

# В ожидании открытий в физике элементарных частиц

Дмитрий Казаков

Лаборатория Теоретической физики

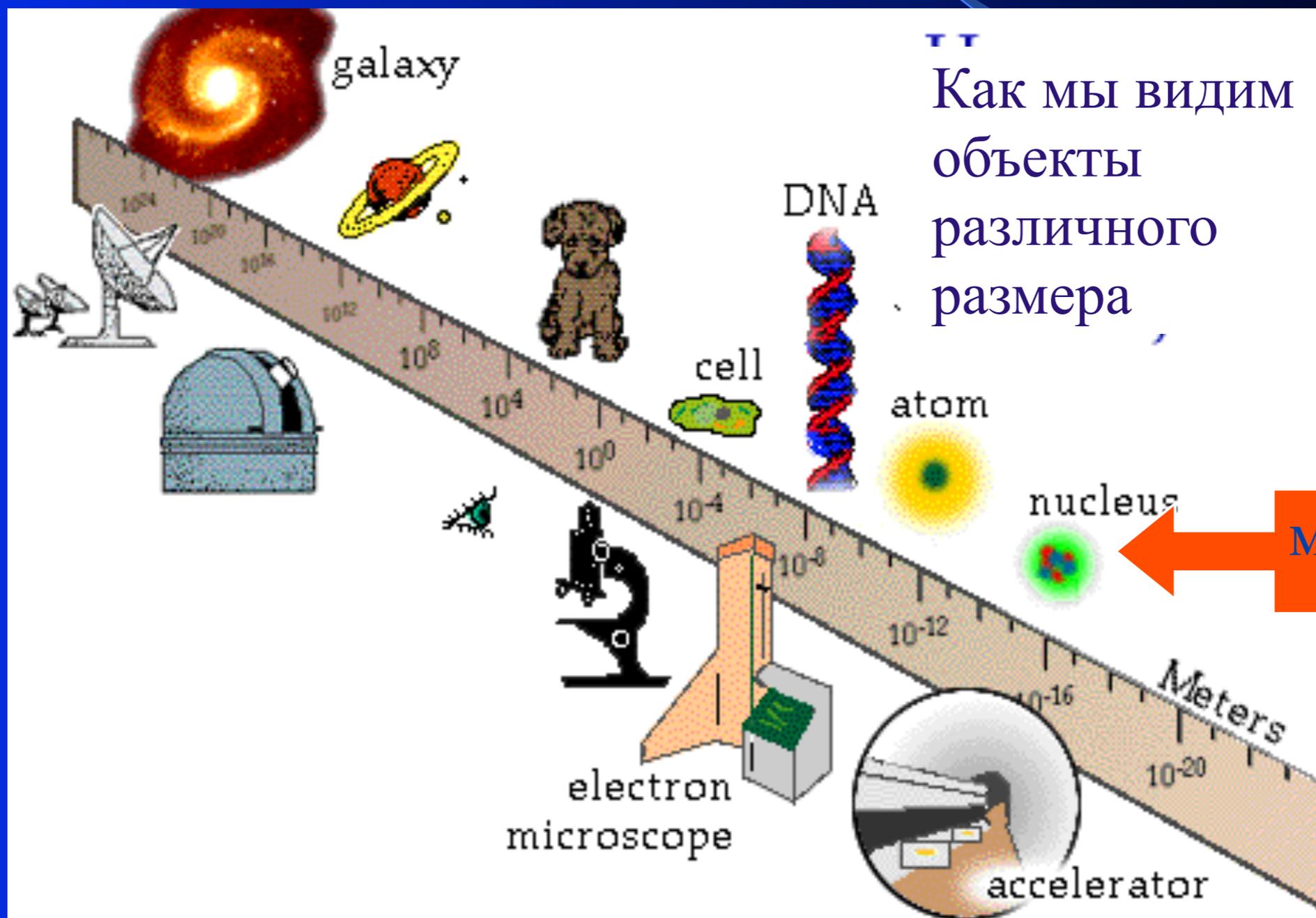
Объединённый институт ядерных исследований

Кафедра Фундаментальных и прикладных проблем физики  
микромира, ЛФИ

Московский Физико-Технический Институт



# Макро и микро космос на шкале расстояний

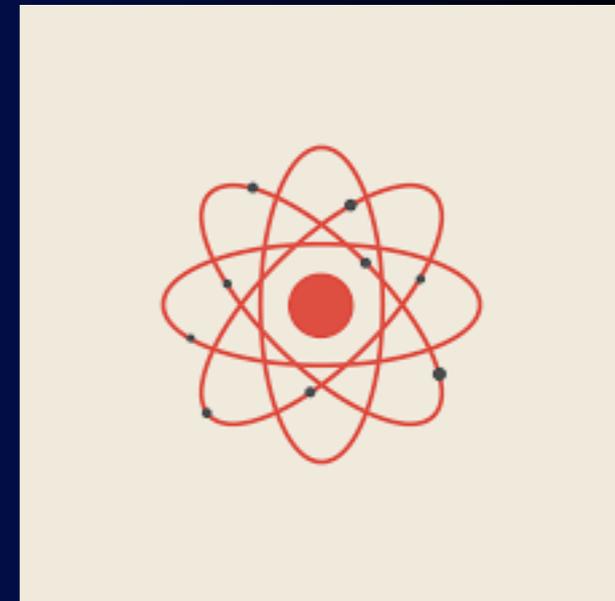


Как мы видим  
объекты  
различного  
размера

← микромир

# АТОМЫ

Атом — частица вещества микроскопических размеров и массы, наименьшая часть химического элемента, являющаяся носителем его свойств. Атомы состоят из ядра и электронов. Ядро атома состоит из протонов и нейтронов.  
Википедия

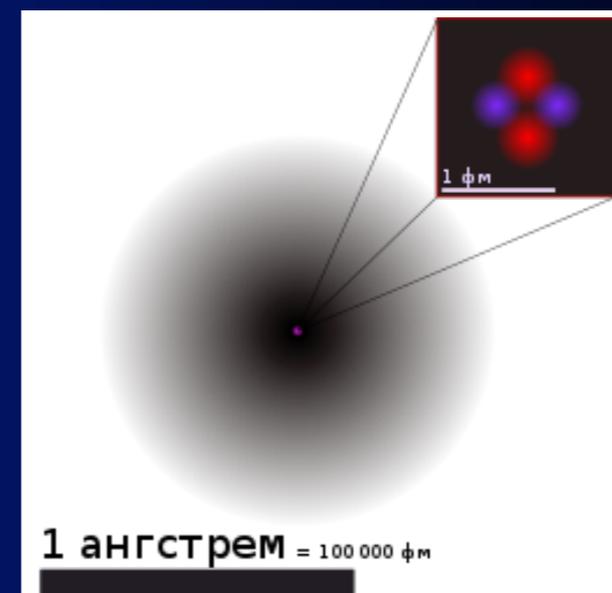
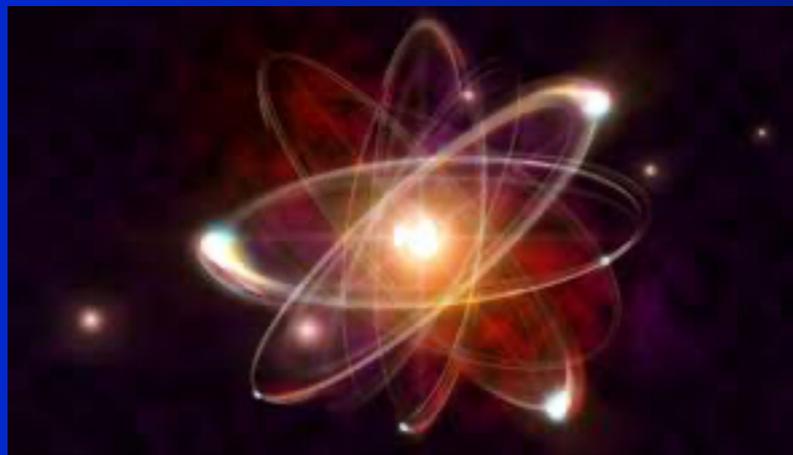


*Если бы в результате какой-то мировой катастрофы все накопленные научные знания оказались бы уничтоженными, и к грядущим поколениям живых существ перешла бы только одна фраза, то, какое утверждение, составленное из наименьшего числа слов, принесло бы наибольшую информацию?*

*Я считаю, что 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.*

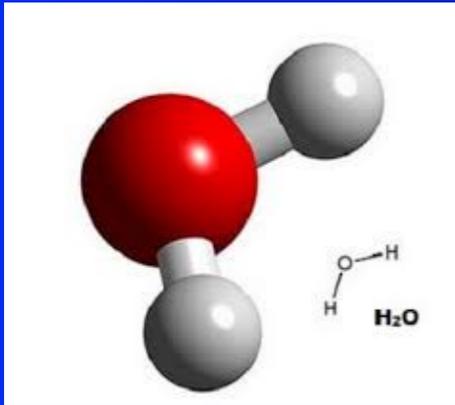
*В одной этой фразе содержится невероятное количество информации о мире, стоит лишь приложить к ней немного воображения и чуть соображения.*

Р. Фейнман

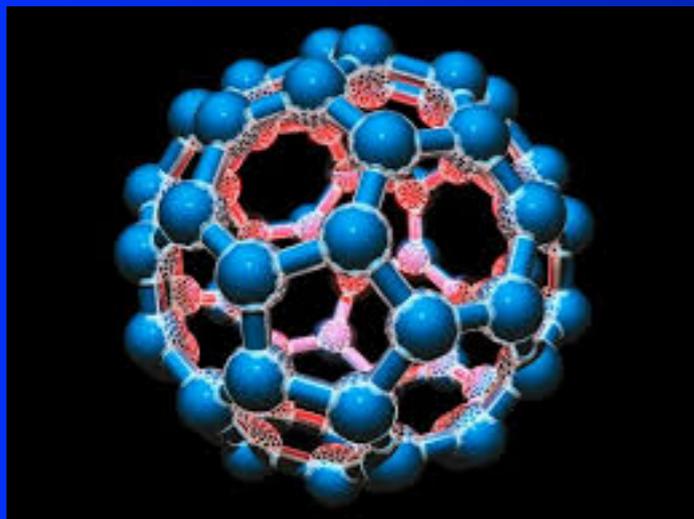
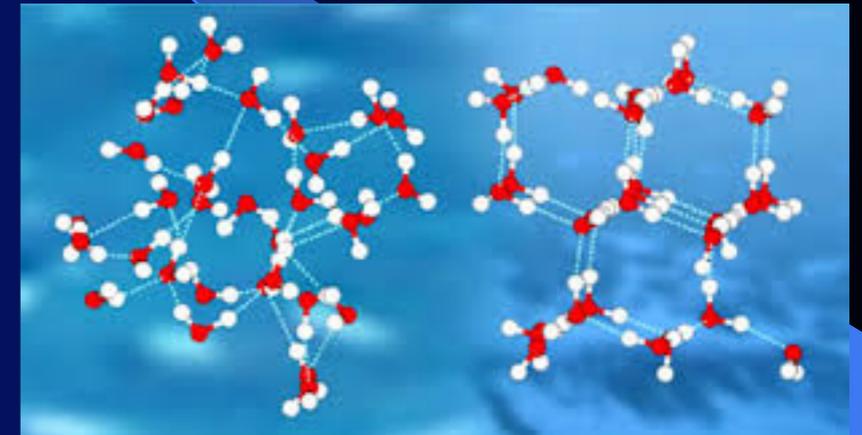


# Молекулы

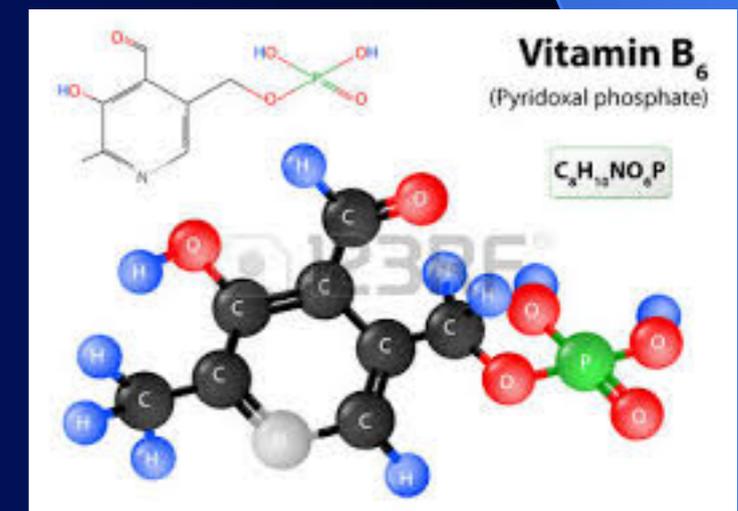
Атомы собираются в молекулы, которые образуют жидкие и газообразные вещества



Простейшая молекула воды

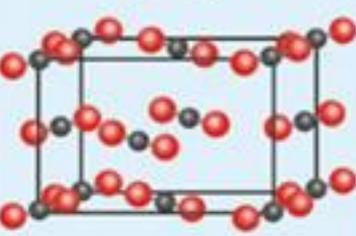
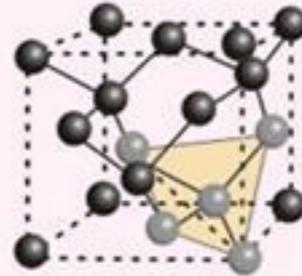
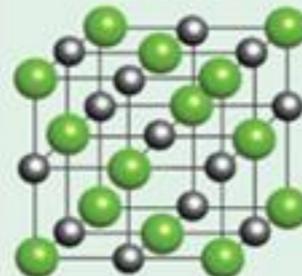
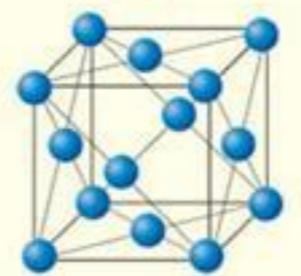


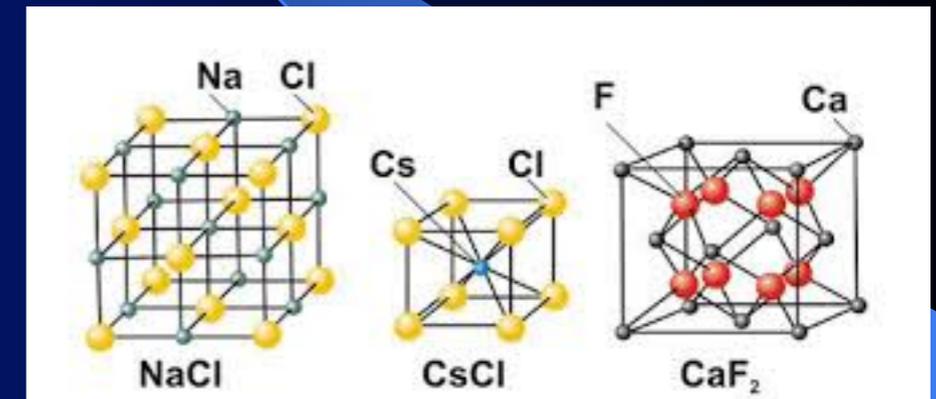
Молекулярная структура определяет химические свойства вещества



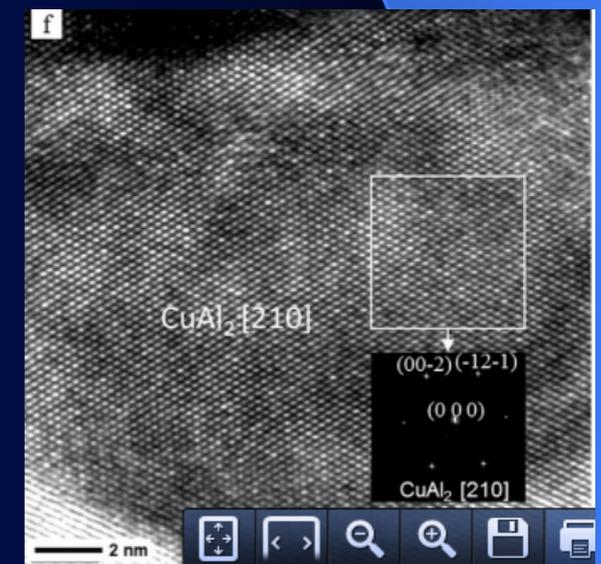
# Кристаллы

Большинство твёрдых тел имеет кристаллическую структуру, атомы при этом находятся в узлах решётки. Жёсткость твердых тел объясняется жесткостью решёточной конструкции

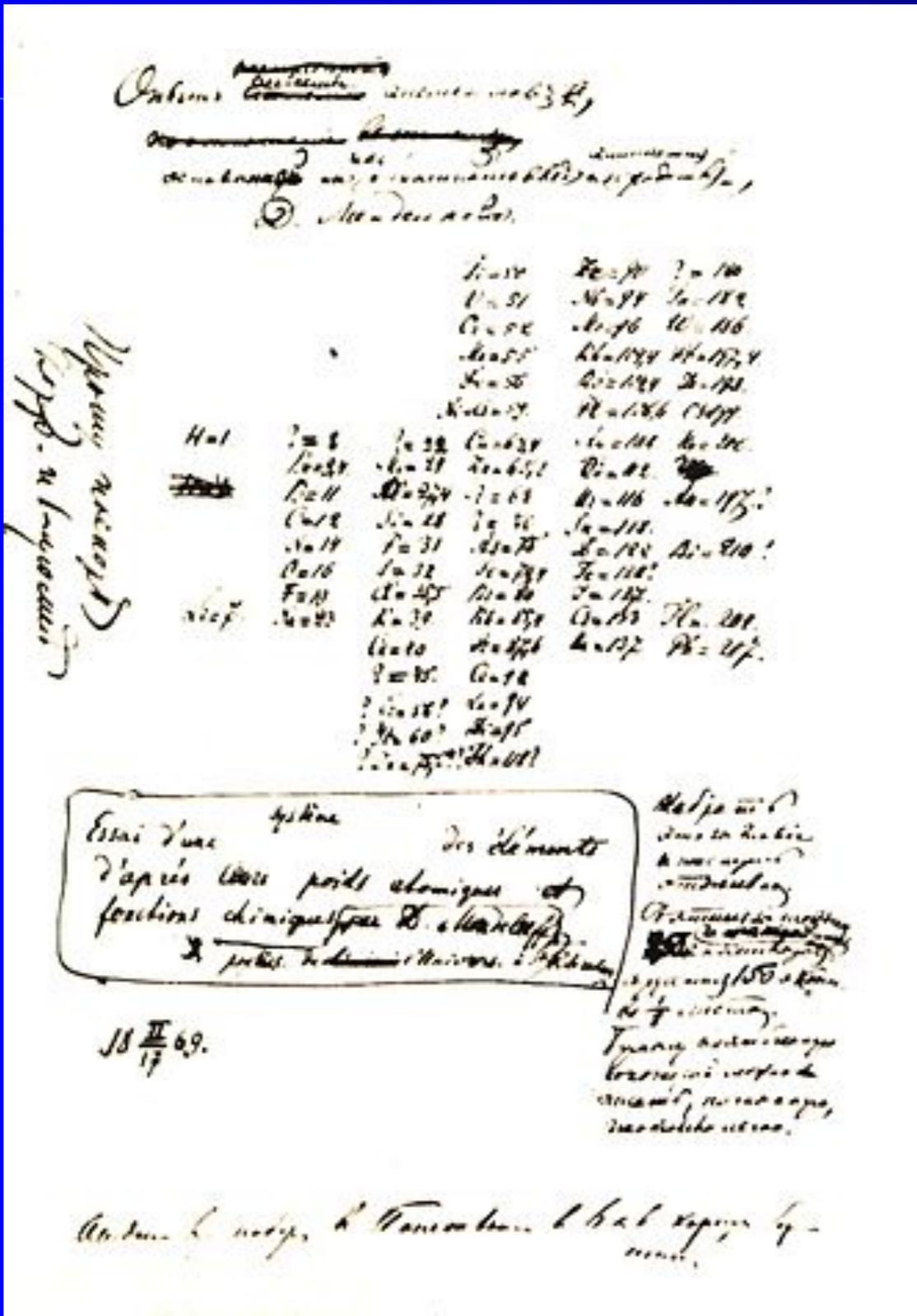
МОЛЕКУЛЯРНЫЕ $\text{CO}_2$	АТОМНЫЕ $\text{C}$	ИОННЫЕ $\text{NaCl}$	МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ $\text{Cu}$
 Углекислый газ $t_{\text{кип}} -78^\circ\text{C}$	 $t_{\text{пл}} 3500^\circ\text{C}$ $t_{\text{кип}} 4200^\circ\text{C}$	 $t_{\text{пл}} 801^\circ\text{C}$ $t_{\text{кип}} 1465^\circ\text{C}$	 $t_{\text{пл}} 1083^\circ\text{C}$ $t_{\text{кип}} 2567^\circ\text{C}$
Твердая двуокись углерода 	Алмаз 	Галит 	Медь 



