_{\mu\nu} \\ & + i\bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha + i\bar{Q}_\alpha \gamma^\mu D_\mu Q_\alpha + i\bar{E}_\alpha \gamma^\mu D_\mu E_\alpha \\ & + i\bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha + i\bar{D}_\alpha \gamma^\mu D_\mu D_\alpha + (D_\mu H)^\dagger (D_\mu H), \\ & + i\bar{N}_\alpha \gamma^\mu \partial_\mu N_\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{Yukawa} = & y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H + y_{\alpha\beta}^D \bar{Q}_\alpha D_\beta H + y_{\alpha\beta}^U \bar{Q}_\alpha U_\beta \tilde{H} + h.c., \\ & + y_{\alpha\beta}^N \bar{L}_\alpha N_\beta \tilde{H} \end{aligned}$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V = m^2 H^\dagger H - \frac{\lambda}{2} (H^\dagger H)^2$$

Станда

ЛАГРАНЖИАН

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{gauge} + \dots$$

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} +$$

$$+ i \bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha +$$

$$+ i \bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha +$$

$$+ i \bar{N}_\alpha \gamma^\mu \partial_\mu N_\alpha$$

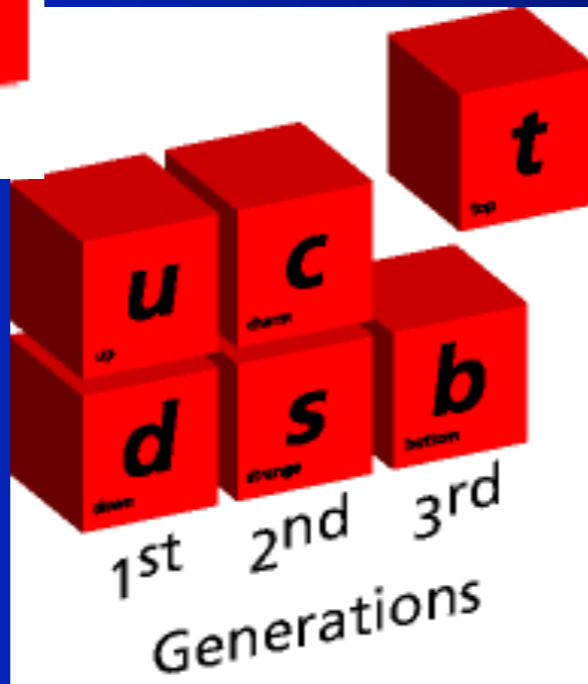
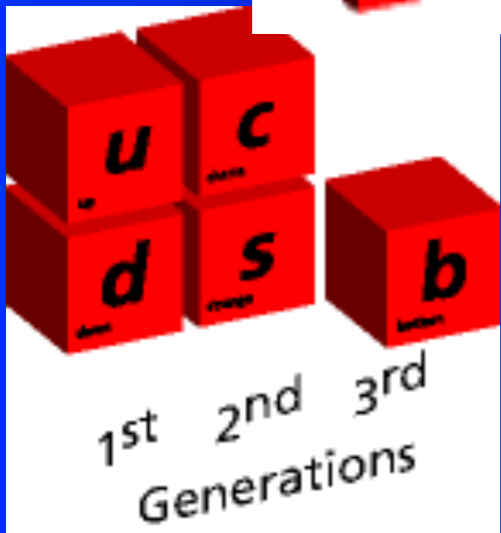
$$\mathcal{L}_{Yukawa} = y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H +$$

$$+ y_{\alpha\beta}^N \bar{L}_\alpha \Lambda_\beta$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V$$

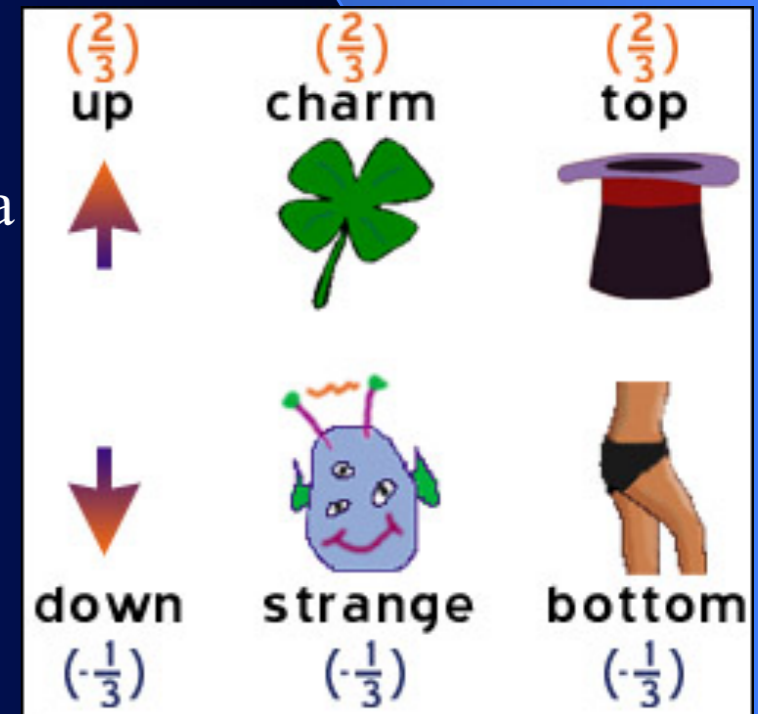
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\ & ig s_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\ & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\ & g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{8} g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\ & \frac{1}{2} ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\ & \frac{1}{2} g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\ & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+)) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\ & \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\ & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2} ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\ & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + \\ & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\ & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\ & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma^5) \hat{\nu}_\kappa - \\ & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma^5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\ & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\ & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\ & \frac{1}{2c_w} ig M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + ig M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\ & \frac{1}{2} ig M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) . \end{aligned}$$

Кварки — “кирпичики мироздания”

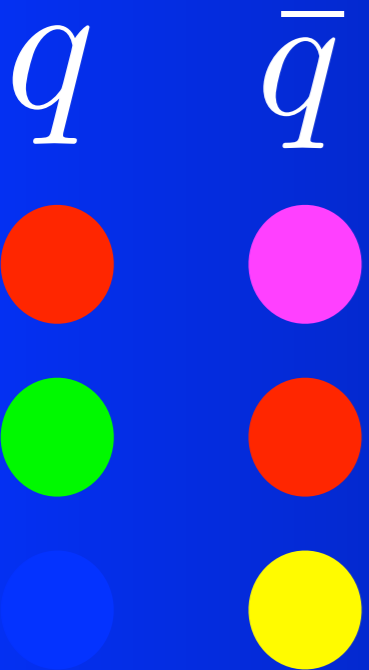


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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



Цветные кварки



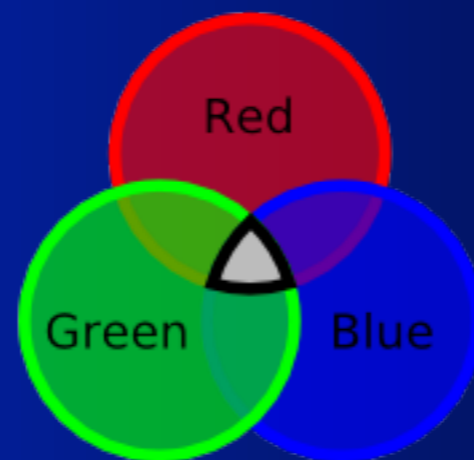
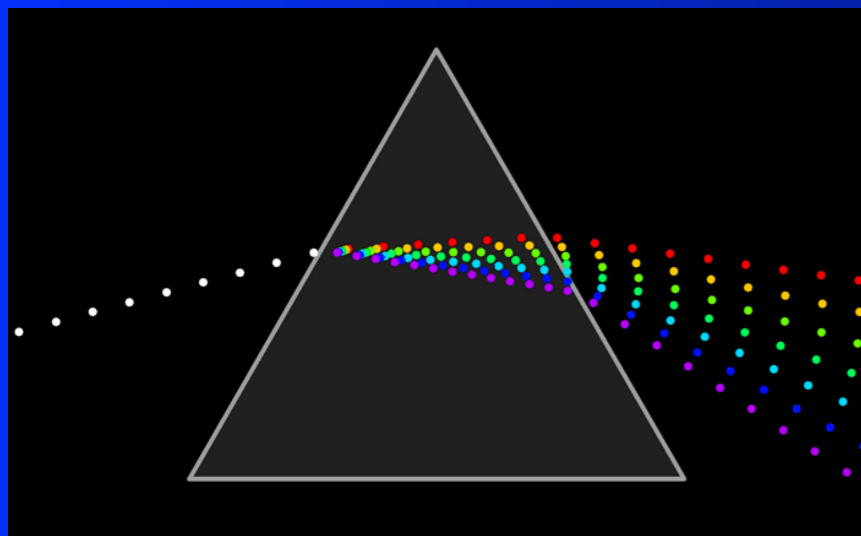
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

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

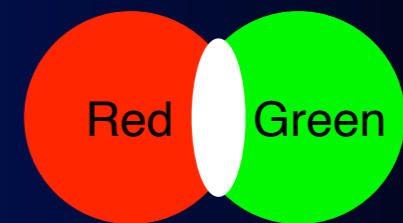
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

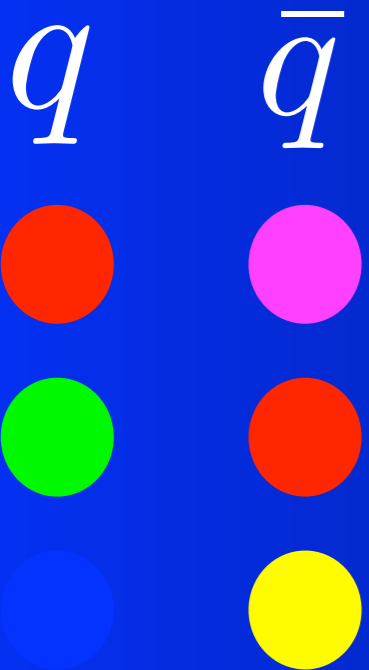


барион



МЕЗОН

Цветные кварки



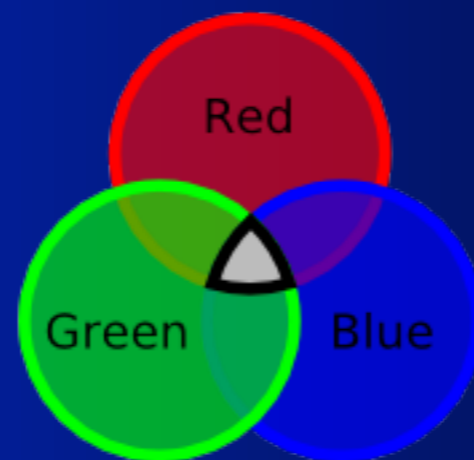
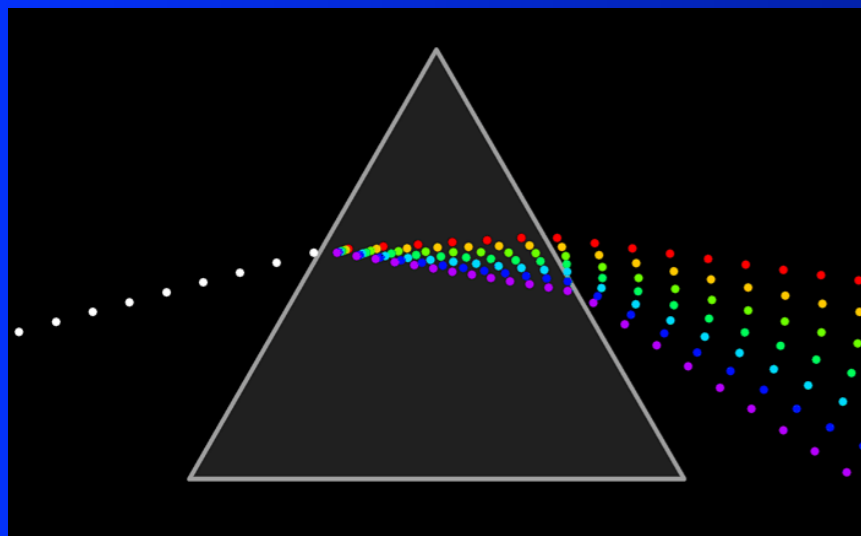
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

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

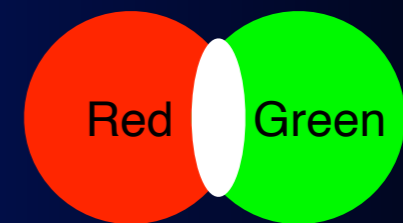
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

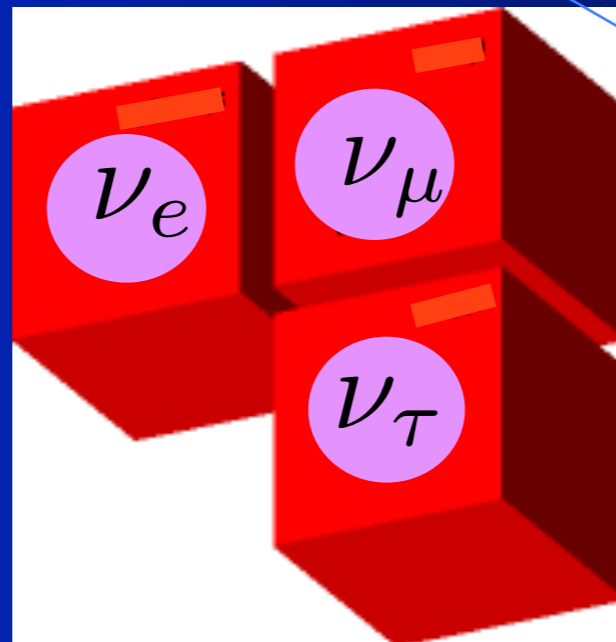
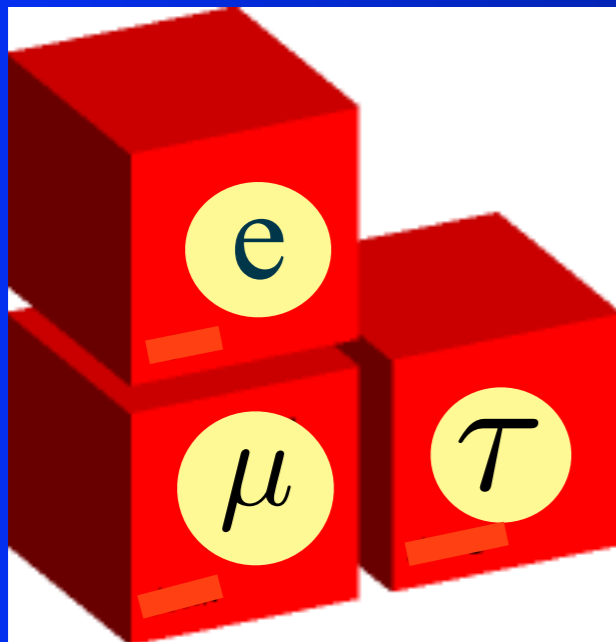


