



ОИЯИ

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дмитрий Казаков



ЛТФ

Лаборатория теоретической физики
им. Н.Н. Боголюбова

'24
Март

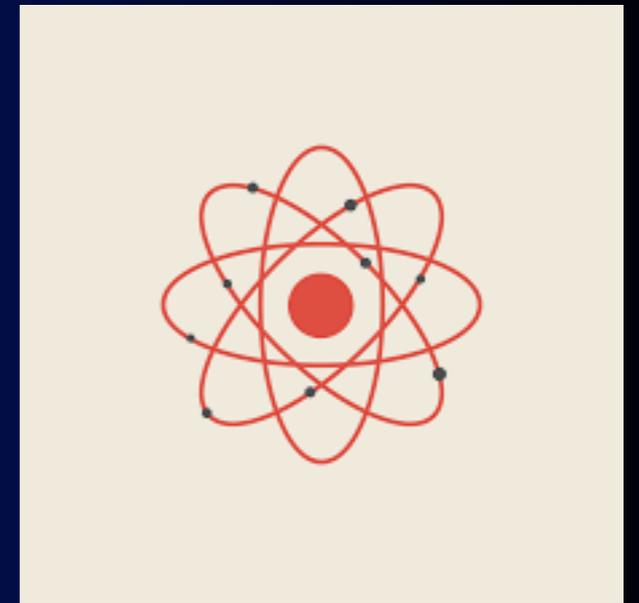
В ожидании НОВОЙ ФИЗИКИ

Дубна

АТОМЫ

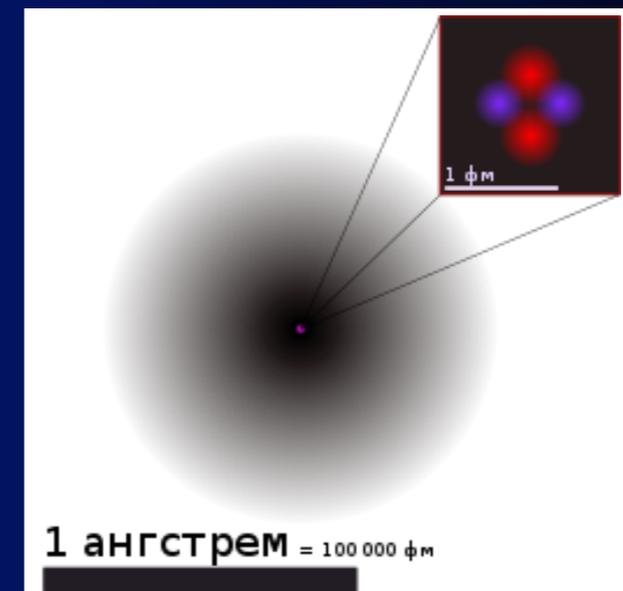
Атом — частица вещества микроскопических размеров и массы, наименьшая часть химического элемента, являющаяся носителем его свойств. Атомы состоят из ядра и электронов.

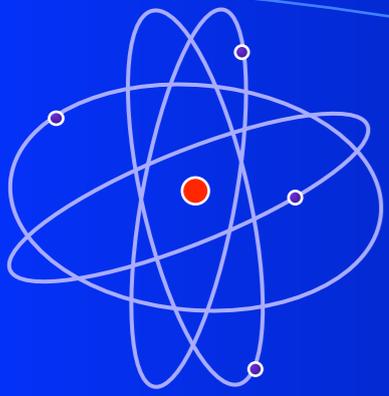
Википедия



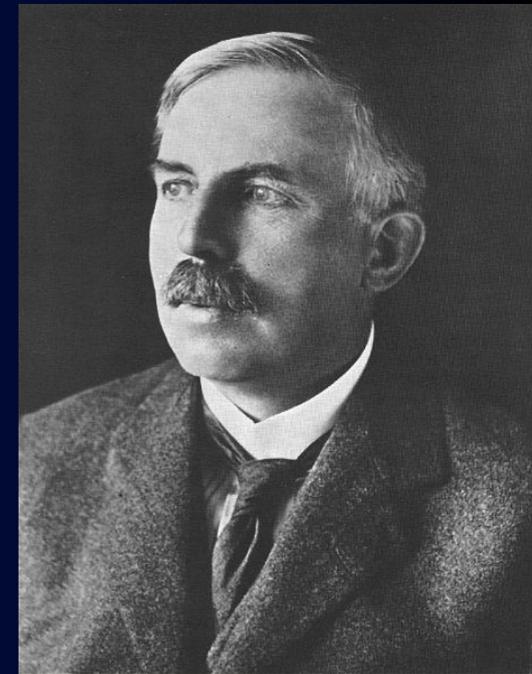
Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными, и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то, это – атомная гипотеза: все тела состоят из атомов – маленьких телец, которые находятся в непрерывном движении, притягиваются на небольших расстояниях, но отталкиваются, если одно из них плотнее прижать к другому.

Р. Фейнман



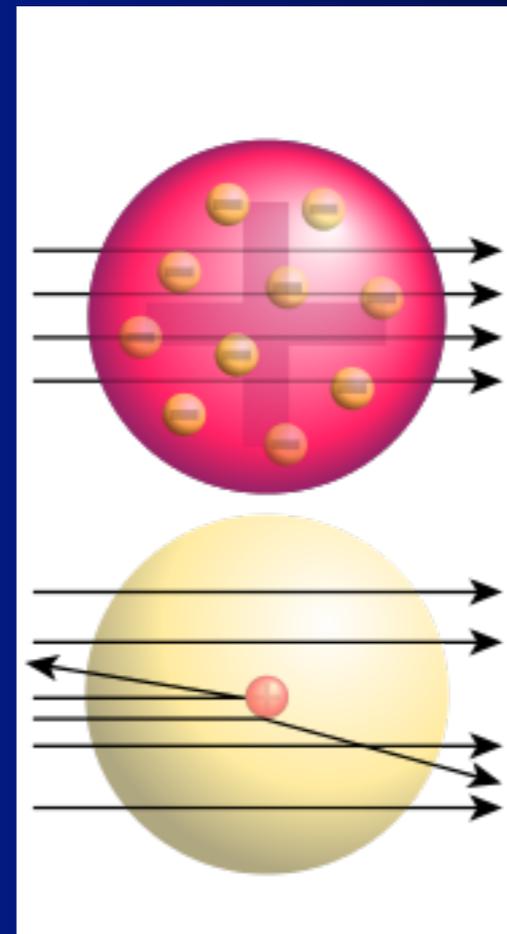
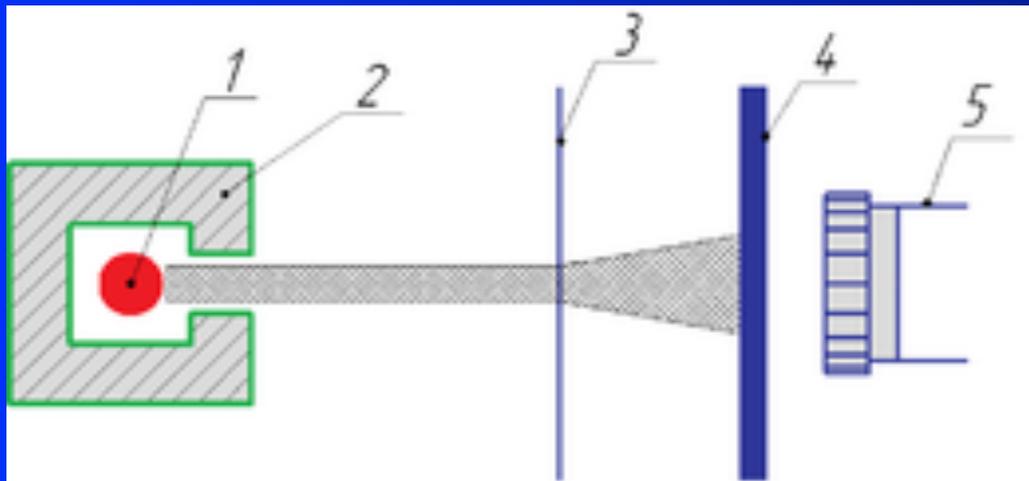


Структура Атома



В 1912 Э.Резерфорд бомбардировал атомы α -частицами и открыл, что атомы имеют маленькое твёрдое ядро $\sim 10^{-14}m$

Ожидаемый эффект



Планетарная модель атома Резерфорда

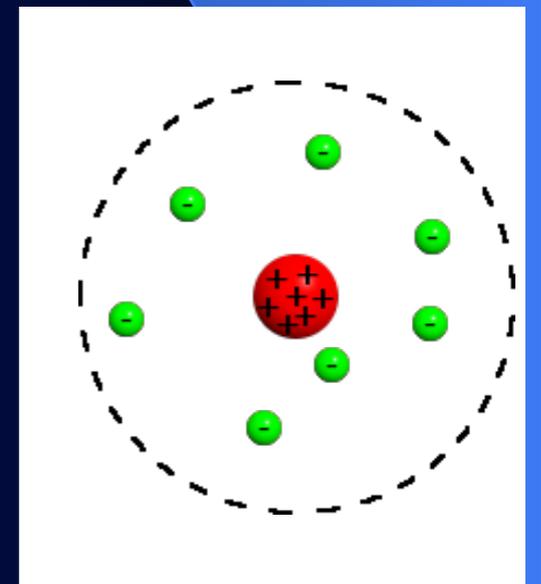
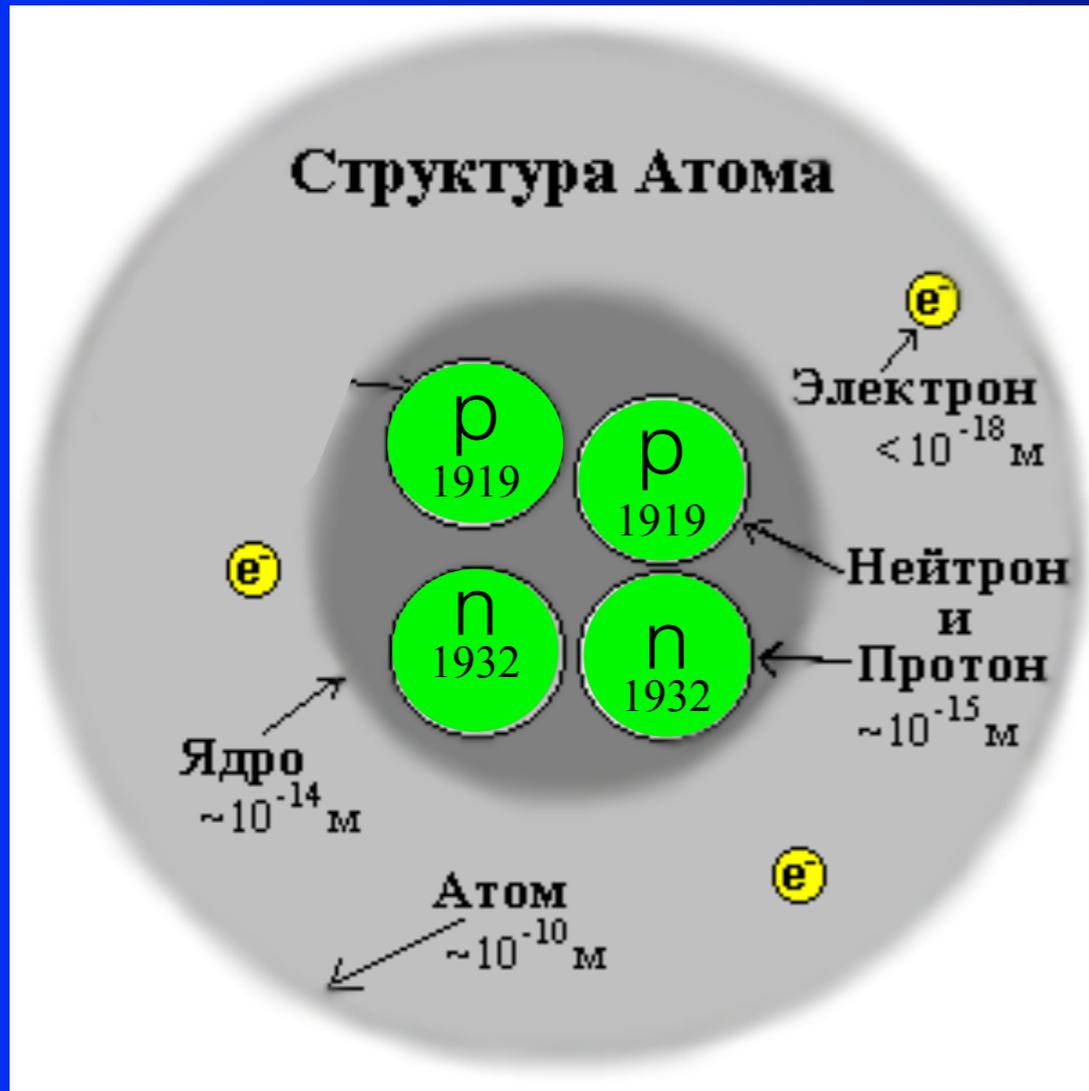
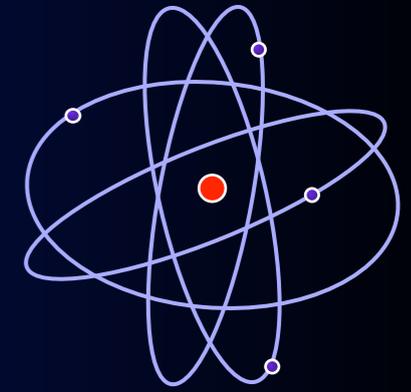