Кристаллическая решётка в электронном микроскопе



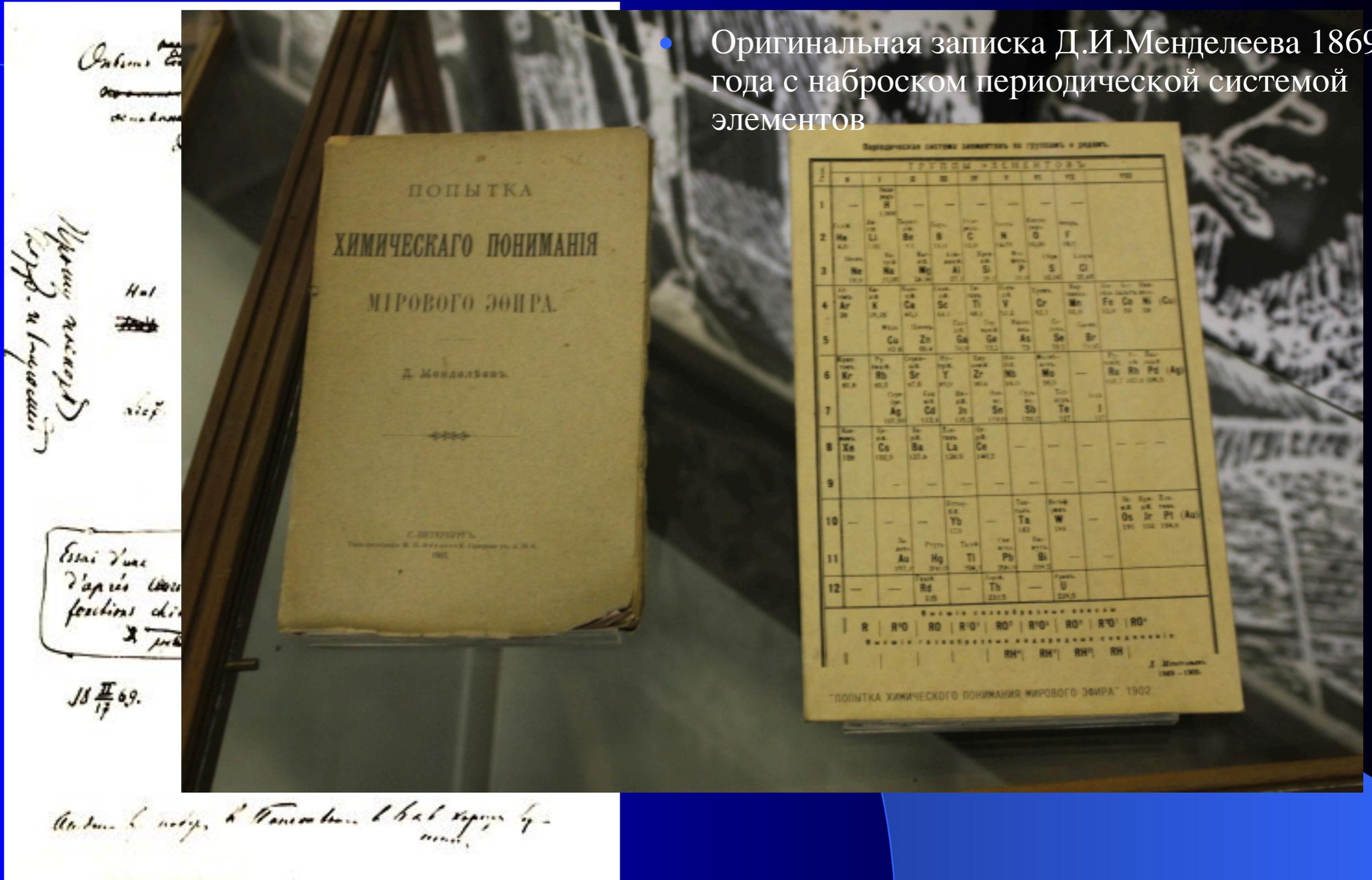
# Периодическая система элементов



- Оригинальная записка Д.И.Менделеева 1869 года с наброском периодической системой элементов

# Периодическая система элементов

- Оригинальная записка Д.И.Менделеева 1869 года с наброском периодической системой элементов



# Периодическая система элементов

Периодическая таблица элементов Д.И.Менделеева  
D.Mendeleev's periodic table of the elements

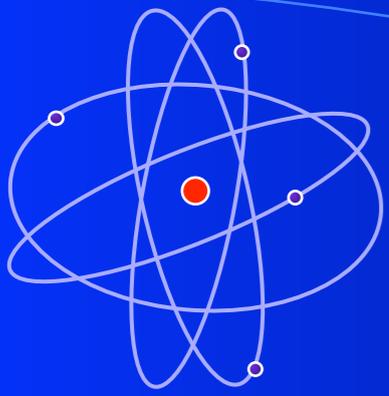
1																		18																	
IA																		VIII A																	
Водород 1 H 1,00794 Hydrogen																		Гелий 2 He 4,0026 Helium																	
Литий 3 Li 6,941 Lithium			Бериллий 4 Be 9,01218 Beryllium														Бор 5 B 10,811 Boron		Углерод 6 C 12,011 Carbon		Азот 7 N 14,0067 Nitrogen		Кислород 8 O 15,9994 Oxygen		Фтор 9 F 18,9984 Fluorine		Неон 10 Ne 20,1797 Neon								
Натрий 11 Na 22,989768 Sodium		Магний 12 Mg 24,3050 Magnesium																																	
Калий 19 K 39,0983 Potassium		Кальций 20 Ca 40,078 Calcium		Скандий 21 Sc 44,95591 Scandium		Титан 22 Ti 47,88 Titanium		Ванадий 23 V 50,9415 Vanadium		Хром 24 Cr 51,9961 Chromium		Марганец 25 Mn 54,93805 Manganese		Железо 26 Fe 55,847 Iron		Кобальт 27 Co 58,93320 Cobalt		Никель 28 Ni 58,6934 Nickel		Медь 29 Cu 63,546 Copper		Цинк 30 Zn 65,39 Zinc		Галлий 31 Ga 69,723 Gallium		Германий 32 Ge 72,61 Germanium		Мышьяк 33 As 74,92159 Arsenic		Селен 34 Se 78,96 Selenium		Бром 35 Br 79,904 Bromine		Криптон 36 Kr 83,80 Krypton	
Рубидий 37 Rb 85,4678 Rubidium		Стронций 38 Sr 87,62 Strontium		Иттрий 39 Y 88,90585 Yttrium		Цирконий 40 Zr 91,224 Zirconium		Ниобий 41 Nb 92,90638 Niobium		Молибден 42 Mo 95,94 Molybdenum		Технеций 43 Tc [98] Technetium		Рутений 44 Ru 101,07 Ruthenium		Родий 45 Rh 102,90550 Rhodium		Палладий 46 Pd 106,42 Palladium		Серебро 47 Ag 107,8682 Silver		Кадмий 48 Cd 112,411 Cadmium		Индий 49 In 114,818 Indium		Олово 50 Sn 118,710 Tin		Сурьма 51 Sb 121,757 Antimony		Теллур 52 Te 127,60 Tellurium		Иод 53 I 126,90447 Iodine		Ксенон 54 Xe 131,29 Xenon	
Цезий 55 Cs 132,90543 Cesium		Барий 56 Ba 137,327 Barium		Лантан 57 La 138,9055 Lanthanum		Гафний 72 Hf 178,49 Hafnium		Тантал 73 Ta 180,9479 Tantalum		Вольфрам 74 W 183,84 Tungsten		Рений 75 Re 186,207 Rhenium		Осмий 76 Os 190,23 Osmium		Иридий 77 Ir 192,22 Iridium		Платина 78 Pt 195,08 Platinum		Золото 79 Au 196,96654 Gold		Ртуть 80 Hg 200,59 Mercury		Таллий 81 Tl 204,3833 Thallium		Свинец 82 Pb 207,2 Lead		Висмут 83 Bi 208,98037 Bismuth		Полоний 84 Po [209] Polonium		Астат 85 At [210] Astatine		Радон 86 Rn [222] Radon	
Франций 87 Fr [223] Francium		Радий 88 Ra 226,025 Radium		Актиний 89 Ac [227] Actinium		Резерфордий 104 Rf [261] Rutherfordium		Дубний 105 Db [262] Dubnium		Сибборгий 106 Sg [266] Seaborgium		Борий 107 Bh [262] Bohrium		Хассий 108 Hs [269] Hassium		Мейтнерий 109 Mt [268] Meitnerium		Дармштадтий 110 Ds [269] Darmstadtium		Рентгений 111 Rg [272] Roentgenium		Коперниций 112 Cn [277] Copernicium		Нихоний 113 Nh [285] Nihonium		Флеровий 114 Fl [287] Flerovium		Московский 115 Mc [288] Moscovium		Ливерморий 116 Lv [293] Livermorium		Теннессиан 117 Ts [294] Tennessine		Оганессон 118 Og [294] Oganesson	

## Лантаноиды Lanthanides

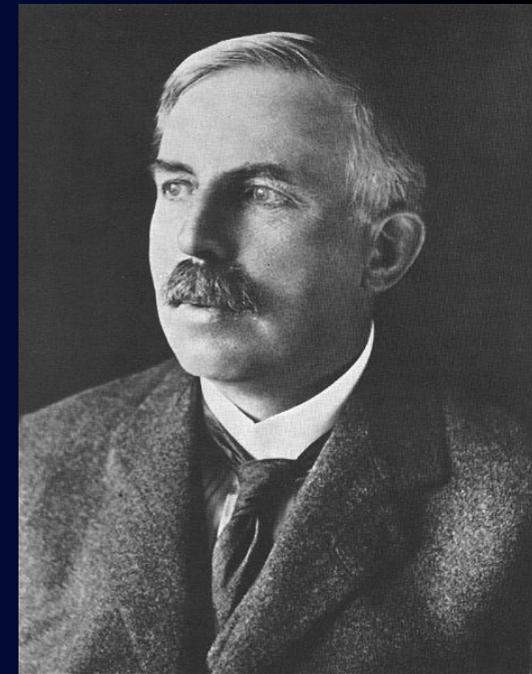
Церий 58 Ce 140,115 Cerium	Празеодим 59 Pr 140,90765 Praseodymium	Неодим 60 Nd 144,24 Neodymium	Прометий 61 Pm [145] Promethium	Самарий 62 Sm 150,36 Samarium	Европий 63 Eu 151,965 Europium	Гадолиний 64 Gd 157,25 Gadolinium	Тербий 65 Tb 158,92534 Terbium	Диспрозий 66 Dy 162,50 Dysprosium	Гольмий 67 Ho 164,93032 Holmium	Эрбий 68 Er 167,26 Erbium	Тулий 69 Tm 168,93421 Thulium	Иттербий 70 Yb 173,04 Ytterbium	Лютеций 71 Lu 174,967 Lutetium
-------------------------------------	---	--	--	--	---	--	---	--	--	------------------------------------	--	--	---

## Актиноиды Actinides

Торий 90 Th 232,0381 Thorium	Протактиний 91 Pa 231,03688 Protactinium	Уран 92 U 238,0289 Uranium	Нептуний 93 Np [237] Neptunium	Плутоний 94 Pu [244] Plutonium	Америций 95 Am [243] Americium	Кюрий 96 Cm [247] Curium	Берклий 97 Bk [247] Berkelium	Калифорний 98 Cf [251] Californium	Эйнштейний 99 Es [252] Einsteinium	Фермий 100 Fm [257] Fermium	Менделевий 101 Md [258] Mendelevium	Нобелий 102 No [259] Nobelium	Лоуренсий 103 Lr [262] Lawrencium
---------------------------------------	---	-------------------------------------	---	---	---	-----------------------------------	--	---	---	--------------------------------------	--	--	--

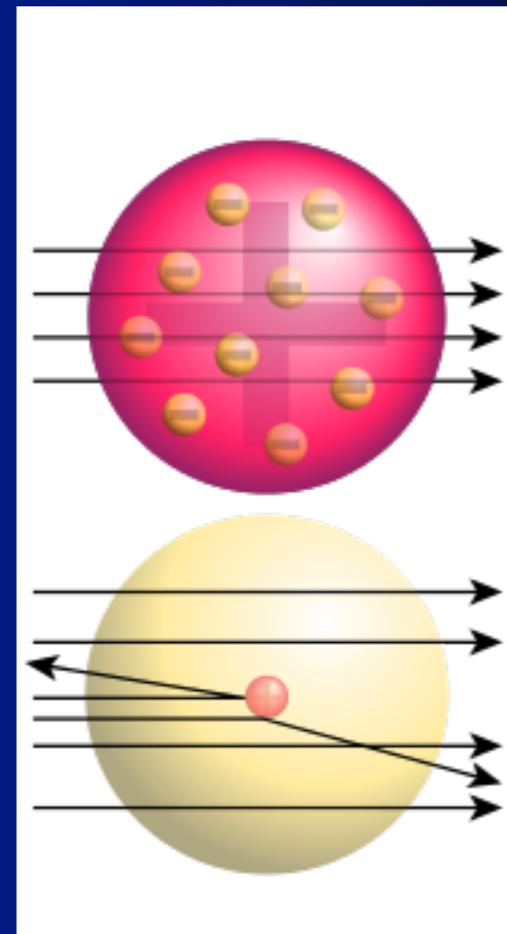
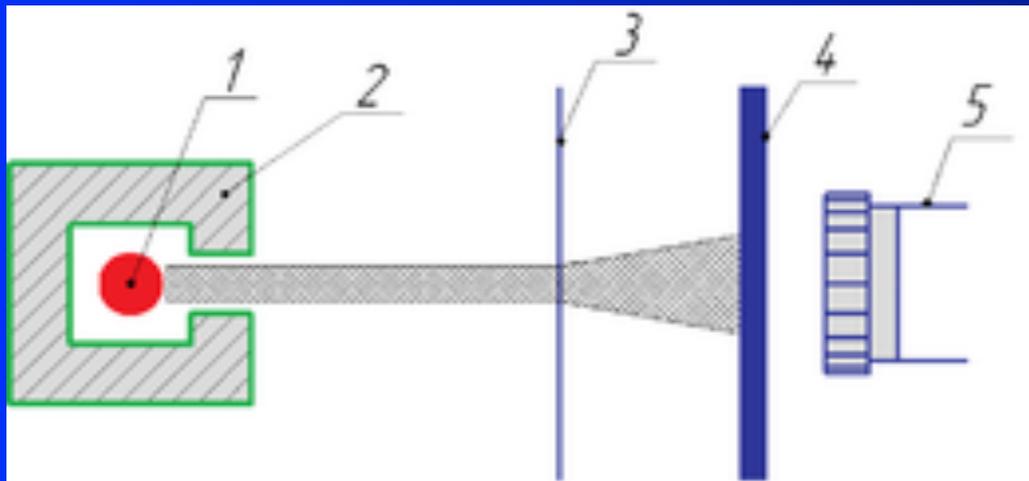


# Структура Атома



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

Ожидаемый эффект



Планетарная модель атома Резерфорда

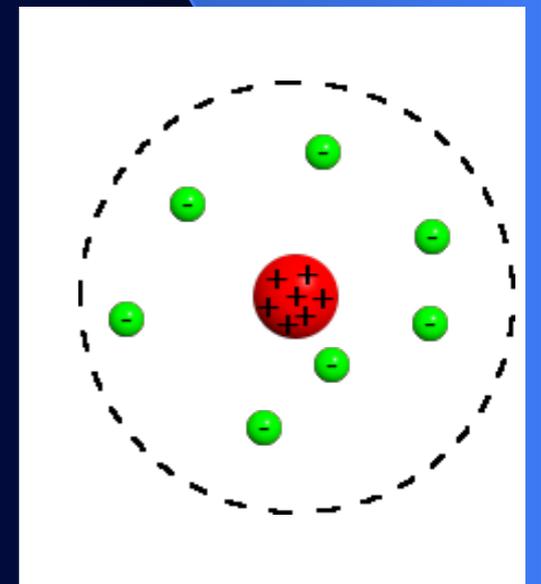
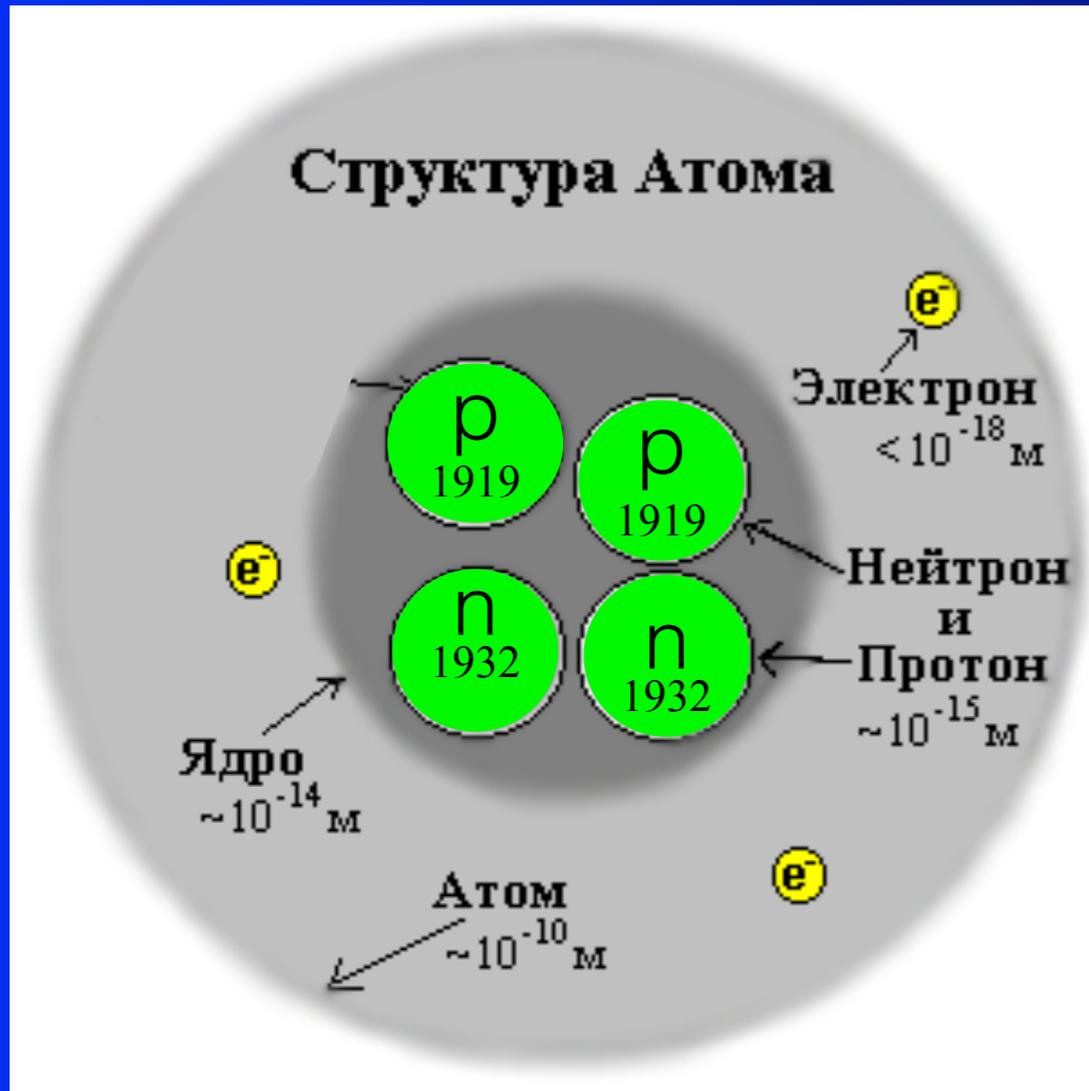
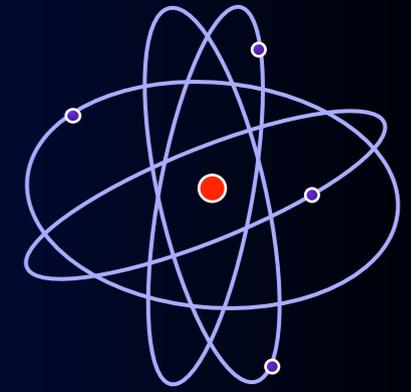