барион



МЕЗОН

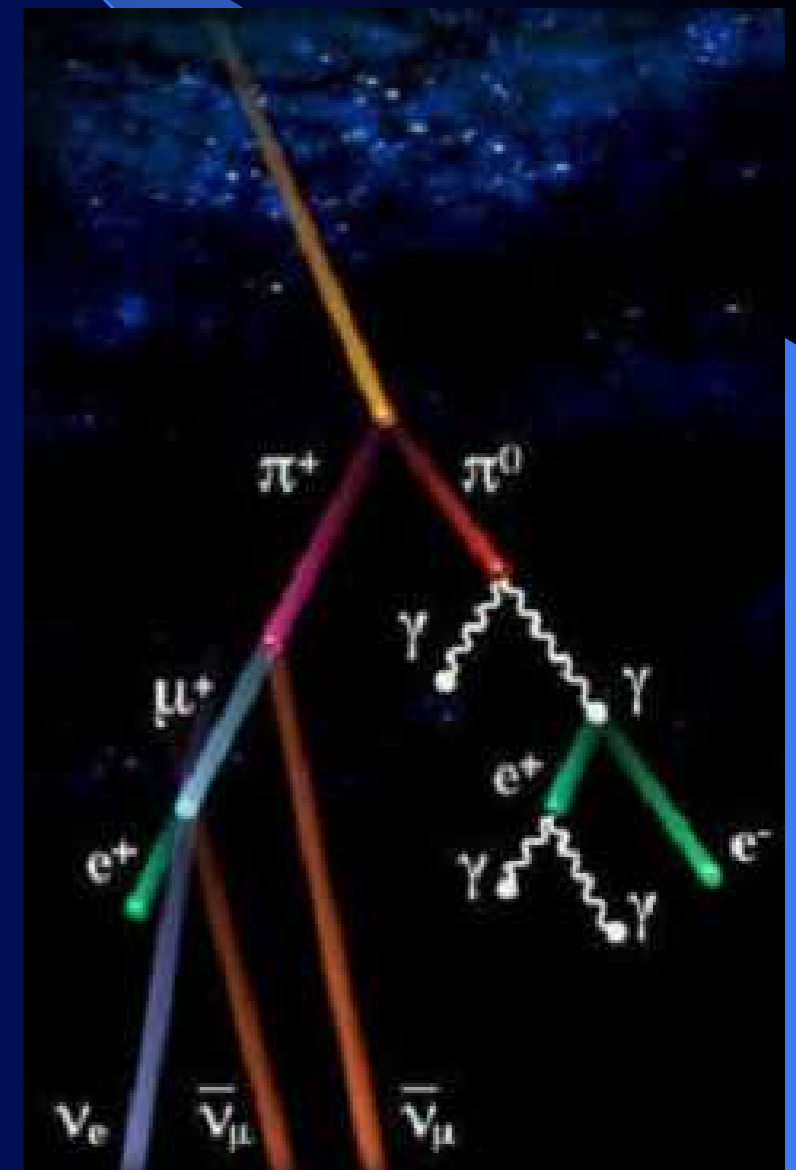
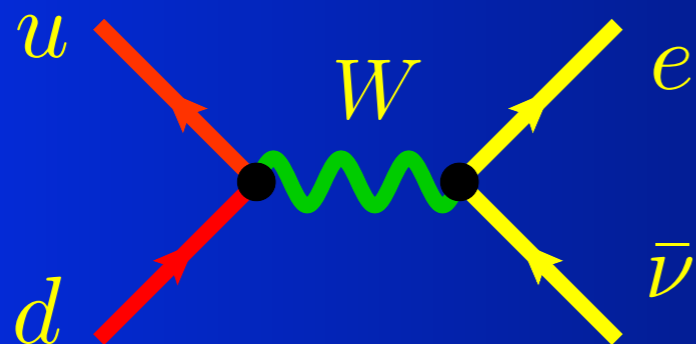
Лептоны от слова ΛΕΤΤΟΪ



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



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.

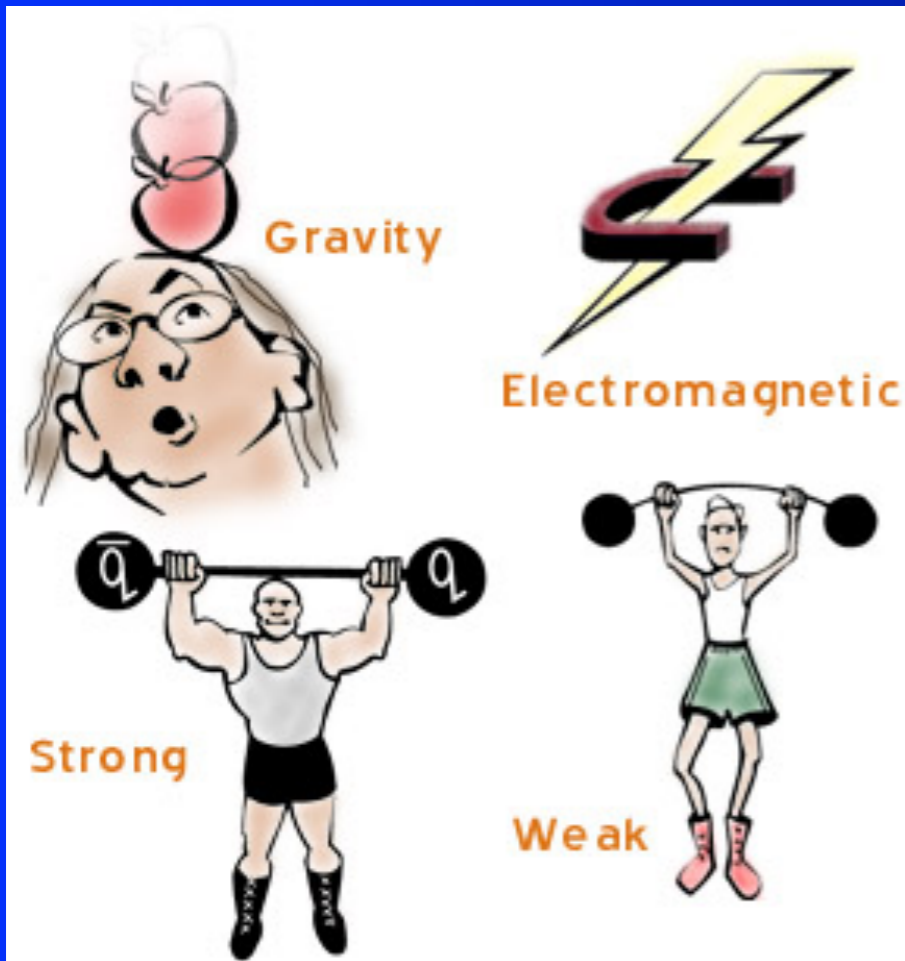
Загадка № 1:

Почему в природе
понадобились три поколения
элементарных частиц?

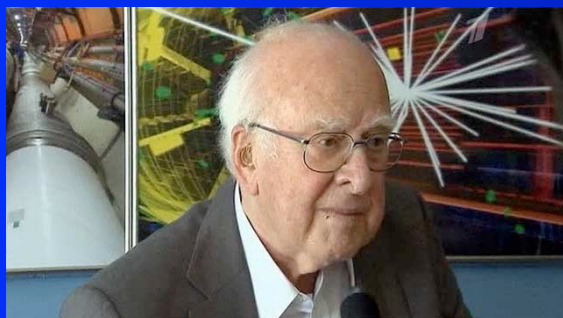
Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе

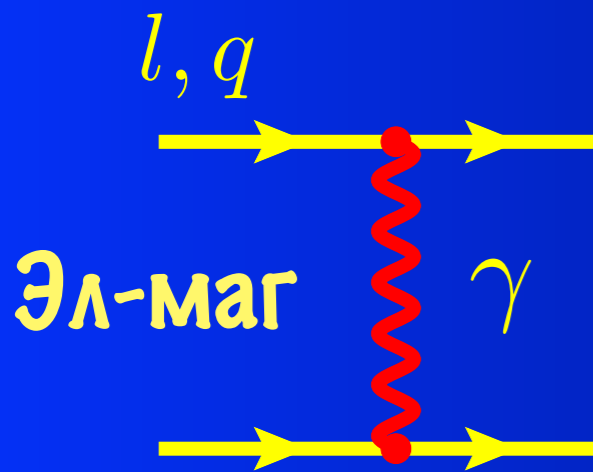


Пятая сила - обмен ХИГГСОВСКИМ БОЗОНОМ

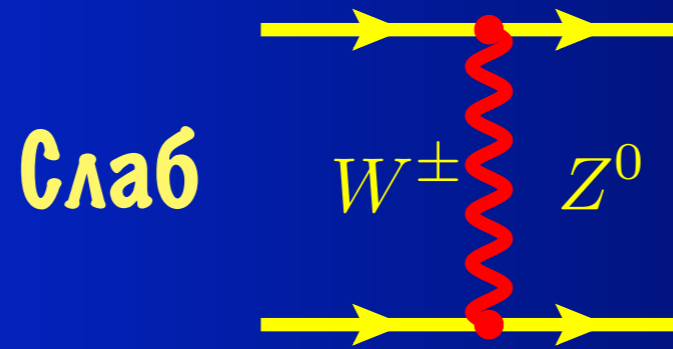


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

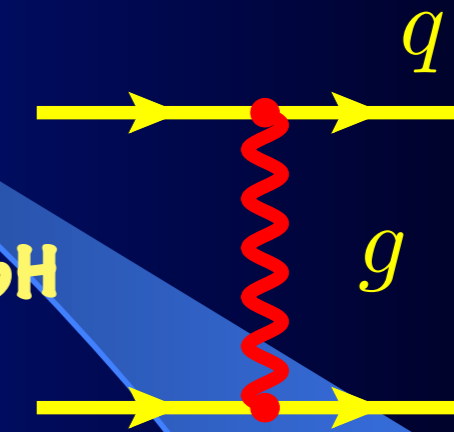
Пять фундаментальных сил Природы



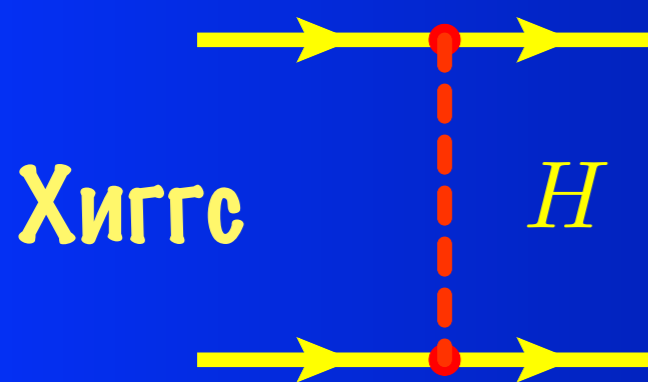
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



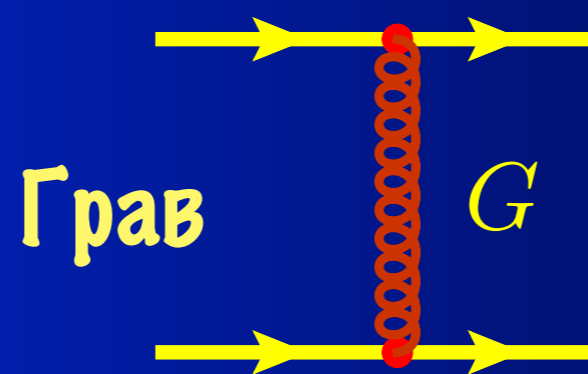
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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



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

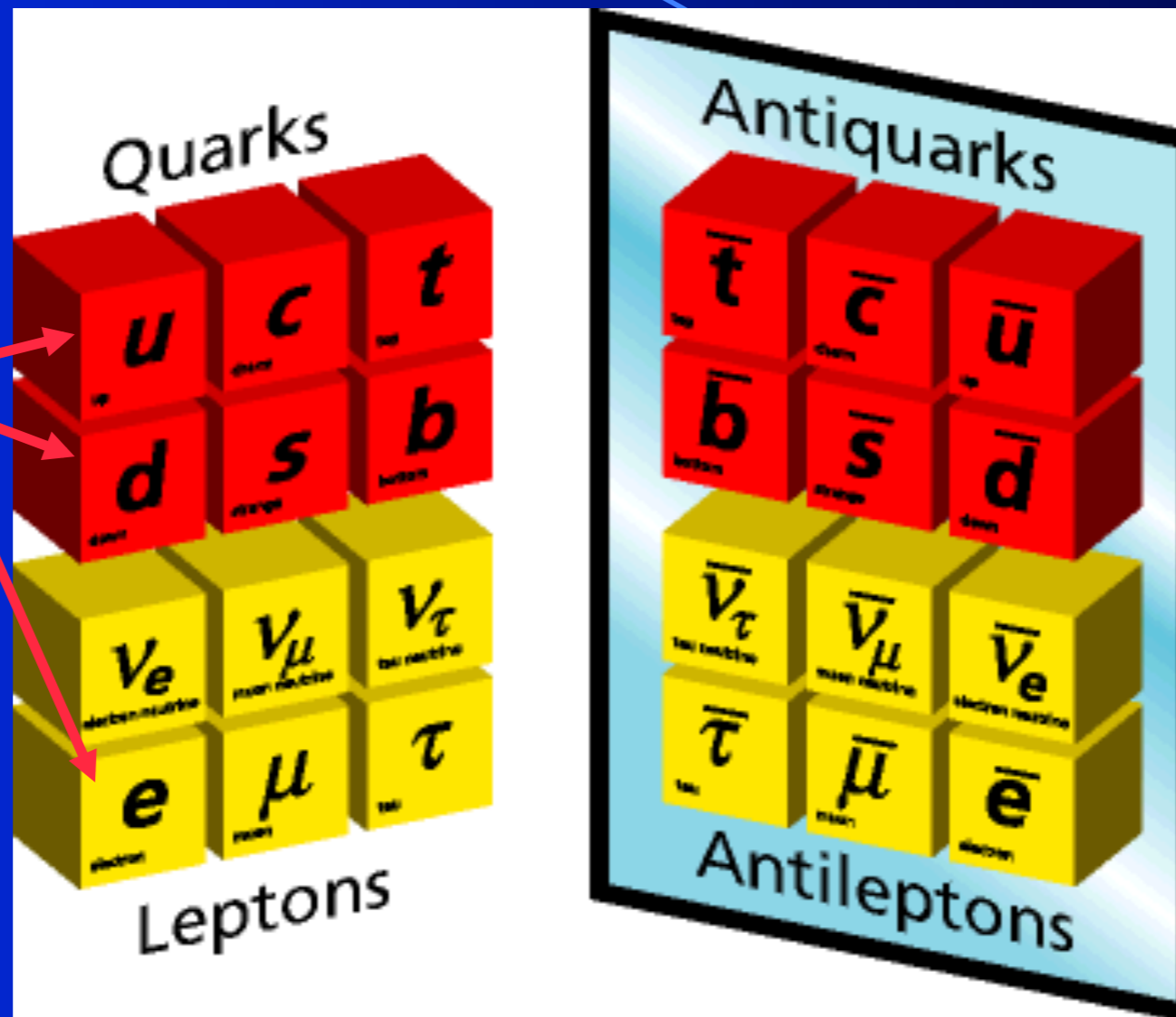
Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

Загадка № 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

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)



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!