Схема эксперимента Резерфорда

Жесткий отскок

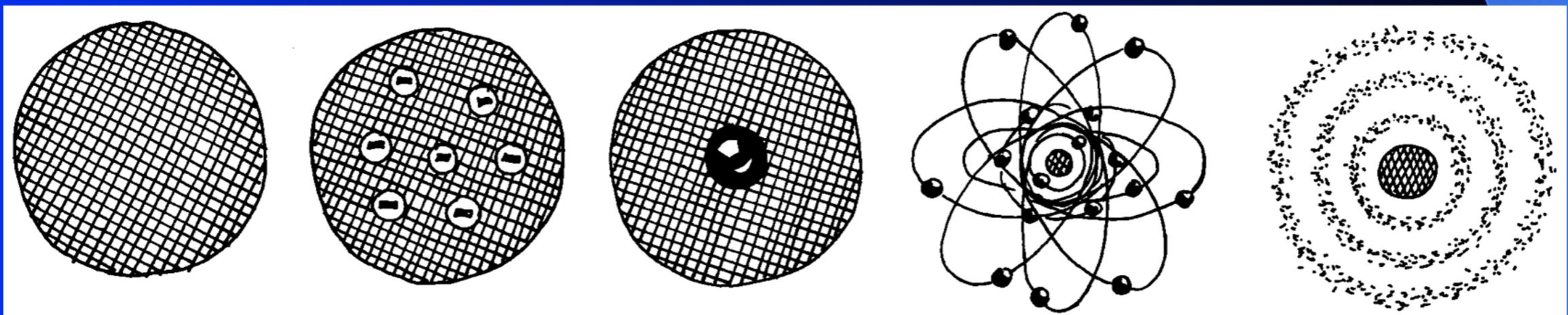
Структура Атома



В центре атома находится плотное ядро имеющее положительный электрический заряд

Оно в 10000 раз меньше размера самого атома

Эволюция в понимании строения атома



Демокрит

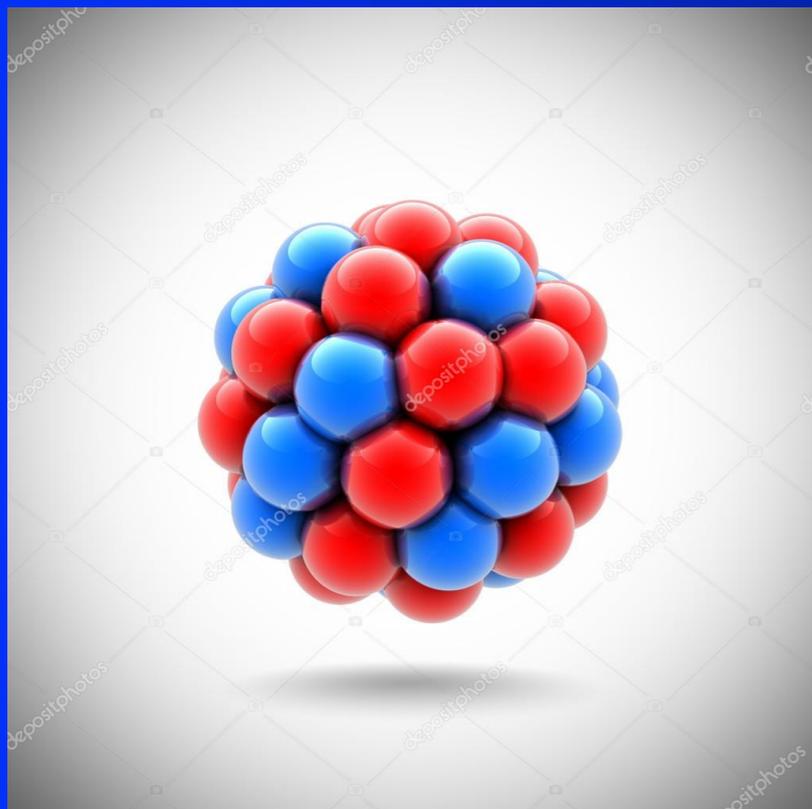
Томпсон

Резерфорд

Бор

Шредингер

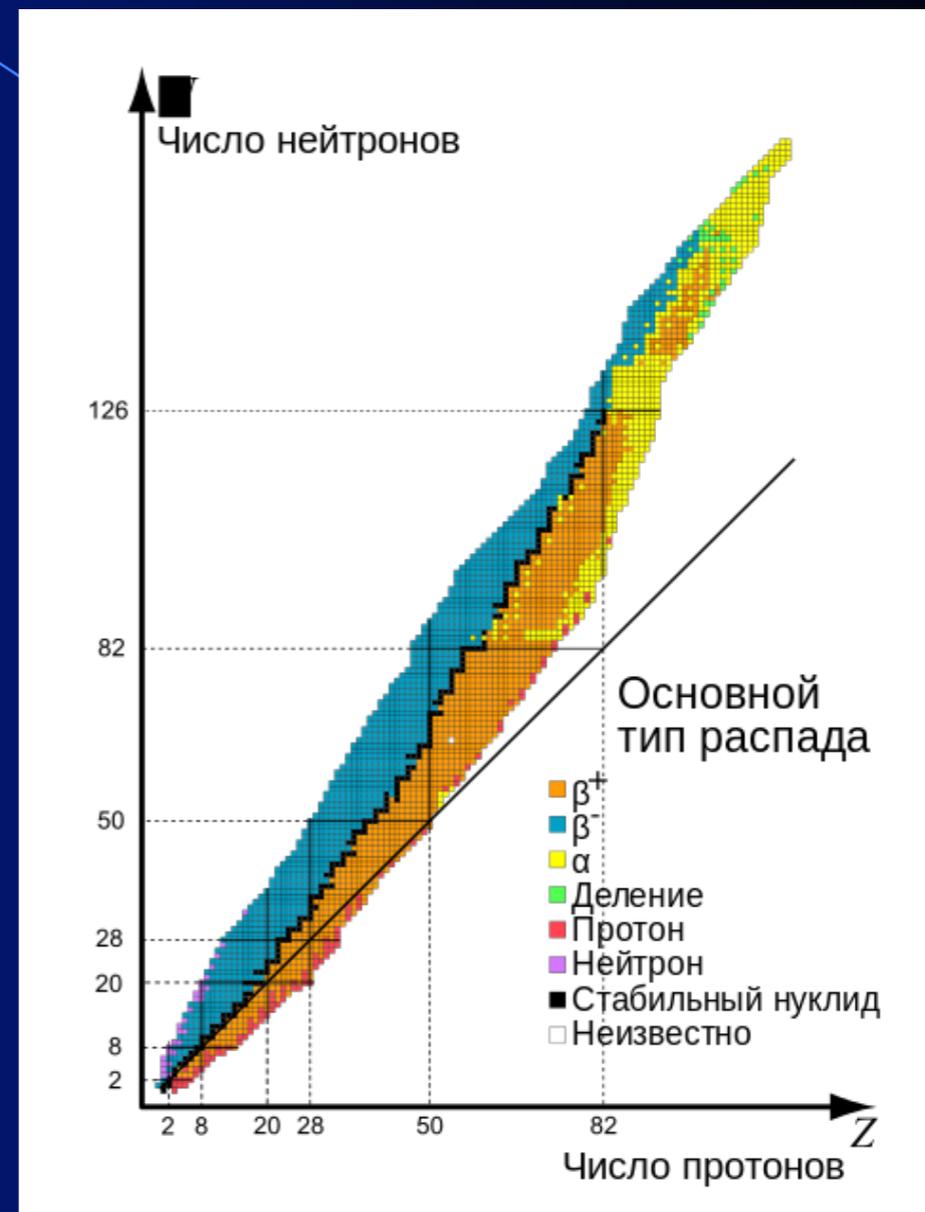
Атомное ядро



Ядро состоит из протонов и нейтронов

Атомы различаются только количеством протонов и нейтронов в ядре

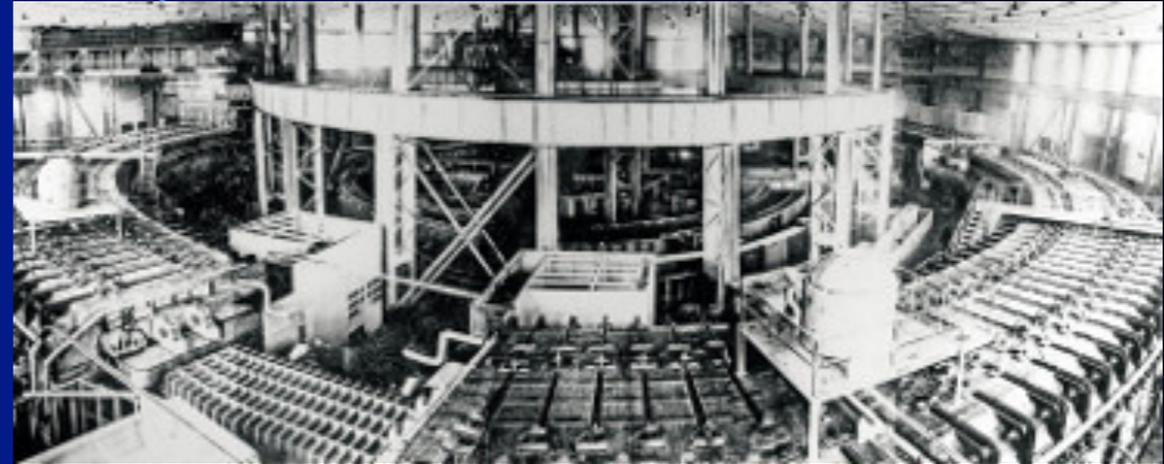
Между ними действуют ядерные силы, которые удерживают протоны и нейтроны вместе



Протонные ускорители



BNL Cosmotron (1952-1966) 3.3 GeV



Синхрофазотрон Дубна ОИЯИ 1957 10 ГэВ



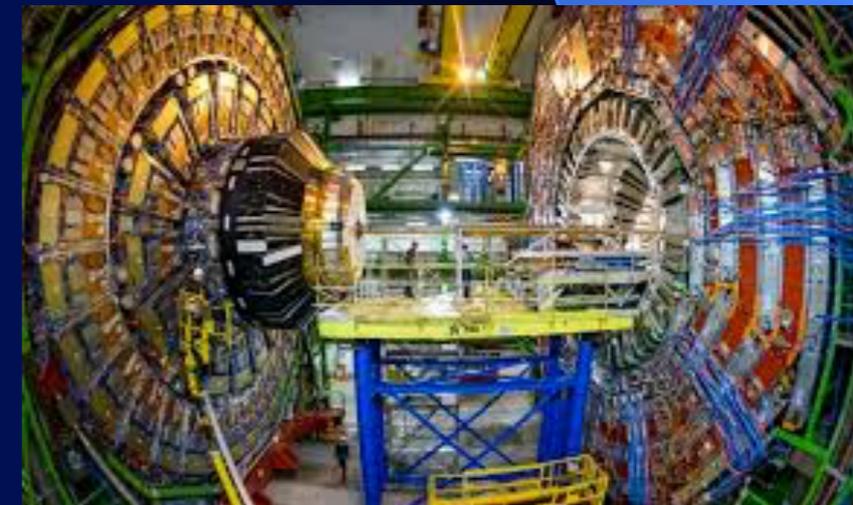
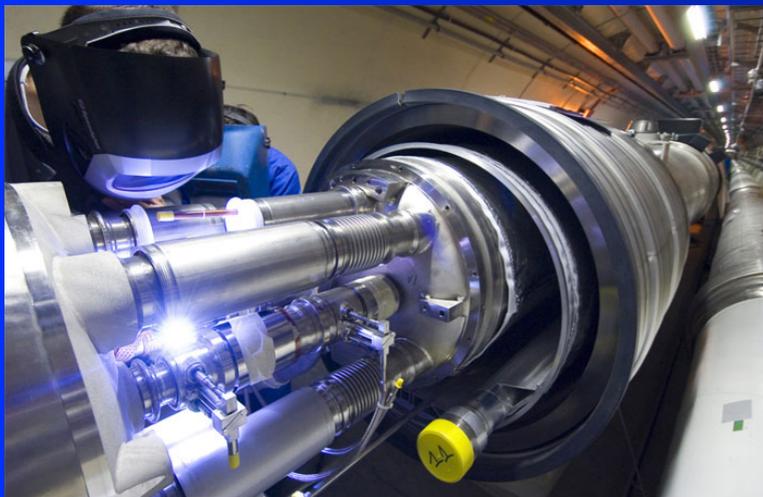
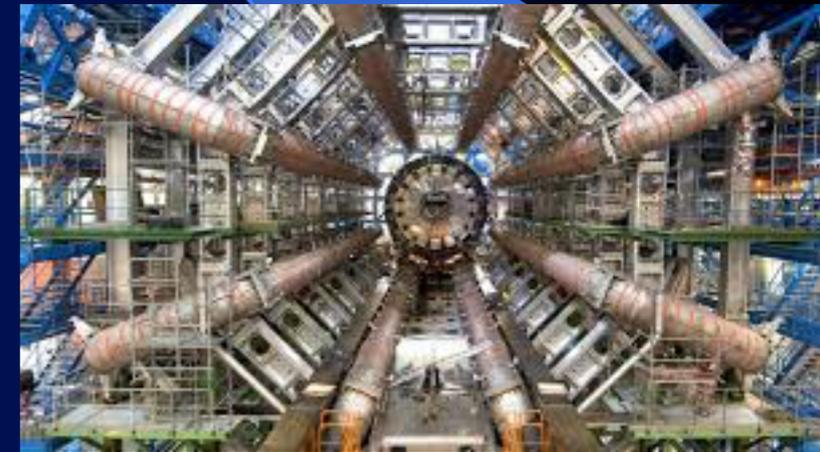
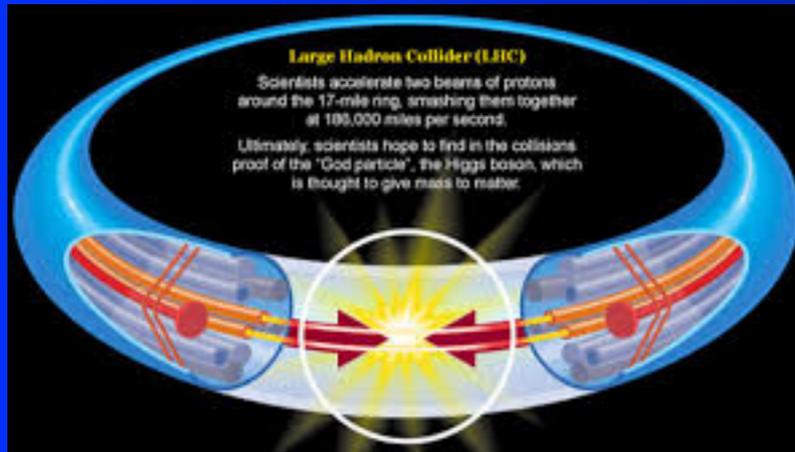
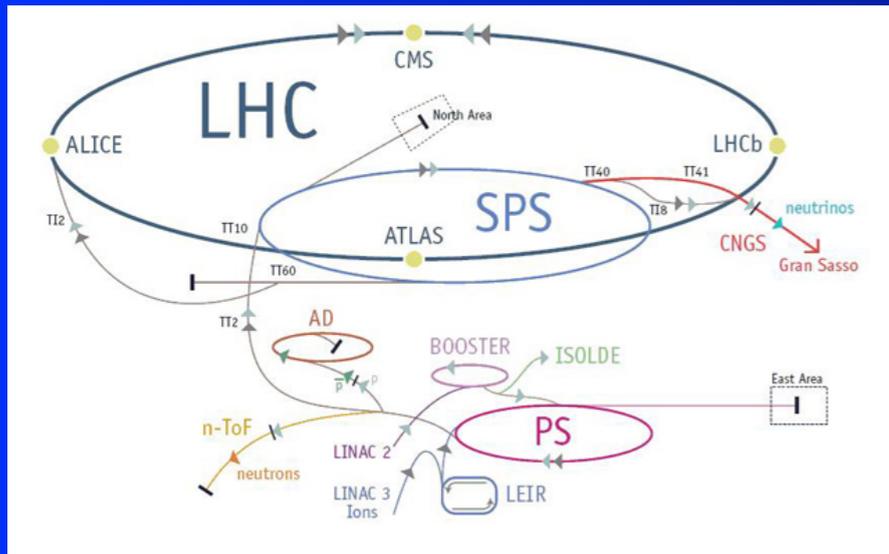
Синхрофазотрон Протвино ИФВЭ 1967 70 ГэВ



Super-proton-synchrotron CERN 1976 450 GeV

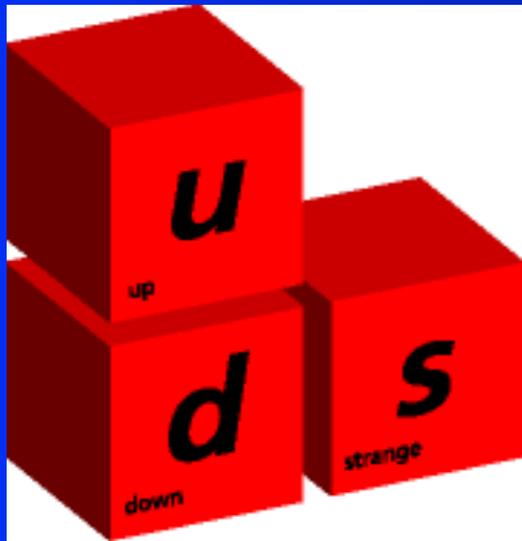
Большой адронный коллайдер

Large Hadron Collider CERN 2009- 14 000 GeV



Кварки – “кирпичики мироздания”

Появление октетов и декуплетов легко объяснить, если предположить, что все частицы «сделаны» из трёх оставяющих, которые стали называть кварками q



Они получили название верхнего (up), нижнего (down) и странного (strange) кварка

Кварки имеют дробный электрический заряд:

$$Q_u = +2/3, \quad Q_d = -1/3, \quad Q_s = -1/3,$$

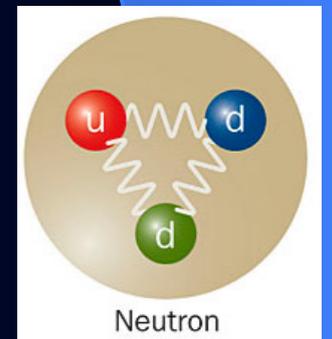
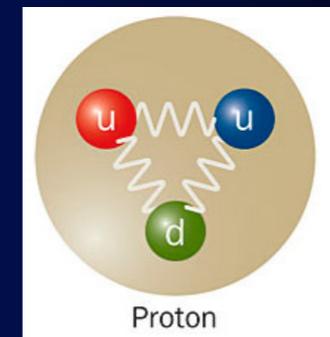
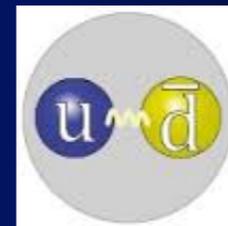
Все частицы сделаны из кварков как из кубиков.

Есть два вида частиц: барионы $B = qqq$ и мезоны $M = q\bar{q}$

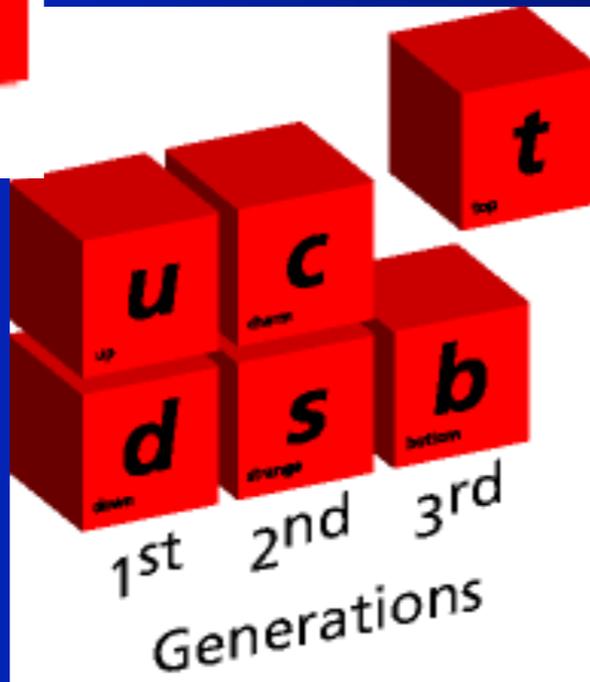
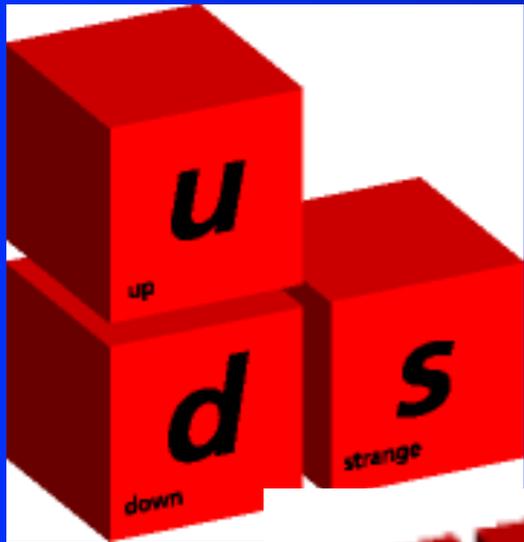
протон $p = uud, \quad Q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$

нейтрон $n = udd, \quad Q_n = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

π^+ -мезон $\pi^+ = u\bar{d}, \quad Q_{\pi} = 2/3 + 1/3 = 1$



Кварки — “кирпичики мироздания”

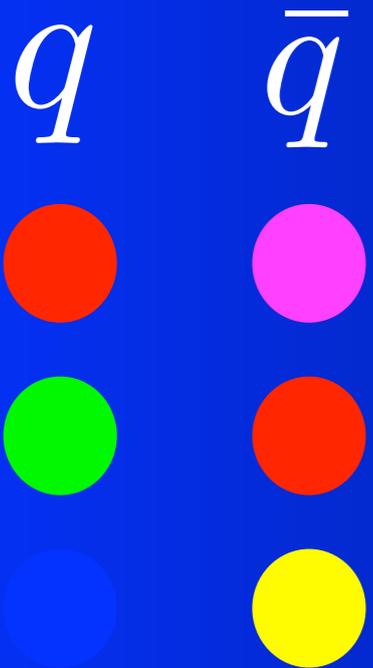


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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

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

Цветные кварки



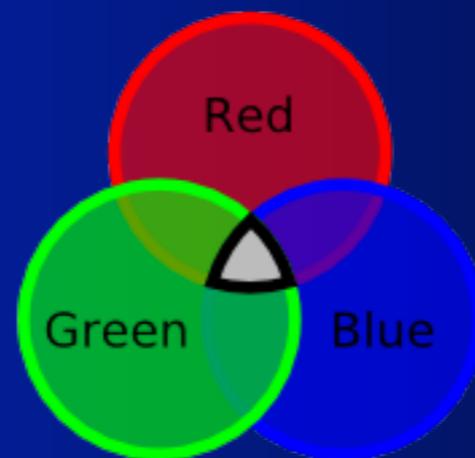
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