Схема эксперимента Резерфорда

Жесткий отскок

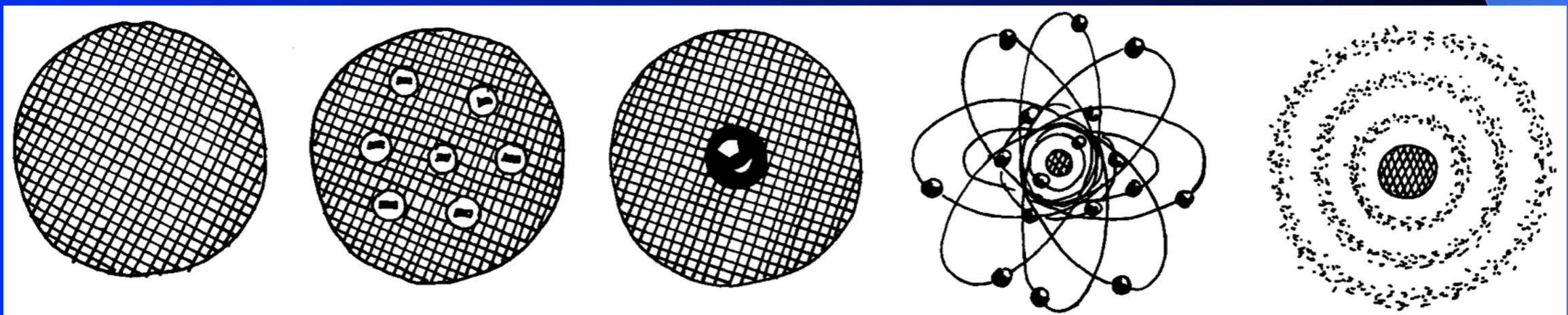
# Структура Атома



В центре атома находится плотное ядро имеющее положительный электрический заряд

Оно в 10000 раз меньше размера самого атома

Эволюция в понимании строения атома



Демокрит

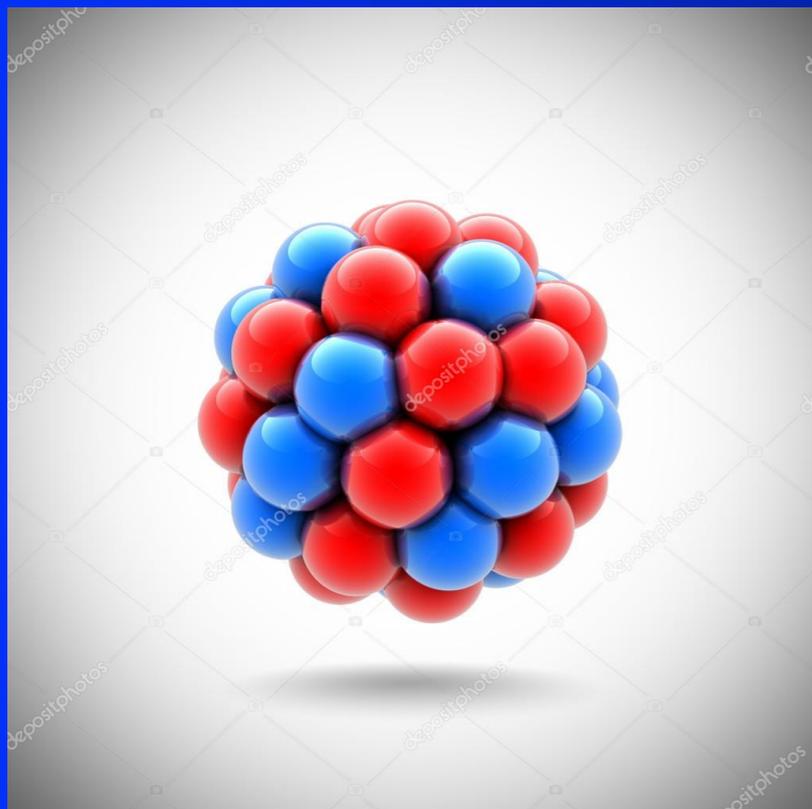
Томпсон

Резерфорд

Бор

Шредингер

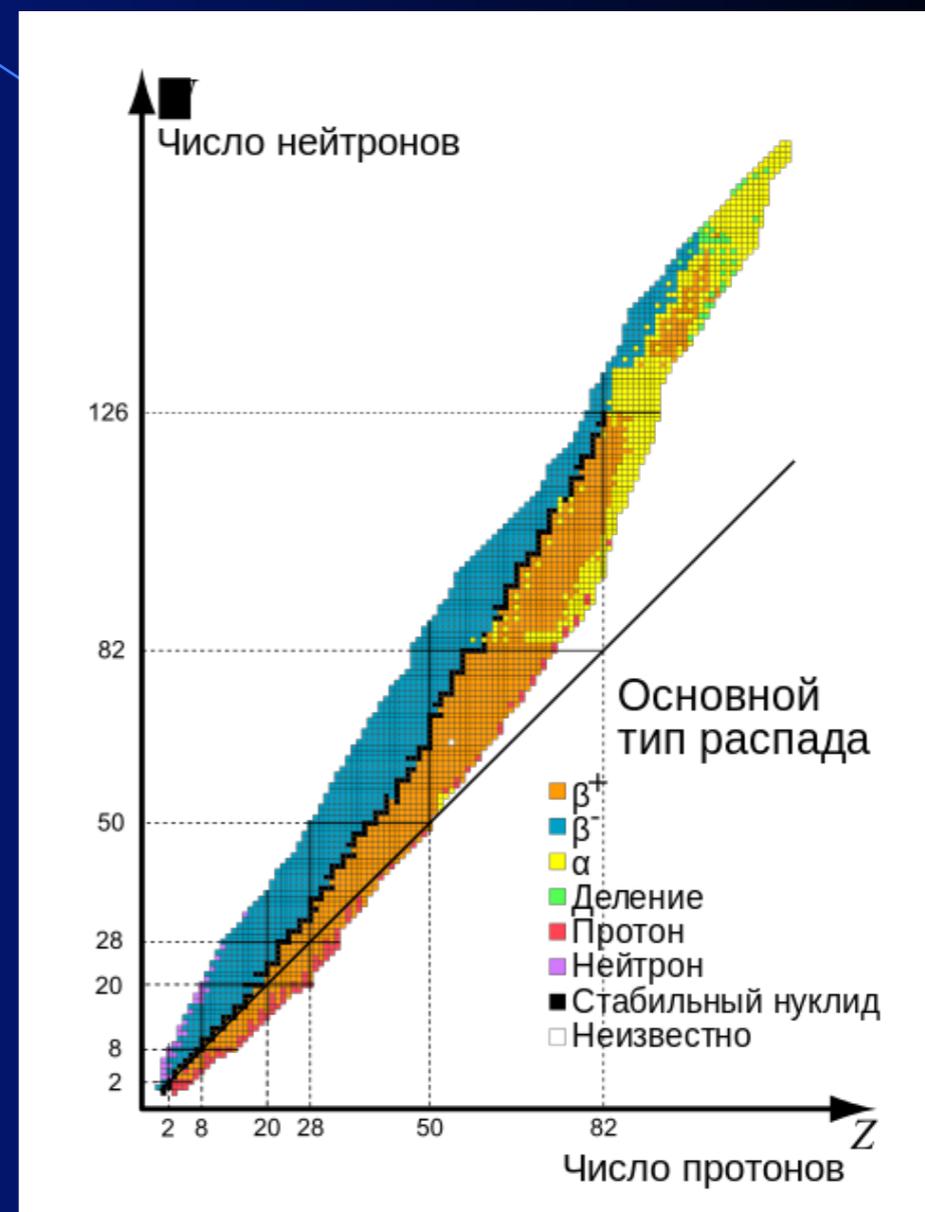
# Атомное ядро



Ядро состоит из протонов и нейтронов

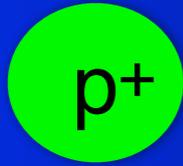
Атомы различаются только количеством протонов и нейтронов в ядре

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



# Элементарные частицы

протон



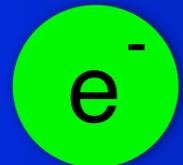
стабильная частица

нейтрон



распадается за 9 минут

электрон

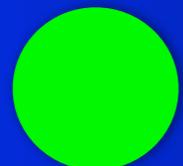


стабильная частица

нейтрино (маленький нейтрончик)

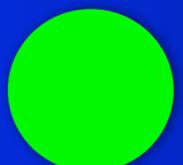
Из этих частиц состоят все атомы и всё что мы видим во Вселенной

фотон



квант электромагнитного поля (квант света)

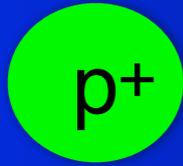
пионы



или  $\pi$ -мезоны ( )  
Ими обмениваются протоны и нейтроны в ядре

# Элементарные частицы

протон

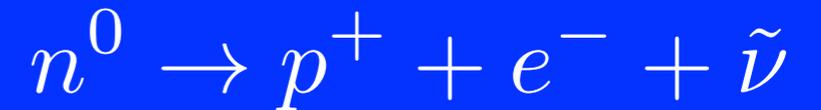


стабильная частица

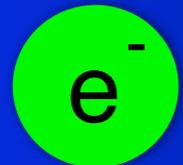
нейтрон



распадается за 9 минут



электрон



стабильная частица

нейтрино (маленький нейтрончик)



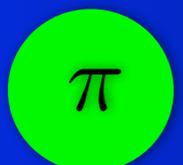
Из этих частиц состоят все атомы и всё что мы видим во Вселенной

фотон



квант электромагнитного поля (квант света)

пионы



или  $\pi$ -мезоны ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ )

Ими обмениваются протоны и нейтроны в ядре

# Тяжёлый электрон

В 1936 году в космических лучах открыт тяжёлый электрон - мюон. Он отличается от электрона только массой, будучи тяжелее электрона в 200 раз!

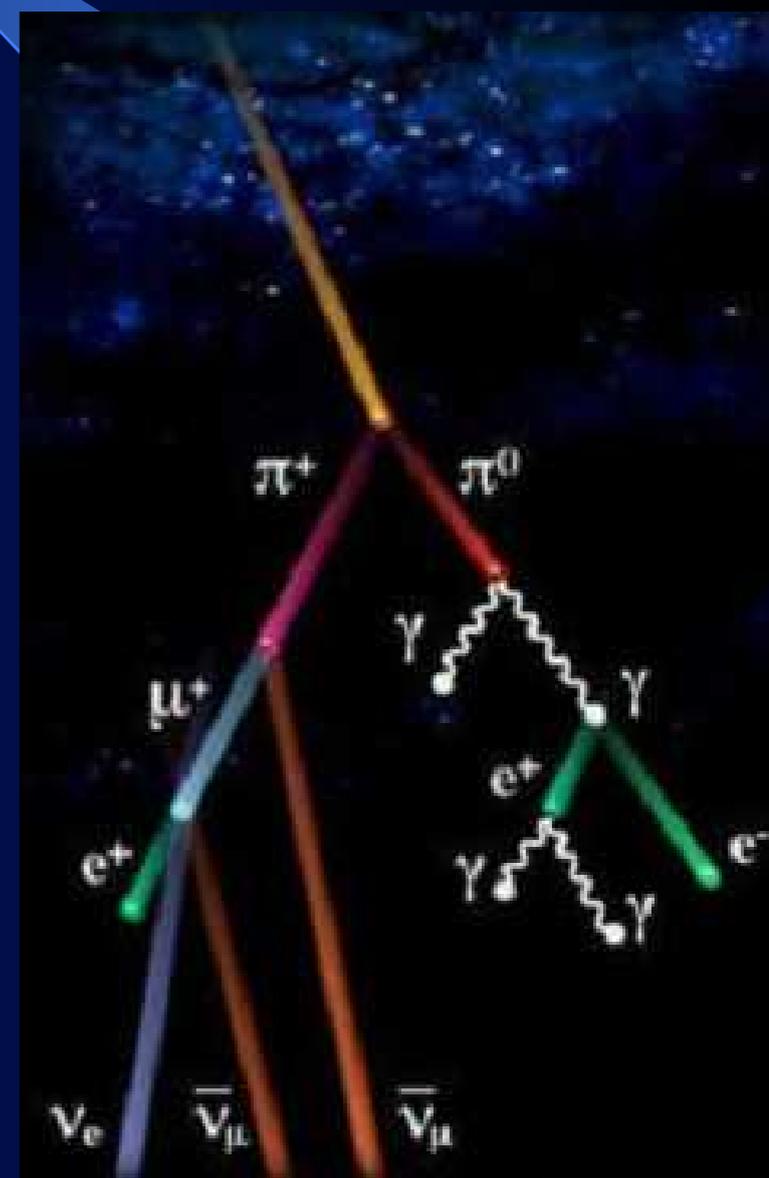
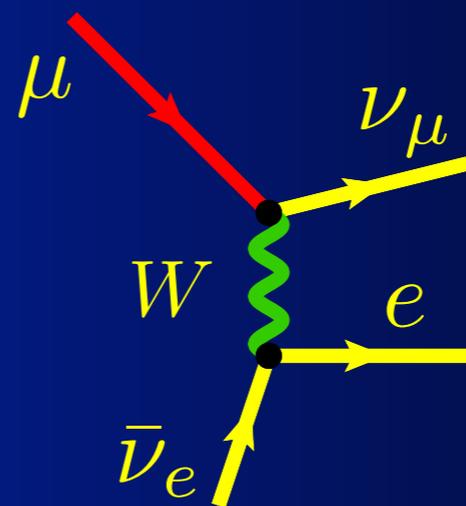
Мюоны рождаются от распада  $\Pi$ -мезонов в космических лучах и распадаются на электроны и два нейтрино

В свободном состоянии мюон живёт 10<sup>-6</sup> секунды и распадается на электрон и два нейтрино

$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Так появились две новые частицы:

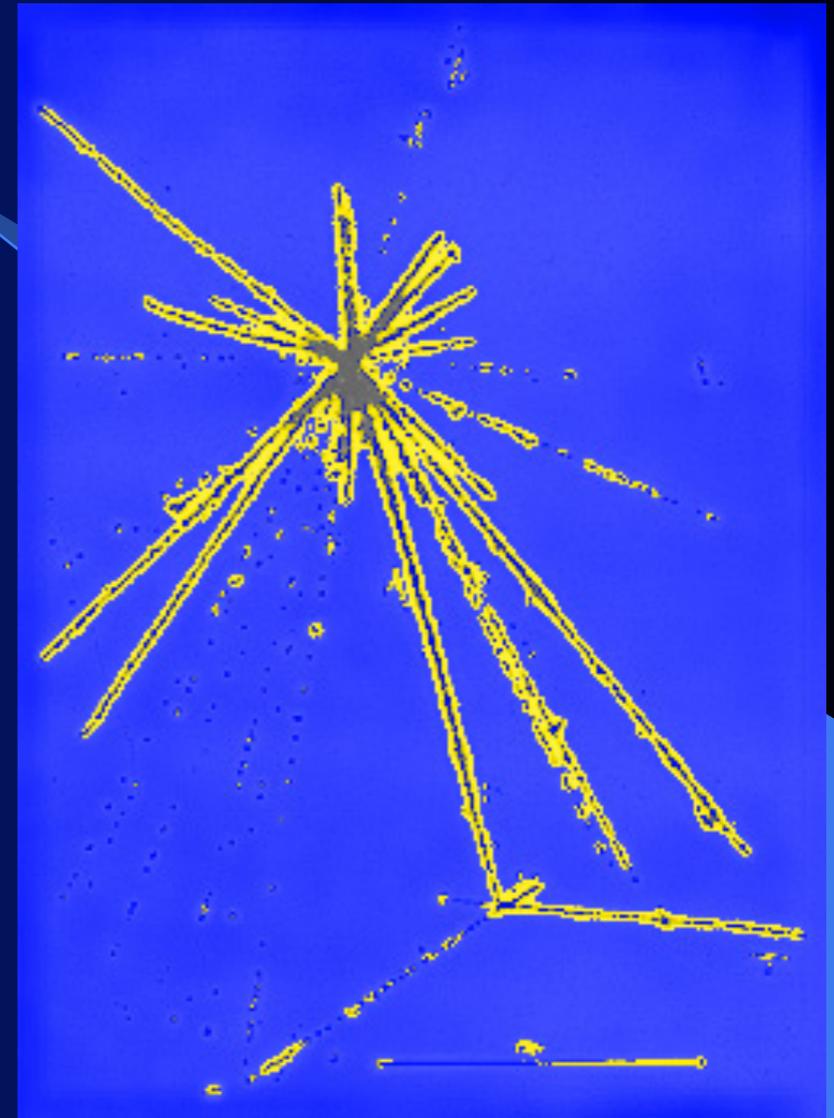
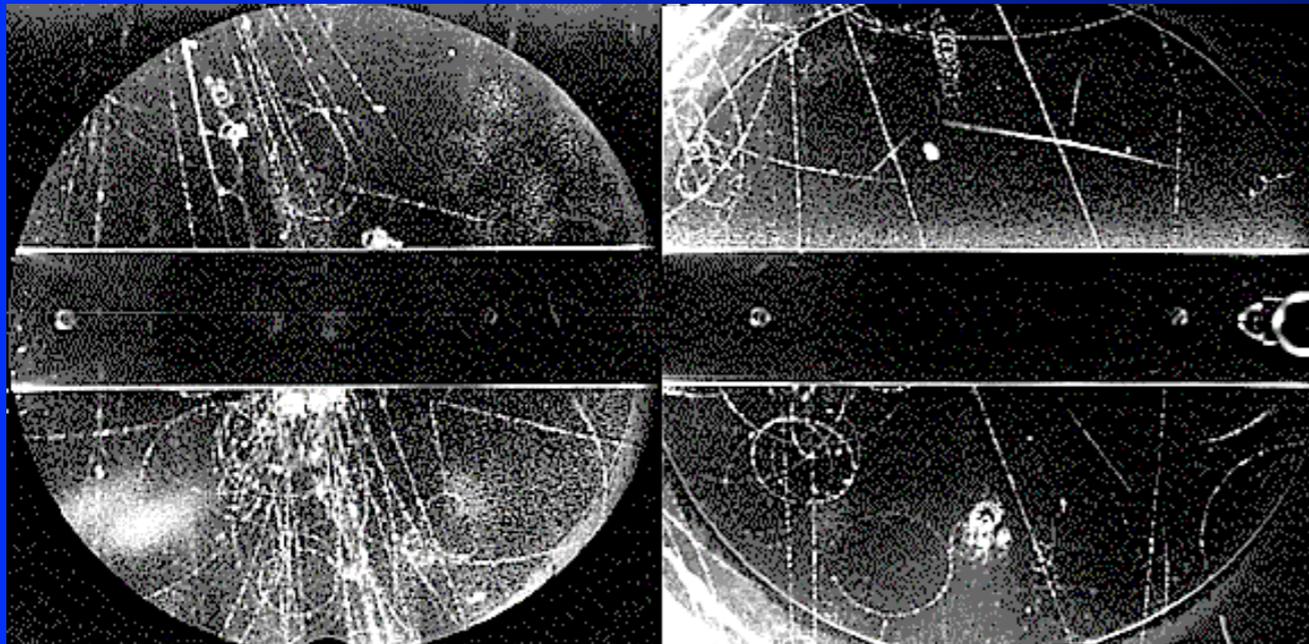
Зачем они нужны?



# Открытие Странности

Открытие К-мезона в 1947 г. и  $\Lambda$  - гиперона в 1952 г. явилось первым указанием на то, что частицы из которых состоит ядро атома - это ещё не всё.

По какой-то неизвестной причине природа хочет чего-то-ещё!



# Открытие элементарных частиц

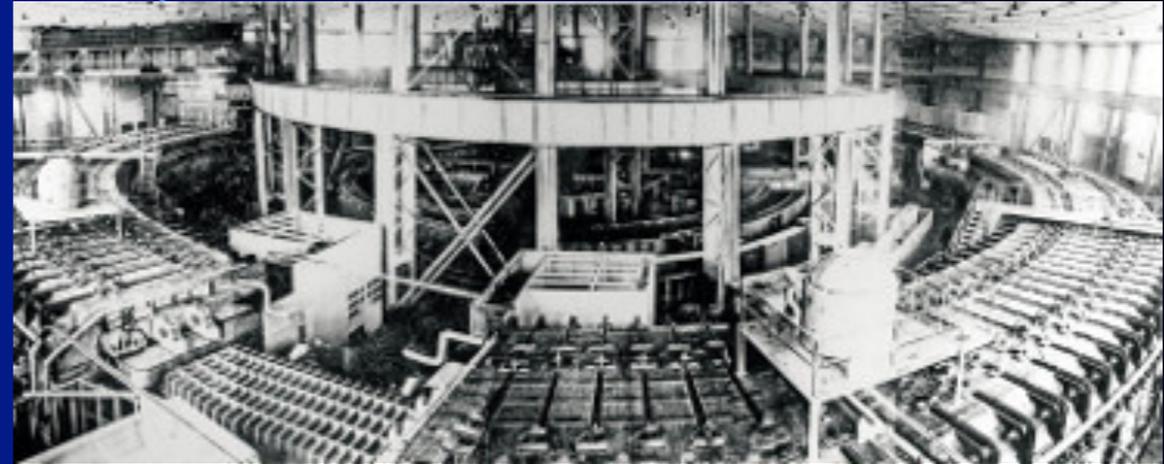


- Целый зоопарк элементарных частиц был открыт на ускорителях
- Их стали разделять на два класса: барионы и мезоны
- Это было окном в новый мир - микромир