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)

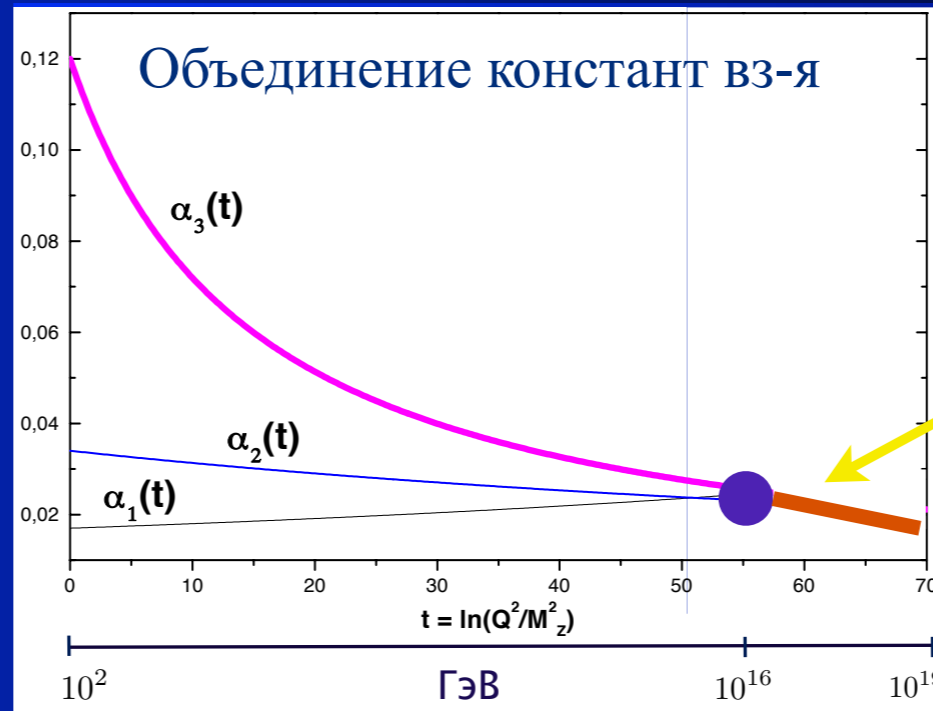
- Три различные силы: сильные, слабые и электромагнитные являются «ветвями» единой силы

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

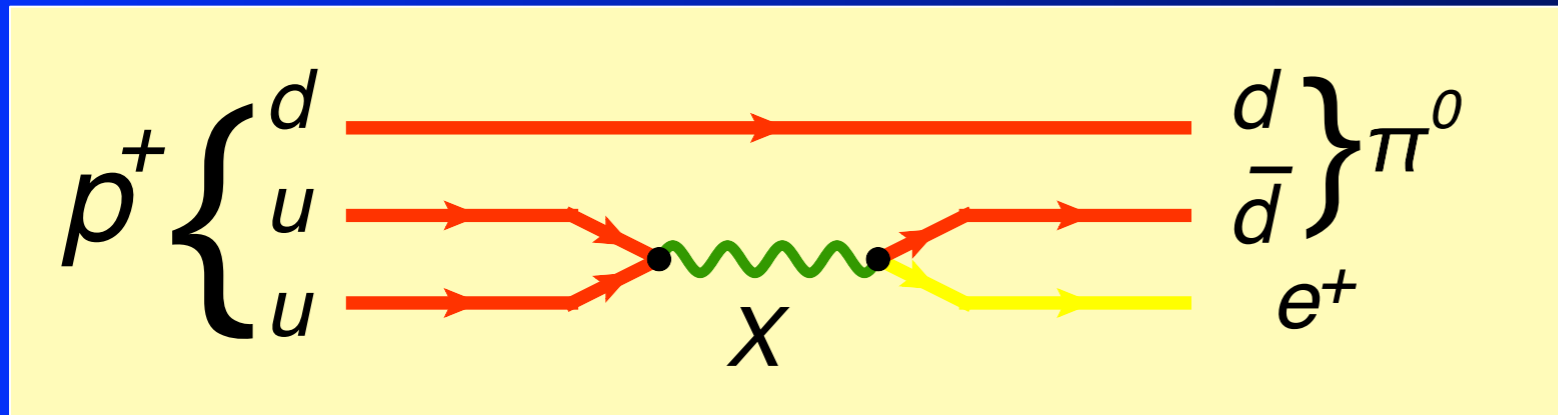
«объединение» констант вз-я - есть следствие их общего происхождения

Нестабильность протона

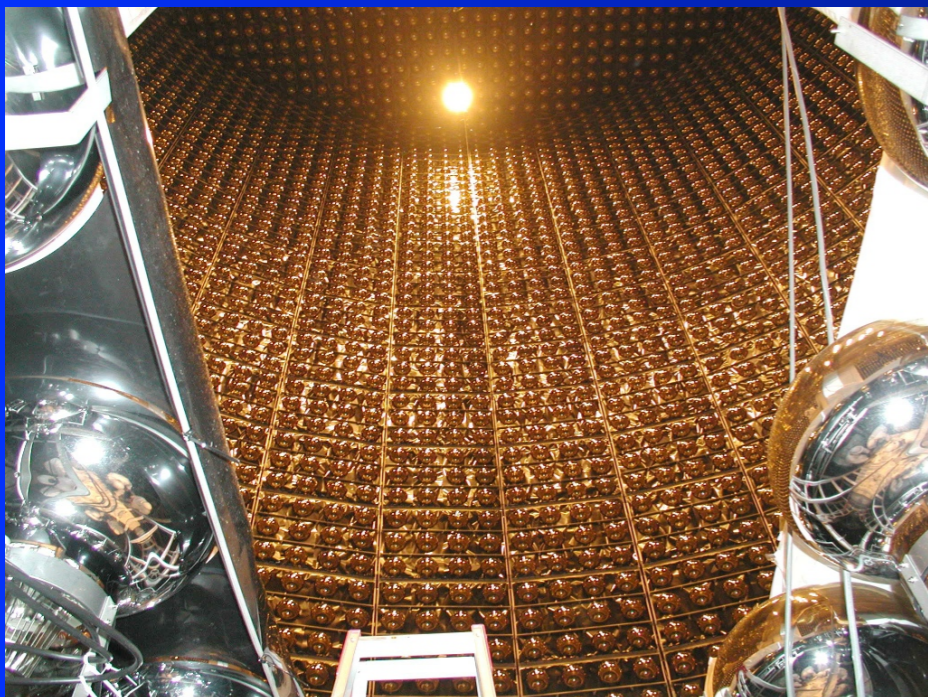
В Теории Великого Объединения кварки и лептоны равноправны и превращаются друг в друга. Это приводит к распаду протона.

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

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



Камиока (Япония)



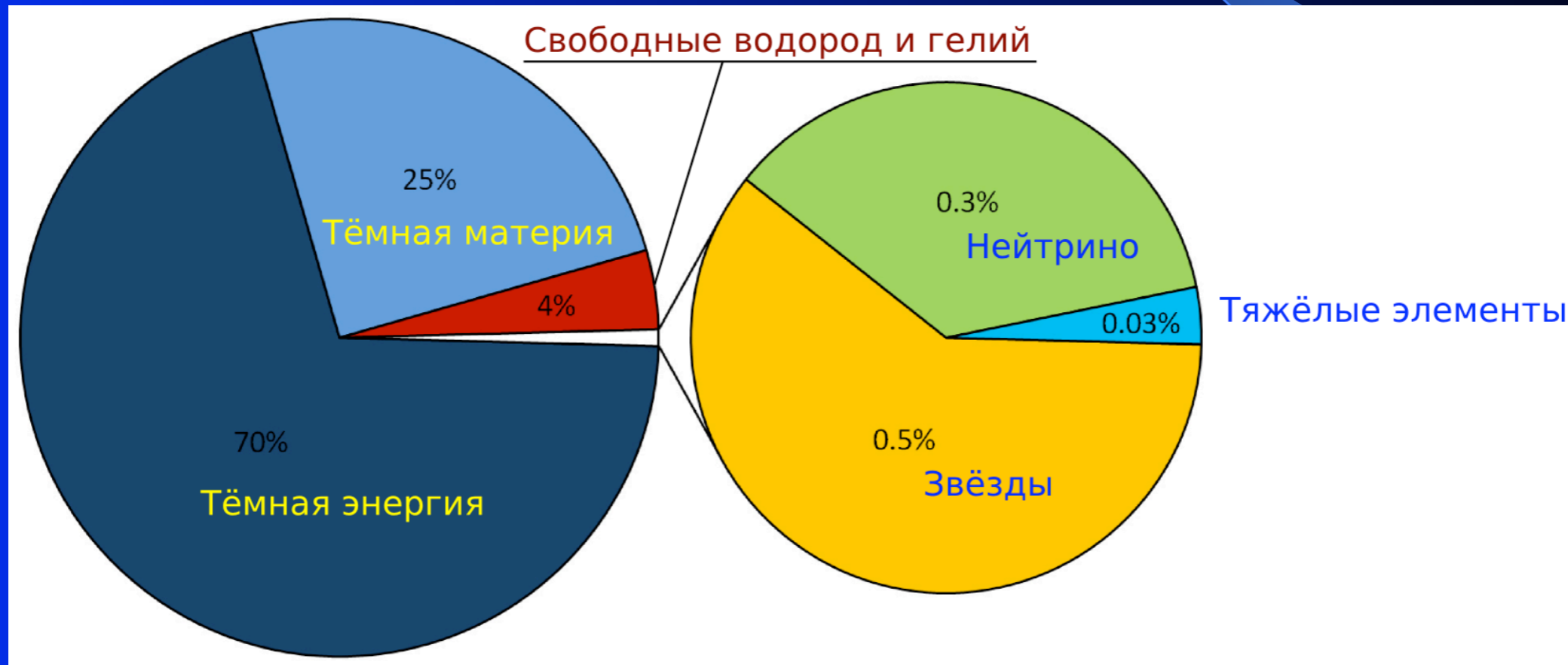
Эксперимент в Камиока не нашёл распада протона, но обнаружил переход нейтрино одного сорта в другое - нейтринные осцилляции

Загадка № 3:

Что такое тёмная
материя и из чего она
состоит?

Энергетический баланс Вселенной

- Температурные флуктуации микроволнового фона
- Взрывы сверхновых

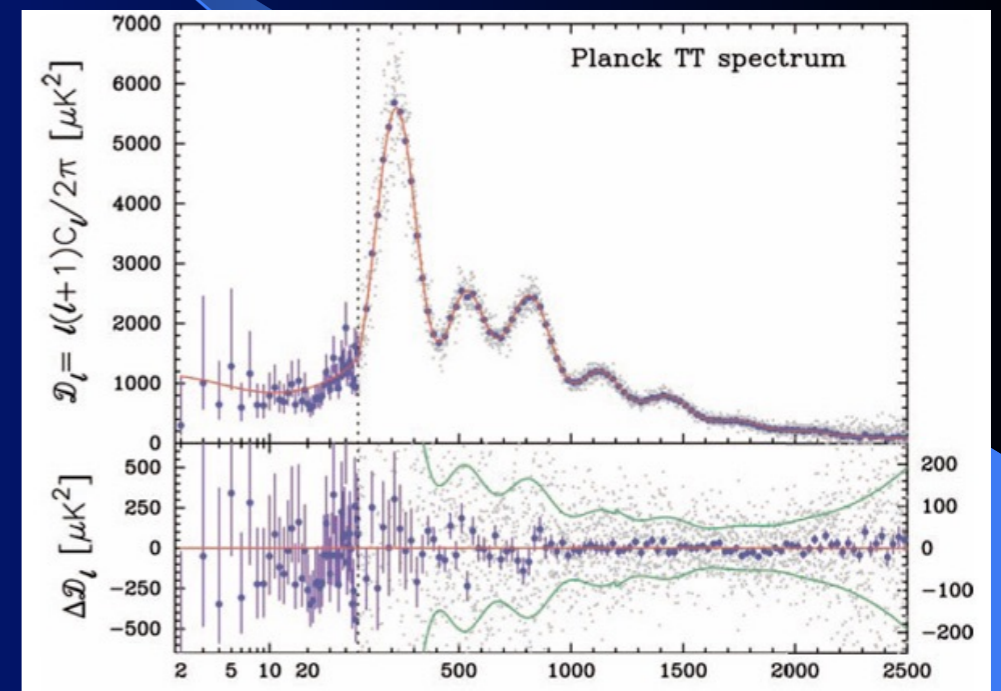
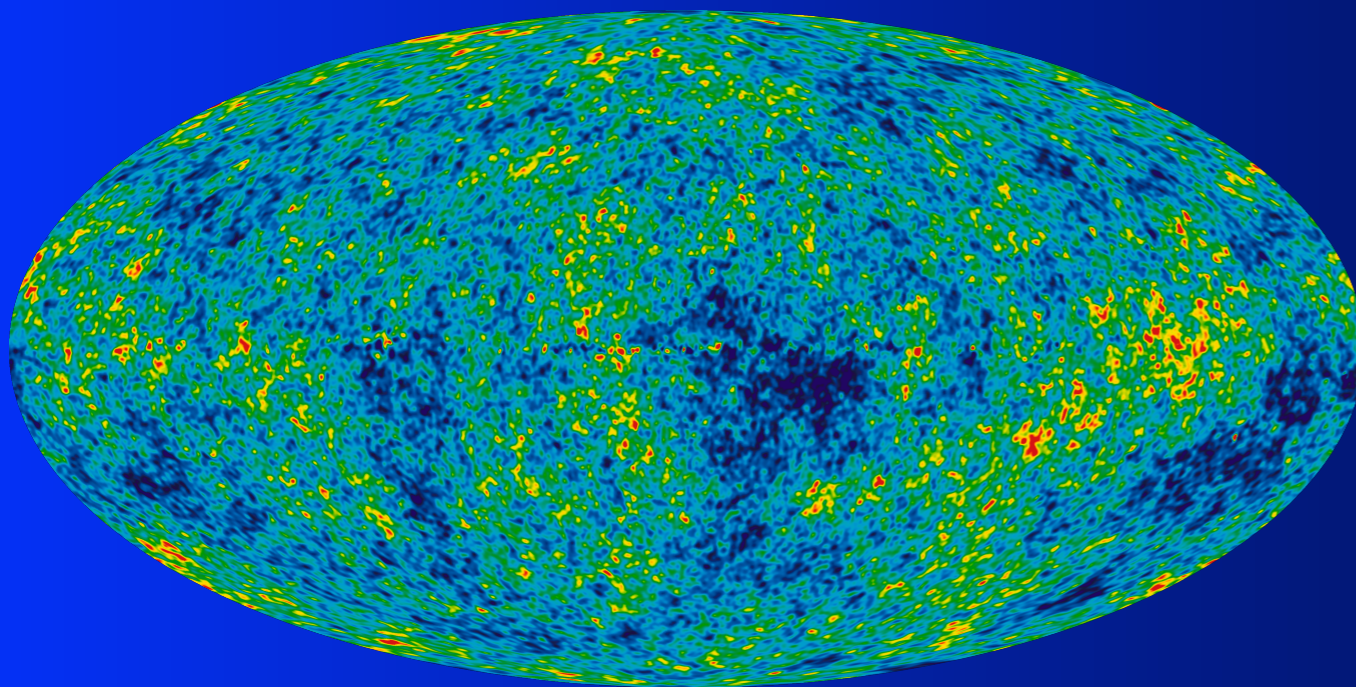


Наше знание касается лишь малой части Вселенной, однако возможно нам известны 99% (50%) элементарных частиц

Реликтовое микроволновое излучение

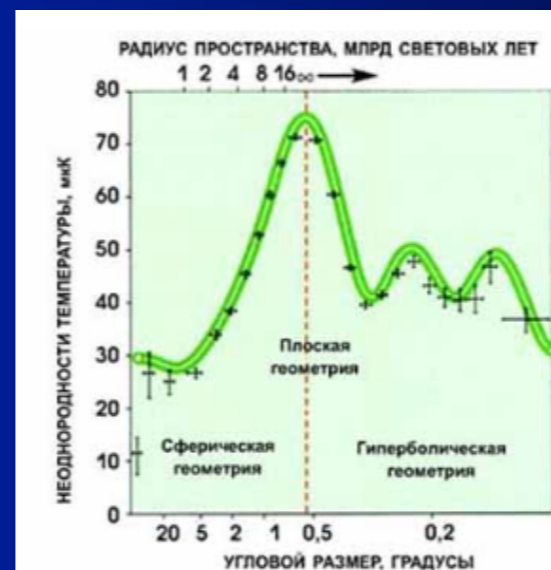
Реликтовое излучение $T \approx 2.7\text{K}^\circ$