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

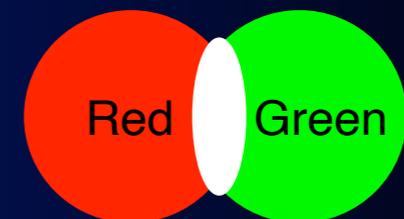
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

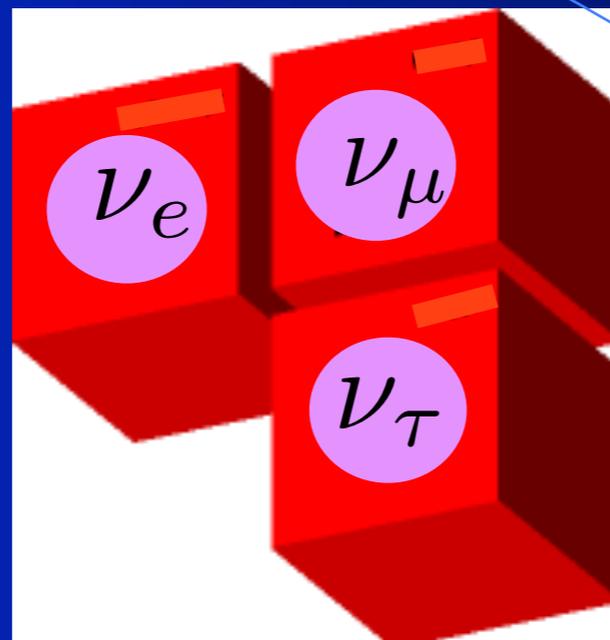
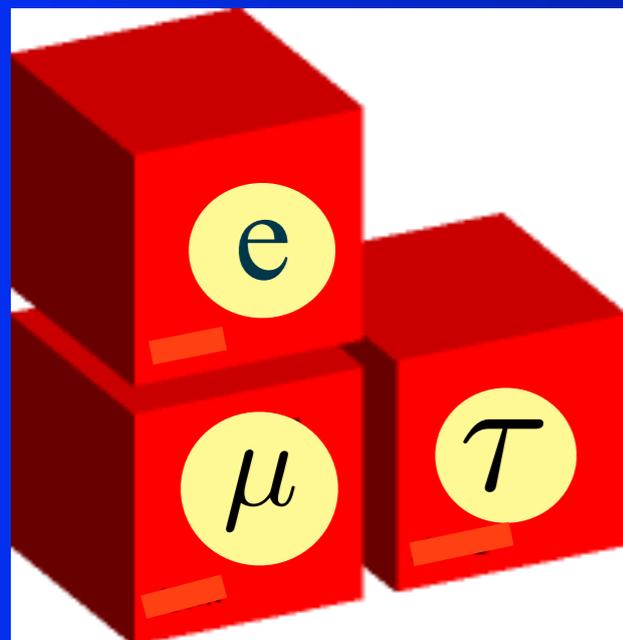


барион



МЕЗОН

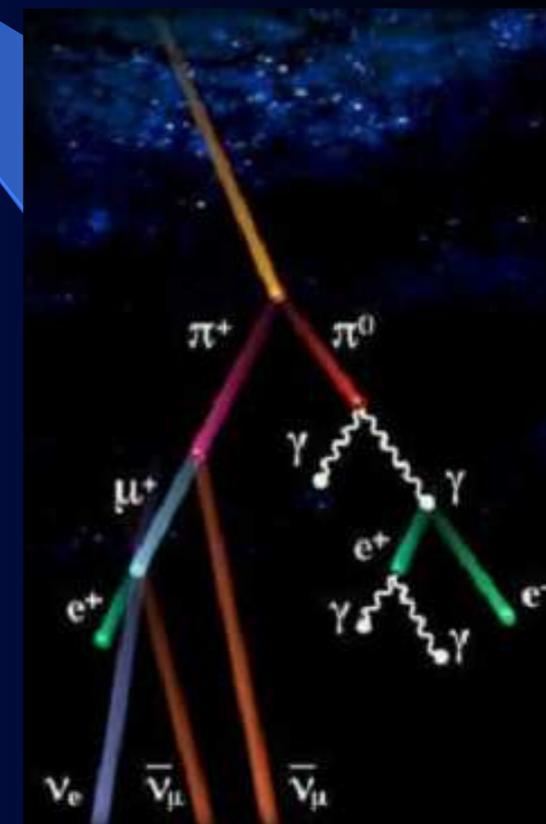
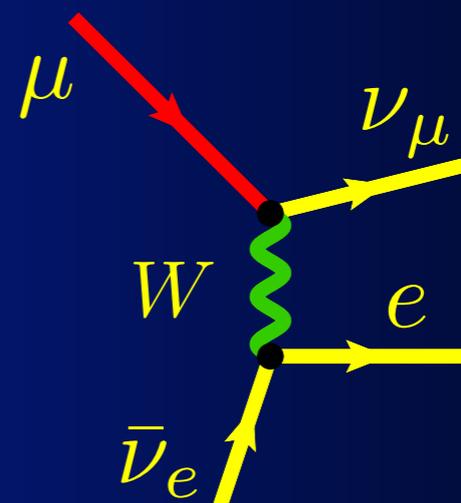
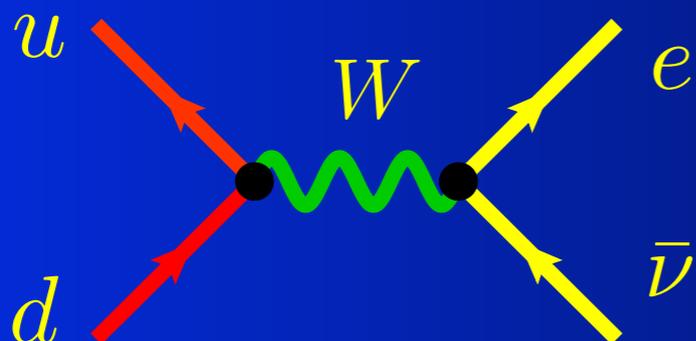
Лептоны от слова ΛΕΤΤΌΣ



Природа создала две копии электронов и нейтрино, каждая копия тяжелее предыдущей

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

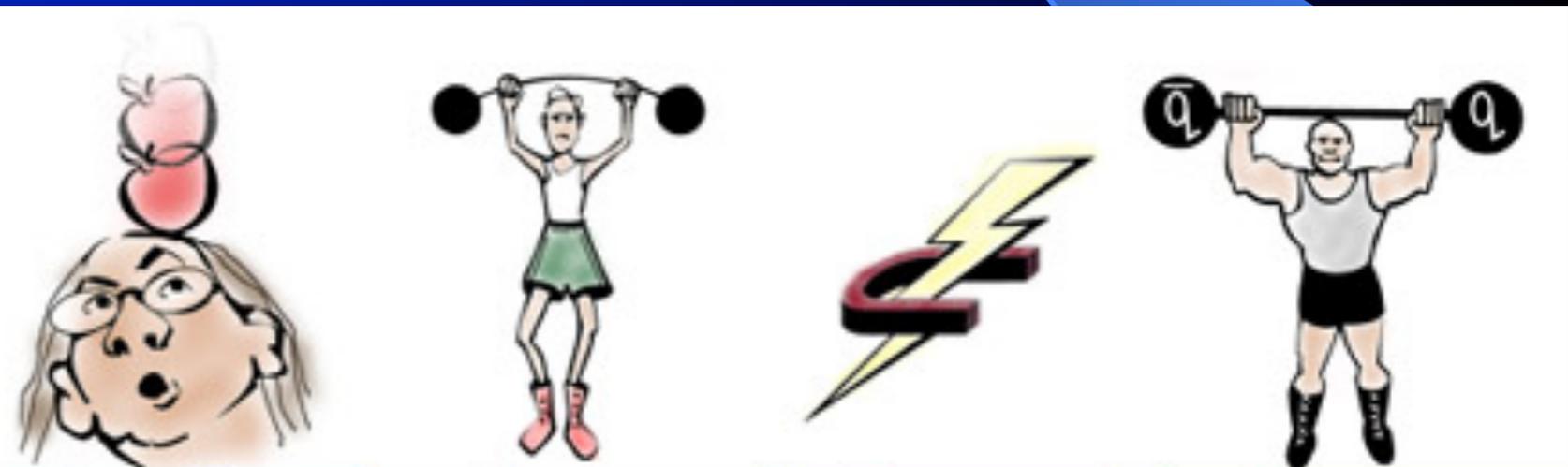
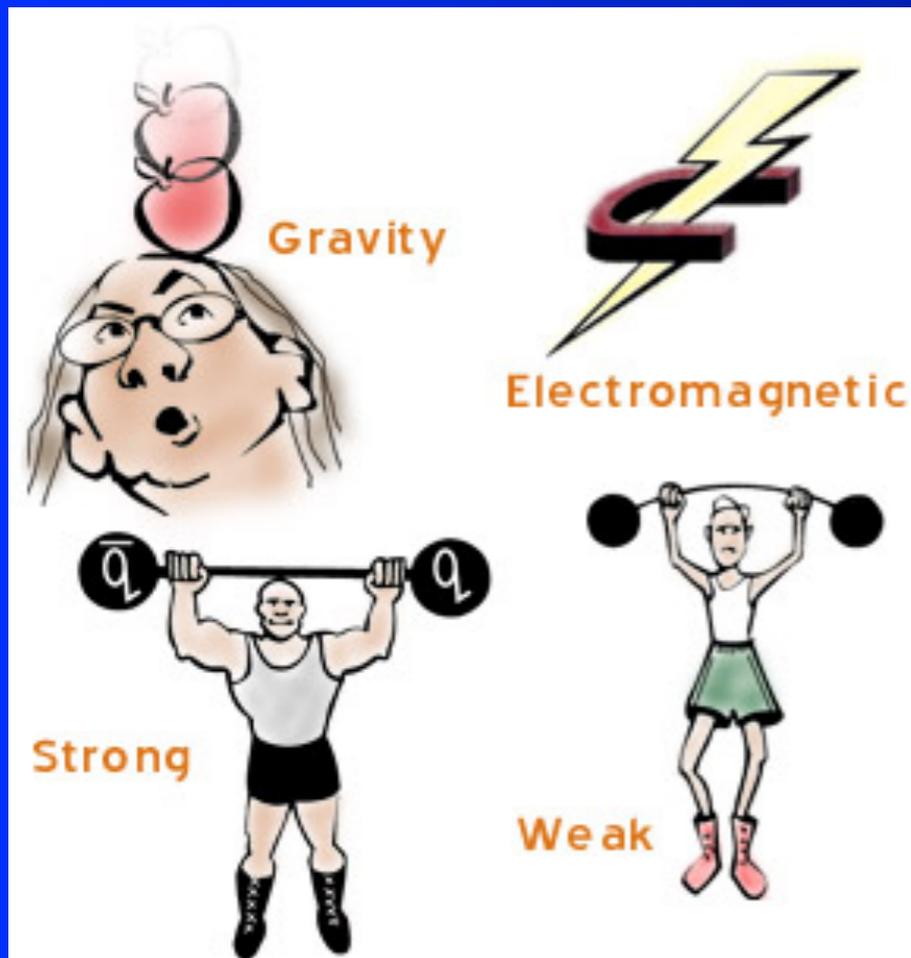
G

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.

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

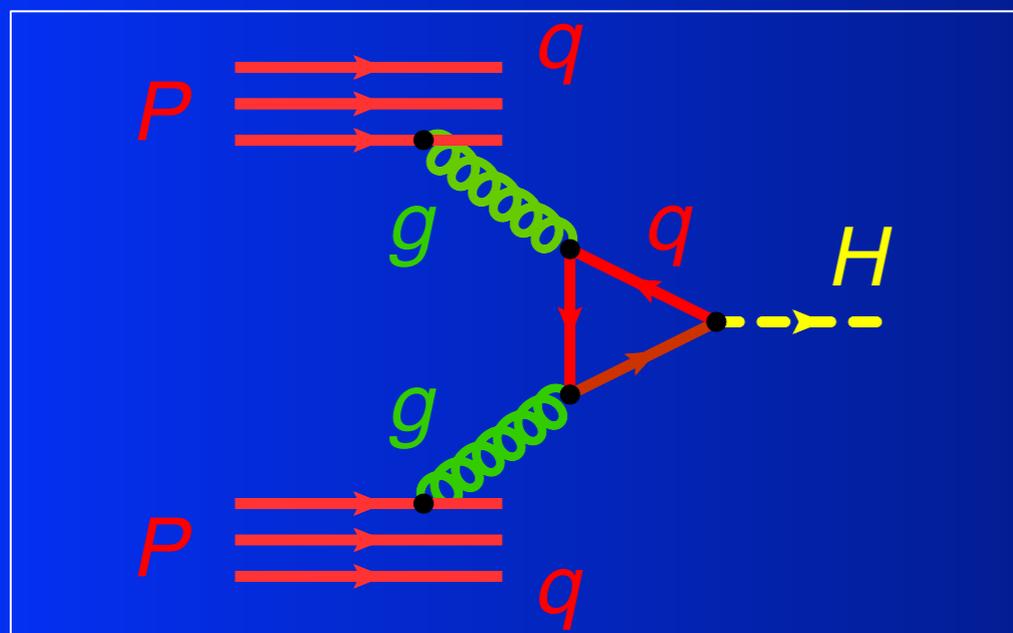


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

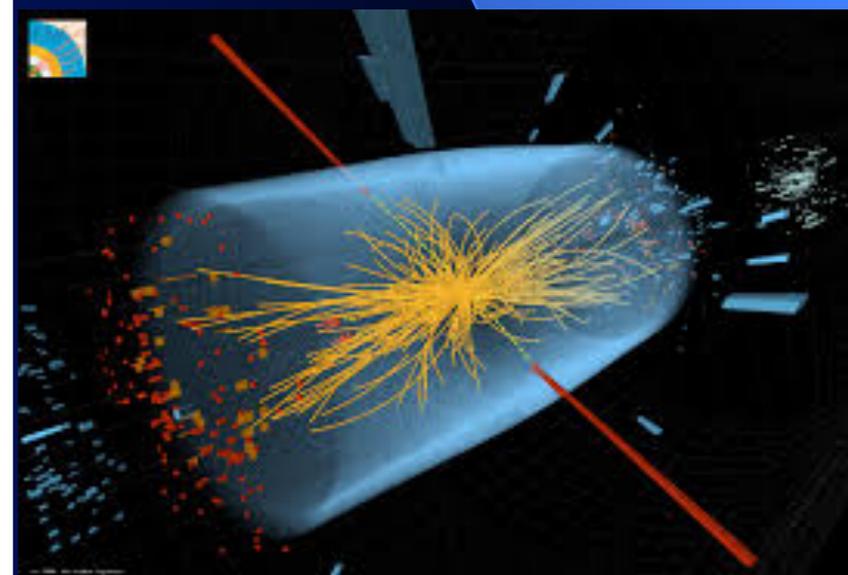
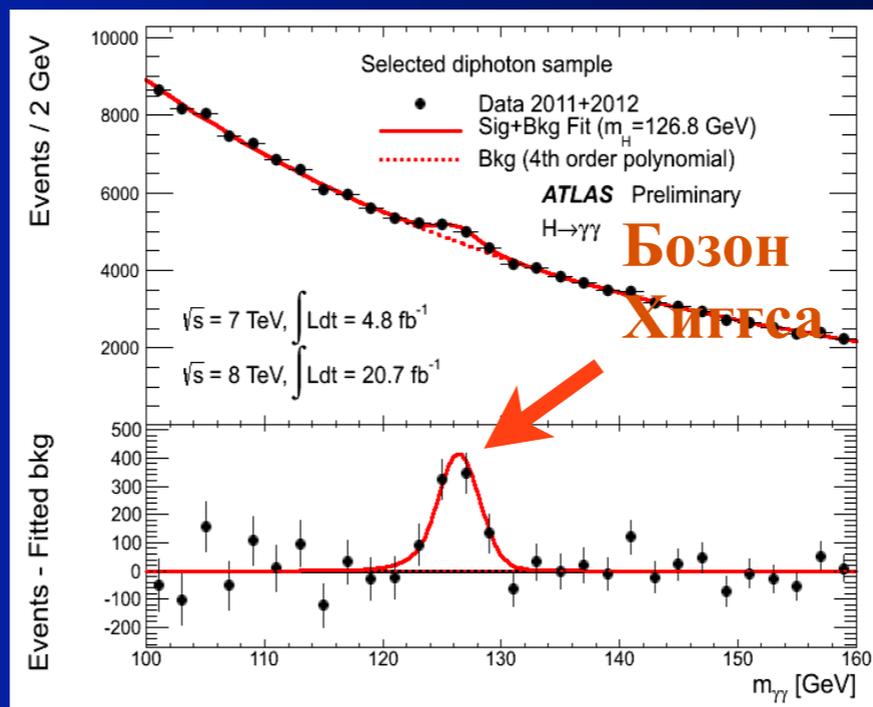
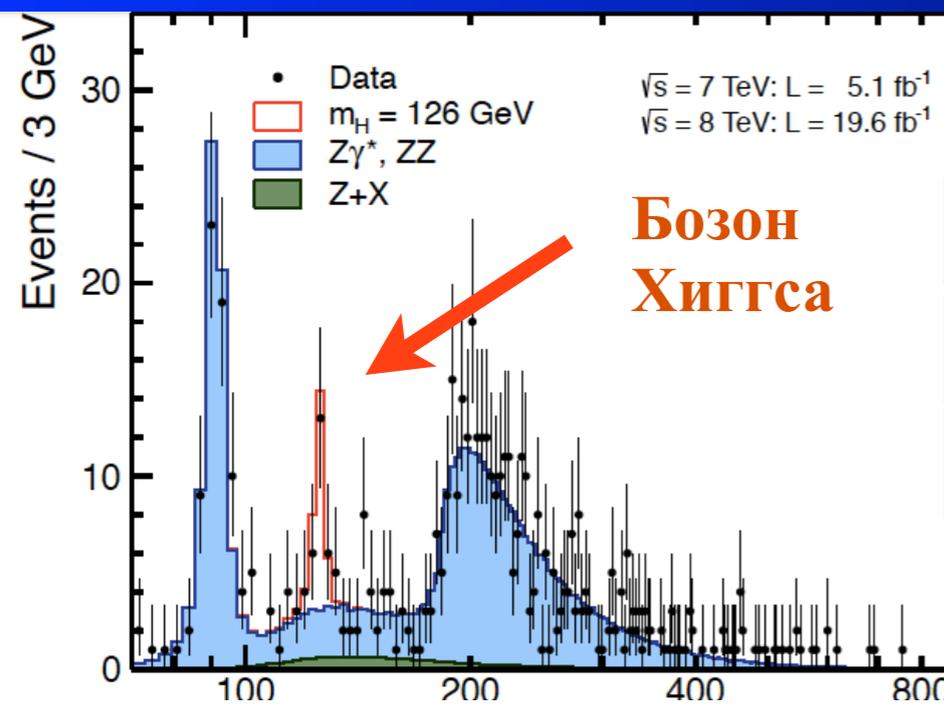
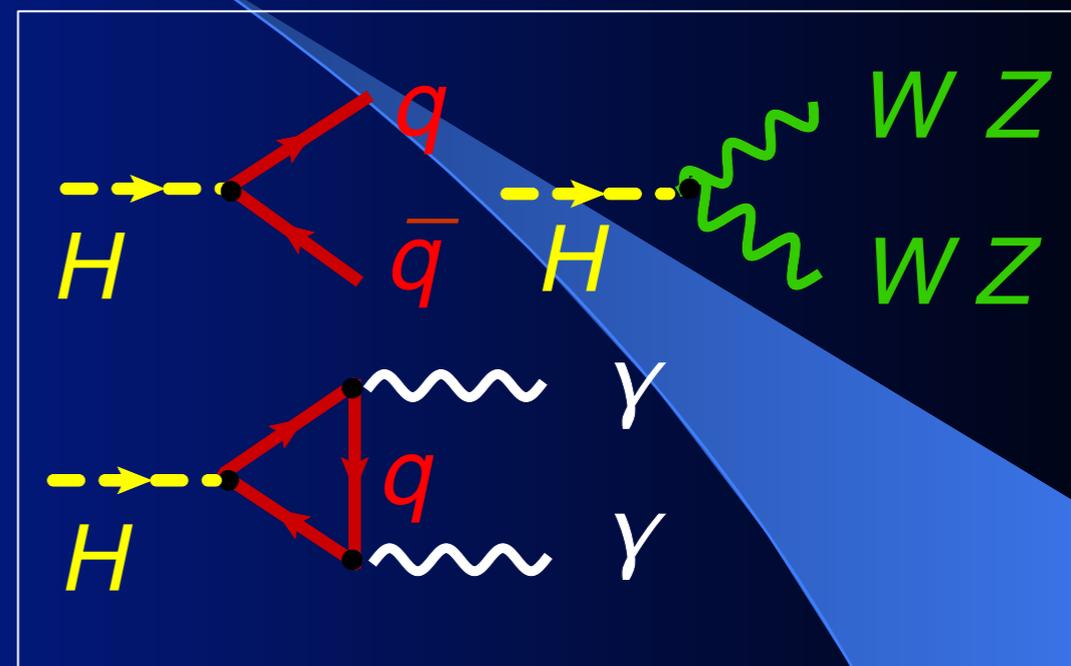
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