# Ускорители протонов



BNL Cosmotron (1952-1966) 3.3 GeV



Синхрофазотрон Дубна ОИЯИ 1957 10 ГэВ



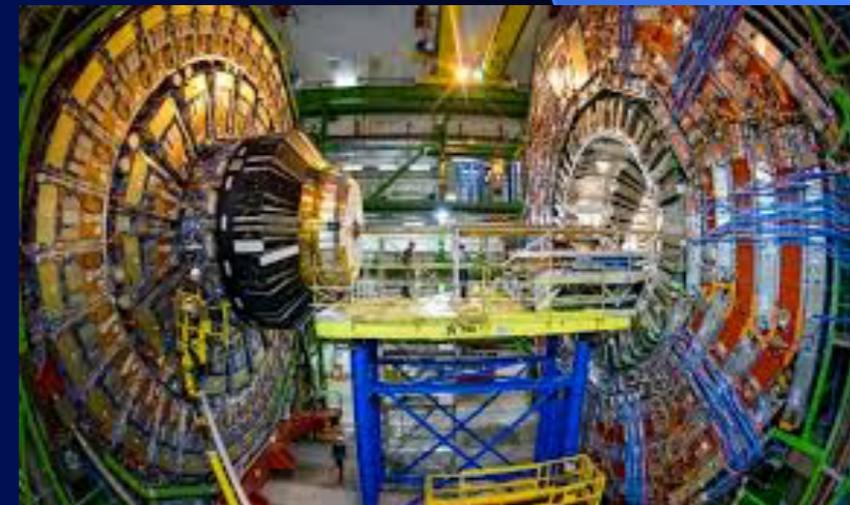
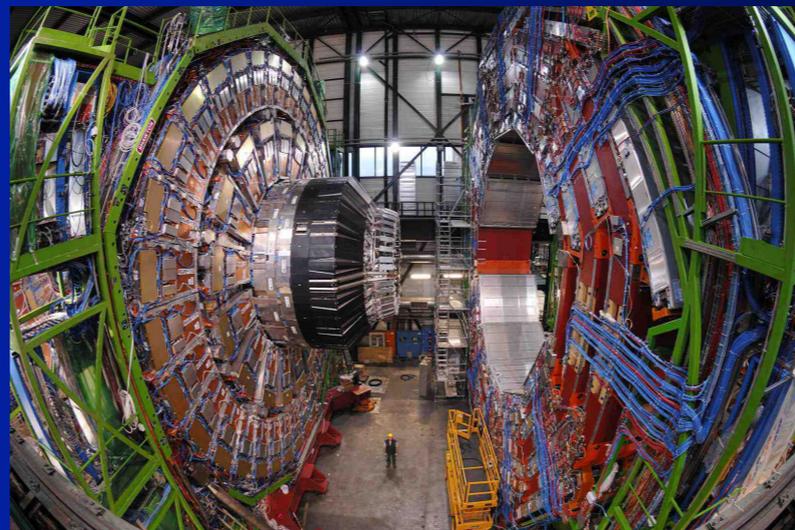
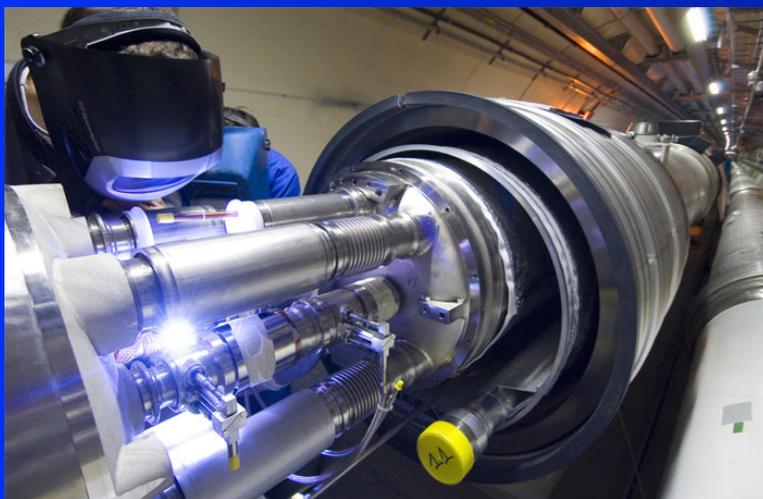
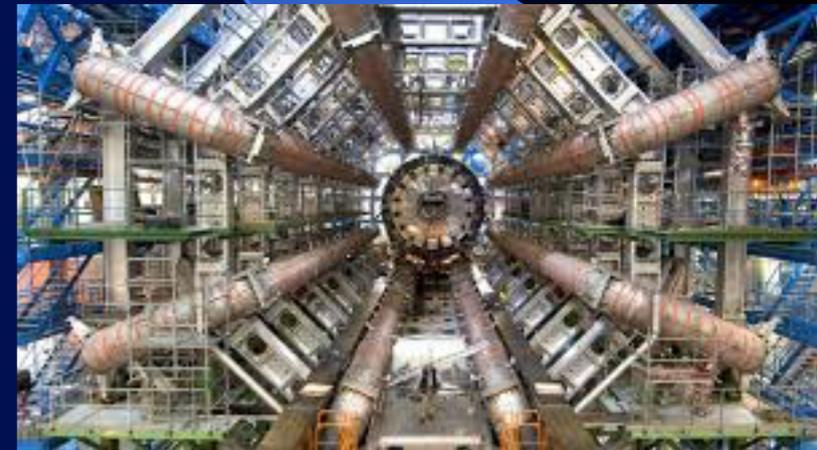
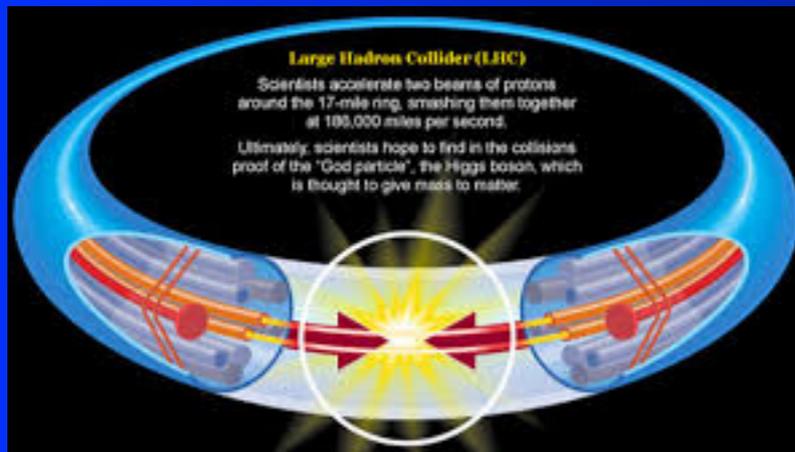
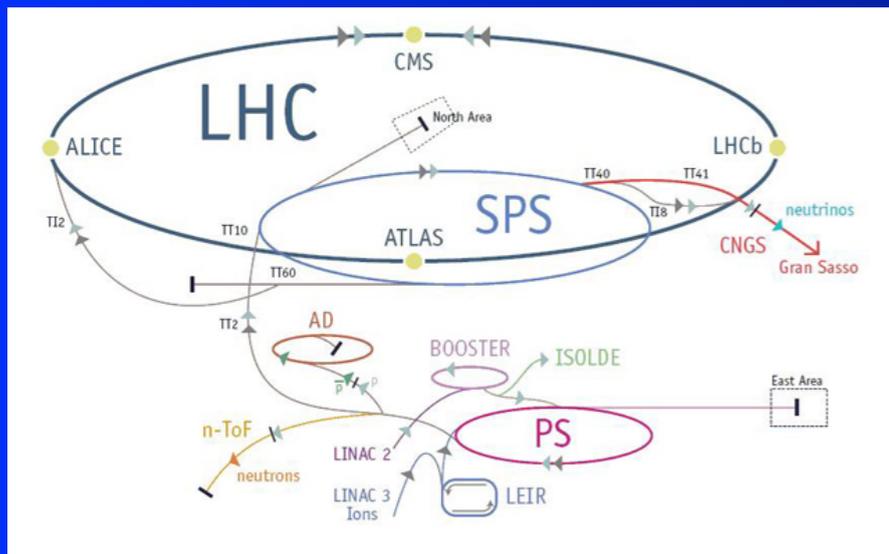
Синхрофазотрон Протвино ИФВЭ 1967 70 ГэВ



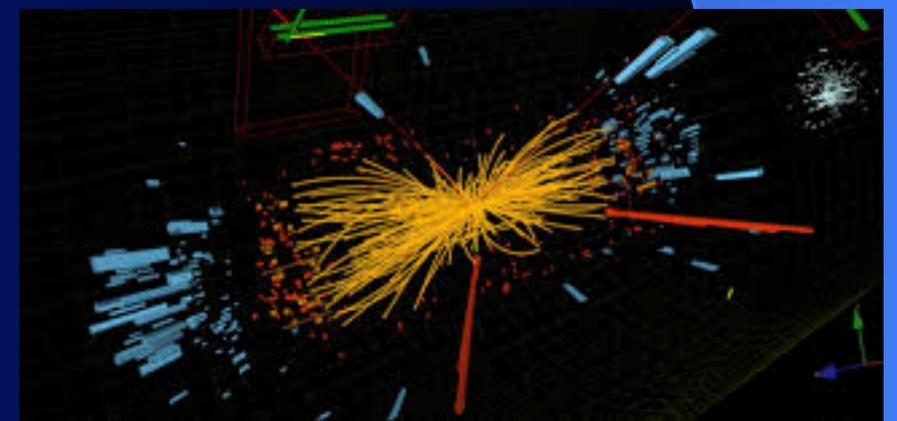
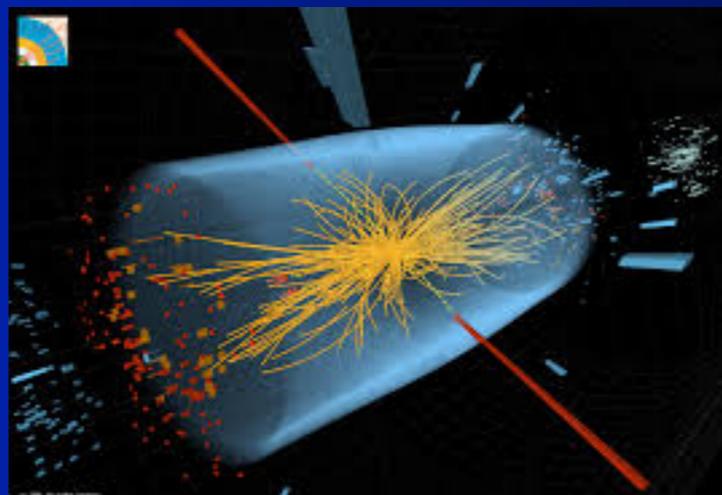
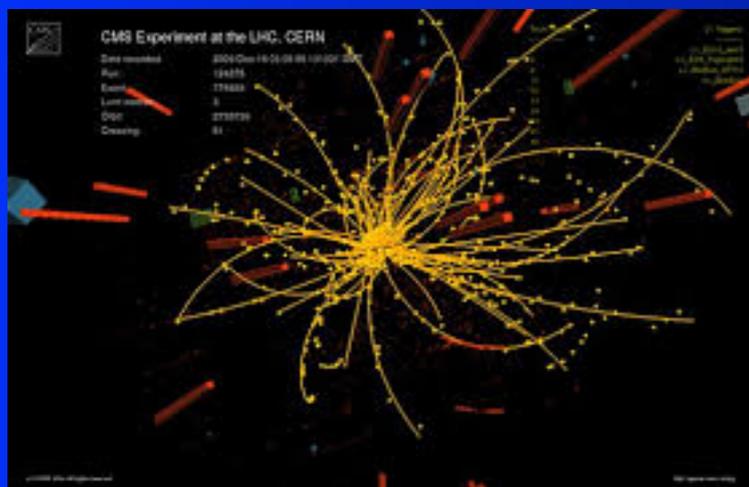
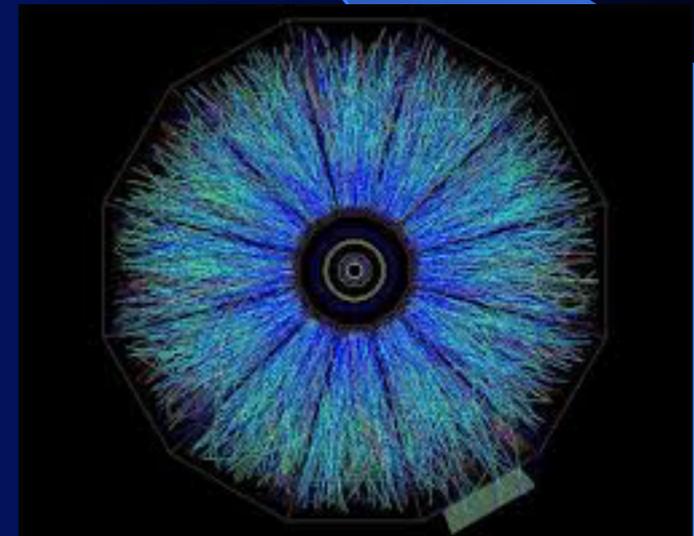
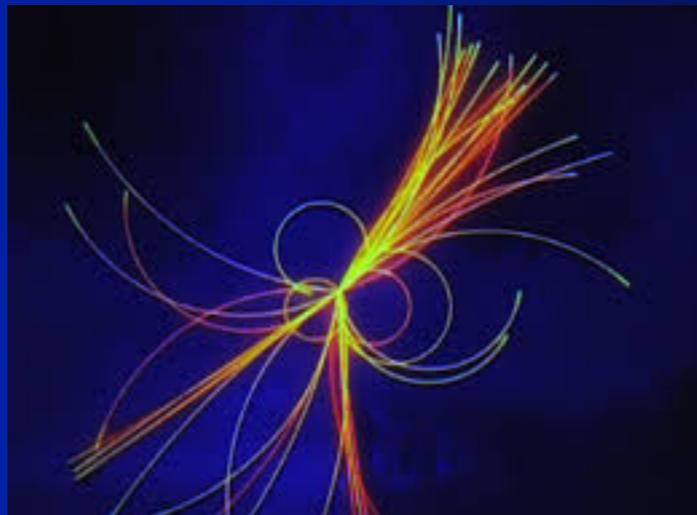
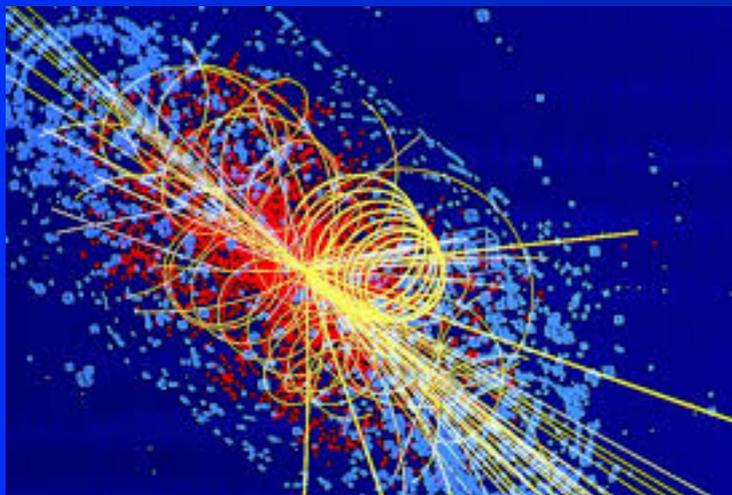
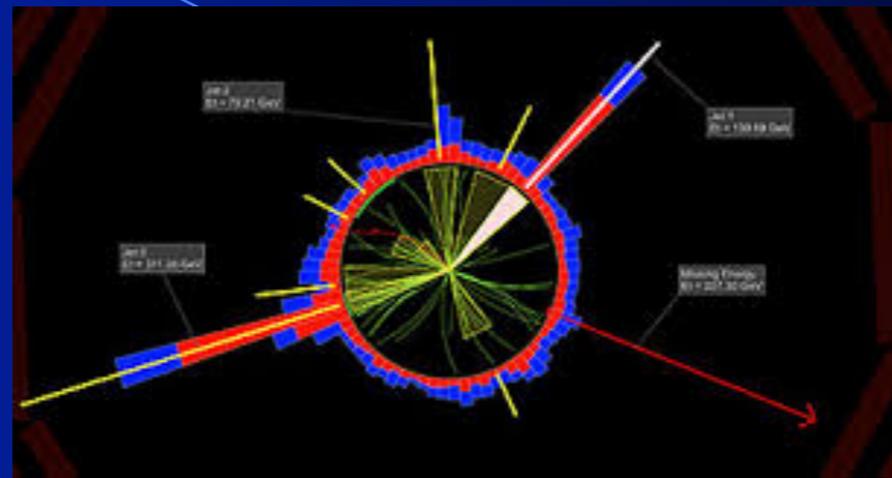
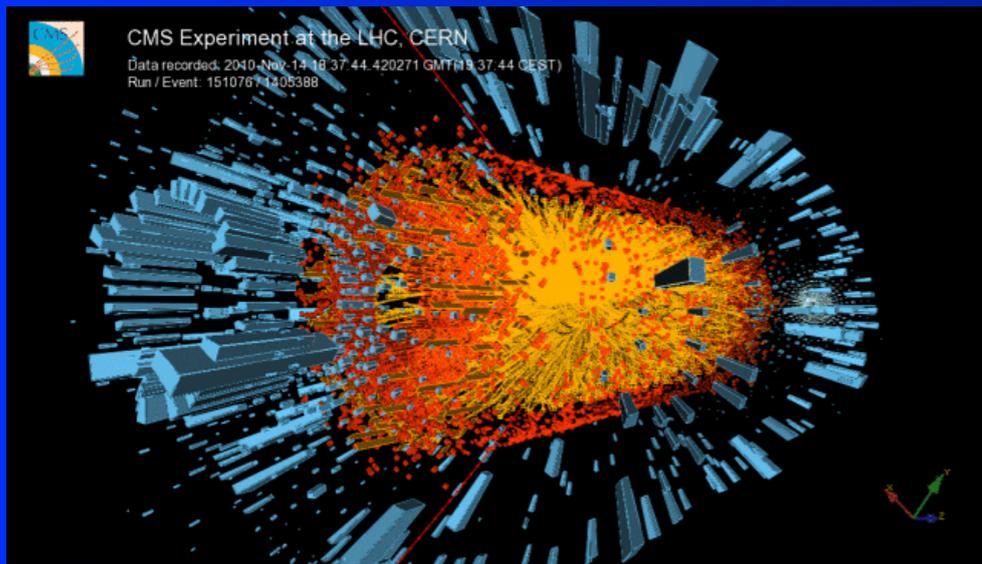
Super-proton-synchrotron CERN 1976 450 ГэВ

# Большой адронный коллайдер

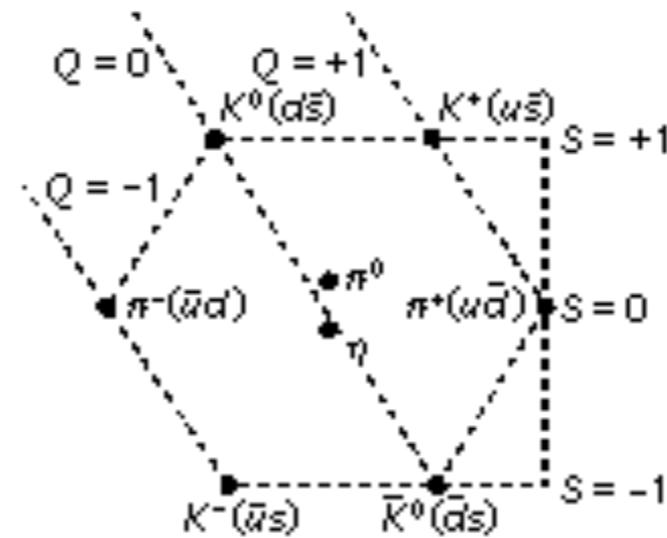
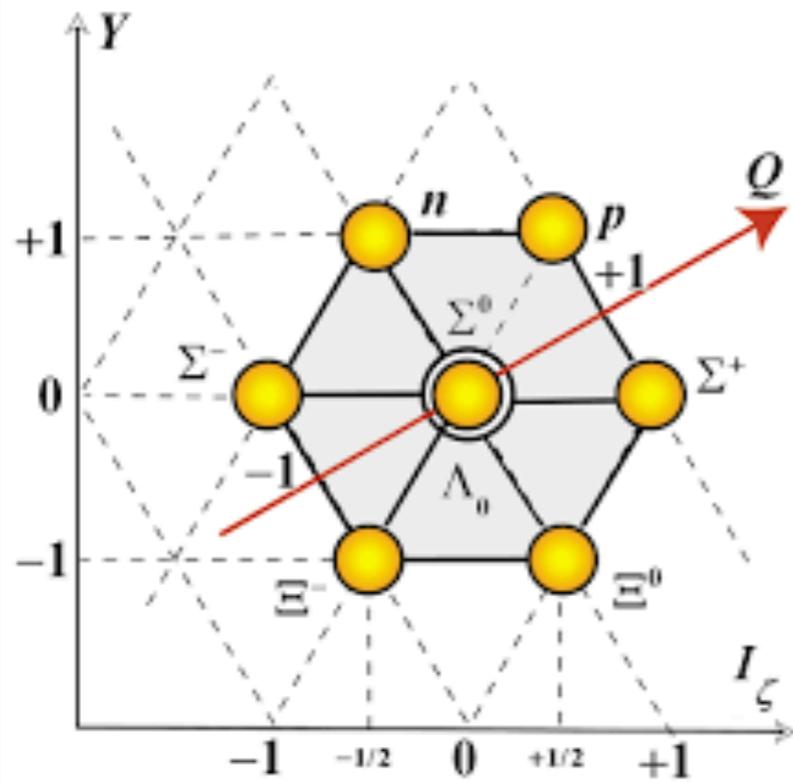
Большой адронный коллайдер ЦЕРН 2009- 14 000 ГэВ