Разложение по угловым гармоникам



Температурные флуктуации микроволнового фона

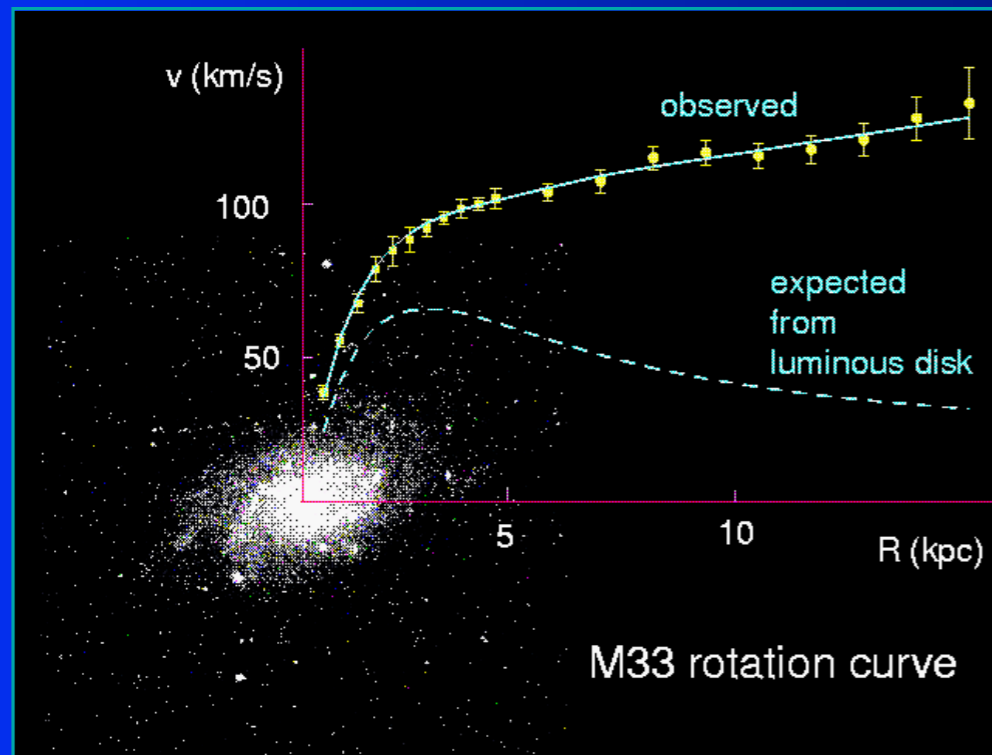
$$\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$$



$\Omega_{UsualMatter} = 4.9\%$
 $\Omega_{DarkMatter} = 26.8\%$
 $\Omega_{DarkEnergy} = 68.3\%$

$$\Omega = 1.02 \pm_{21} 0.02$$

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

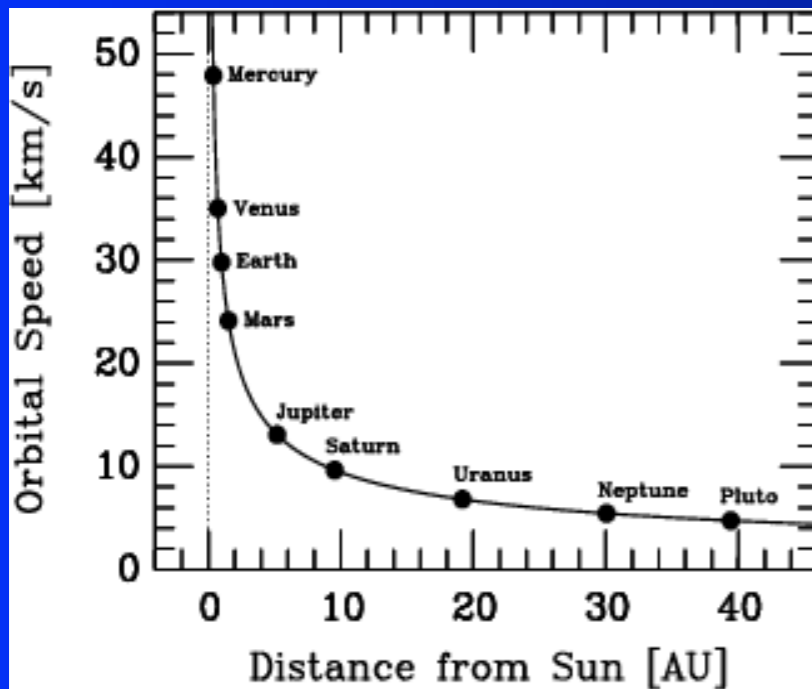


Ротационные кривые звёзд

центробежная сила

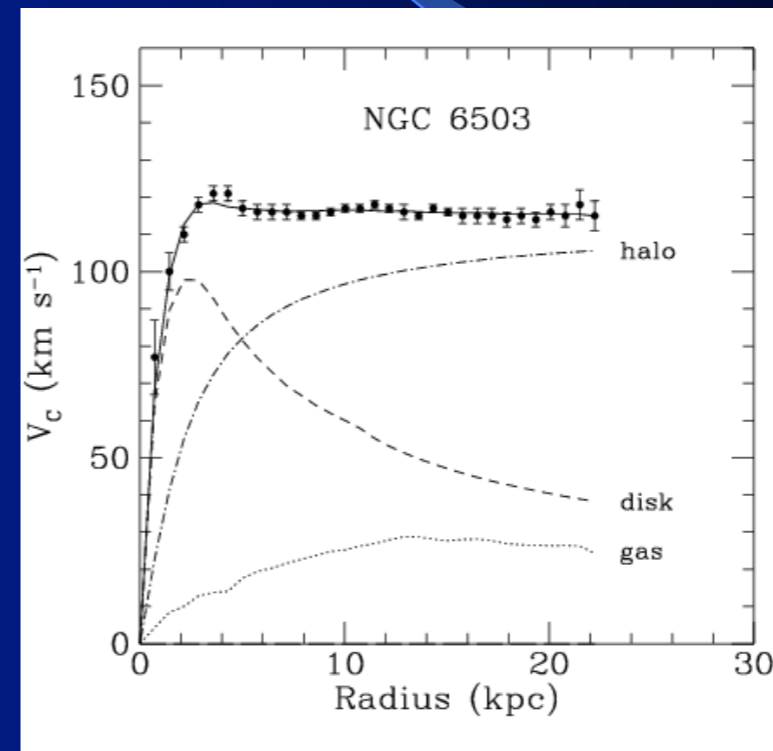
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

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

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

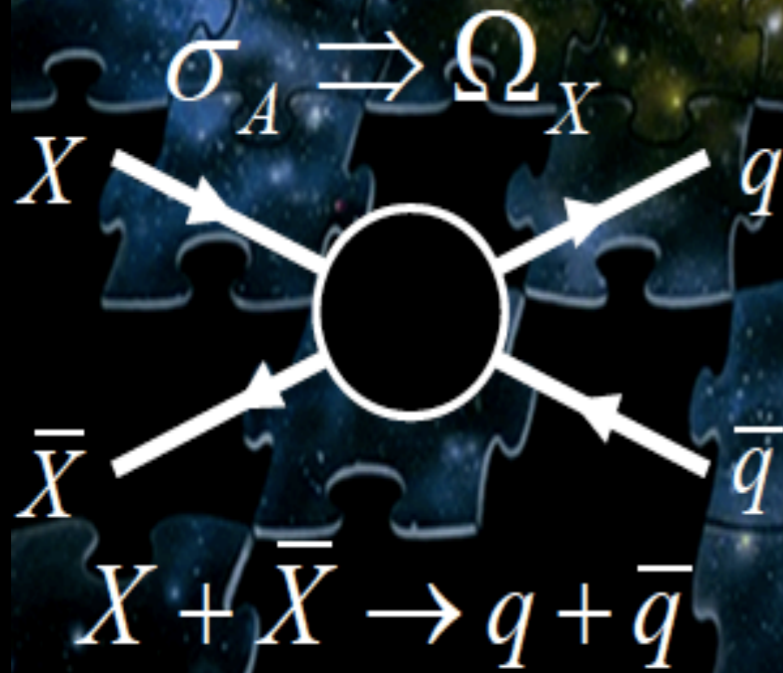


- Частица тёмной материи должна быть нейтральной, стабильной, слабо и/или гравитационно взаимодействующей
- В Стандартной модели нет такой частицы (за исключением возможно тяжёлого правого нейтрино)

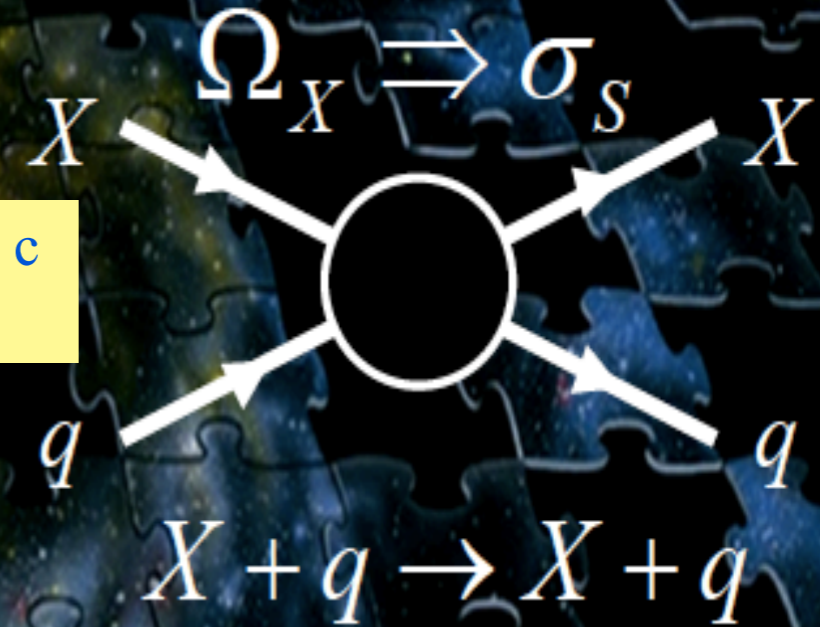
- Частицы ТМ не участвуют в сильных взаимодействиях и не испускают свет.
- В силу этого они не могут образовывать компактных объектов

Поиск частиц тёмной материи

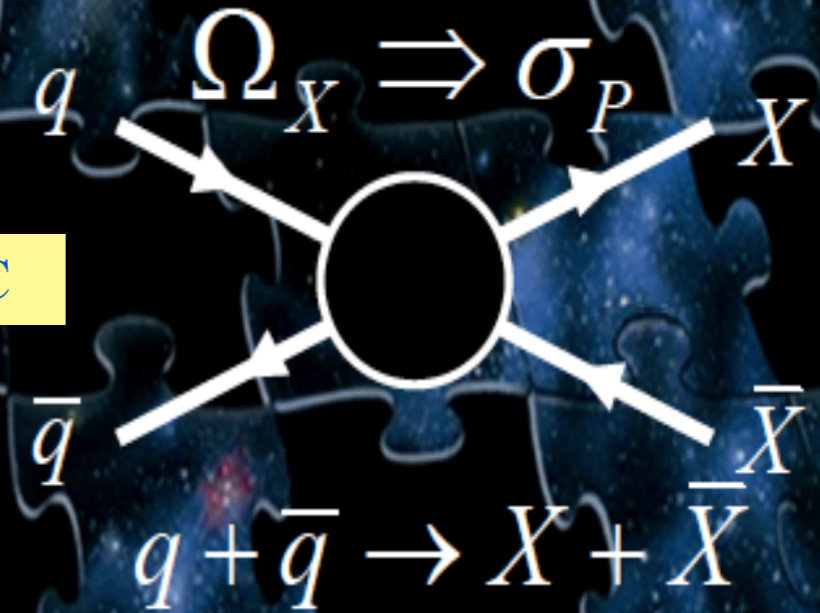
Аннигиляция \rightarrow новая компонента в космических лучах