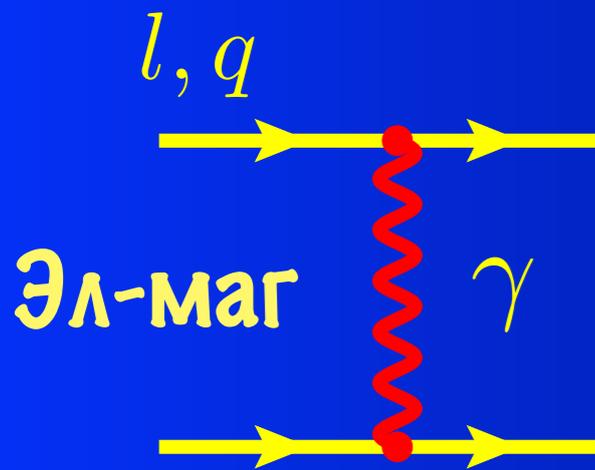
Рождение на протонном коллайдере



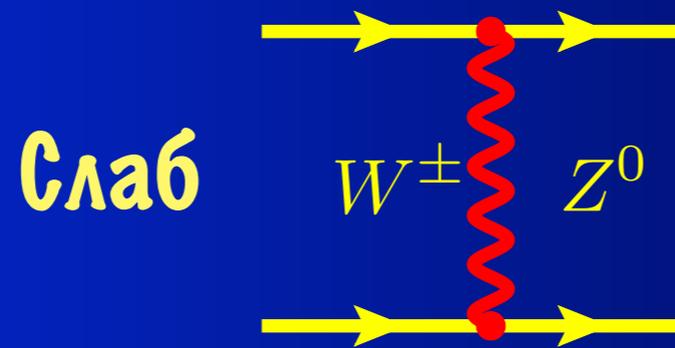
Процессы распада



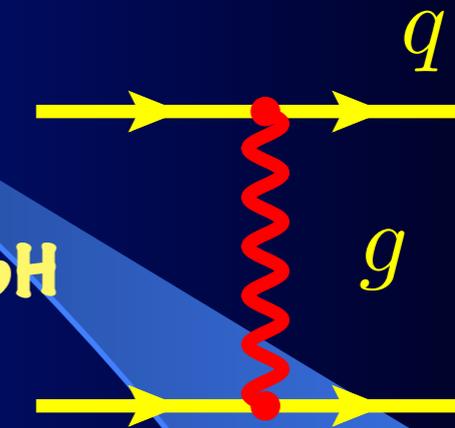
Пять фундаментальных сил Природы



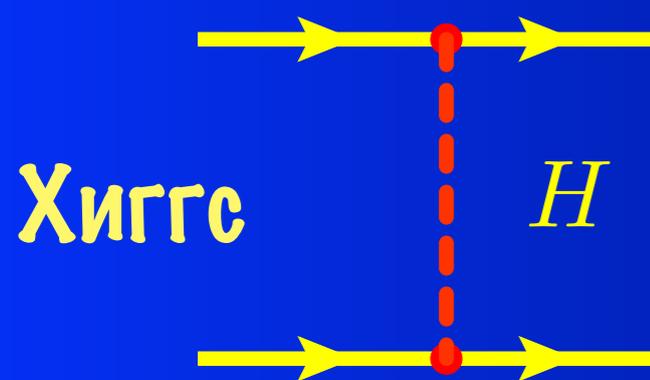
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



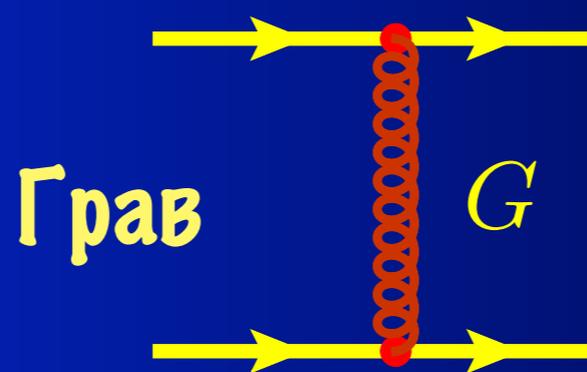
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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



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

Спин

γ	$W^\pm Z^0$	g	=1
H			=0
G			=2

Стандартная Модель



Ч
Д
И
Т
С
А
Ц
Ы

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)

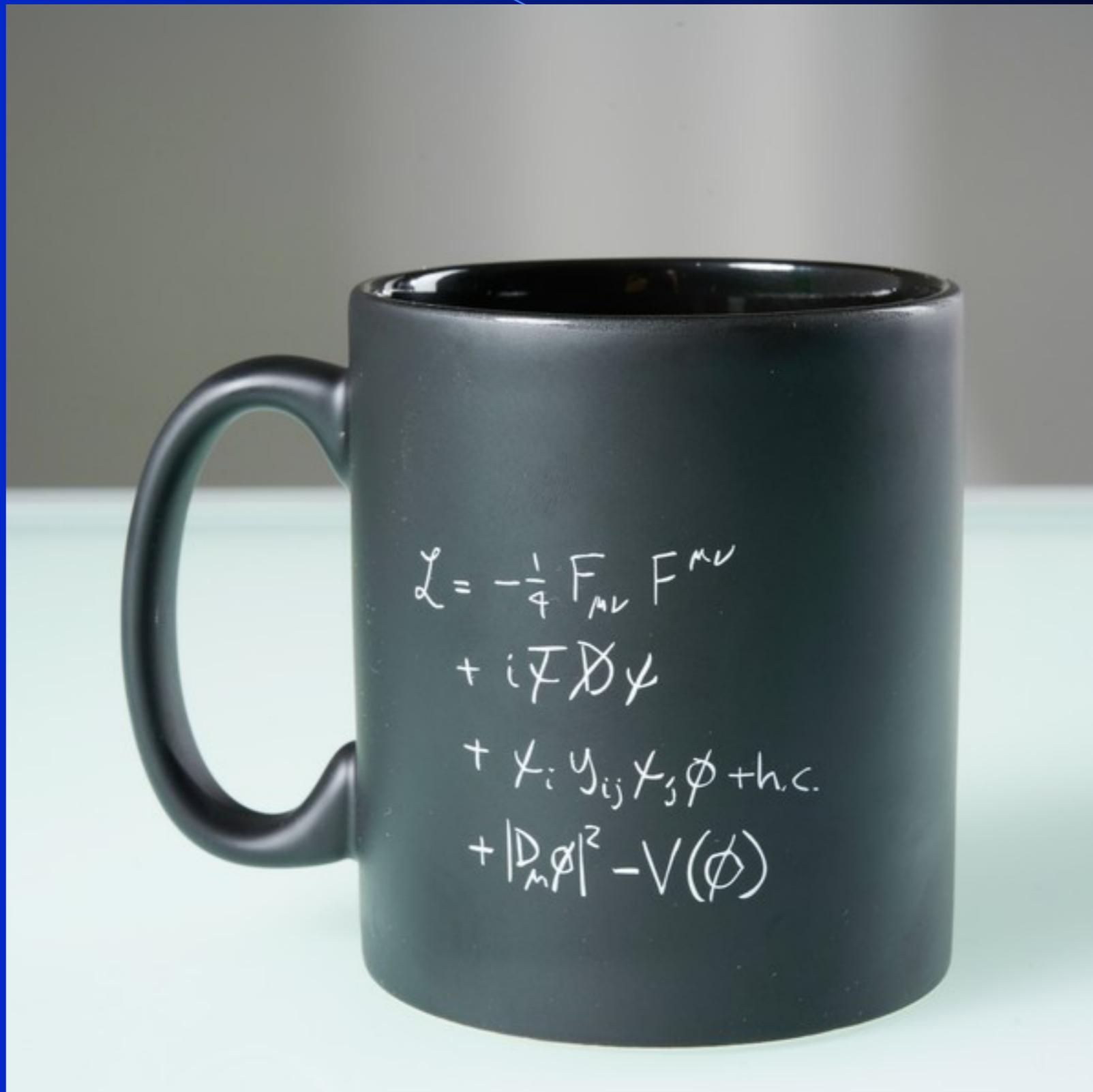
Силы

Электромагнитные

Сильные

Слабые

Стандартная Модель



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

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

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

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

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

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

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

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

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

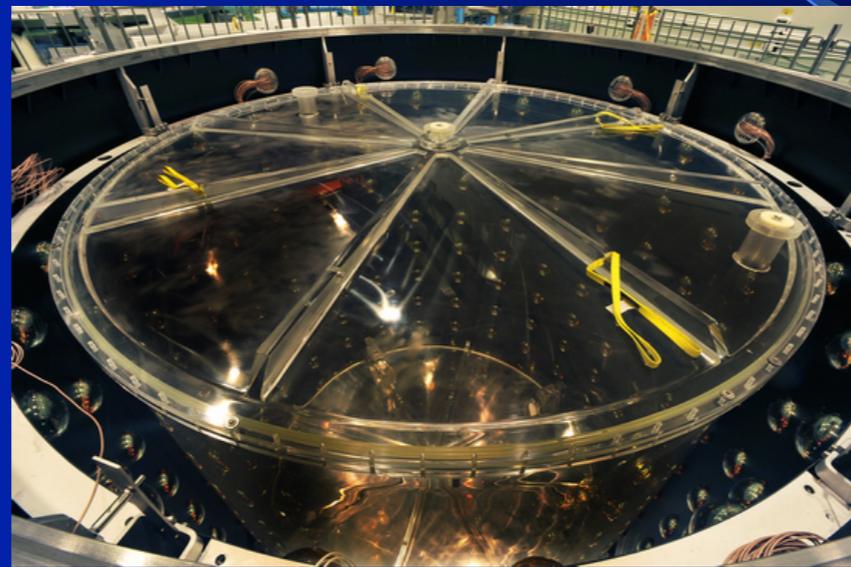
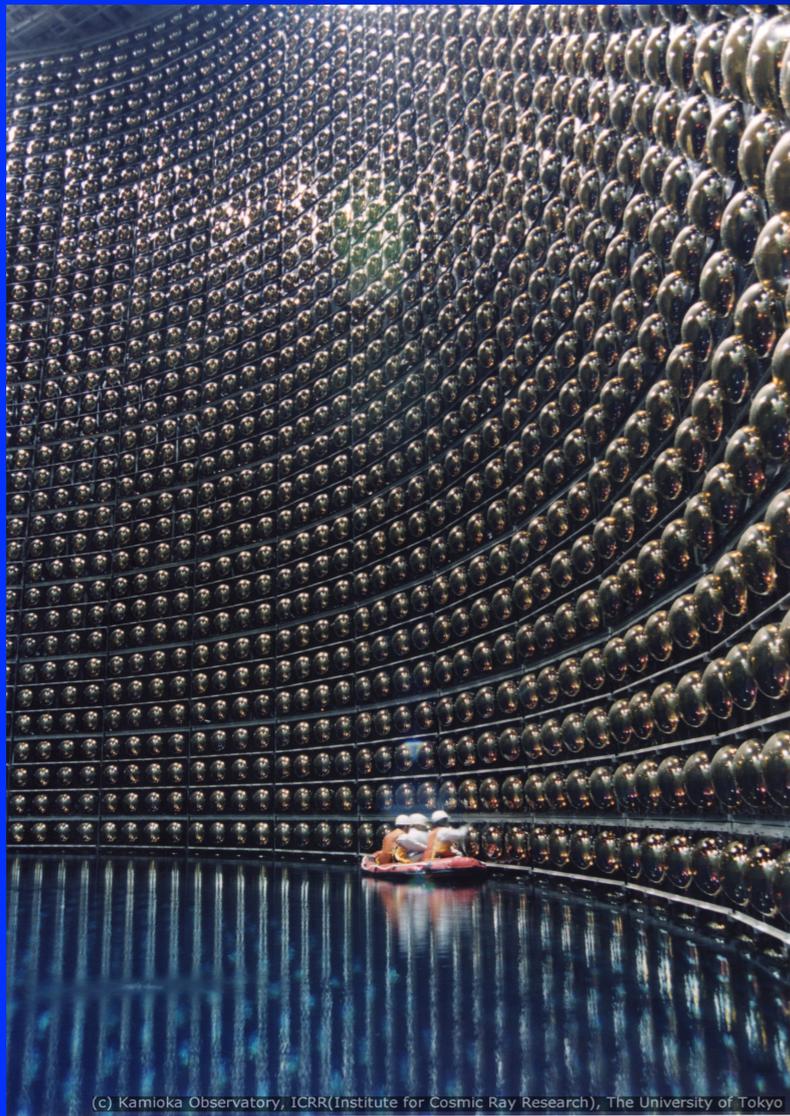
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu 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}$$