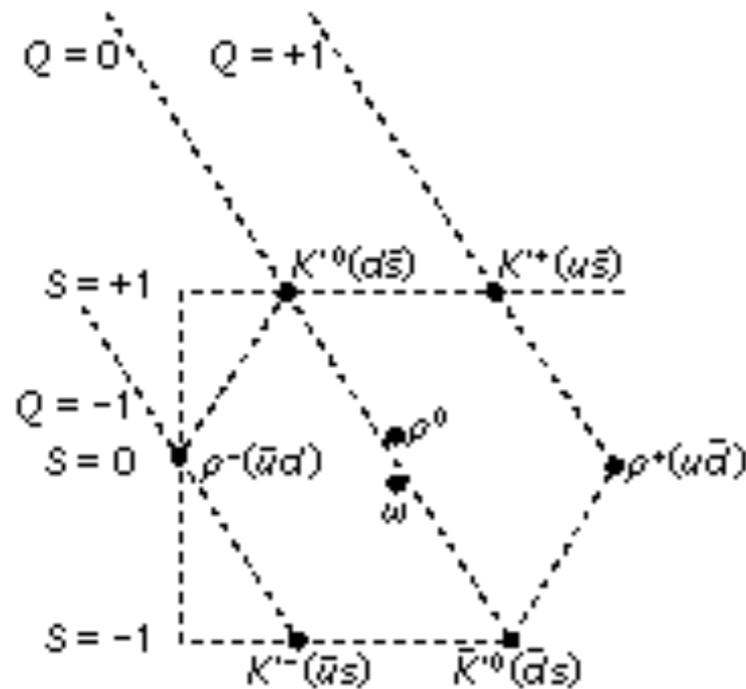
# Большой адронный коллайдер



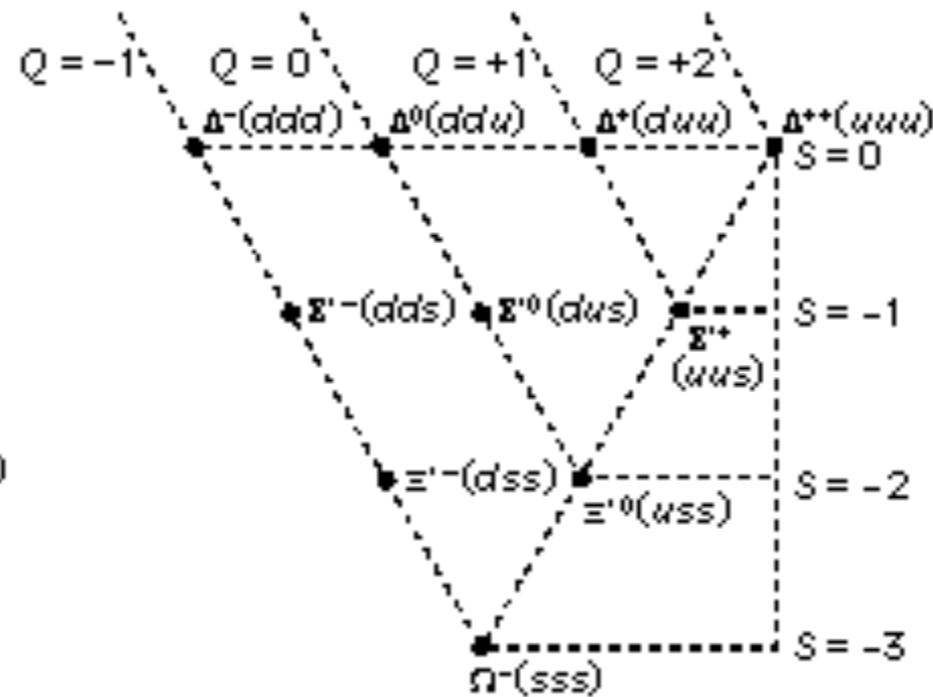
# Таблицы элементарных частиц



ОКТЕТ МЕЗОНОВ ( $s = 0$ )



ОКТЕТ МЕЗОНОВ ( $s = 1$ )

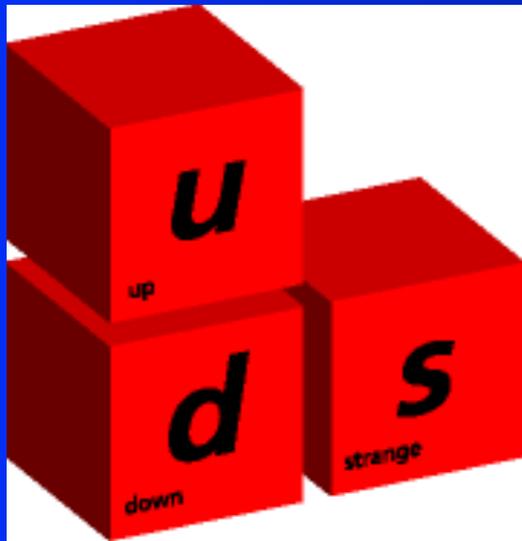


ДЕКУПЛЕТ БАРИОНОВ ( $s = 3/2$ )

Было обнаружено, что по какой-то причине частицы группируются в 8 (октеты) и 10 (декуплеты)

# Кварки – “кирпичики мироздания”

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



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

Кварки имеют дробный электрический заряд:

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

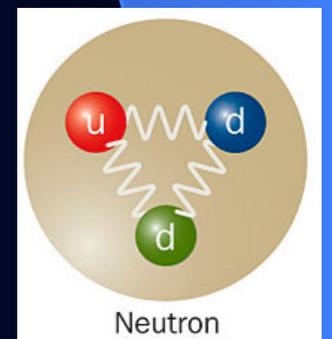
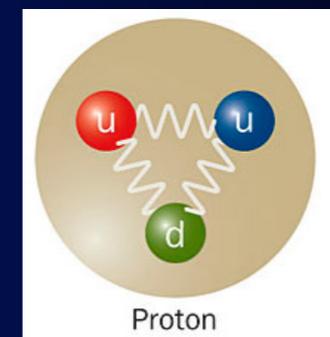
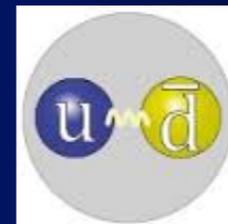
Все частицы сделаны из кварков как из кубиков.

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

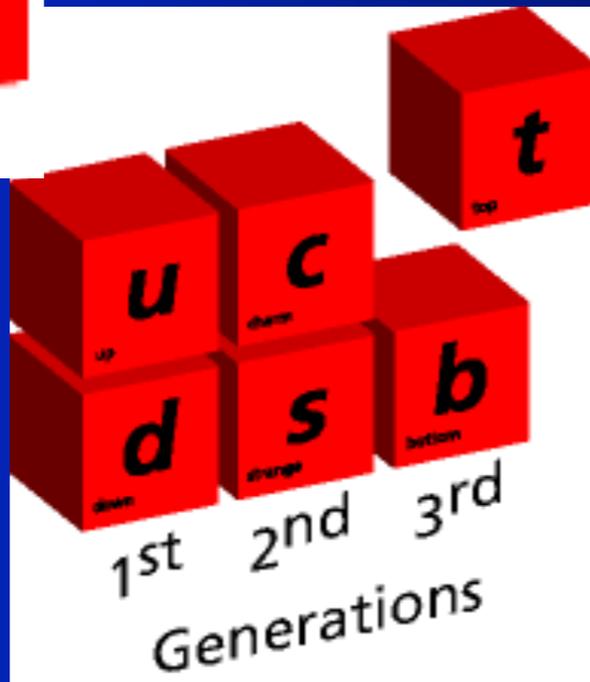
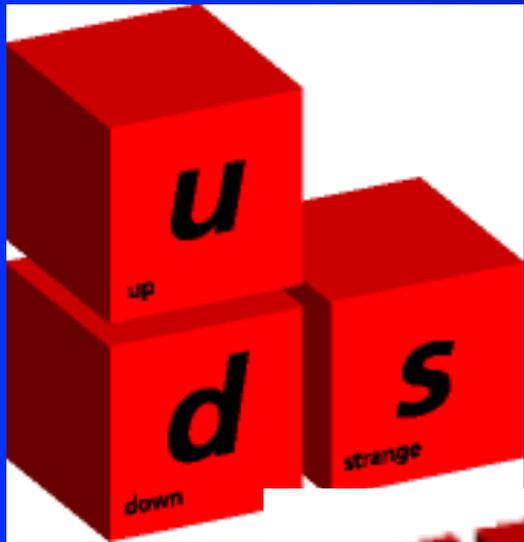
протон  $p = uud, \quad Q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$

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

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

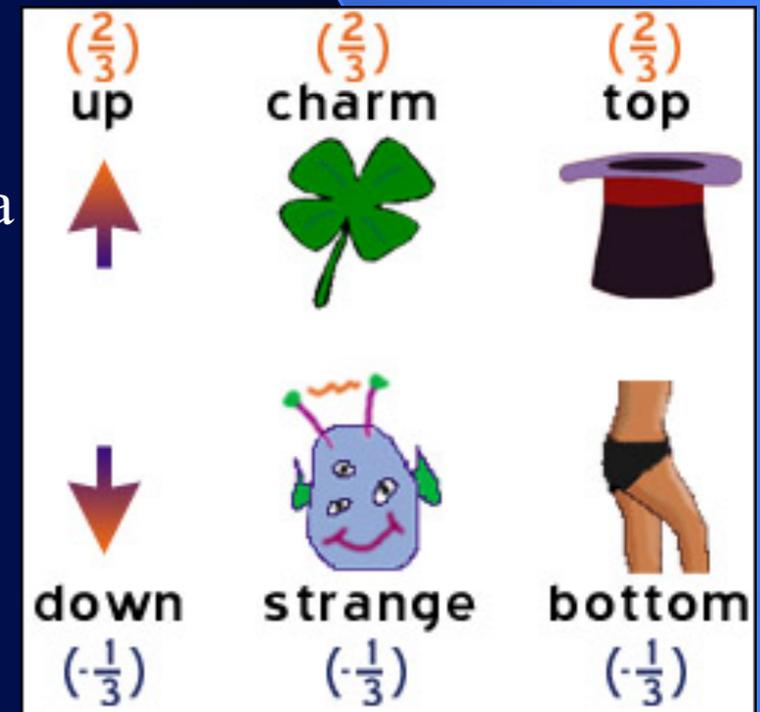


# Кварки — “кирпичики мироздания”

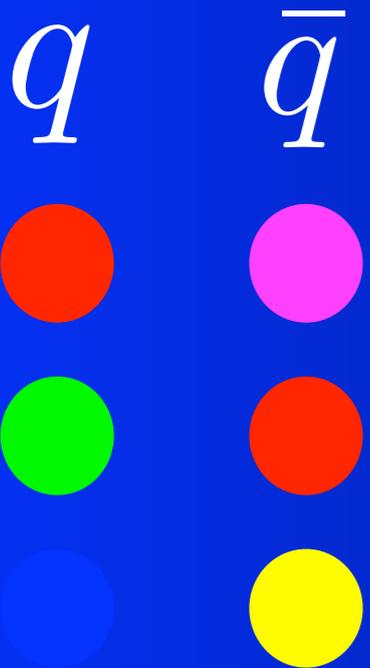


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен  $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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



# Цветные кварки



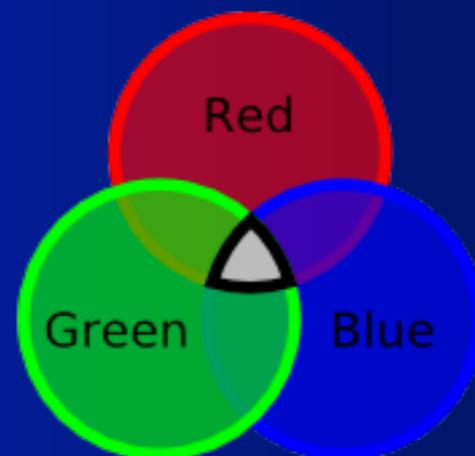
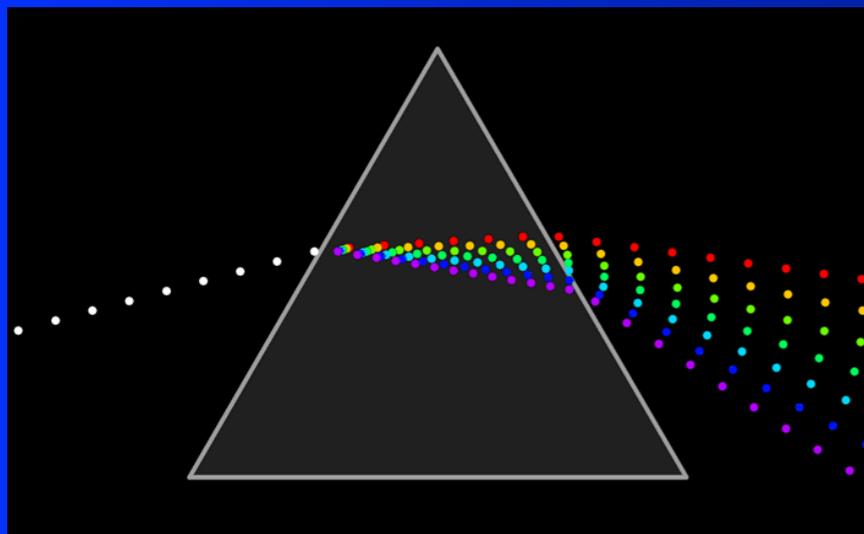
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

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

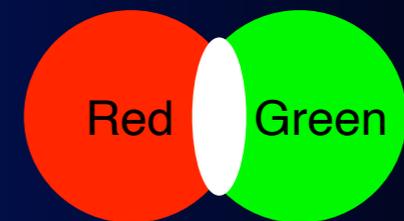
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

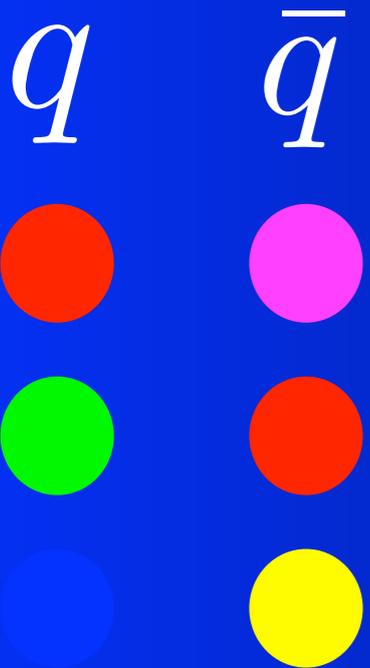


барион



МЕЗОН

# Цветные кварки



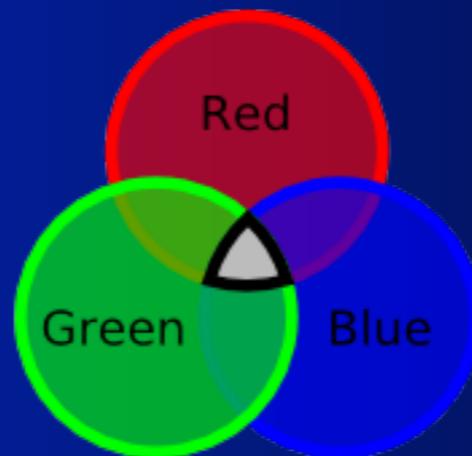
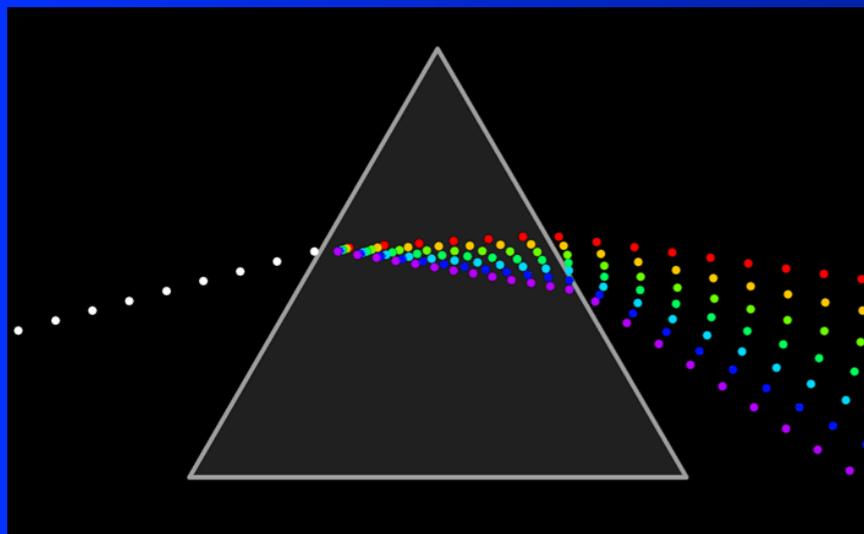
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

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

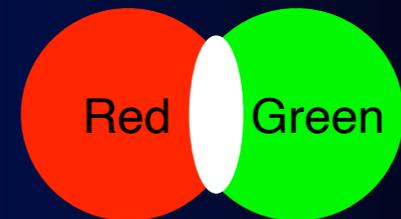
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

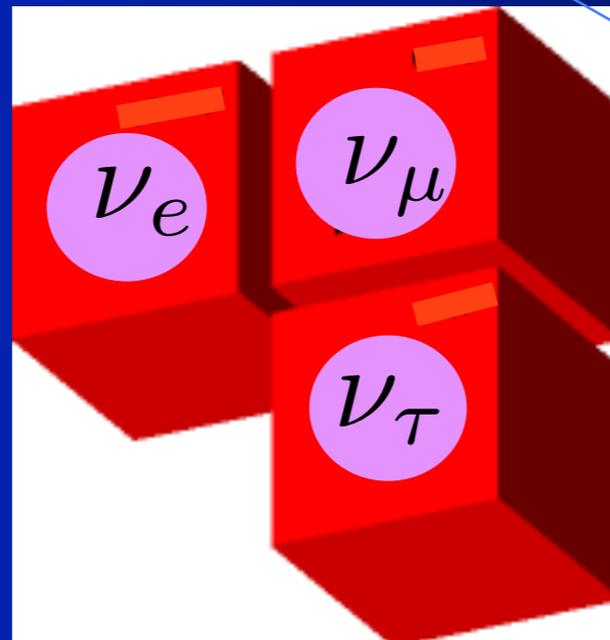
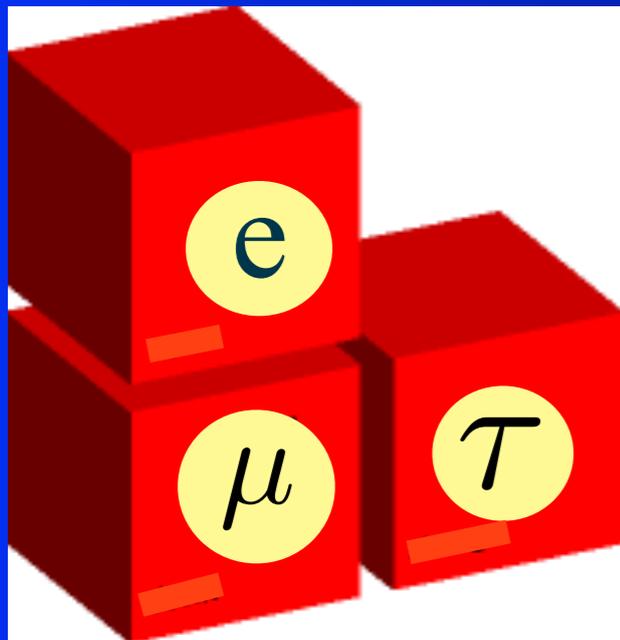


барион



МЕЗОН

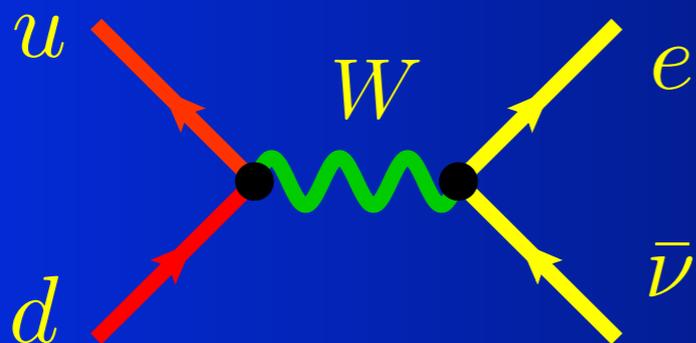
# Лептоны от слова λεπτός



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



Эти частицы живут микроскопические доли секунды и не образуют обычного вещества, но прилетают к нам в виде космических лучей и рождаются на ускорителях