Прямое вз-е с веществом



Рождение на LHC



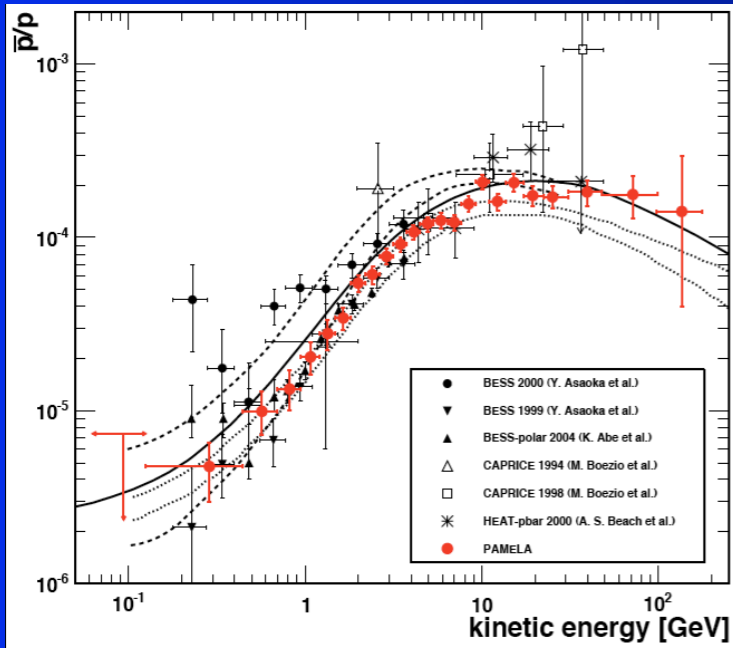
R. Kolb

Сигнал пока отсутствует

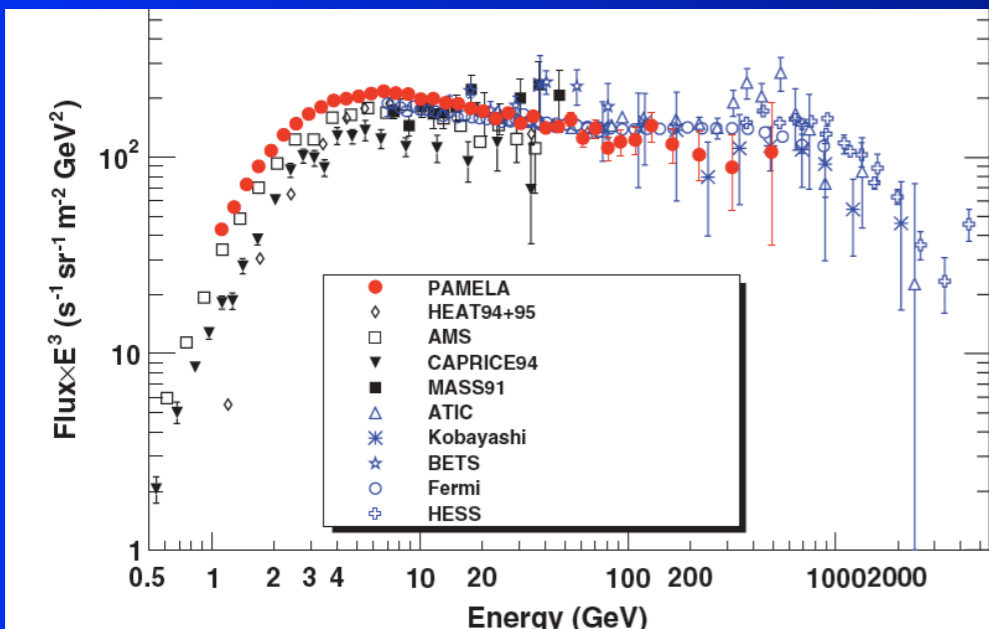
Поиск WIMP'ов

WIMP - Weakly Interactive Massive Particle

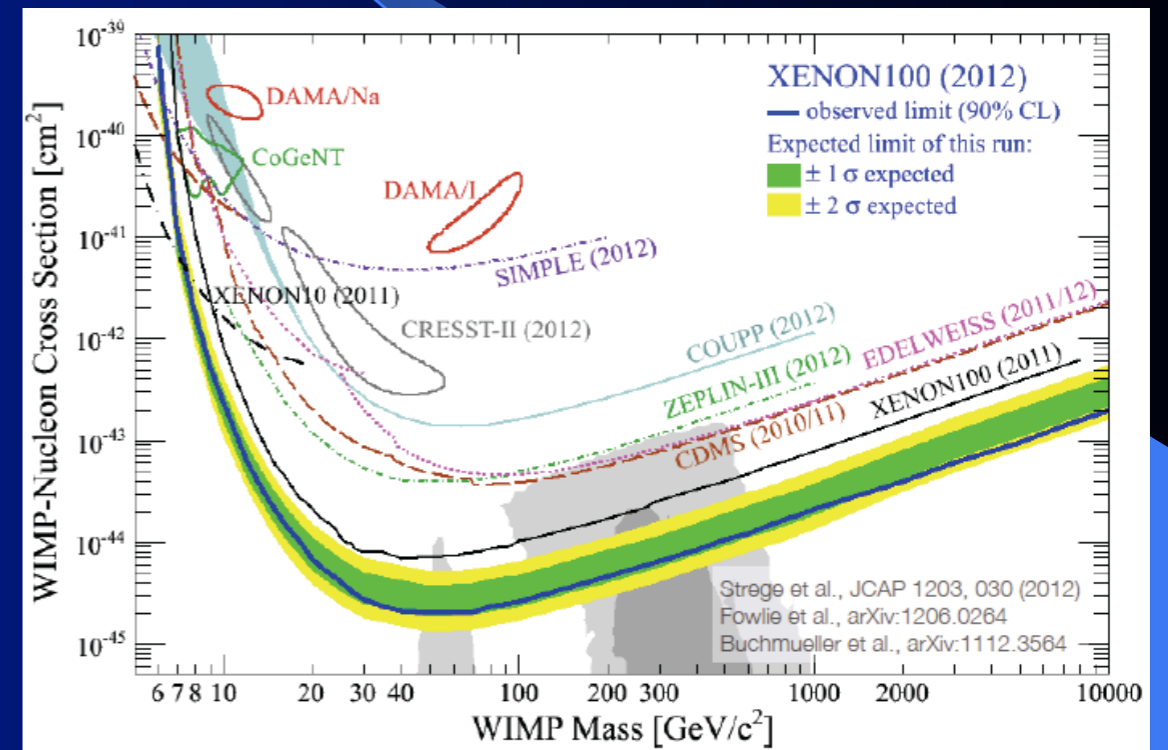
Аннигиляция ТМ в гало галактики



Антипротоны и позитроны
в космических лучах



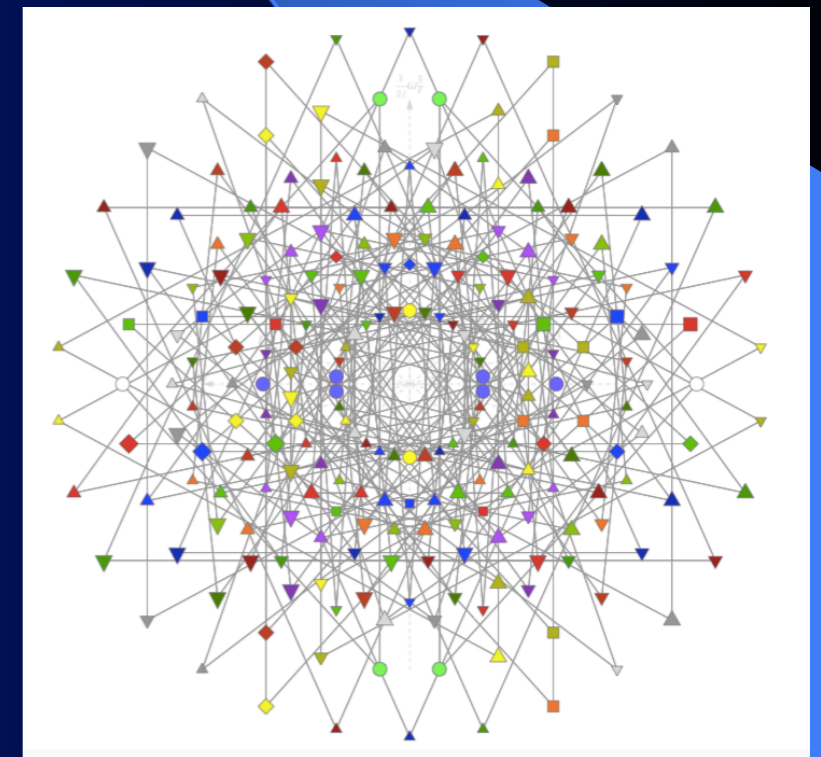
Взаимодействие ТМ с веществом



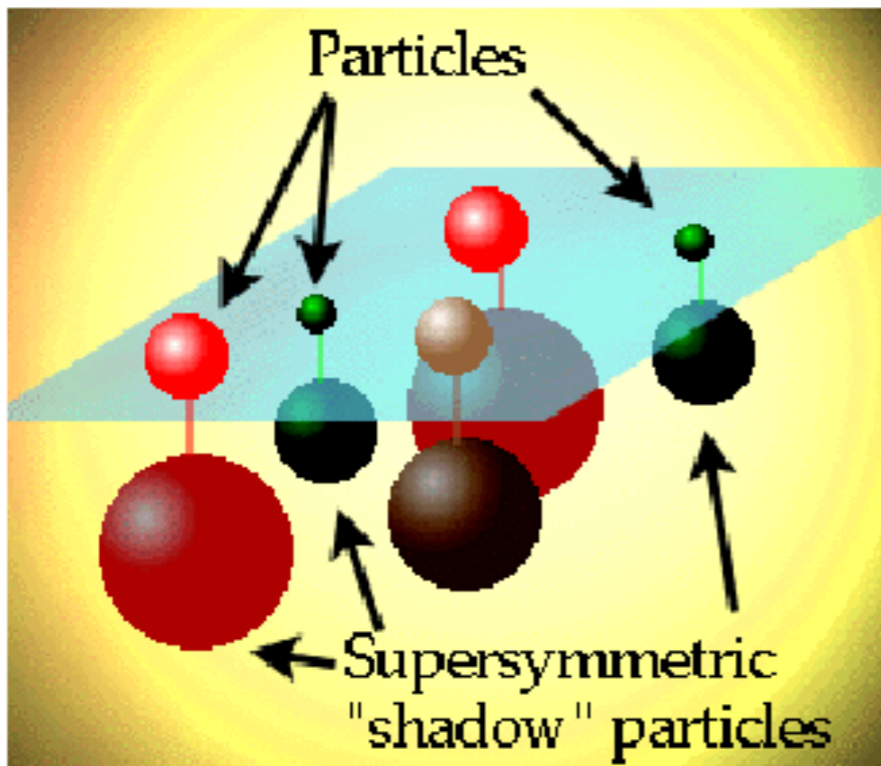
Как в спектре космических лучей, так
и в реакции взаимодействия с
веществом - нет превышения над
фоном

Новая физика - Новая Симметрия

Looking for new physics we are looking for new Symmetry of Nature!



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

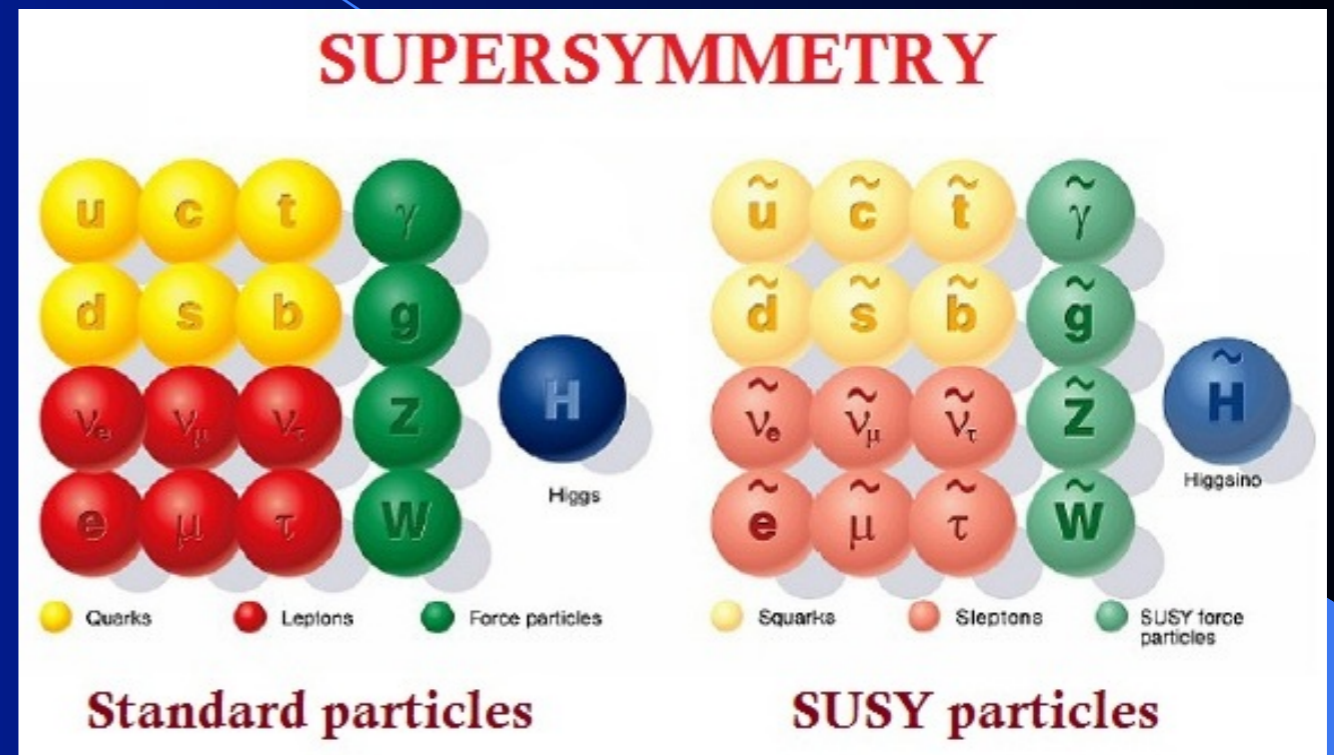
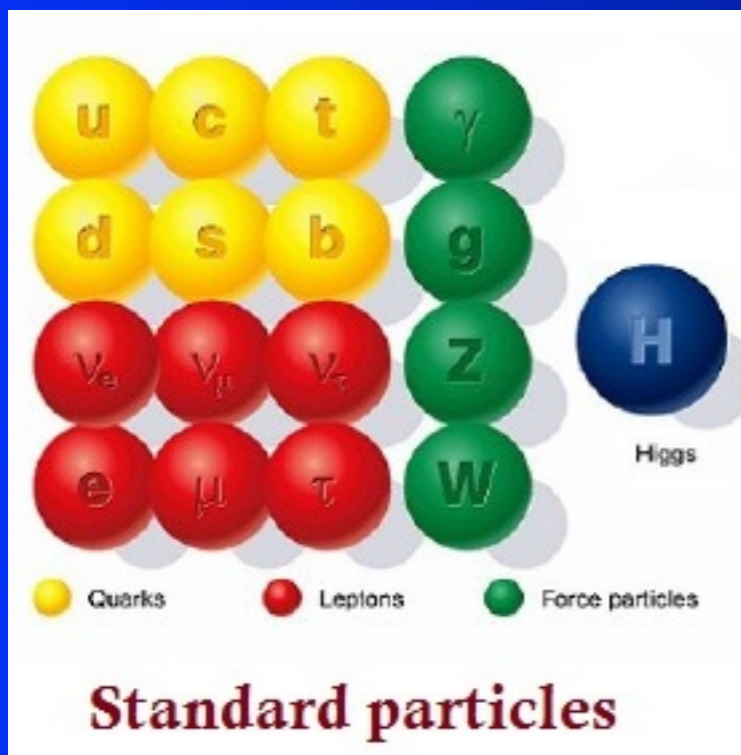
гравитон

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

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

$$R = (-1)^{3(B-L)+2S}$$

The Usual Particle : $R = +1$
SUSY Particle : $R = -1$

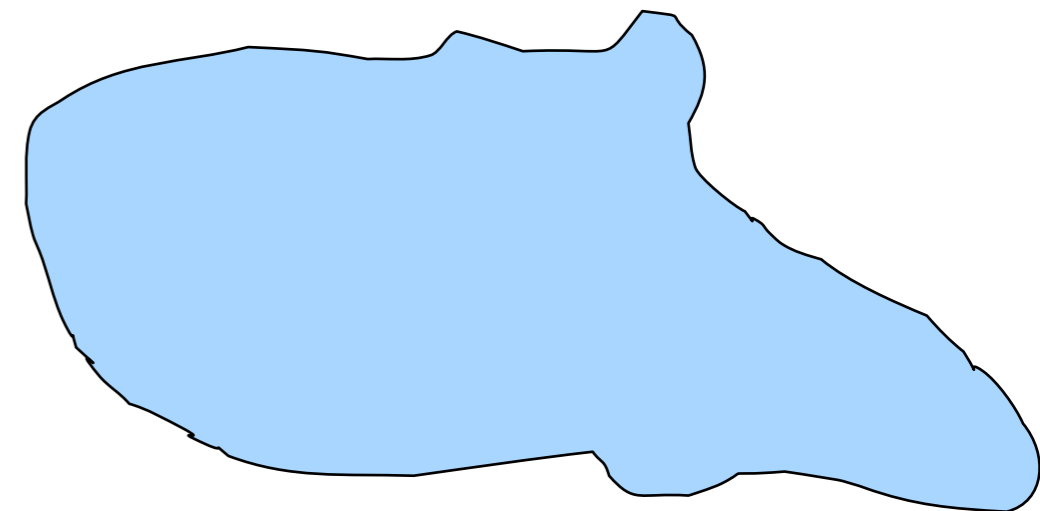
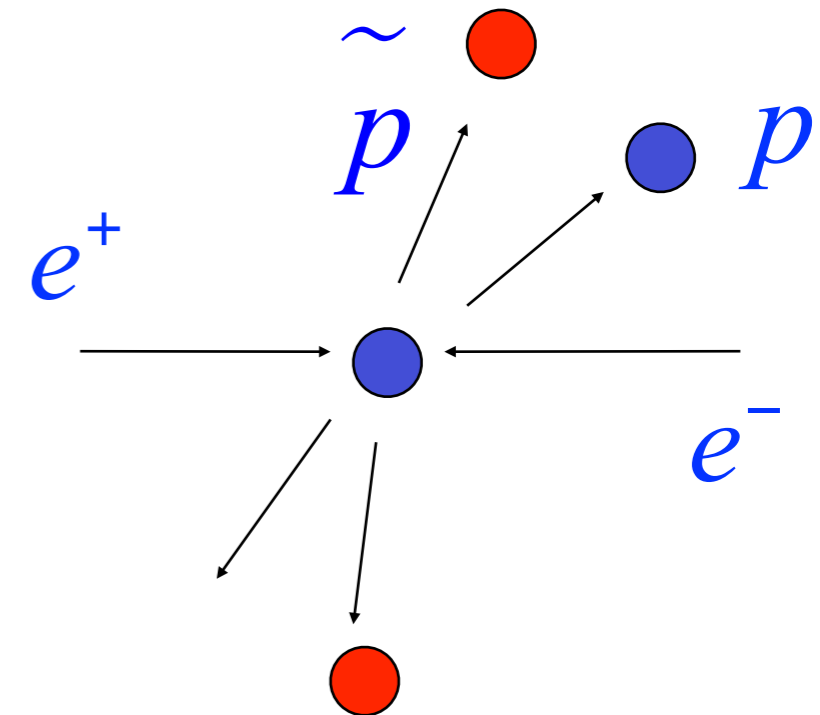
B - Baryon Number
L - Lepton Number
S - Spin