Нейтрино - неуловимая

частица

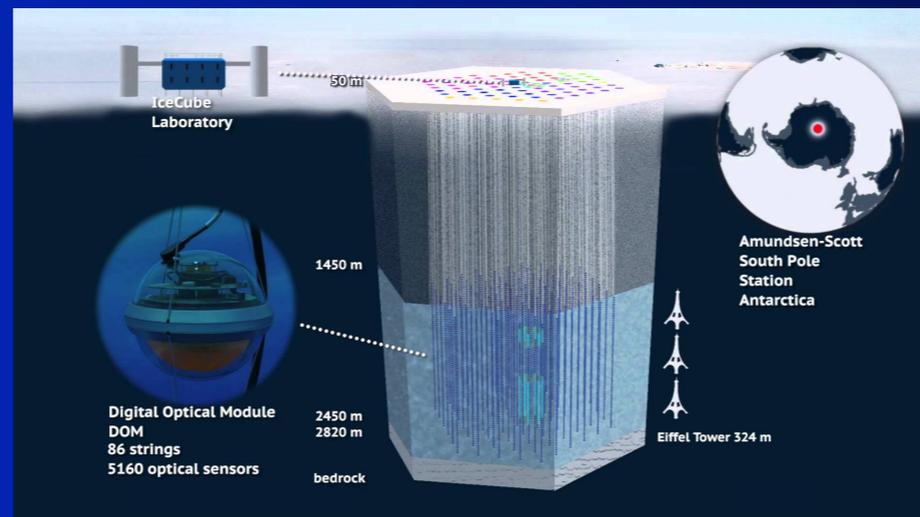
Dune

Daya Bay

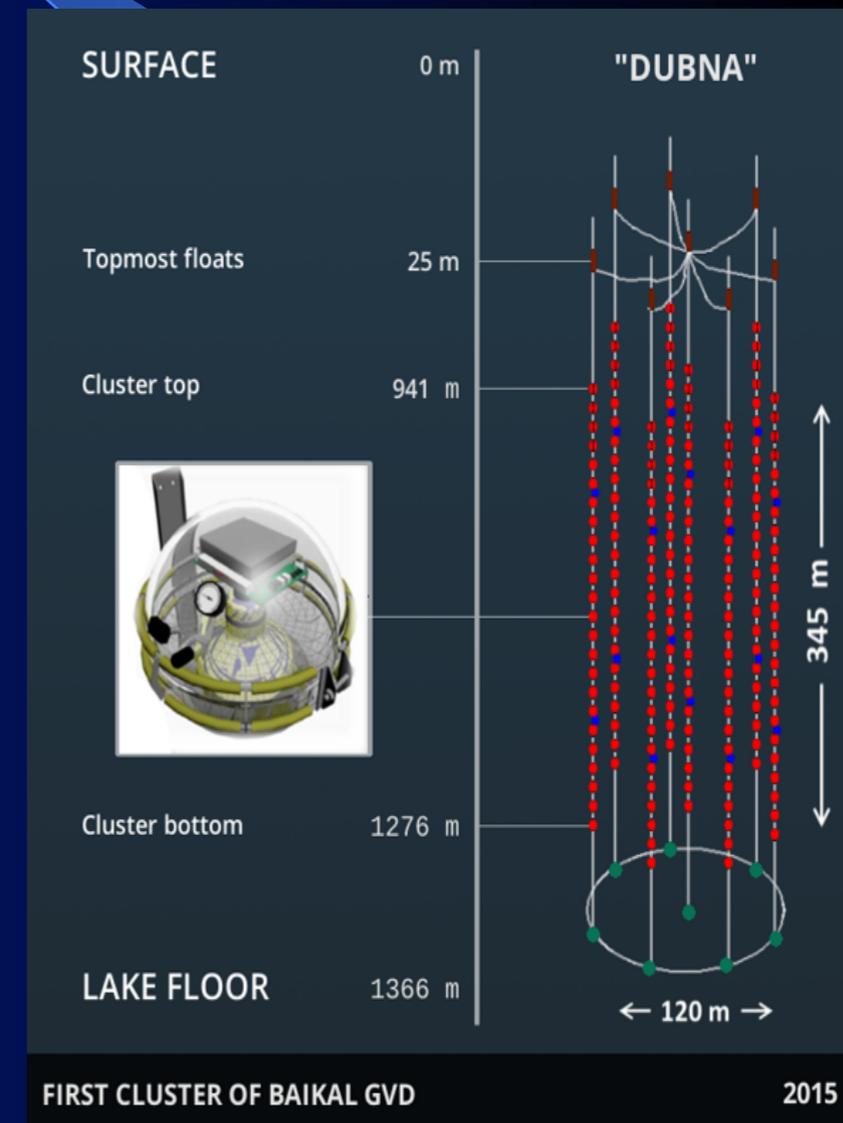


Nova

Juno



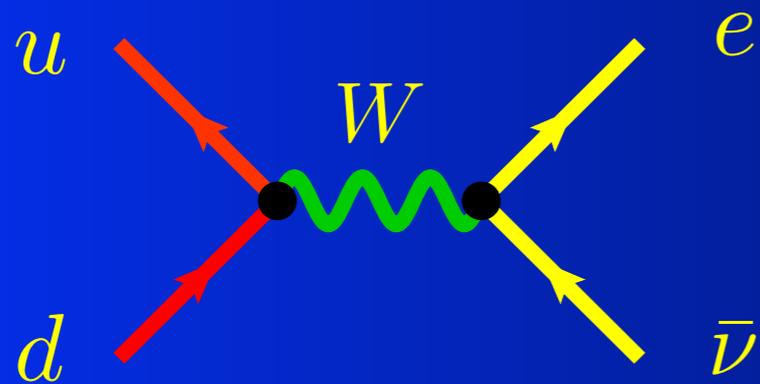
Baikal GVD



HyperK

Neutrino-mysterious particle

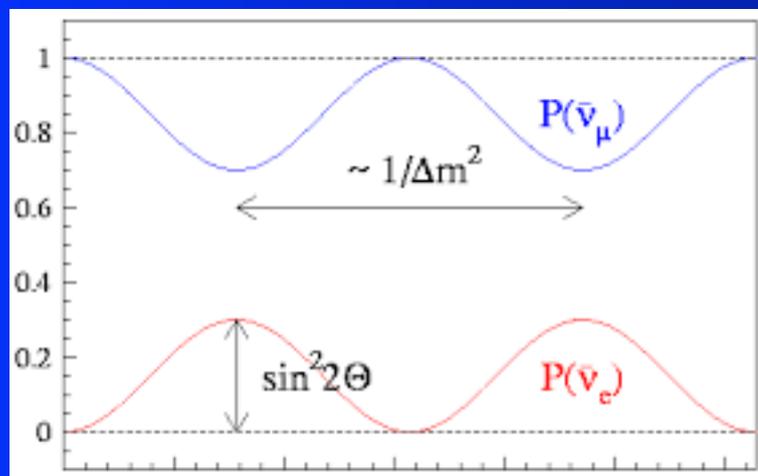
Neutrino is created in the process of weak decays of hadrons



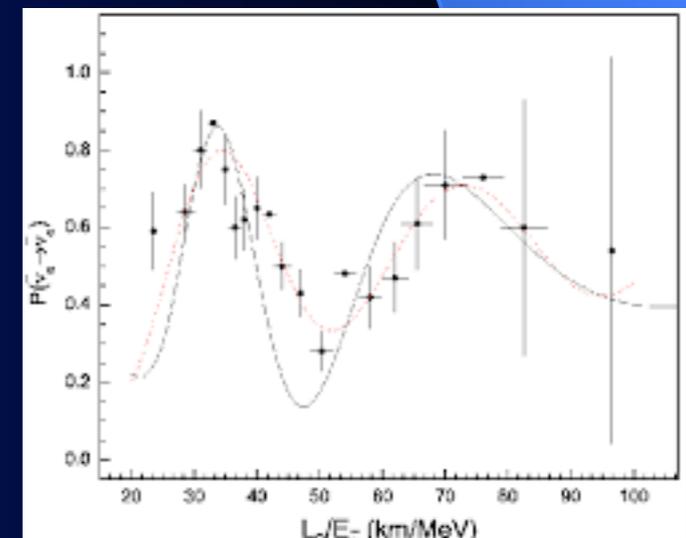
Neutrino

- Has no electric charge
- Do not participate in electromagnetic interactions
- Do not participate in strong interactions
- Participate in weak interactions
- Interact with the Higgs field
- Has a very small (< 1 eV) mass

Non-zero neutrino mass follows from the observation of neutrino oscillations

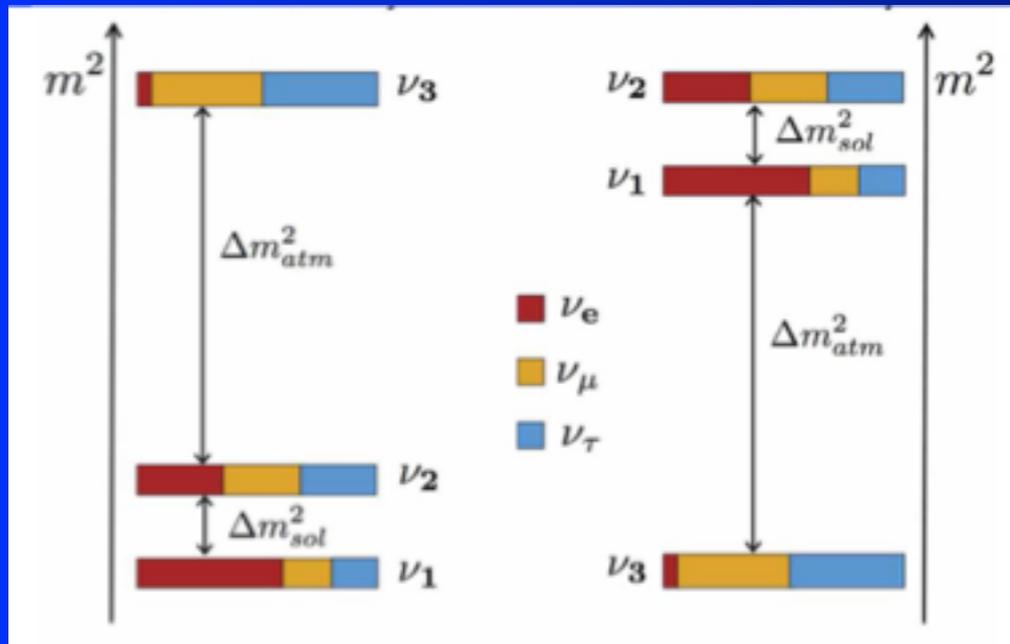


$$P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}} = \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{\alpha\beta}^2 L}{4E} \right)$$



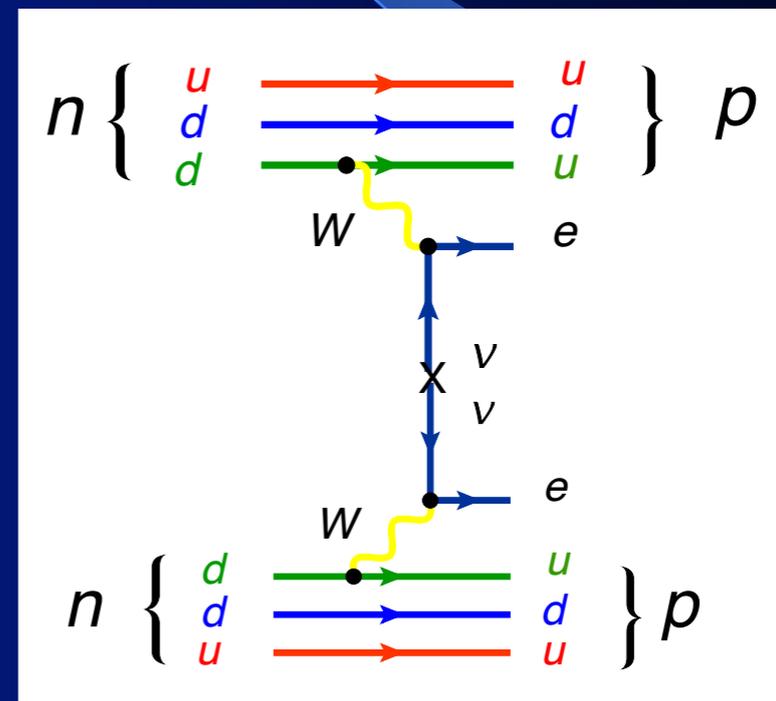
Физика Нейтрино

Иерархия масс



Neutrinoless double β -decay

$0\nu\beta\beta$ decay



$$0.06 \text{ eV} < \sum m_\nu < 0.12 \text{ eV}$$

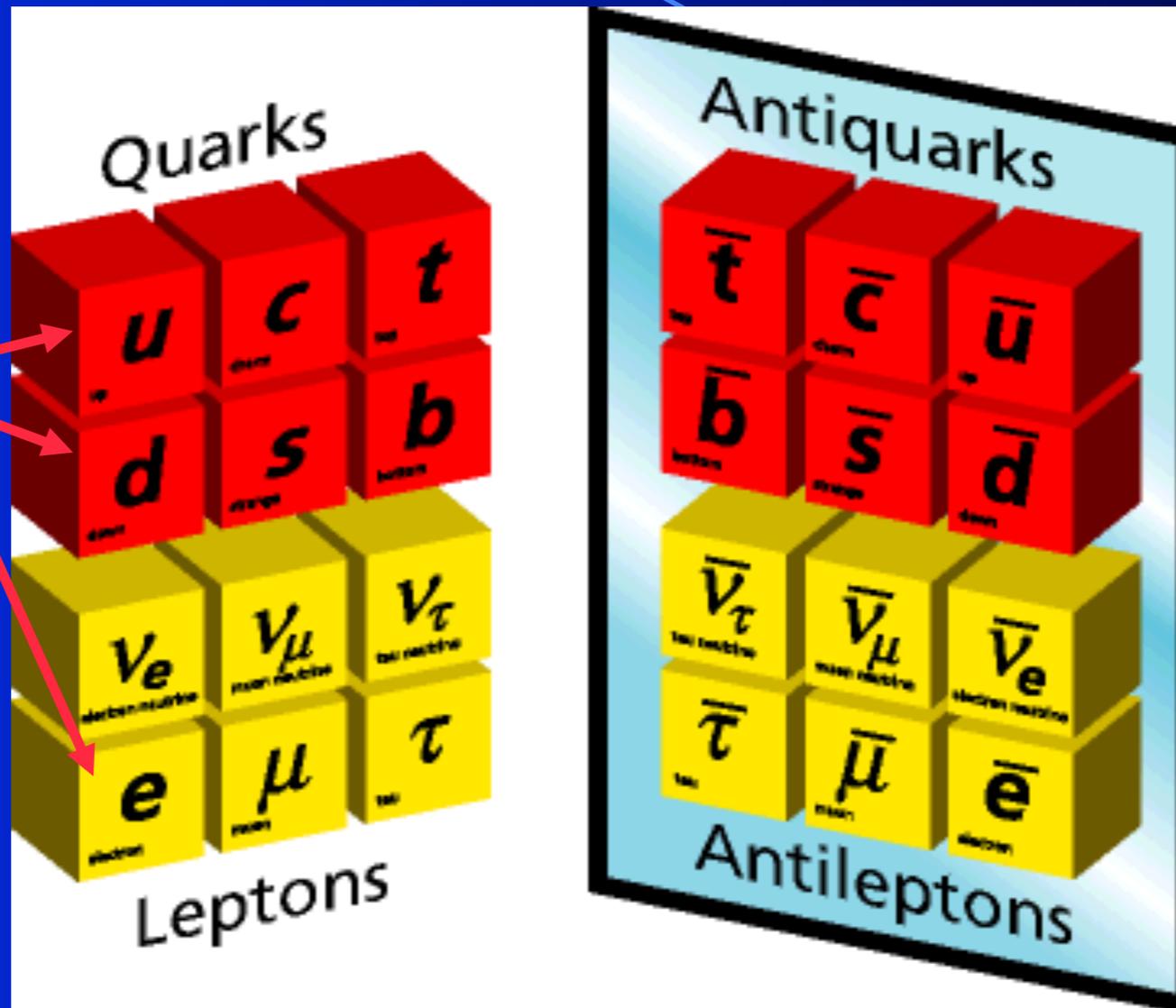
↑
 ν -OSC

↑
CMB

- Абсолютное значение масс нейтрино?
- Иерархия масс нейтрино?
- Природа нейтрино (античастица)?
- Стерильные нейтрино?
- Тёмная материя из нейтрино?

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

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

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

среднее число барионов в единице объёма

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

Остаток после взаимной аннигиляции



Три критерия Сахарова:

- Нарушение барионного числа
- Нарушение C и CP инвариантности
- Нарушение теплового равновесия

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

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)

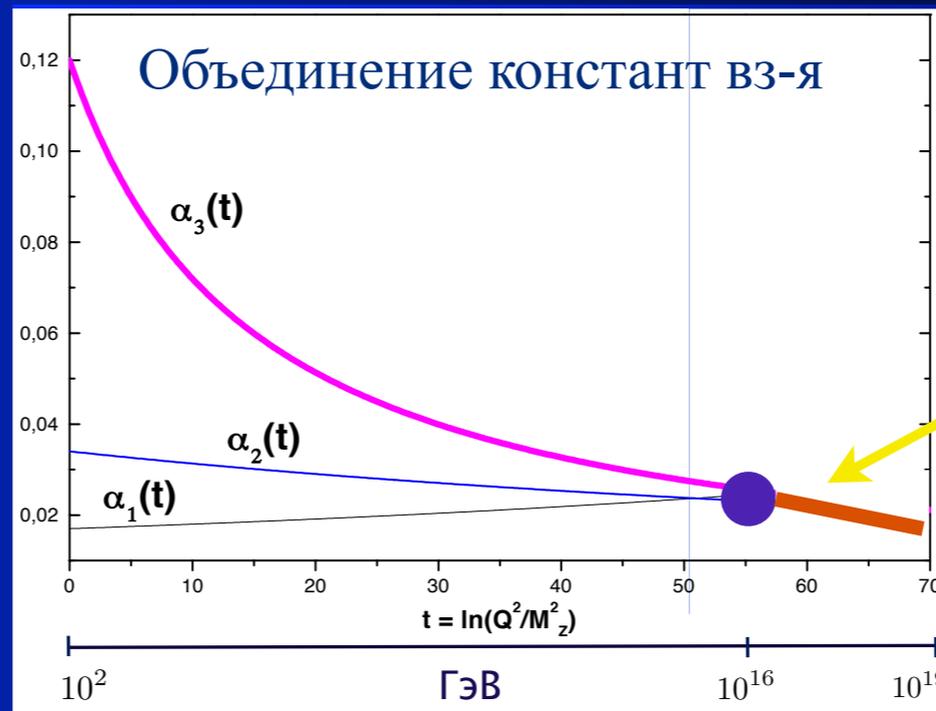
- Три различные силы: сильные, слабые и электромагнитные являются «ветвями» единой силы

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

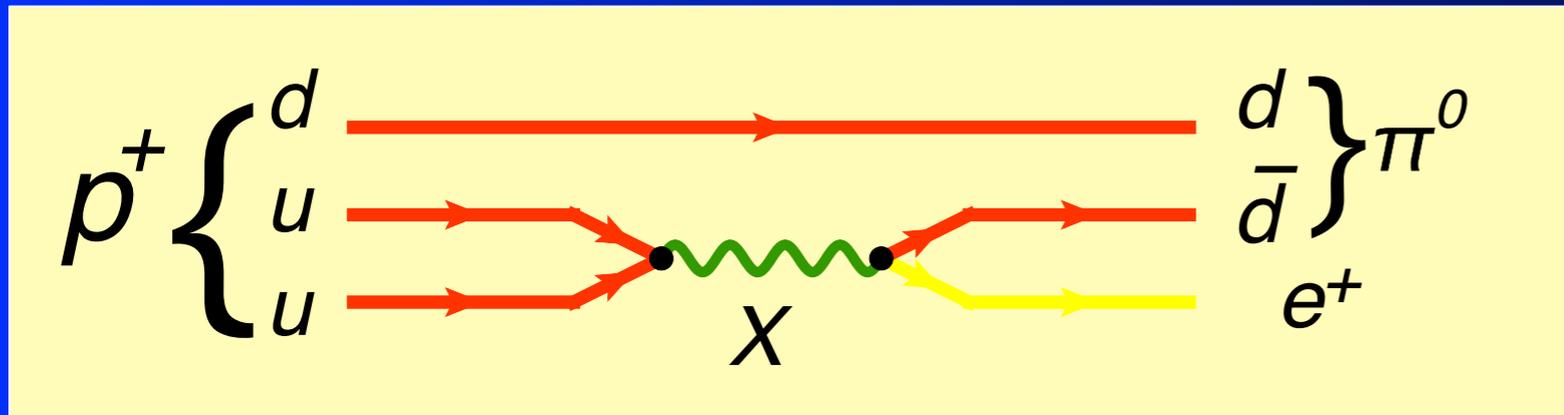
«объединение» констант вз-я - есть следствие их общего происхождения