# История открытий

$p$   
1919

$n$   
1932

$u$

$c$   
1974

$t$   
1995

$\nu_e$   
1956

$\nu_\mu$   
1963

$\nu_\tau$   
2000

$d$

$s$   
1947

$b$   
1977

$e$   
1895

$\mu$   
1936

$\tau$   
1975

шесть кварков

шесть лептонов

$\gamma$

$g$   
1979

$W, Z$   
1983

$H$   
2012

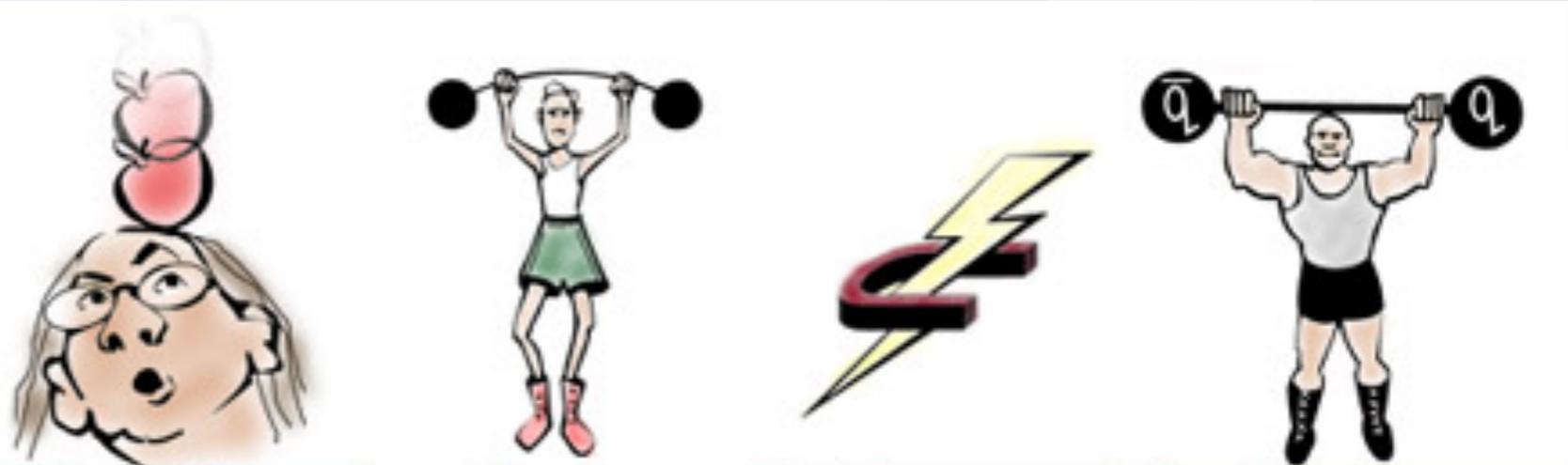
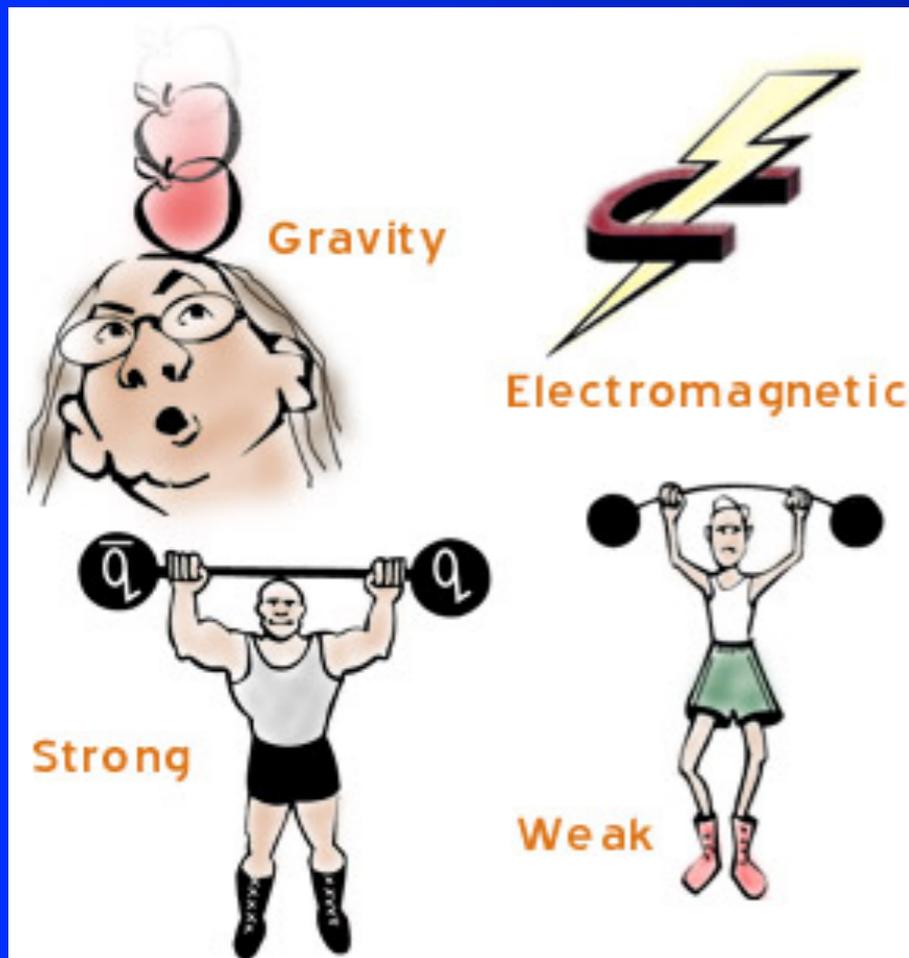
$G$

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

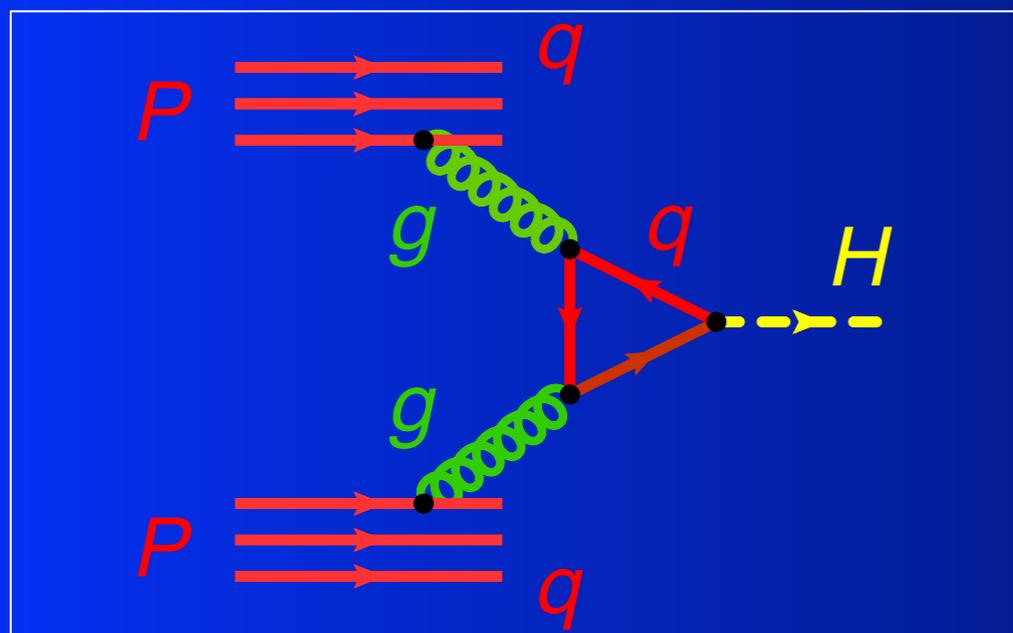


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+$ $W^-$	Quarks and Gluons

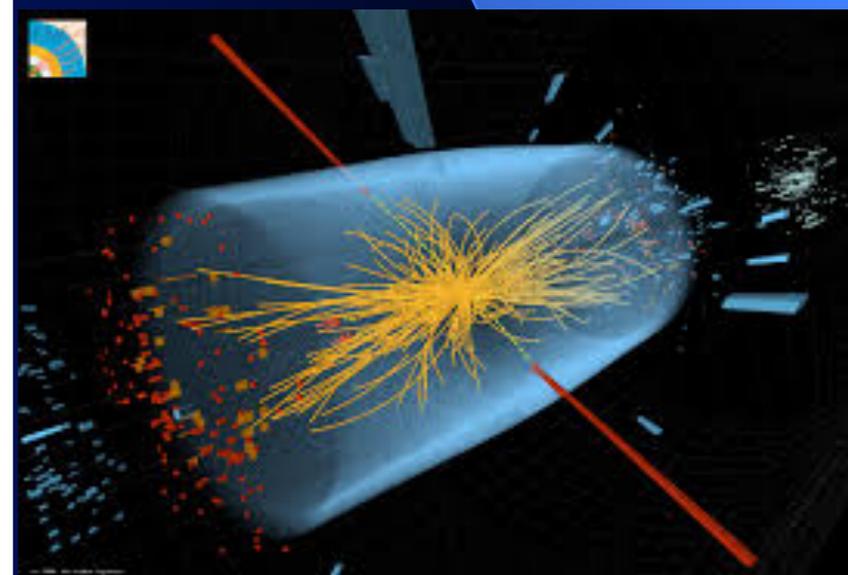
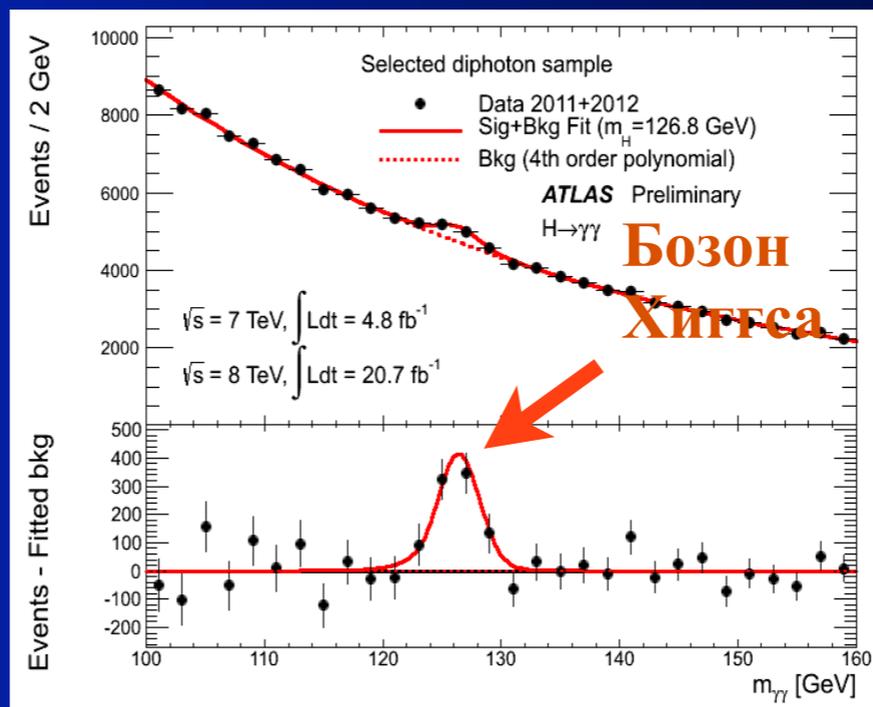
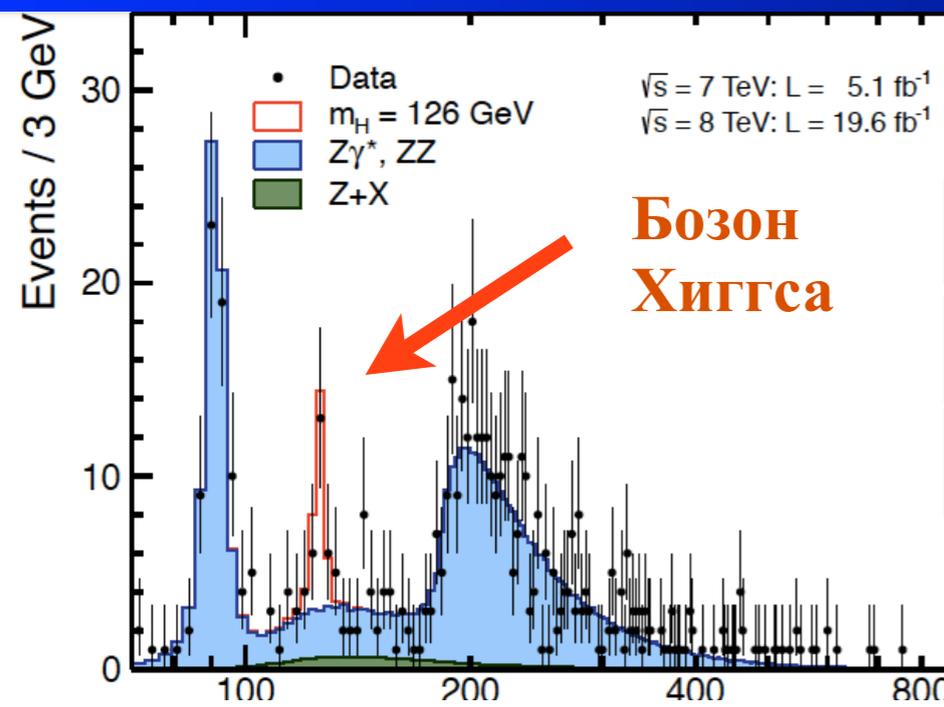
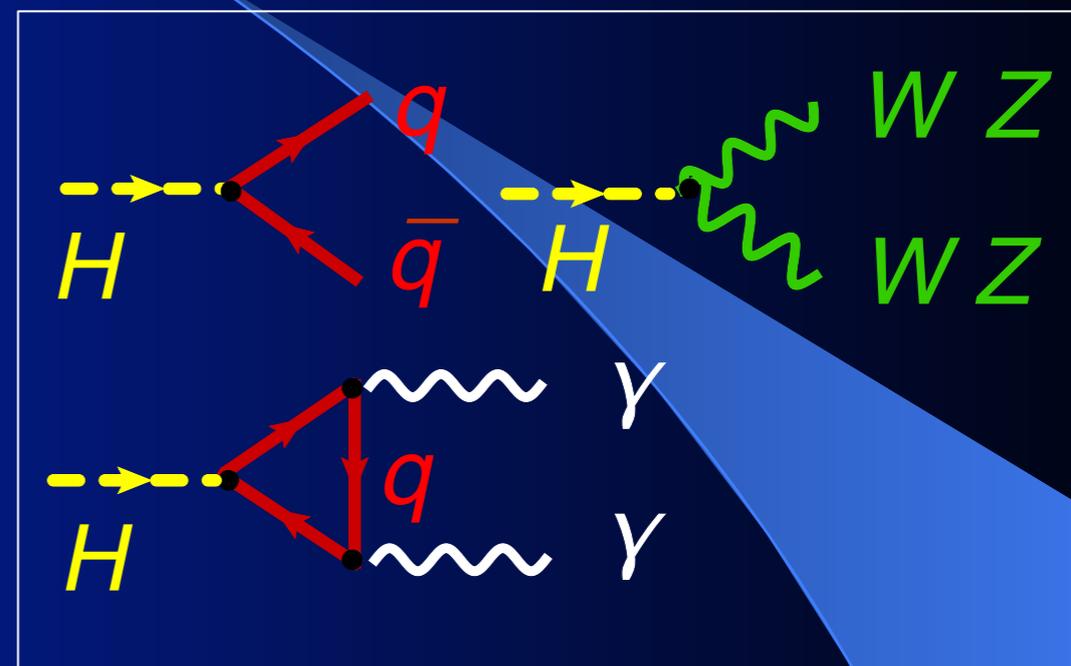
# Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



Процессы распада



# 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→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	<b>H</b> 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
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	<b>G</b> 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	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> 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	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force	
					Bosons (Forces)