The consequences:

- The superpartners are created in pairs
- The lightest superparticle is stable



- The lightest superparticle (LSP) should be neutral - the best candidate is neutralino (photino or higgsino)
- It can survive from the Big Bang and form the Dark matter in the Universe



$$R = (-)^{3(B-L)+2S}$$

The Usual Particle : $R = + 1$
 SUSY Particle : $R = - 1$

B - Baryon Number
 L - Lepton Number
 S - Spin

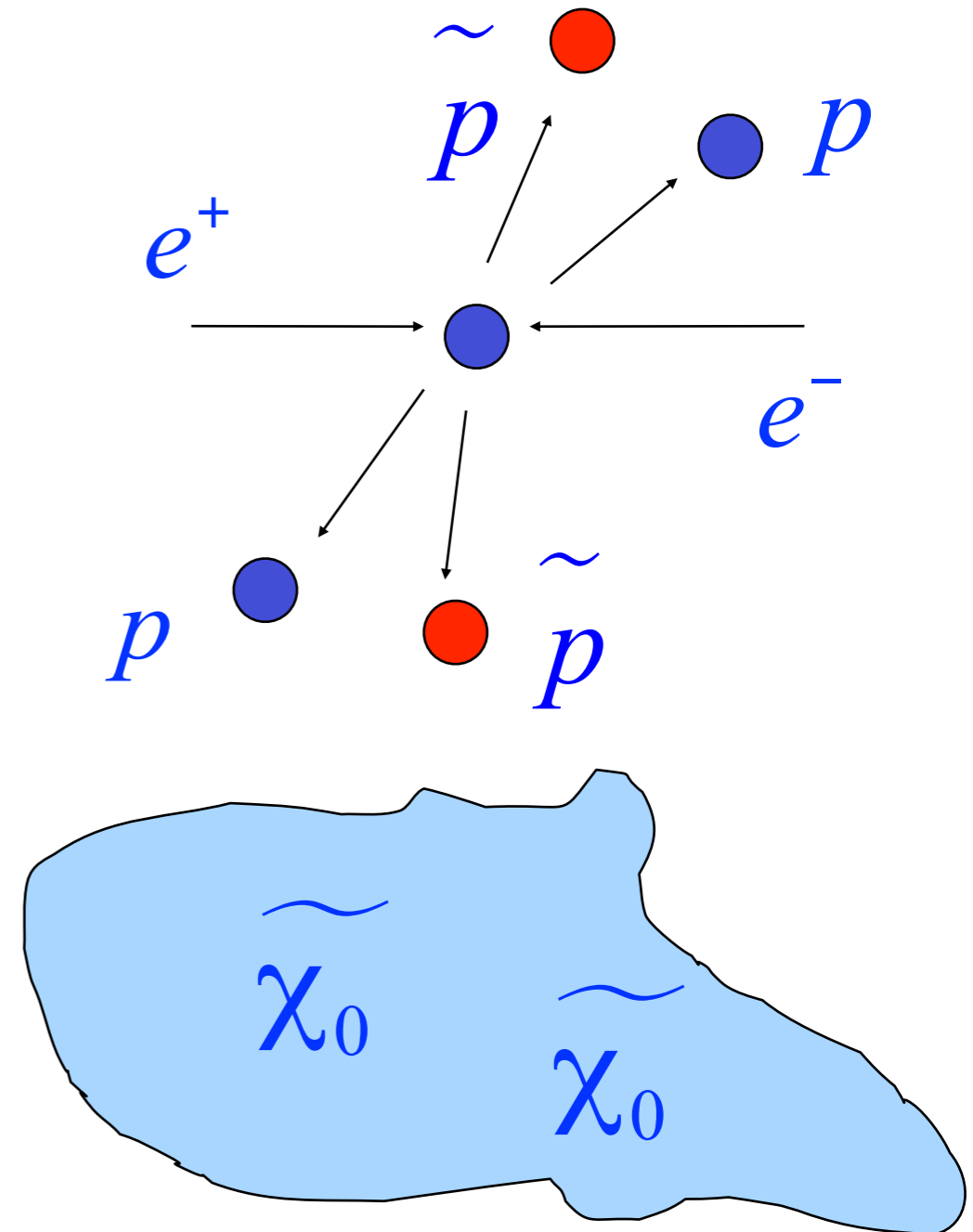
The consequences:

- The superpartners are created in pairs
- The lightest superparticle is stable



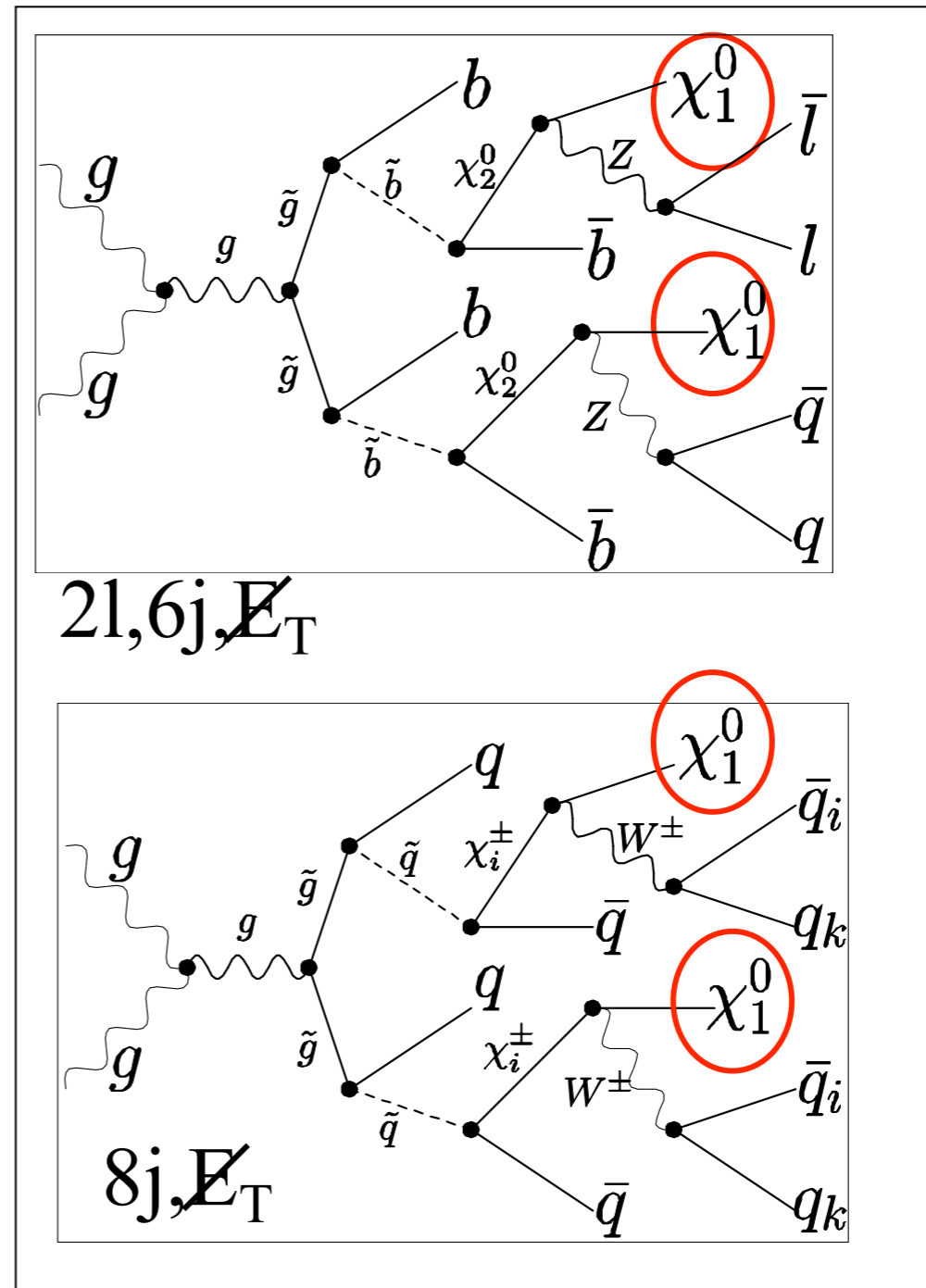
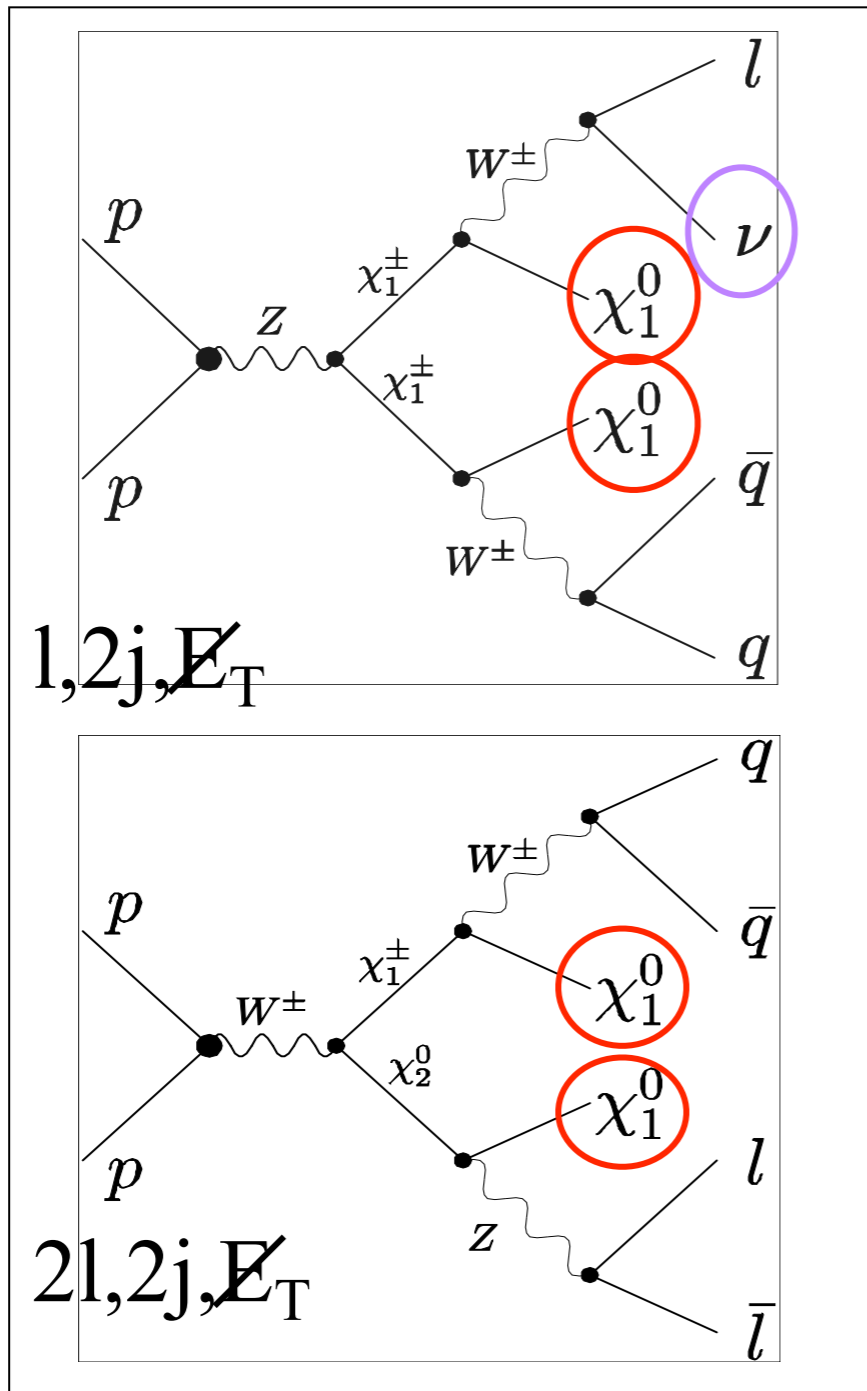
- The lightest superparticle (LSP) should be neutral - the best candidate is neutralino (photino or higgsino)
- It can survive from the Big Bang and form the Dark matter in the Universe

$\tilde{\chi}_0$



CREATION AND DECAY OF SUPERPARTNERS IN CASCADE PROCESSES @ LHC

weak int's



Strong int's

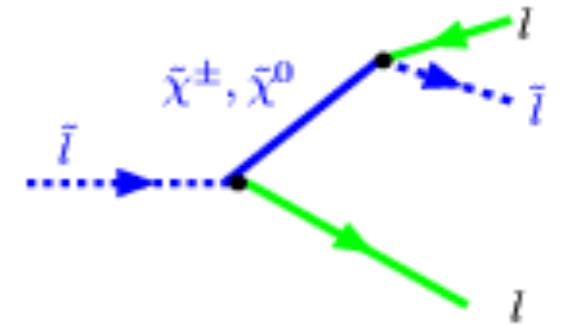
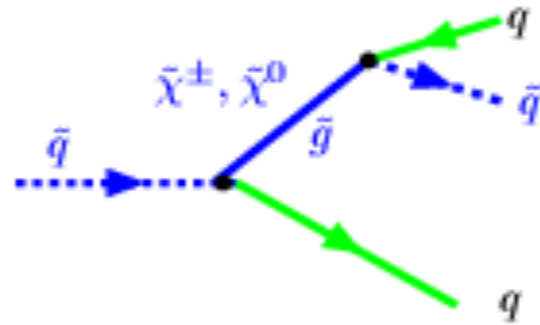
Typical SUSY signature: Missing Energy and Transverse Momentum

squarks

$$\tilde{q}_{L,R} \rightarrow q + \tilde{\chi}_i^0$$

$$\tilde{q}_L \rightarrow q' + \tilde{\chi}_i^\pm$$

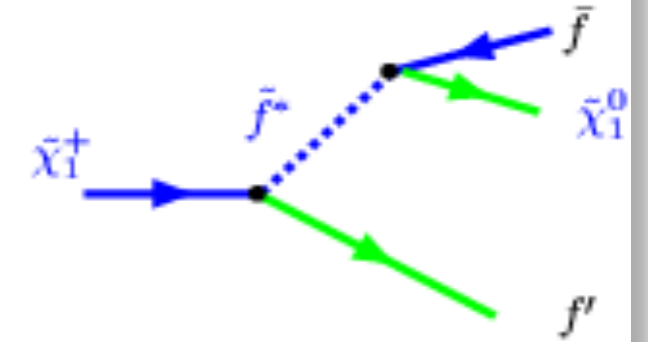
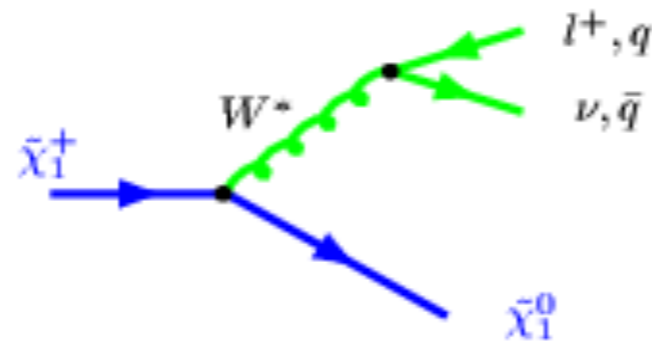
$$\tilde{q}_{L,R} \rightarrow q + g$$



sleptons

$$\tilde{l} \rightarrow l + \tilde{\chi}_i^0$$

$$\tilde{l}_L \rightarrow \nu_l + \tilde{\chi}_i^\pm$$



chargino

$$\tilde{\chi}_i^\pm \rightarrow e + \nu_e + \tilde{\chi}_i^0$$

$$\tilde{\chi}_i^\pm \rightarrow q + q' + \tilde{\chi}_i^0$$

neutralino

$$\tilde{\chi}_i^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^+ + l^-$$

$$\tilde{\chi}_i^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + q + q'$$

$$\tilde{\chi}_i^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm + l^\pm + \nu_l$$

$$\tilde{\chi}_i^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \nu_l + \bar{\nu}_l$$