Нестабильность протона

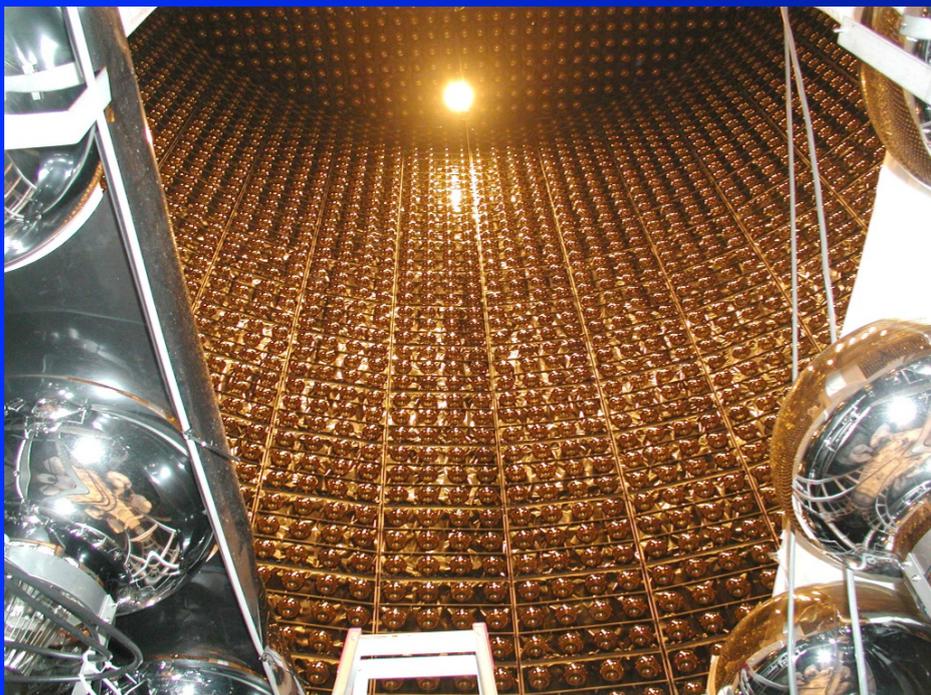
В Теории Великого Объединения кварки и лептоны равноправны и превращаются друг в друга. Это приводит к распаду протона.

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

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



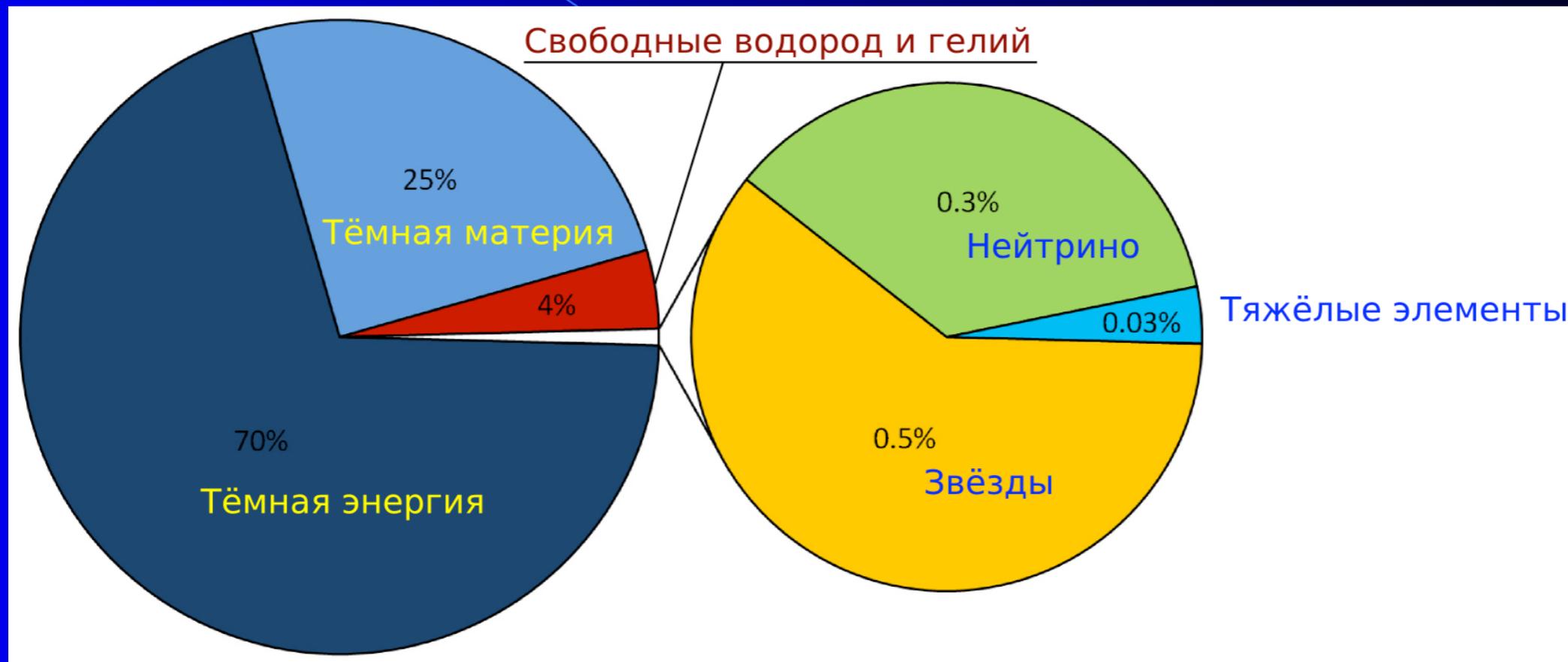
Камиока (Япония)



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

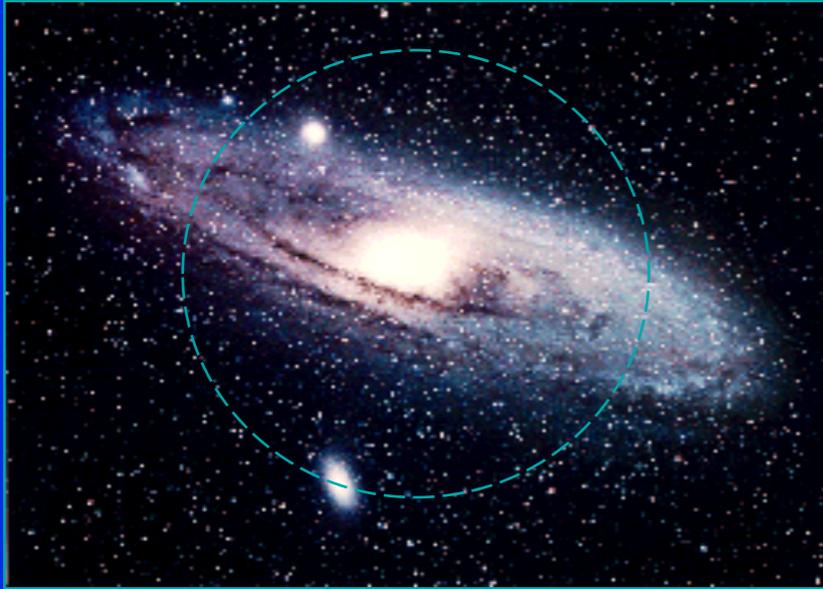
Энергетический баланс Вселенной

- Температурные флуктуации микроволнового фона
- Взрывы сверхновых



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

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

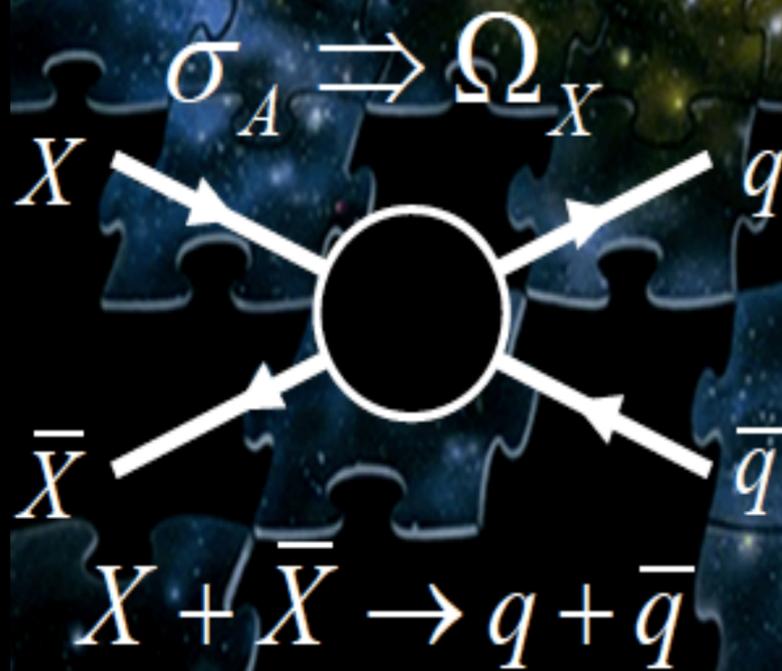


- Частица тёмной материи должна быть нейтральной, стабильной, слабо и/или гравитационно взаимодействующей
- В Стандартной модели нет такой частицы (за исключением возможно тяжёлого правого нейтрино)

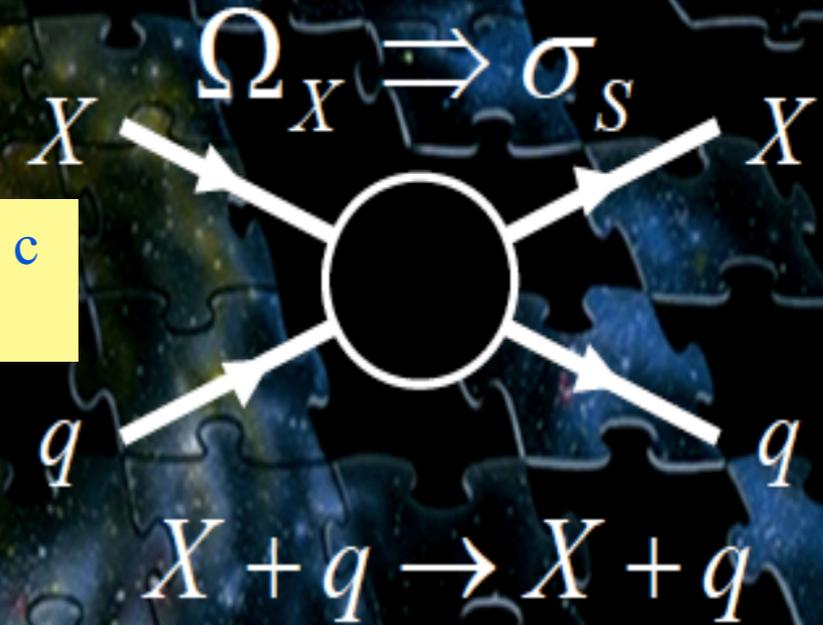
- Частицы ТМ не участвуют в сильных взаимодействиях и не испускают свет.
- В силу этого они не могут образовывать компактных объектов

Поиск частиц тёмной материи

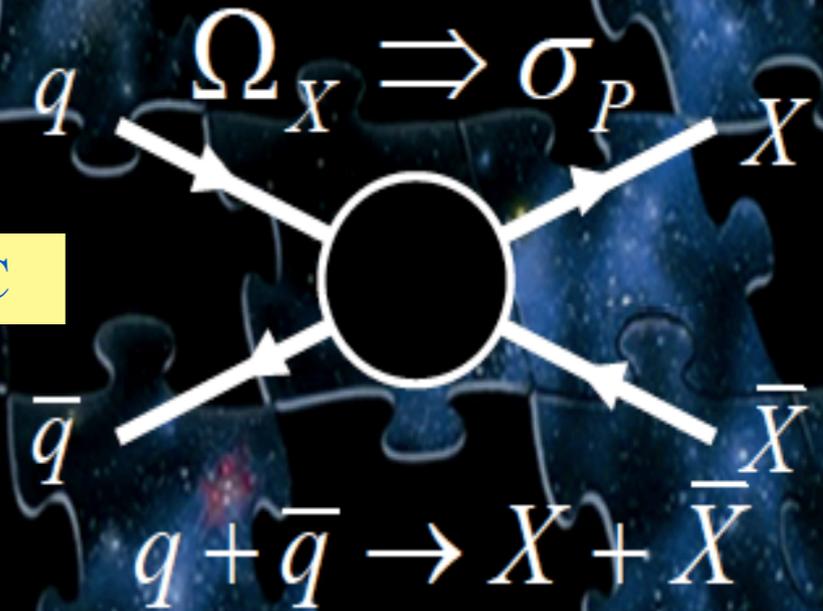
Аннигиляция \rightarrow новая компонента в космических лучах



Прямое вз-е с веществом



Рождение на LHC



R. Kolb

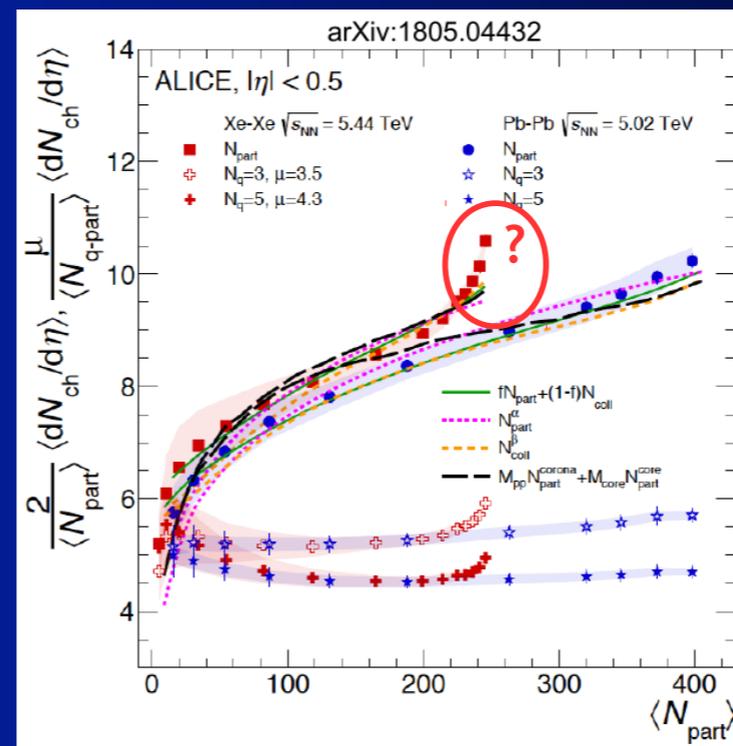
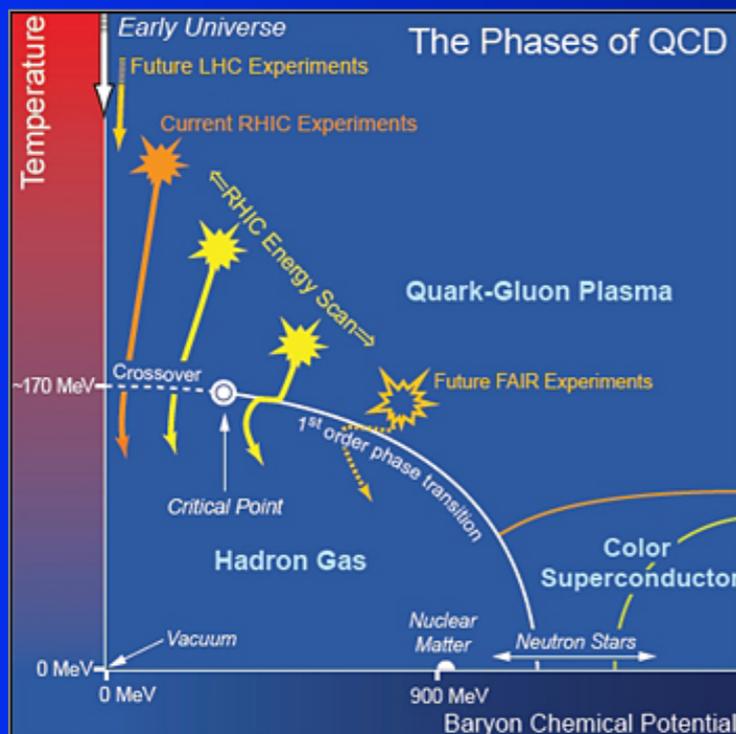
Сигнал пока отсутствует

Новое состояние вещества - кварк-глюонная плазма

Столкновения тяжёлых ионов: новые состояния вещества и новые явления при рекордных плотностях