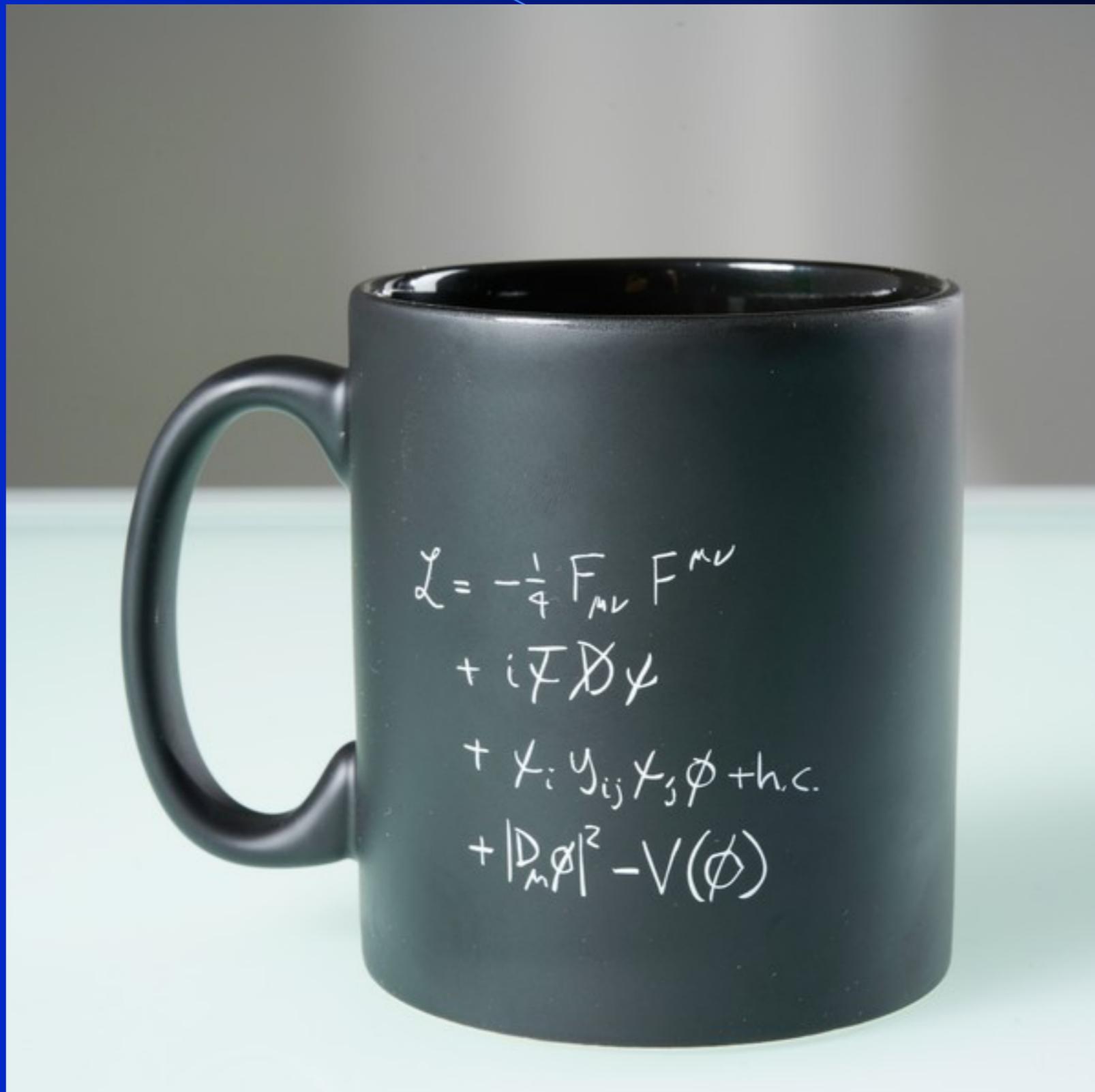
Силы

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

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

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

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

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

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

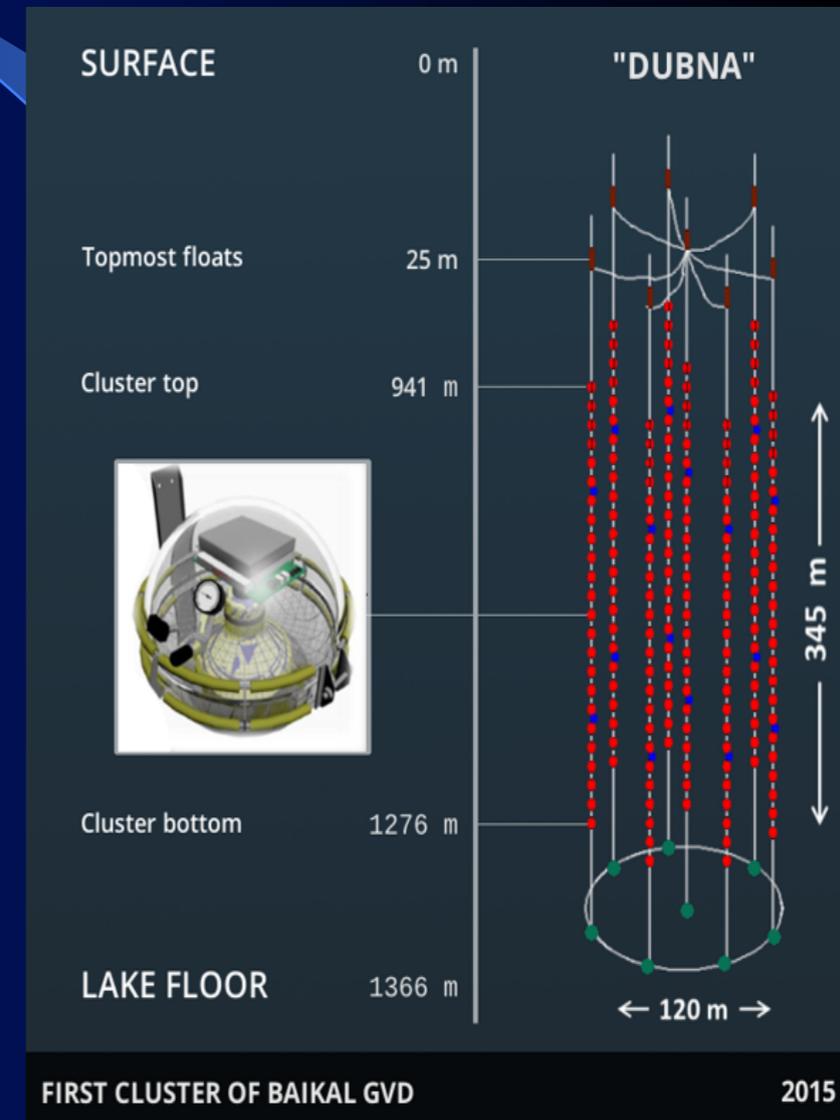
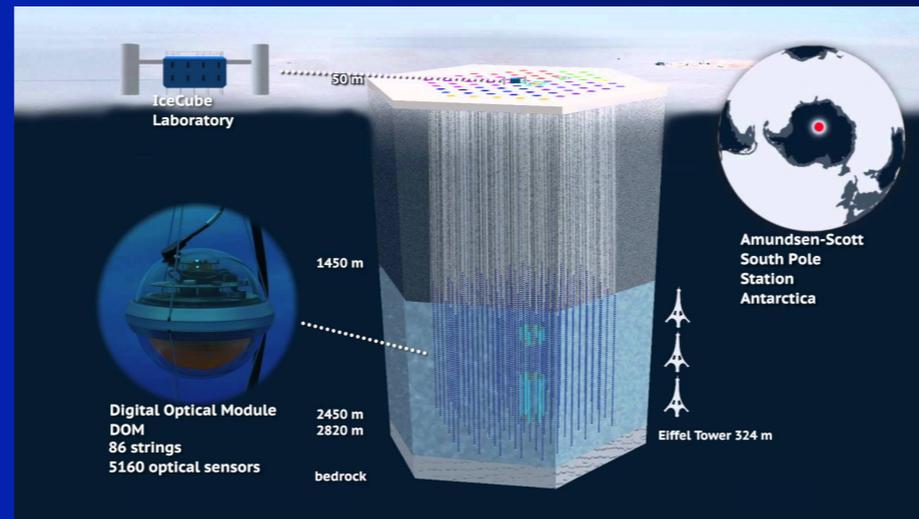
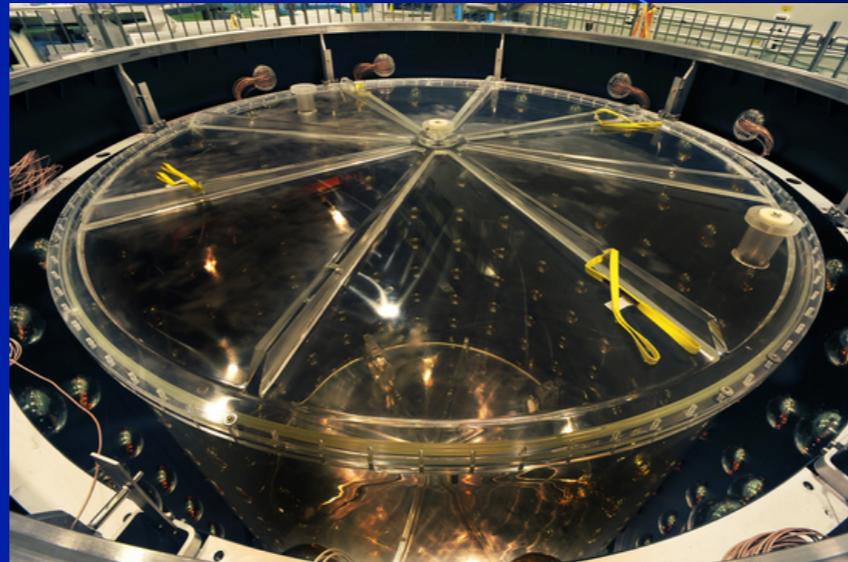
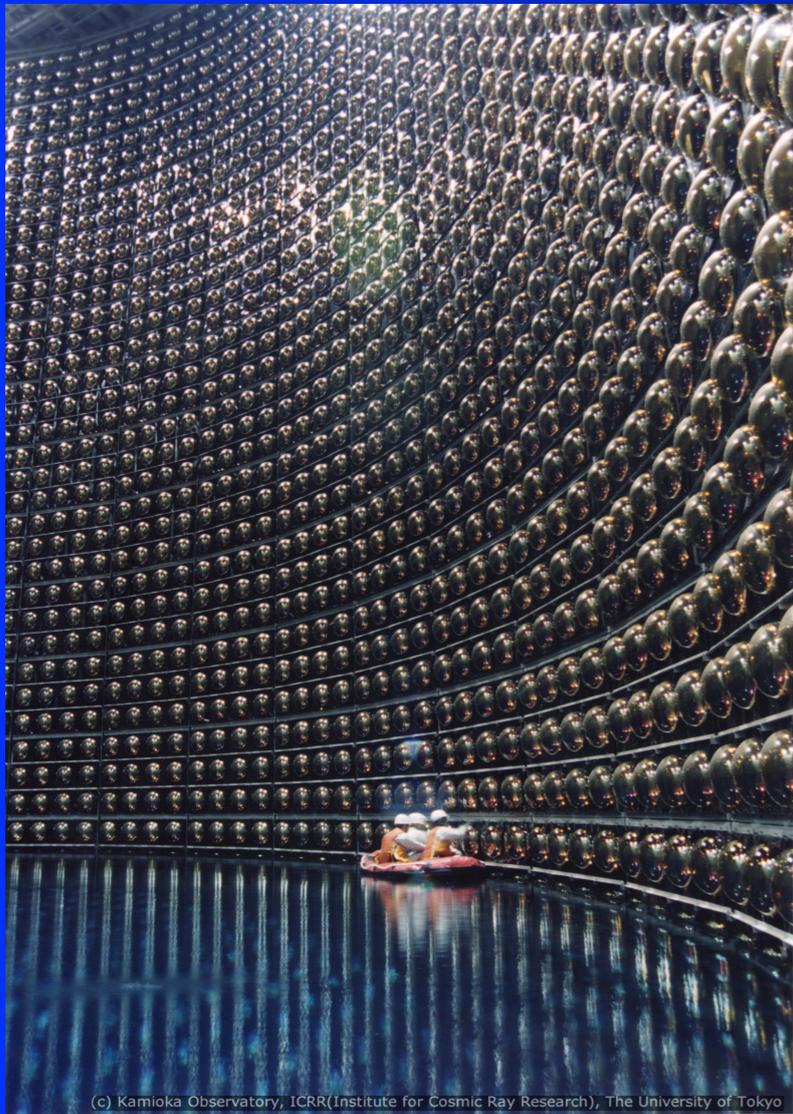
$$\mathcal{L}_{Yukawa} = y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H +$$

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

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

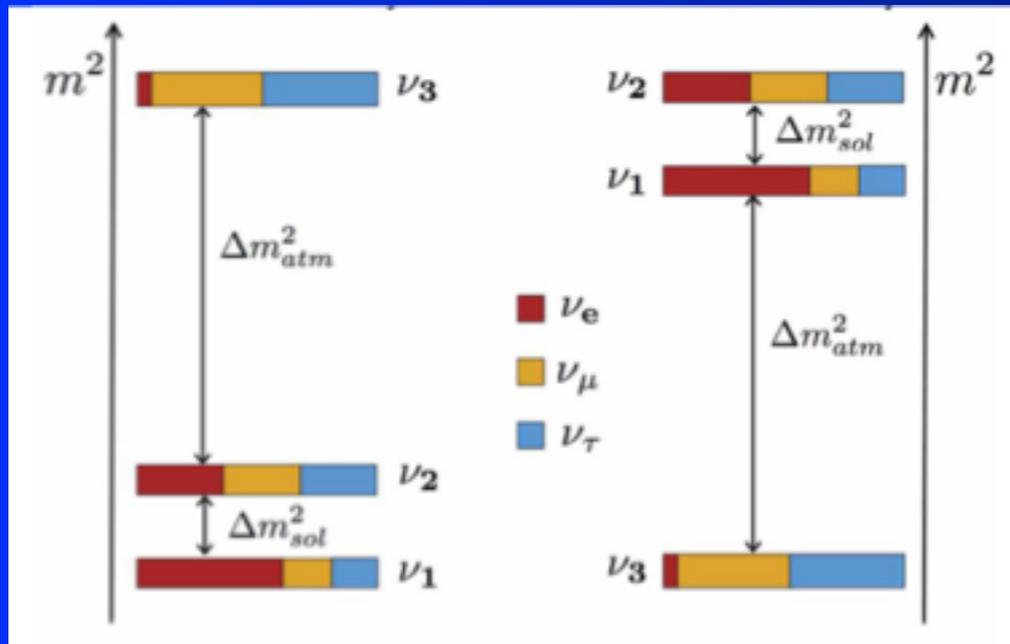
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu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

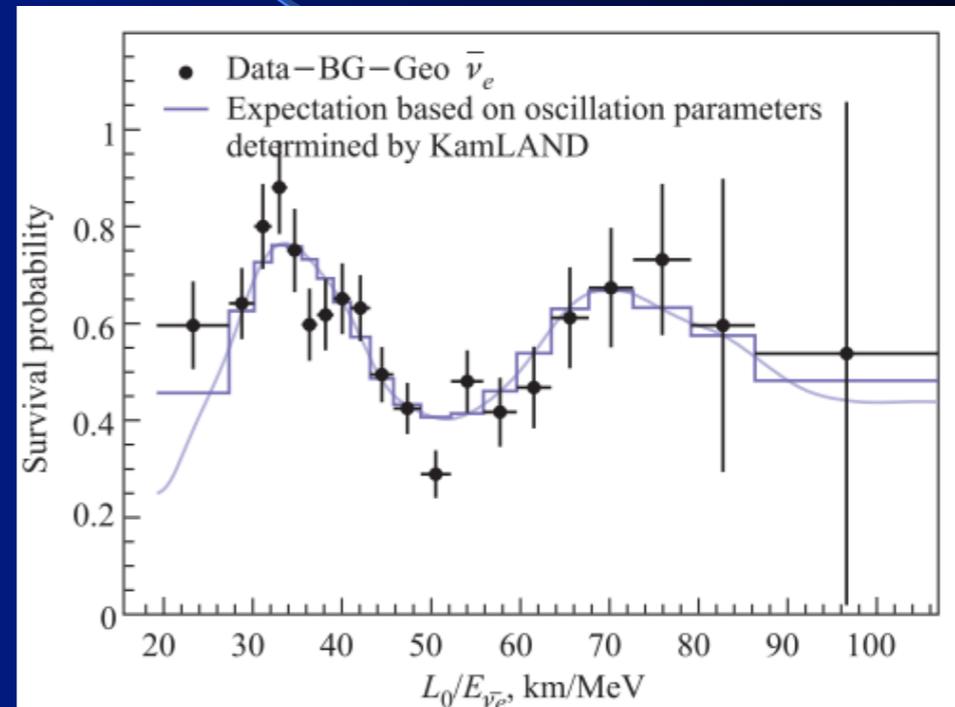


# Физика Нейтрино

## Иерархия масс



## Осцилляции нейтрино



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

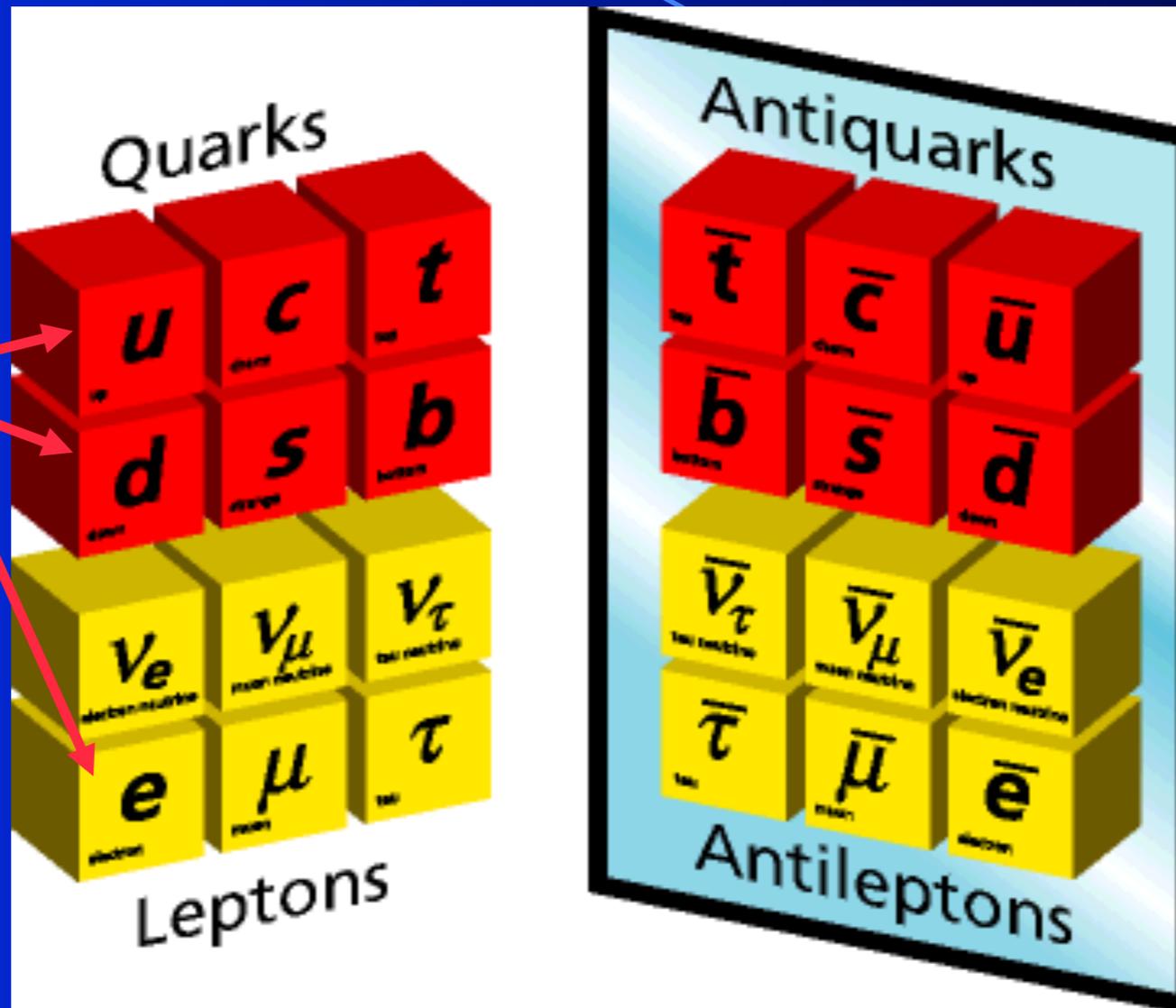
↑  
 $\nu$ -OSC

↑  
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

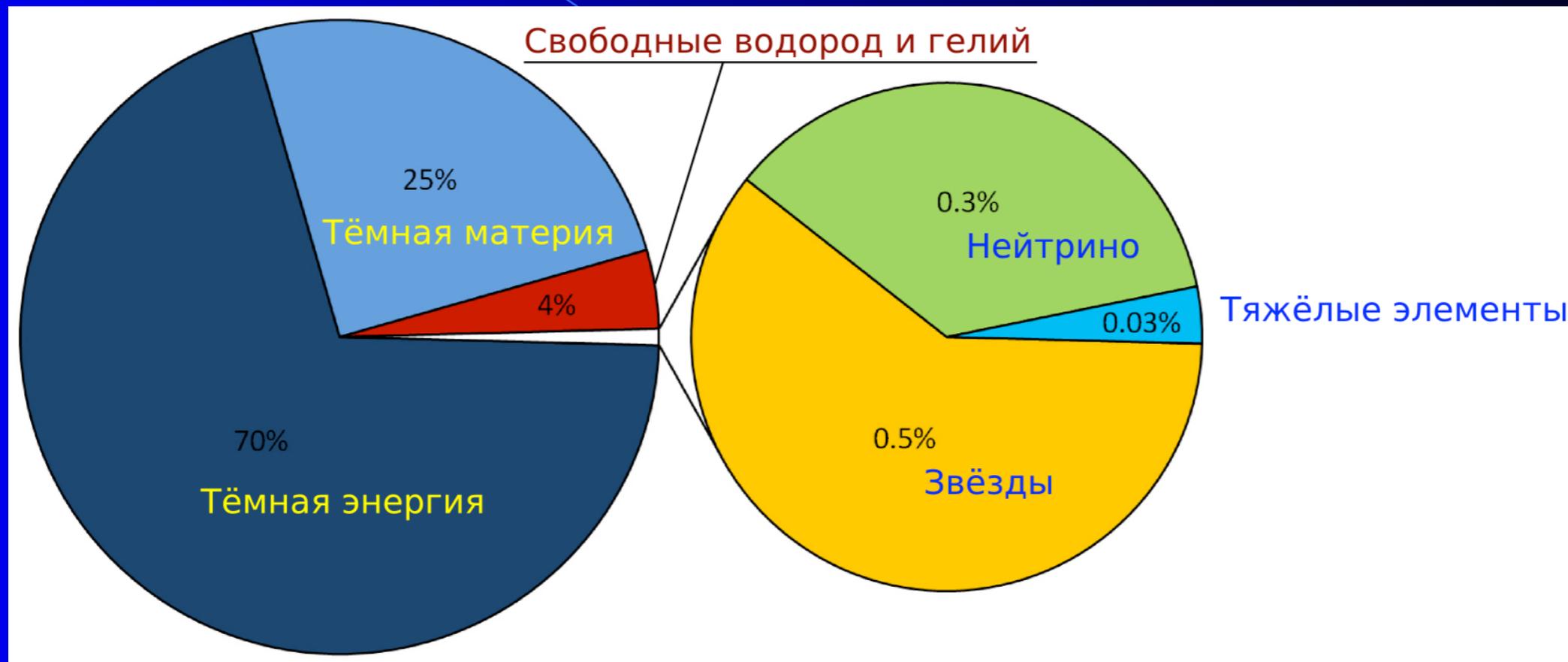


Антиматерия родилась вместе с материей во время «Большого взрыва»

Античастицы рождаются вместе с частицами на ускорителях, но мир вокруг нас не содержит антивещества

# Энергетический баланс Вселенной

- Температурные флуктуации микроволнового фона
- Взрывы сверхновых

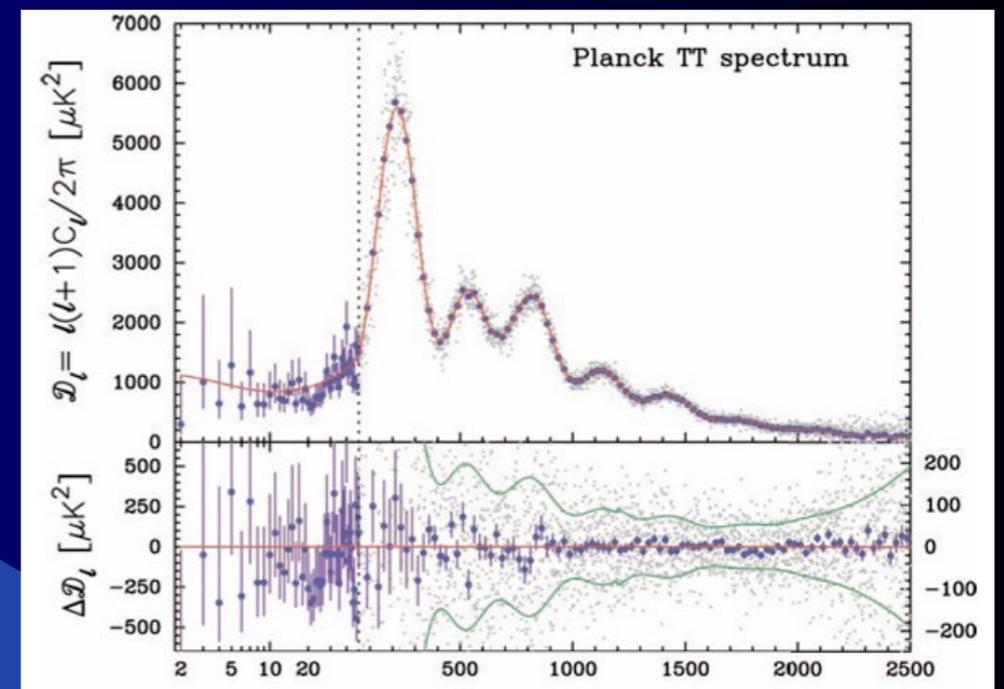
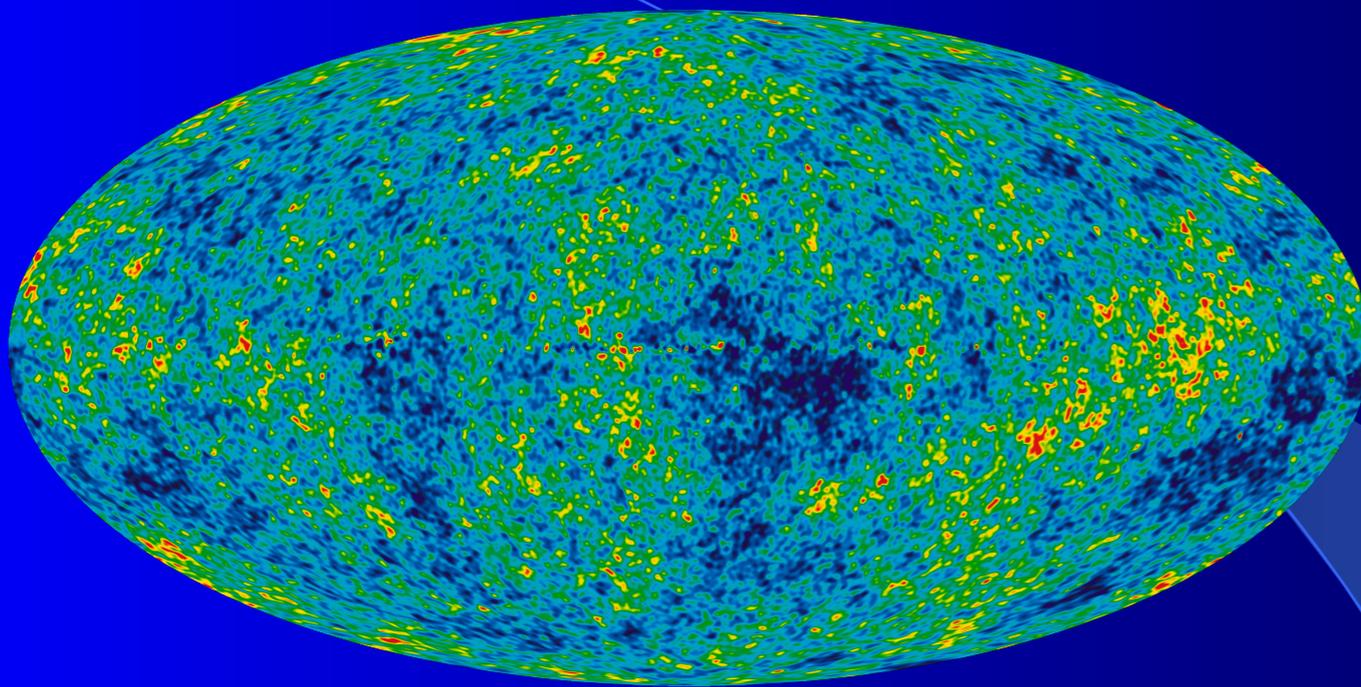