Final states

$$l^+ l^- + \cancel{E}_T$$

$$2 \text{ jets} + \cancel{E}_T$$

$$\gamma + \cancel{E}_T$$

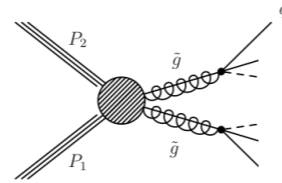
$$\cancel{E}_T$$

gluino

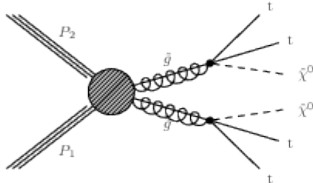
$$\tilde{g} \rightarrow q + \bar{q} + \tilde{\gamma}$$

$$\tilde{g} \rightarrow g + \tilde{\gamma}$$

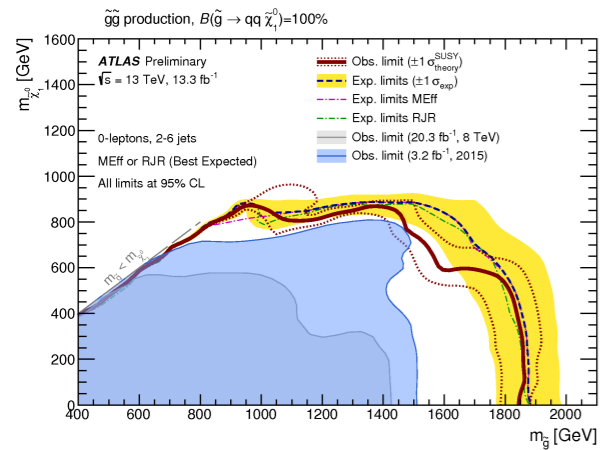
Glauino decays to qq+LSP



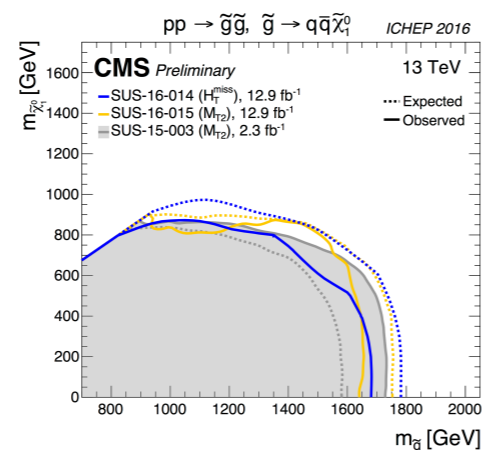
Glauino decays to tt+LSP



Summary of decays to light quarks + LSP

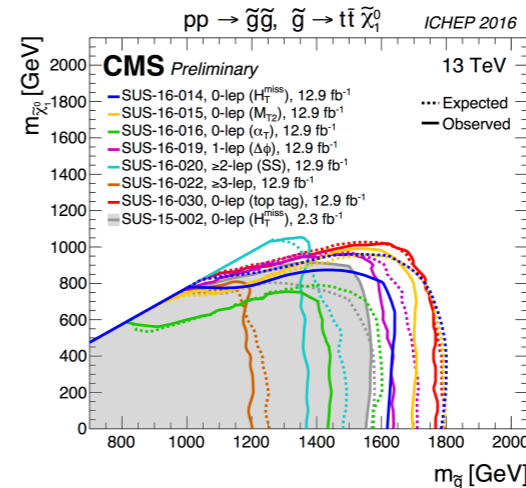


ATLAS-CONF-2016-078



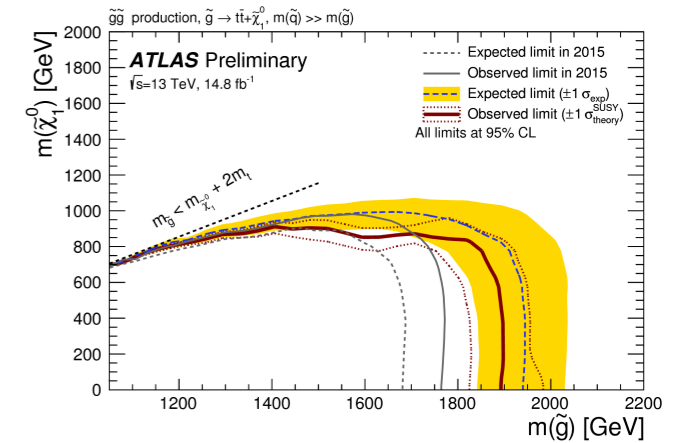
CMS-SUS-16-014
CMS-SUS-16-015

CMS summary

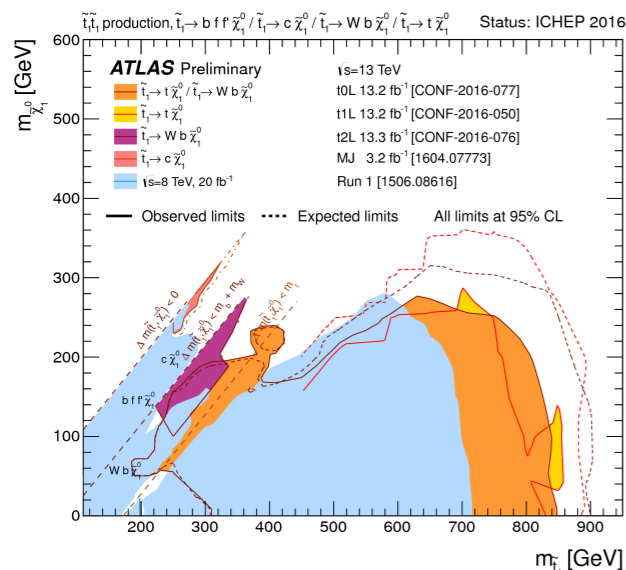


ATLAS multi-b

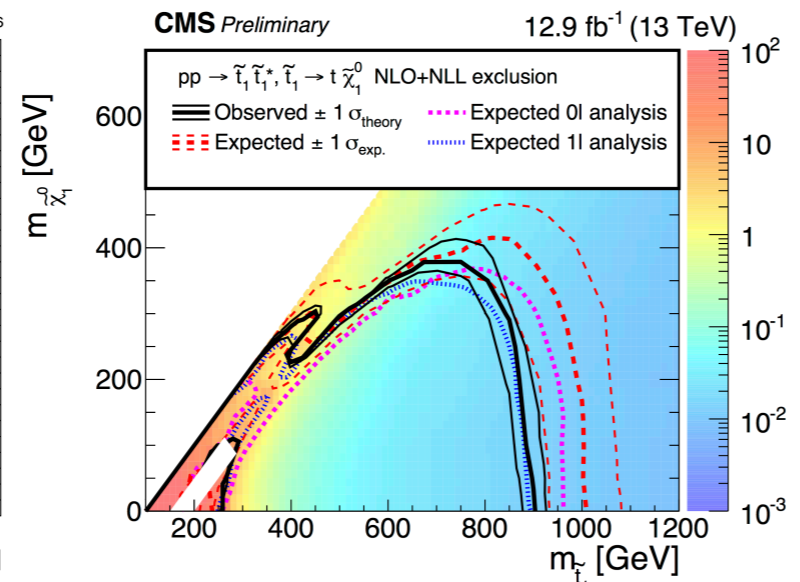
ATLAS-CONF-2016-052



Top squarks - summaries



ATLAS summary



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

- SUSY limits for strong int's are pushed above 1 TeV
- This already requires fine tuning - little hierarchy prob
- No guiding lines

Ускорители протонов



BNL Cosmotron (1952-1966) 3.3 GeV



Синхрофазотрон Дубна ОИЯИ 1957 10 ГэВ



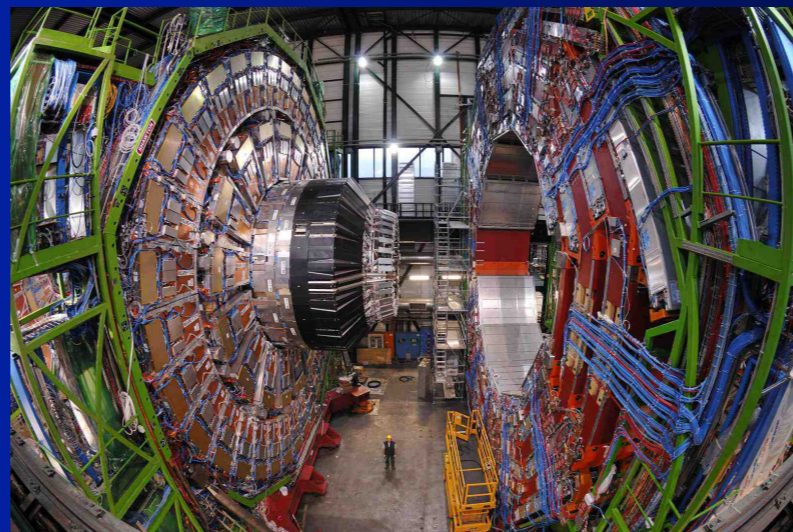
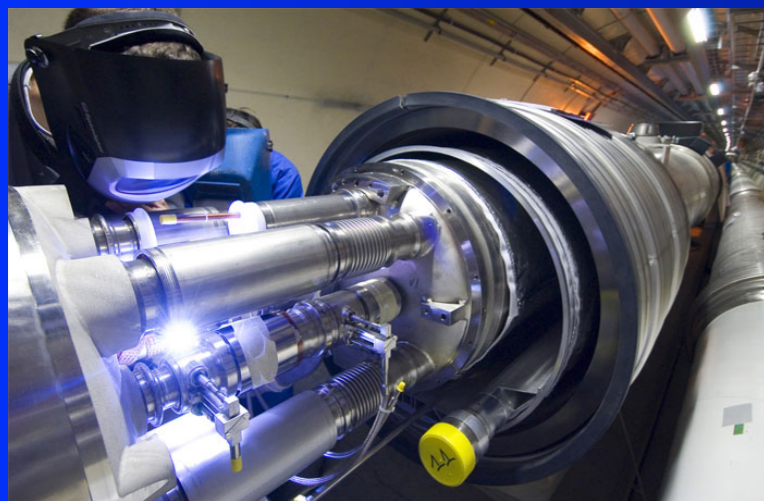
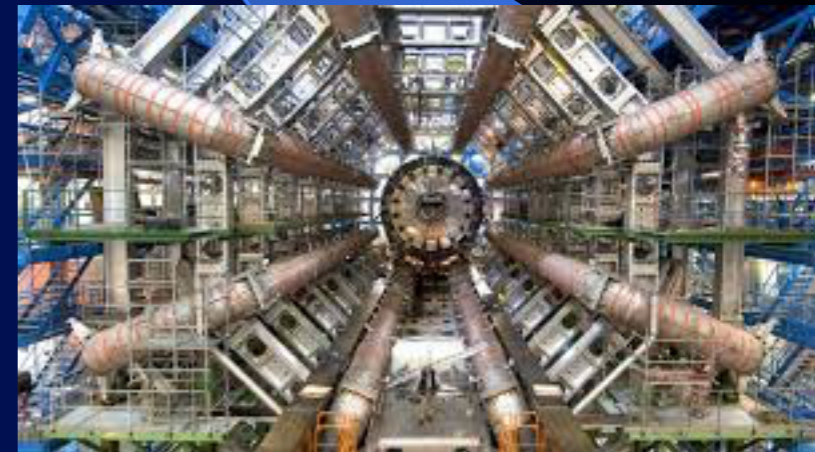
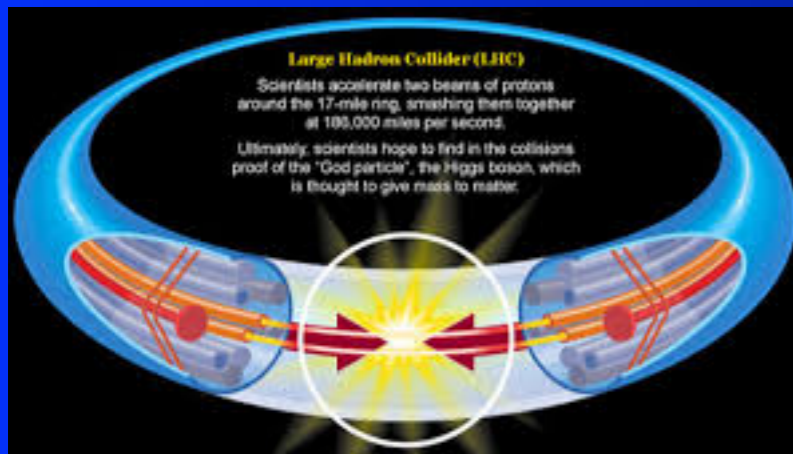
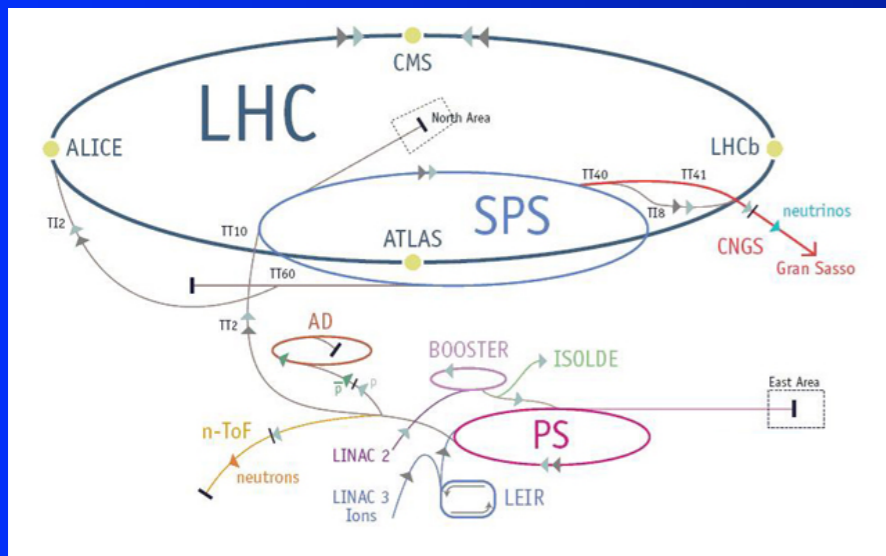
Синхрофазотрон Протвино ИФВЭ 1967 70 ГэВ