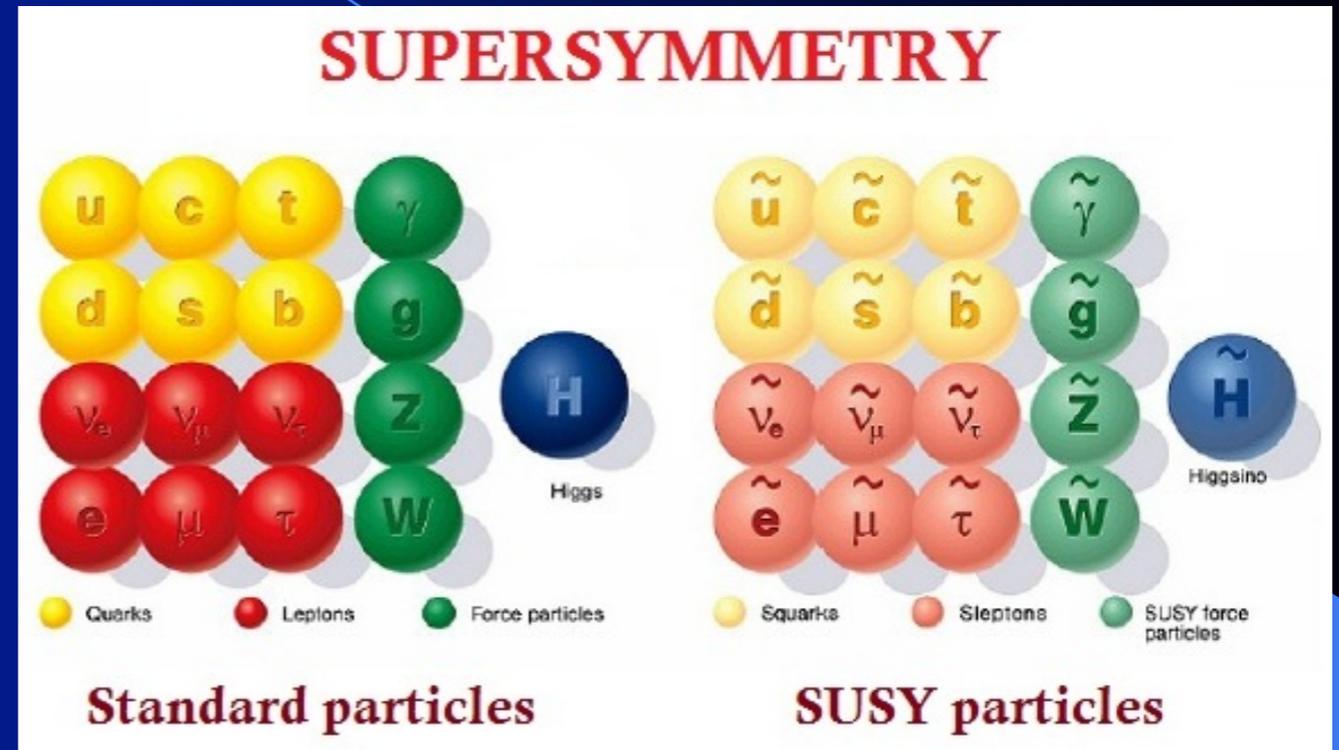
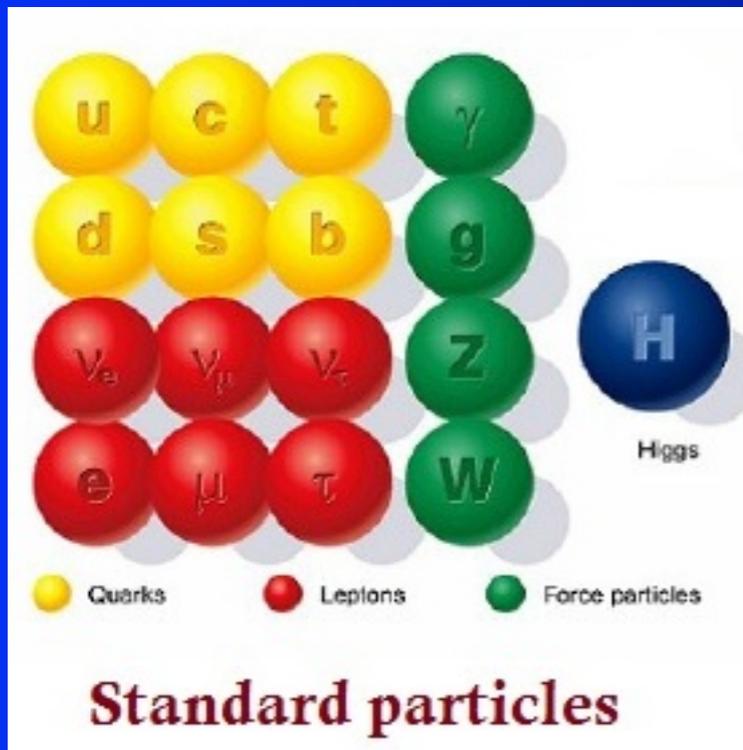
Фазовая диаграмма КХД



Резкое возрастание множественности при центральном столкновении в XeXe - невидимое в PbPb

Суперсимметрия

Суперсимметрия - это мечта о единой теории всех частиц и взаимодействий



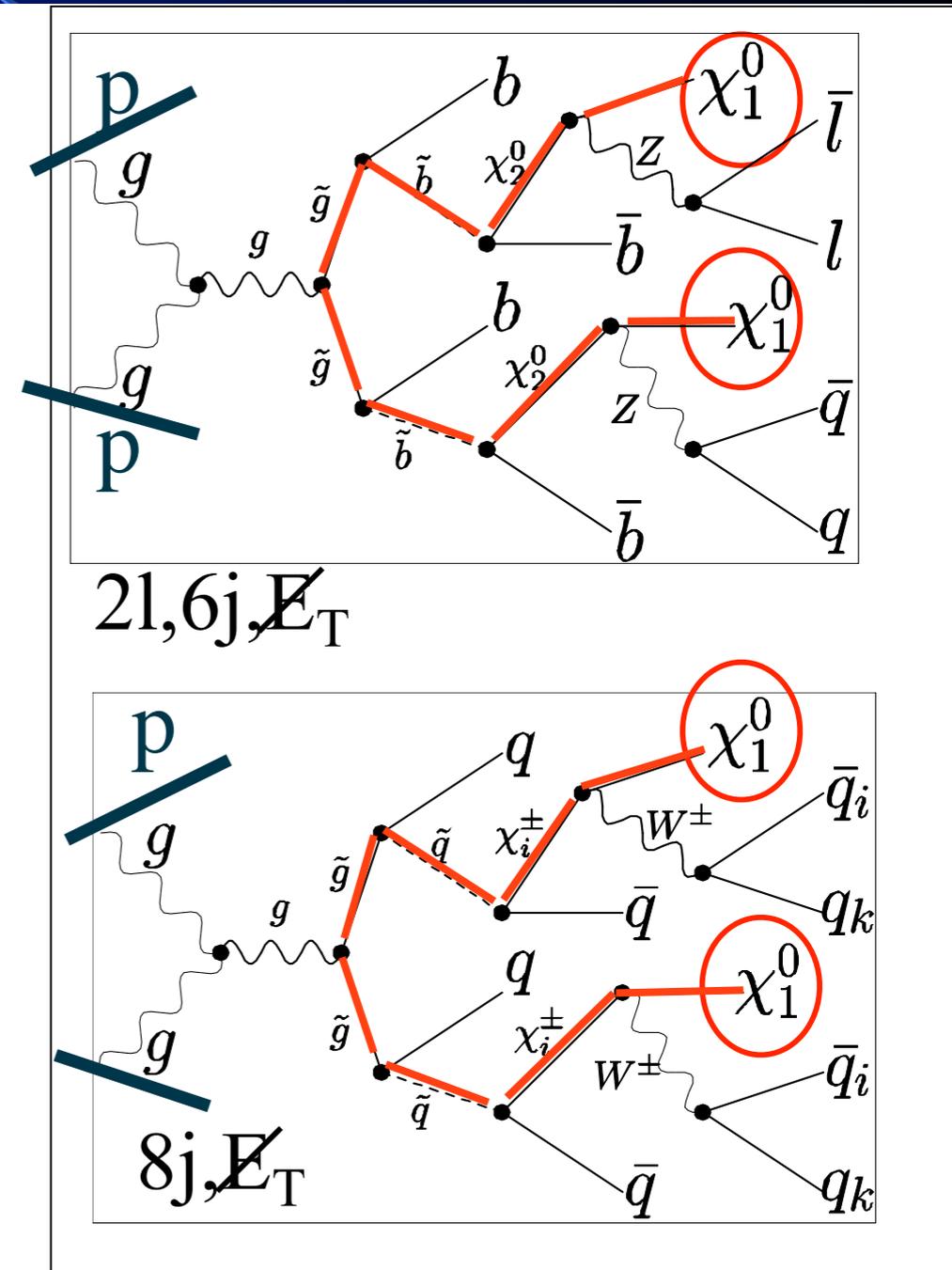
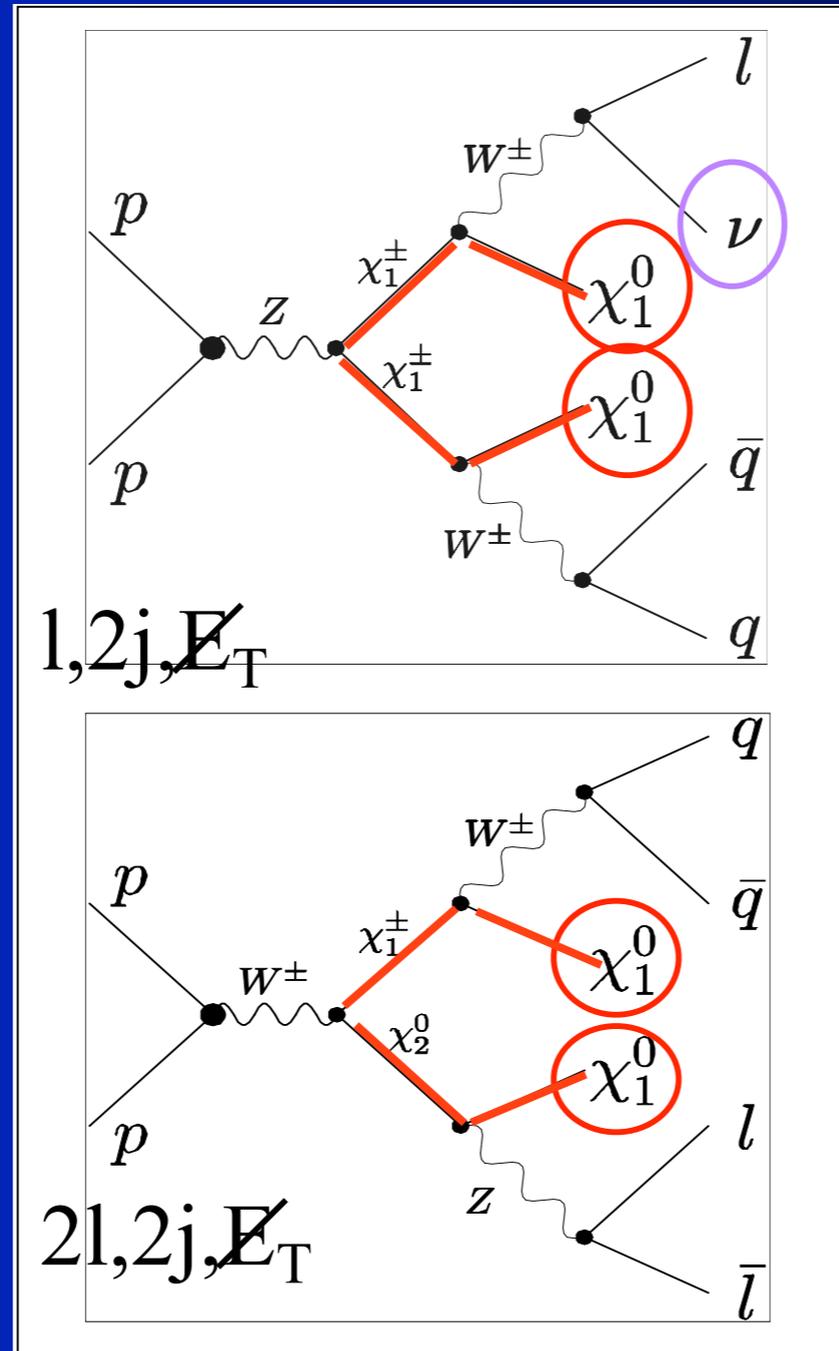
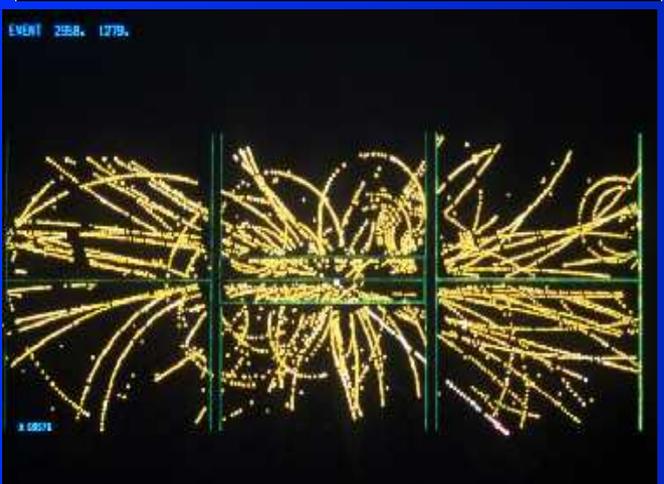
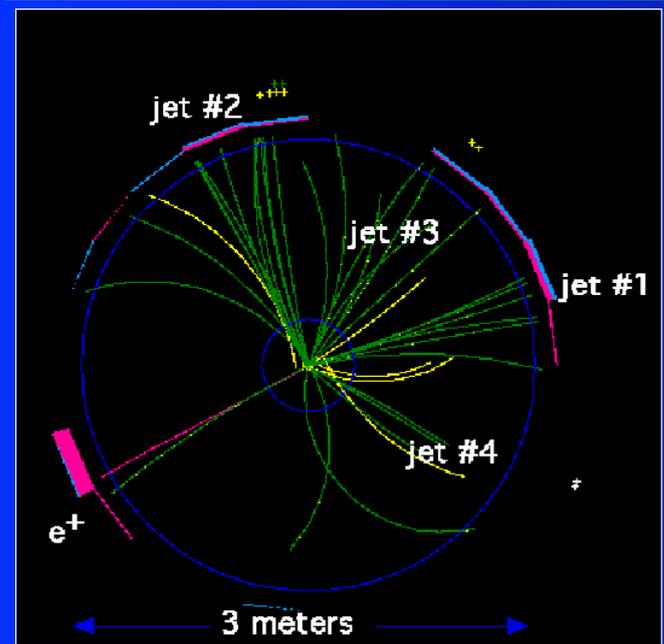
- «суперпартнёры» тяжелее обычных частиц и потому пока не рождаются на ускорителях

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

📌 Локальная суперсимметрия - это теория (супер) гравитации!

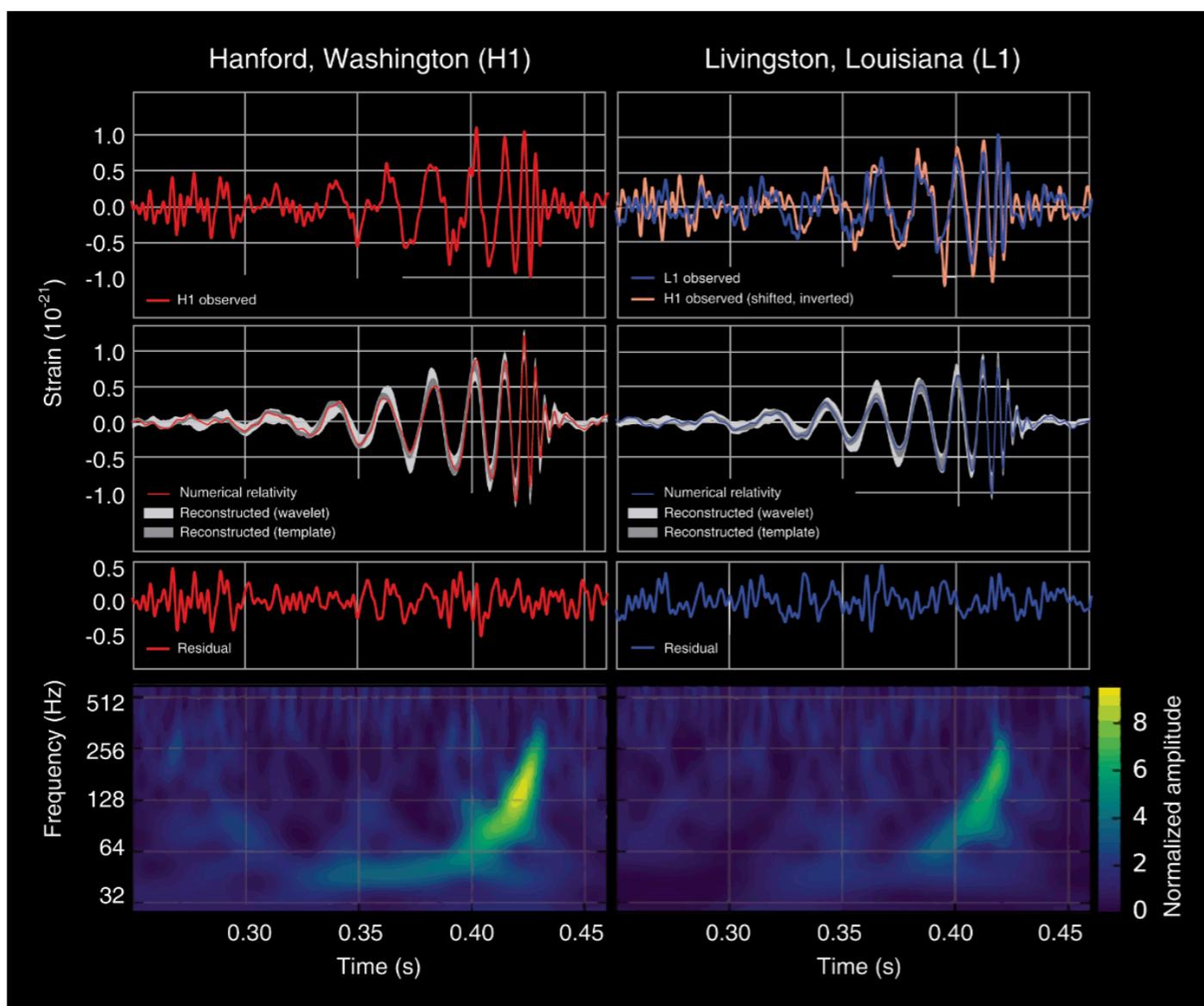
- Теория супергравитации включает в себя все известные частицы и взаимодействия