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

HEAVY-ION COLLIDERS

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

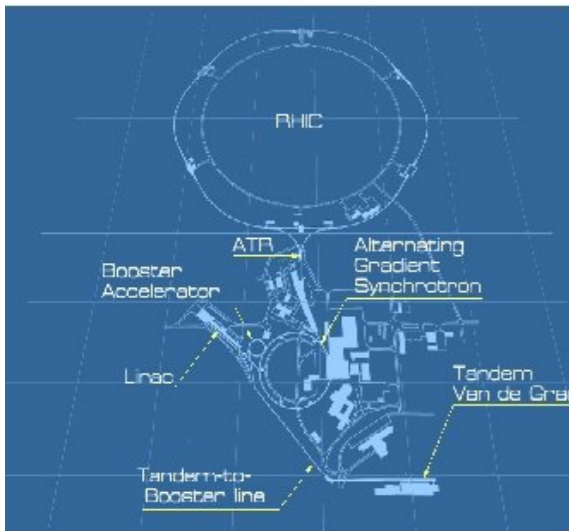
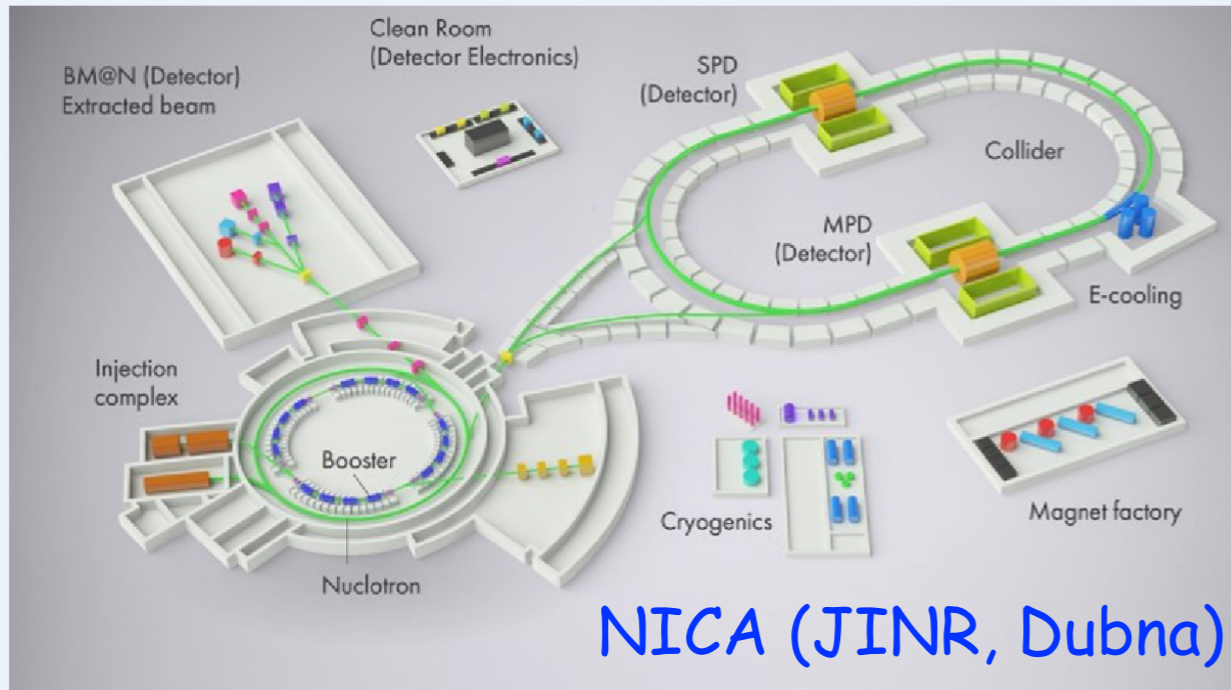
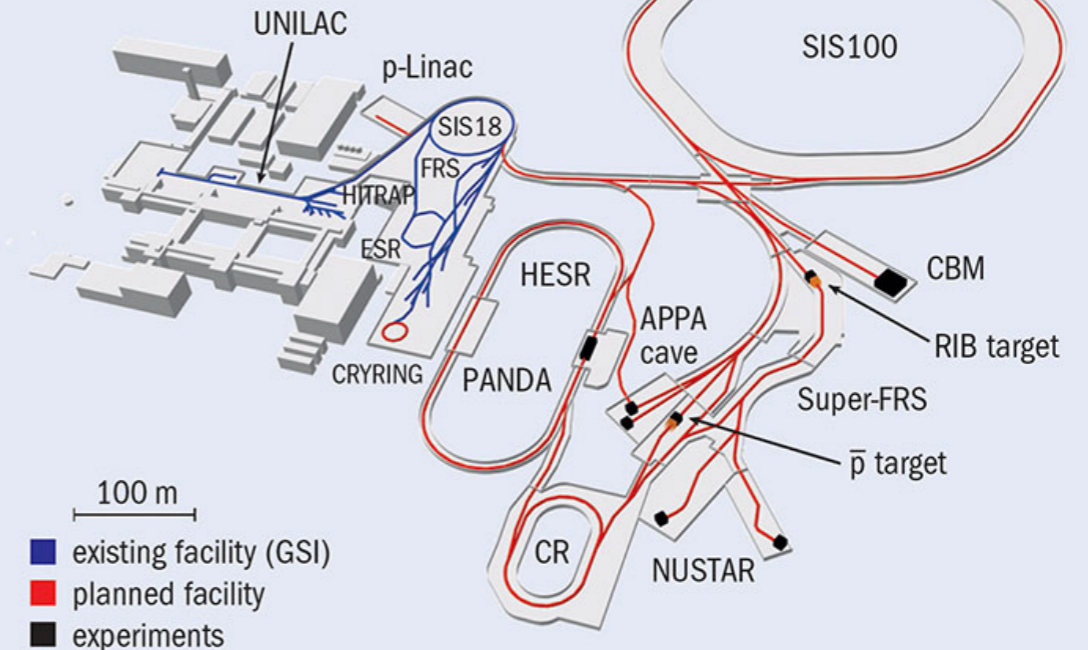
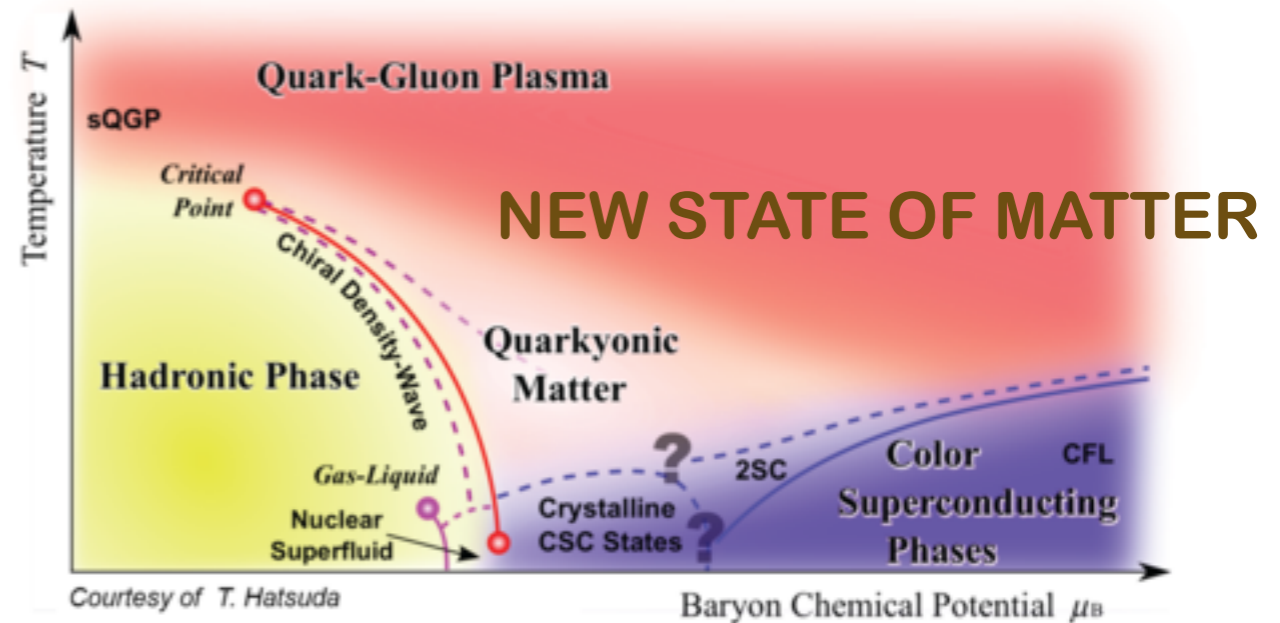


Figure 1. Schematic layout of ENL complex for polarized proton operations. Courtesy of MacKay (private communication) and BNL Collider Accelerator Department.

FAIR (GSI, Germany)



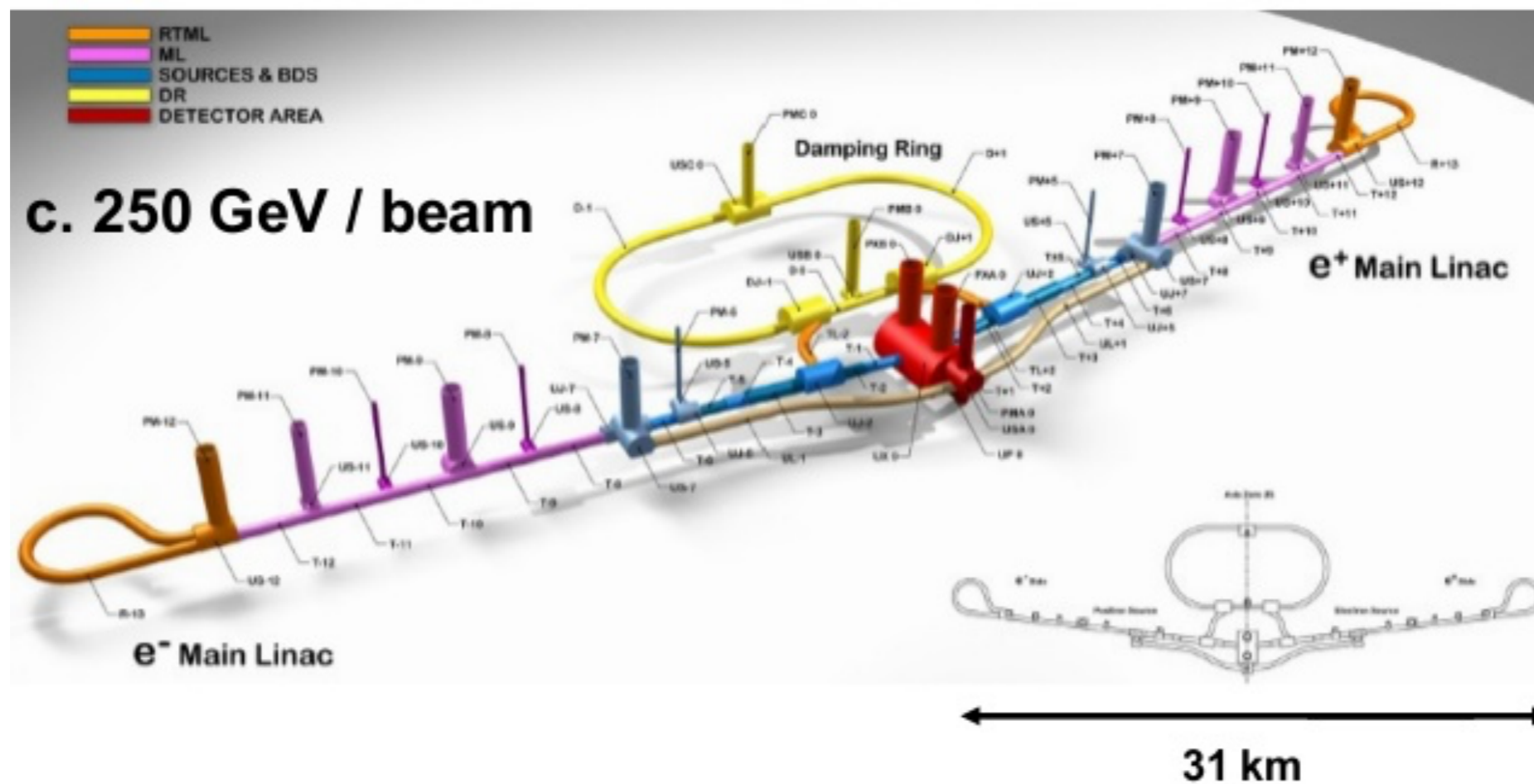
NICA (JINR, Dubna)



Courtesy of T. Hatsuda

ELECTRON-POSITRON LINEAR COLLIDER (JAPAN)

International Linear Collider (ILC)



TECHNOLOGY EXISTS, CONSTRUCTION DID NOT START YET



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 $\sqrt{s} \sim 3.5 \text{ TeV}$, $L \sim 10^{34}$

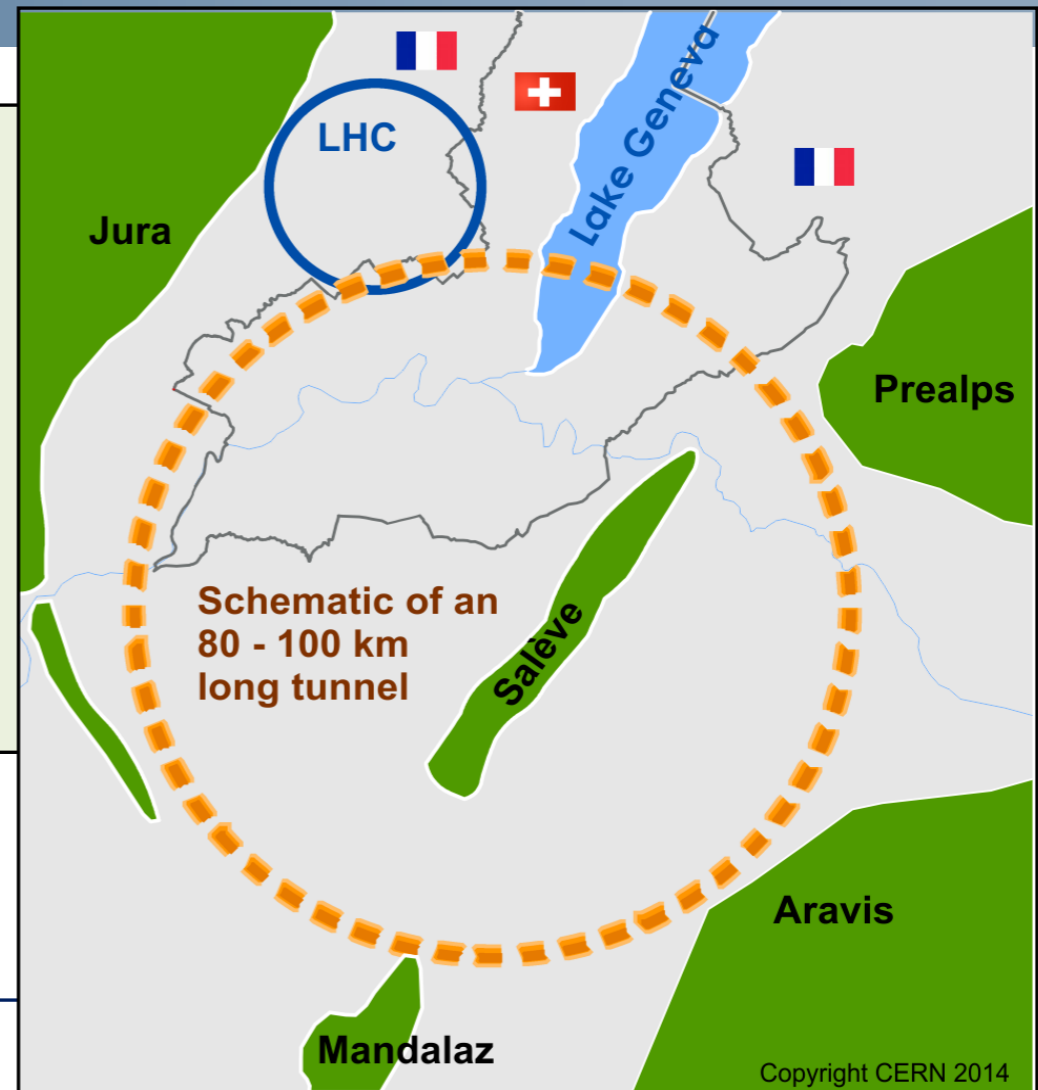
Main technology challenge: ~ 16 T magnets

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?