Рождение суперчастиц на коллайдере

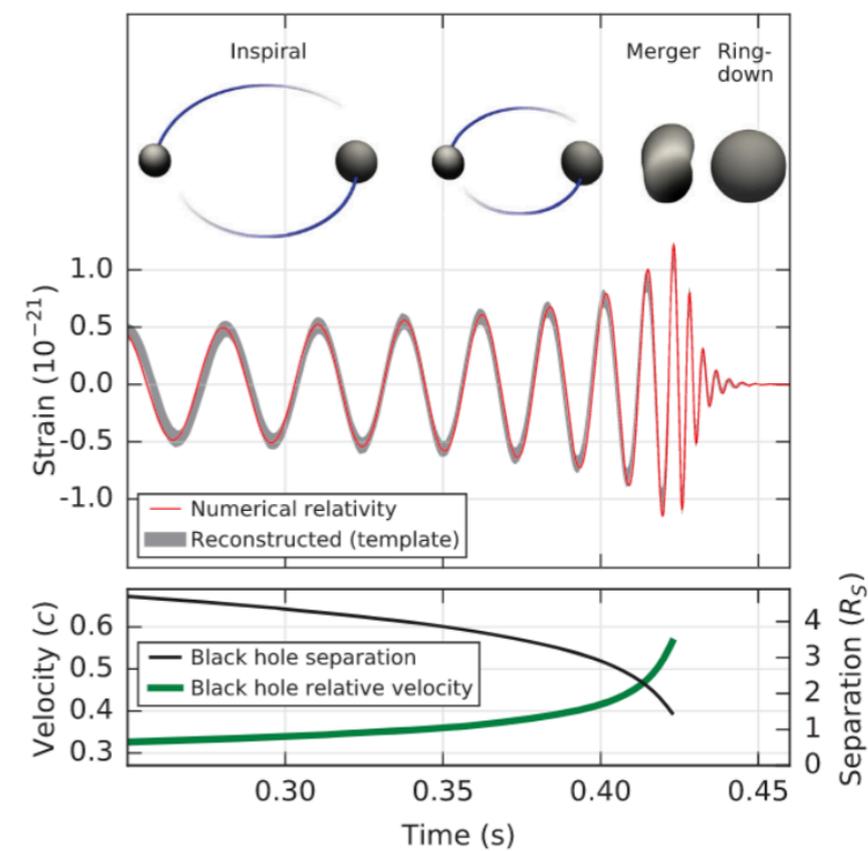


Красным цветом показаны суперпартнёры

GW150914: Первое детектирование гравитационных волн



(l.) LIGO; (r.) Abbott+ PRL (2016)

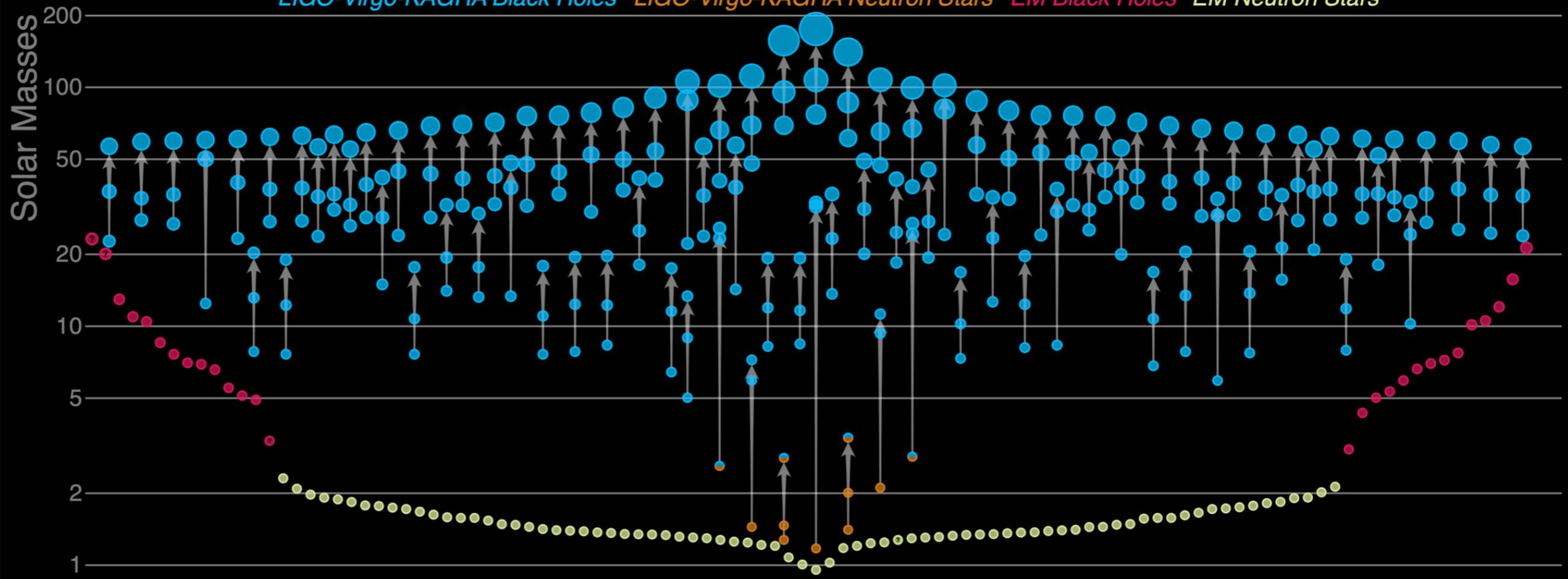


Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	410^{+160}_{-180} Mpc
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

Чёрные дыры и нейтронные звёзды: каталог гравитационных волн

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

<https://ligo.northwestern.edu/media/mass-plot/index.html>

HEAVY-ION COLLIDERS

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

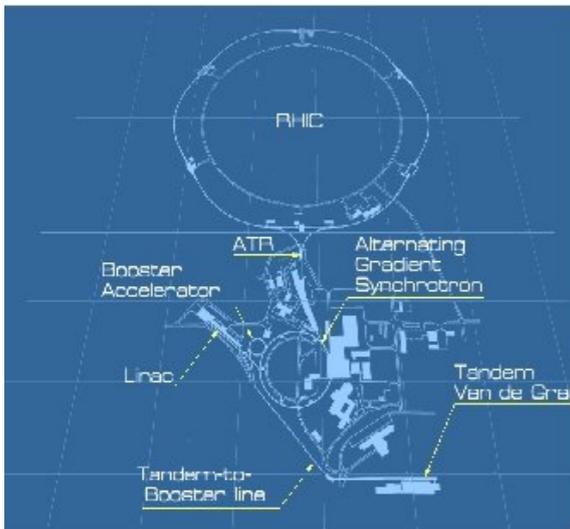
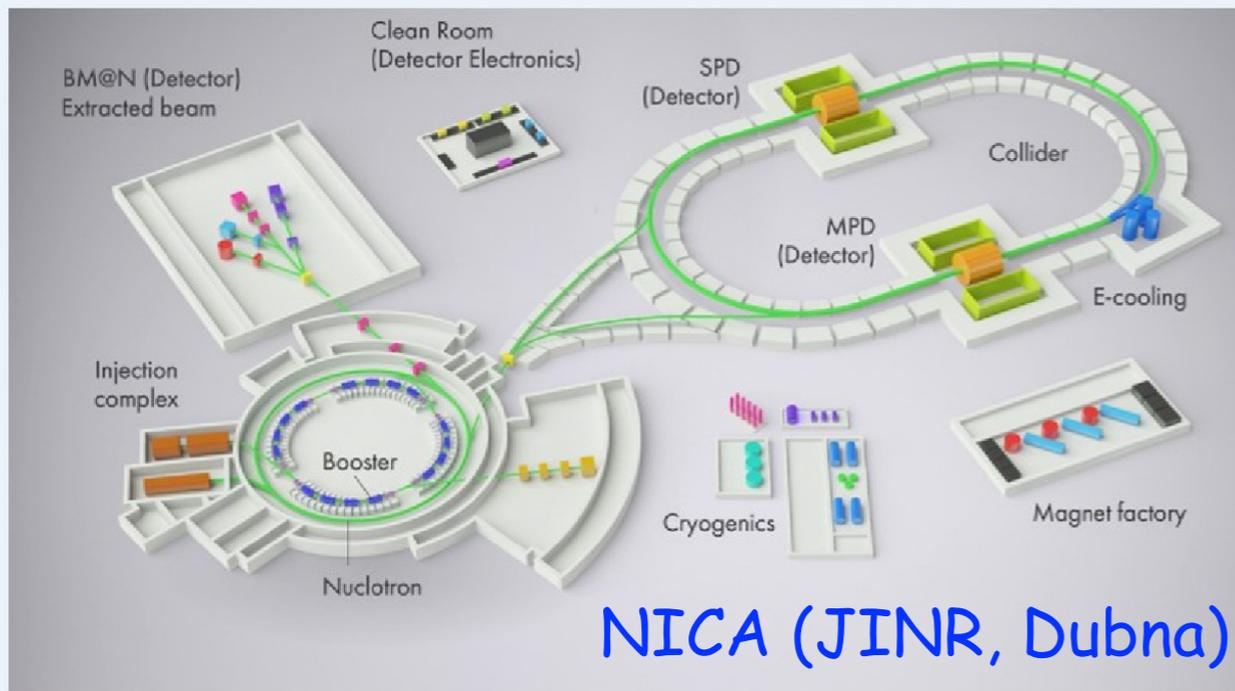
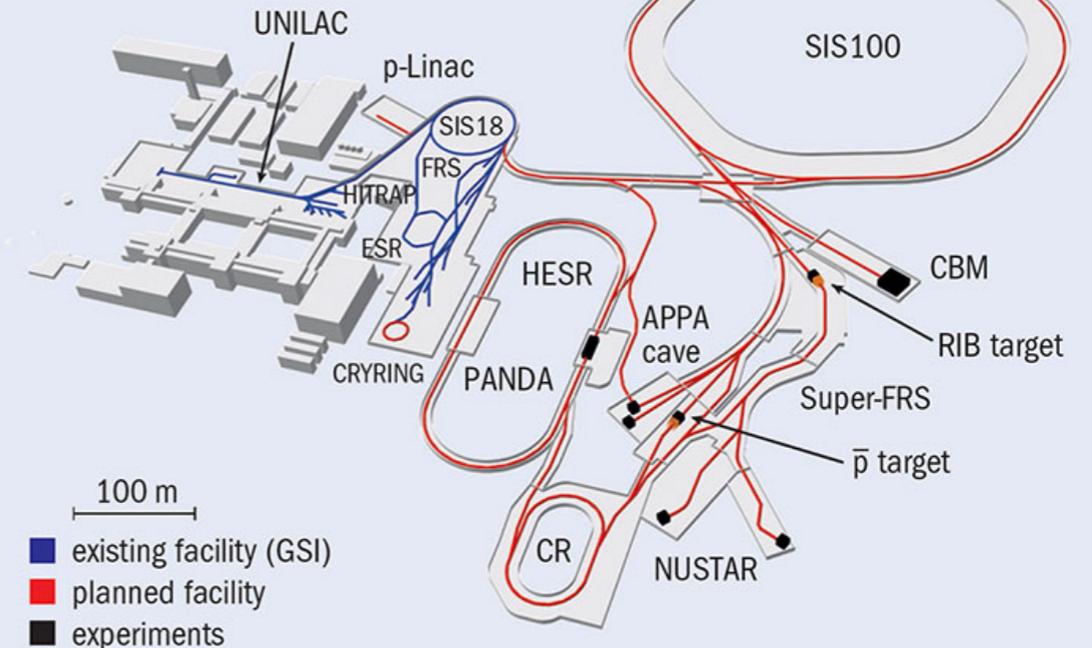
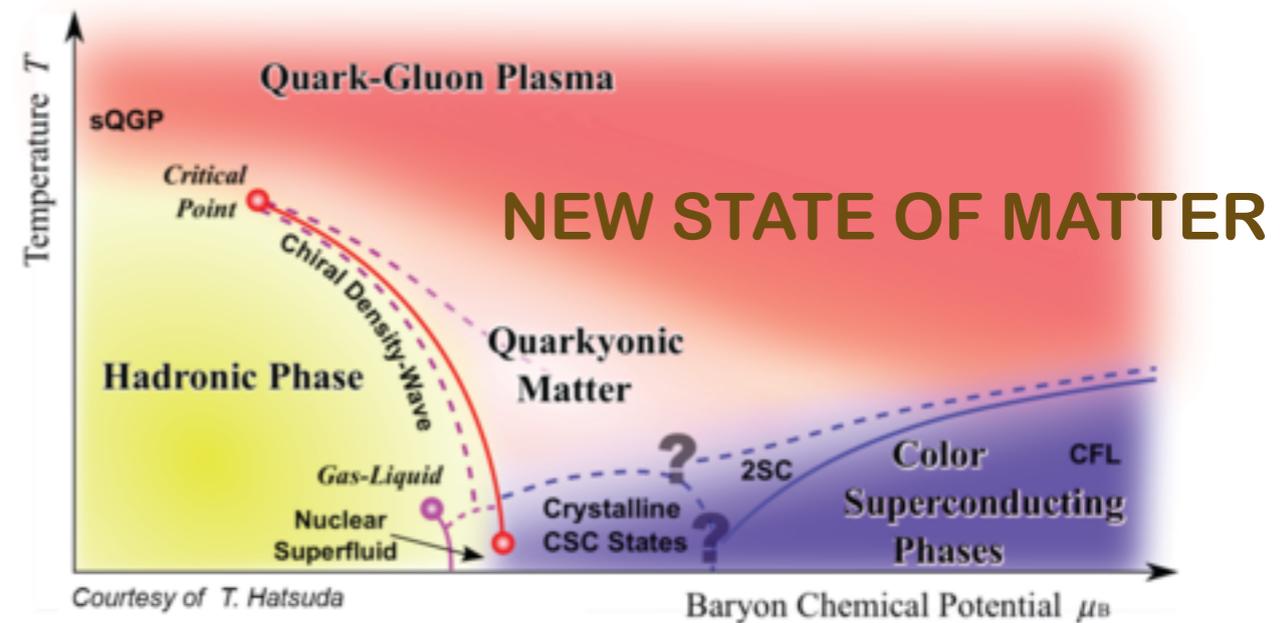


Figure 1. Schematic layout of ENL complex for polarized proton operations. Courtesy of MacKay (private communication) and BNL Collider Accelerator Department.

FAIR (GSI, Germany)



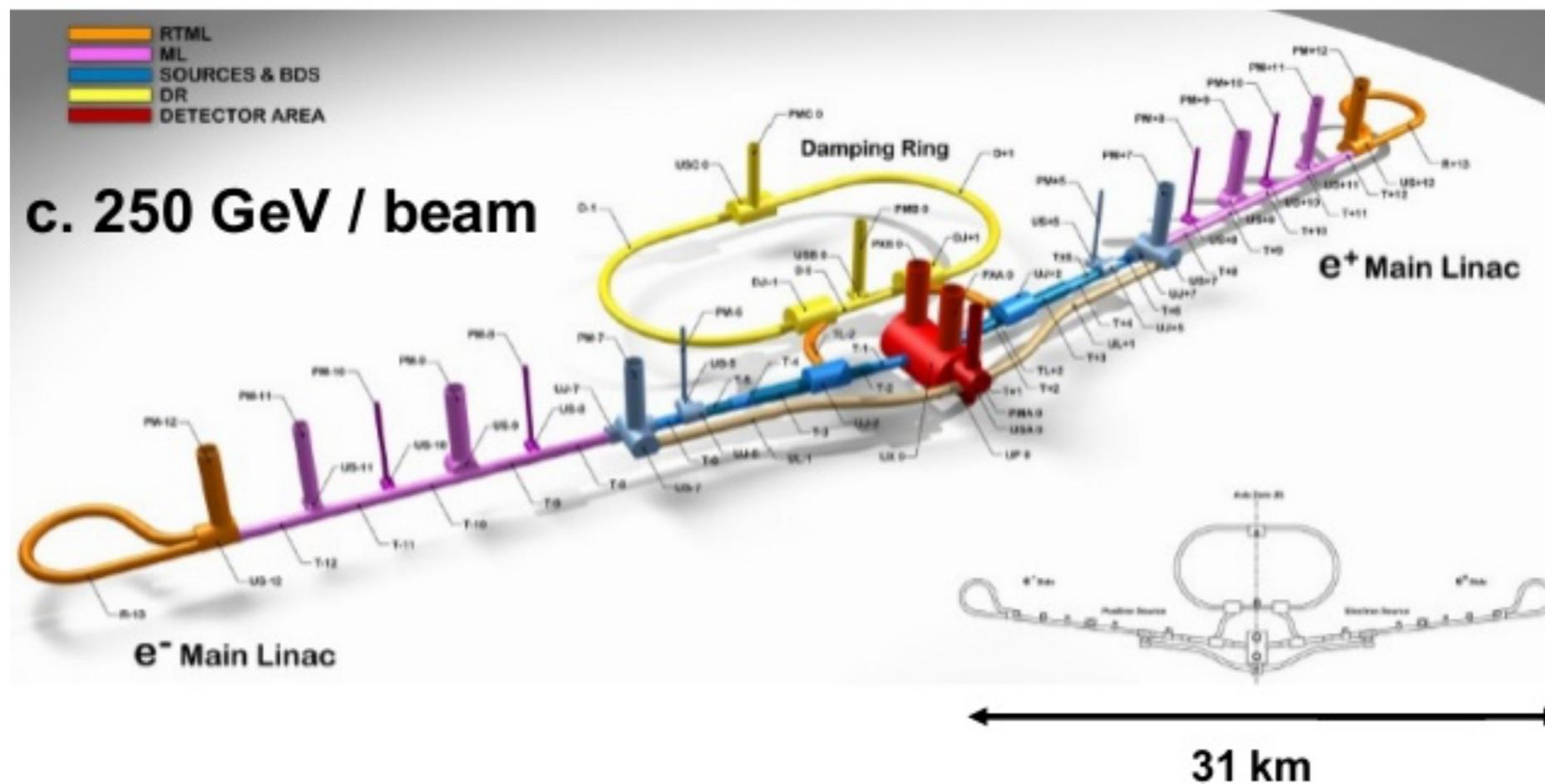
NICA (JINR, Dubna)



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 TeV) by improving by ~20-200 times the precision of EW parameters measurements, $\Delta M_W < 1 \text{ MeV}$, $\Delta m_{\text{top}} \sim 10 \text{ MeV}$