Наше знание касается лишь малой части Вселенной, однако возможно нам известны 99% (50%) элементарных частиц

# Реликтовое микроволновое излучение

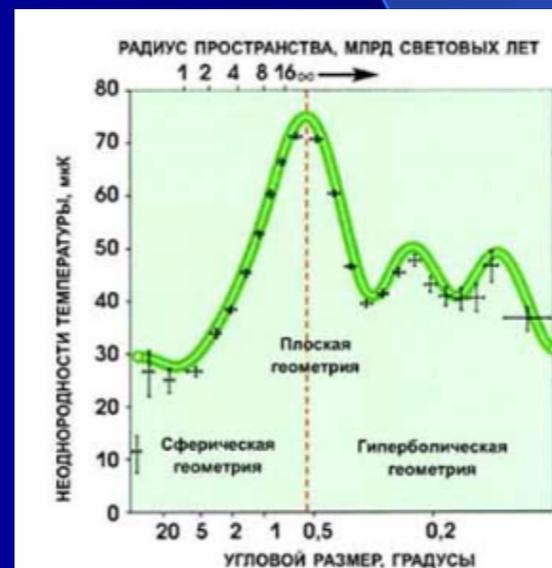
Реликтовое излучение  $T \approx 2.7\text{K}^\circ$

Разложение по угловым гармоникам



Температурные флуктуации микроволнового фона

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



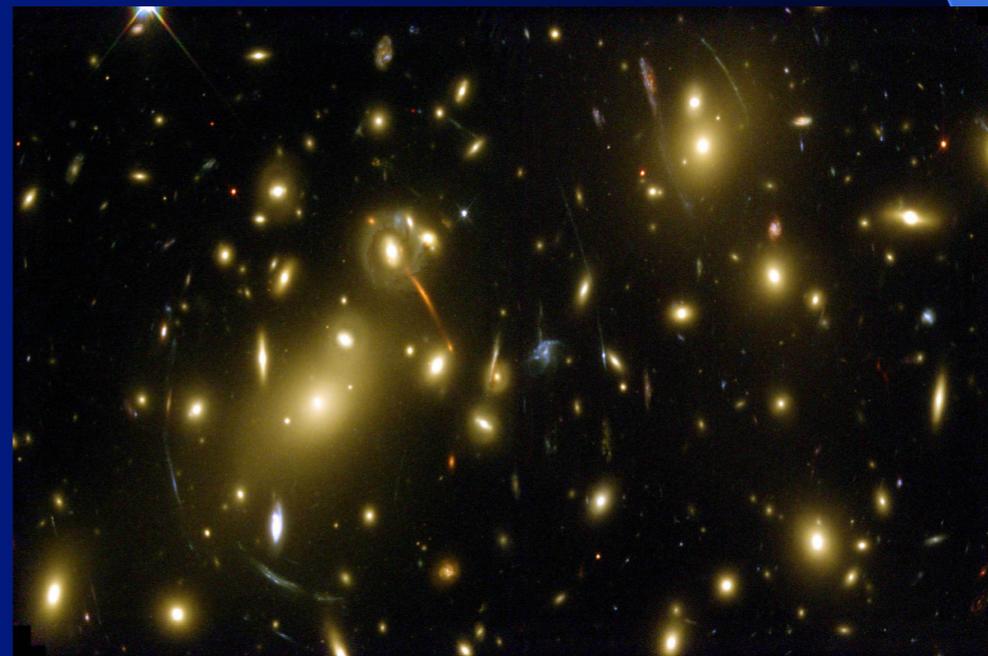
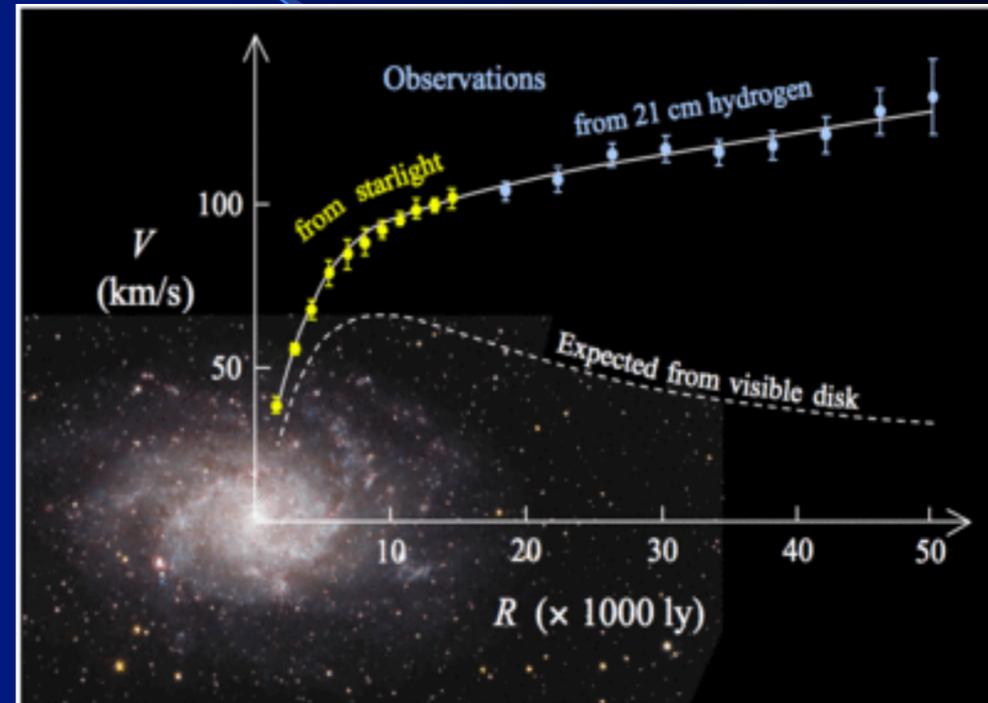
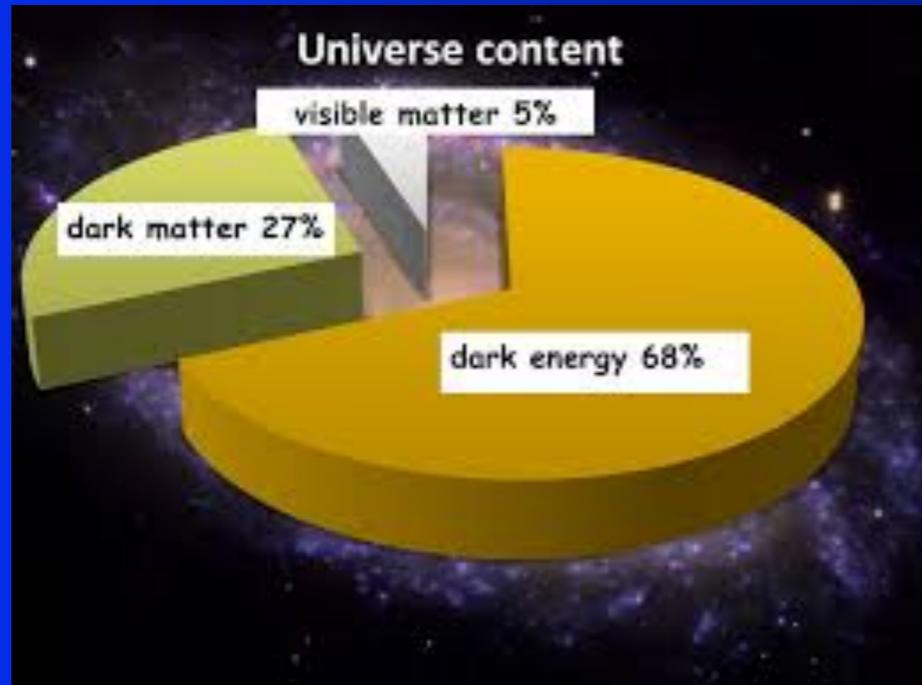
$$\Omega_{UsualMatter} = 4.9\%$$

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

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

$$\Omega = 1.02 \pm 0.02$$

# Тёмная материя





# 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

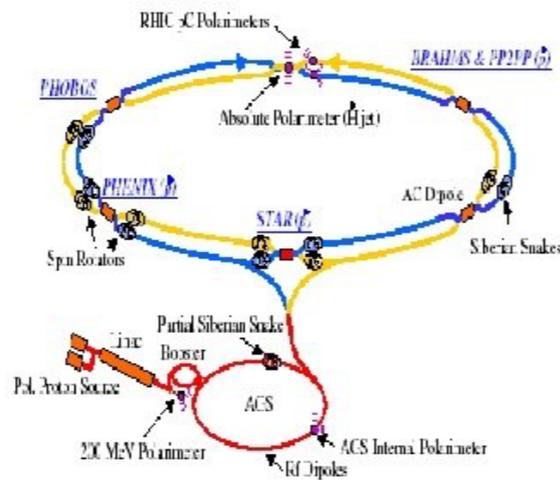
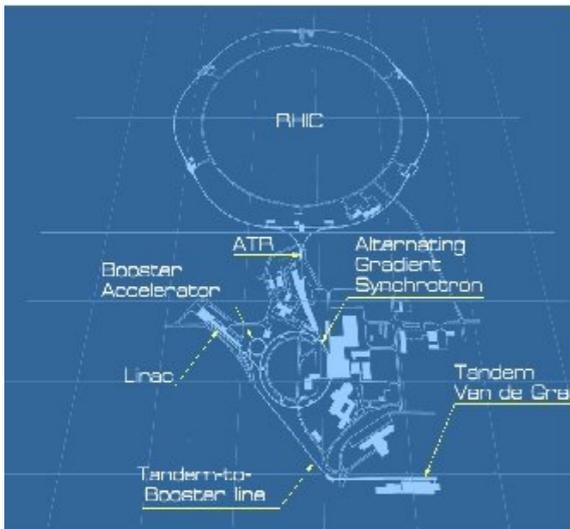
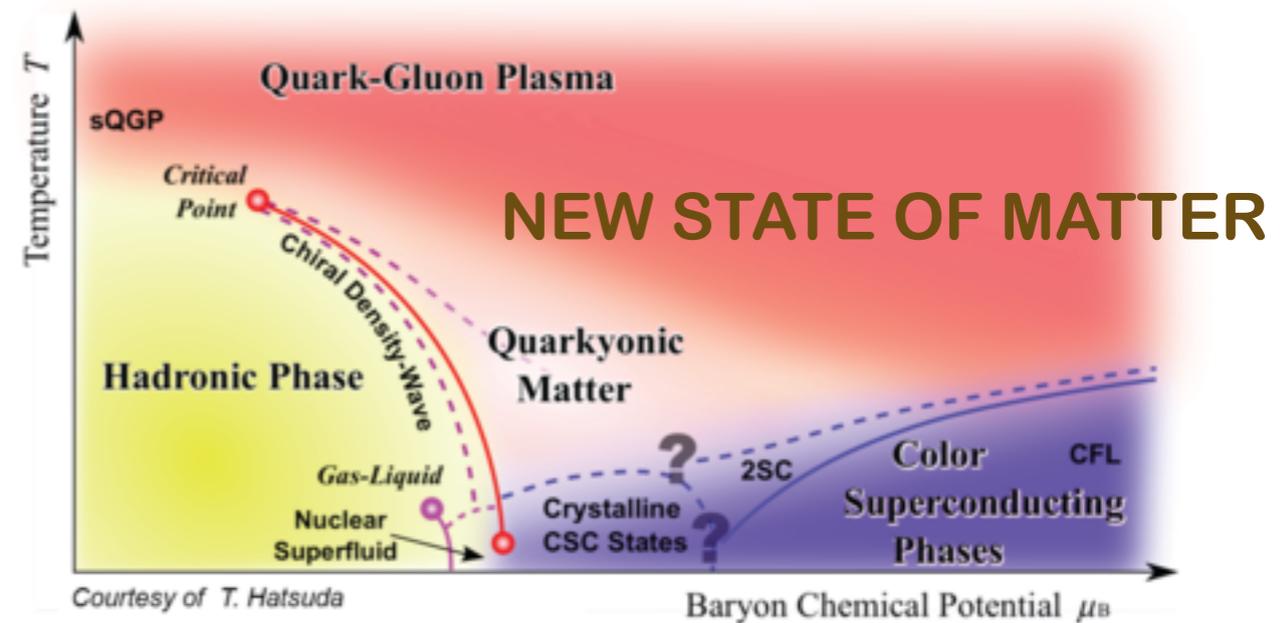
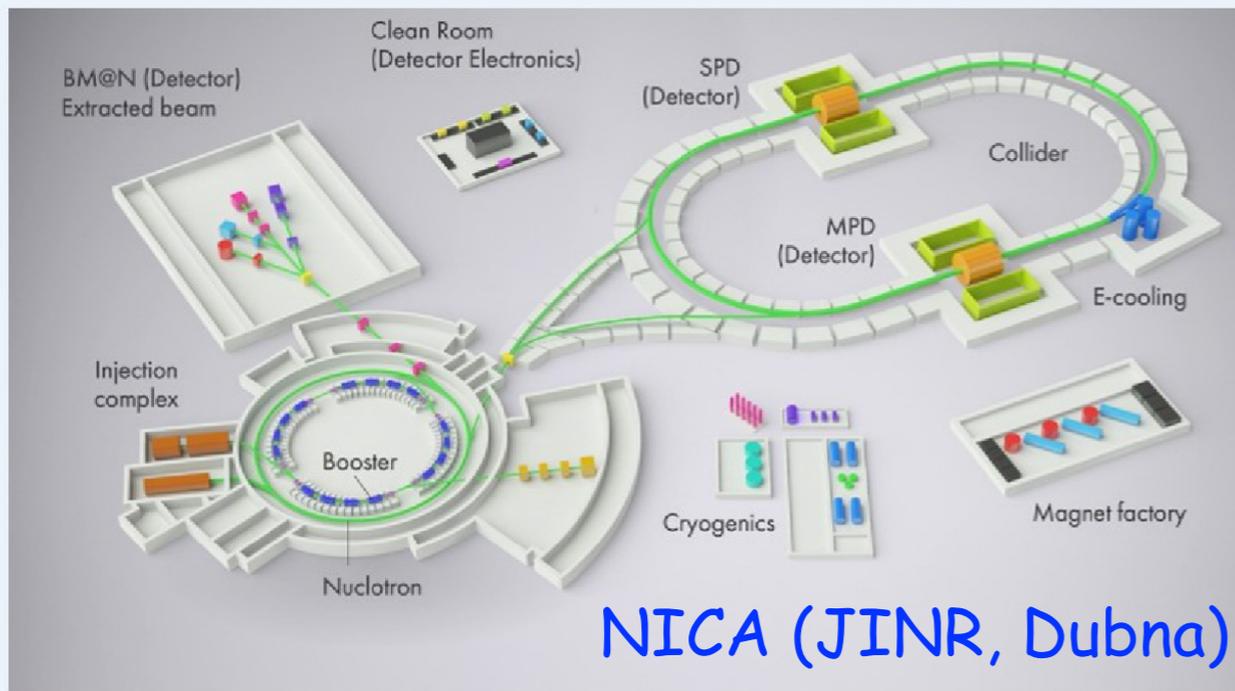
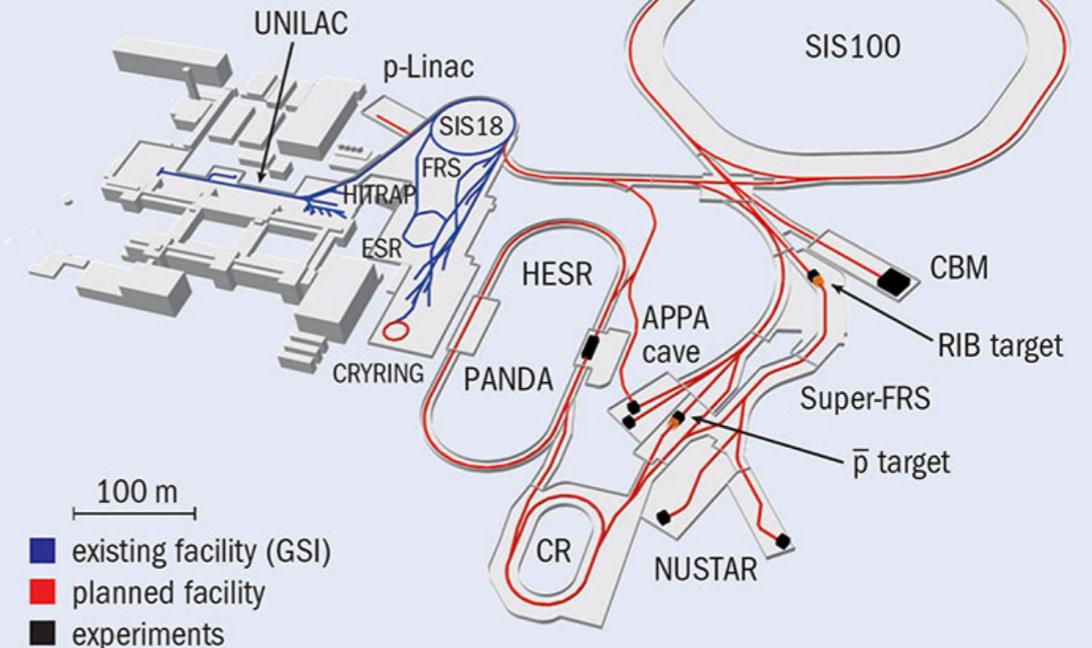


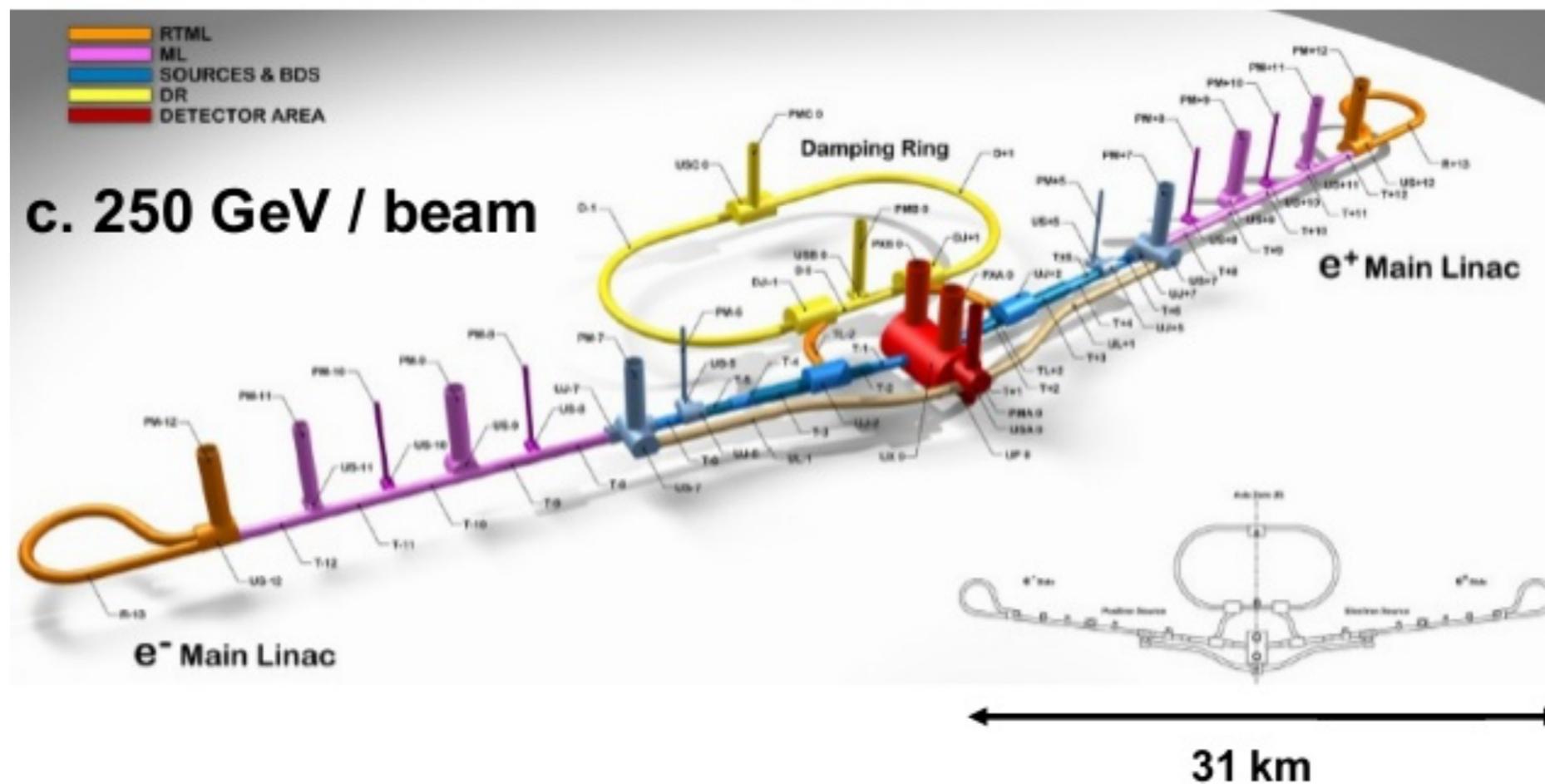
Figure 1. Schematic layout of ENL complex for polarized proton operations. Courtesy of MacKay (private communication) and BNL Collider Accelerator Department.

### FAIR (GSI, Germany)



# ELECTRON-POSITRON LINEAR COLLIDER (JAPAN)

## International Linear Collider (ILC)



TECHNOLOGY EXISTS, CONSTRUCTION DID NOT START YET

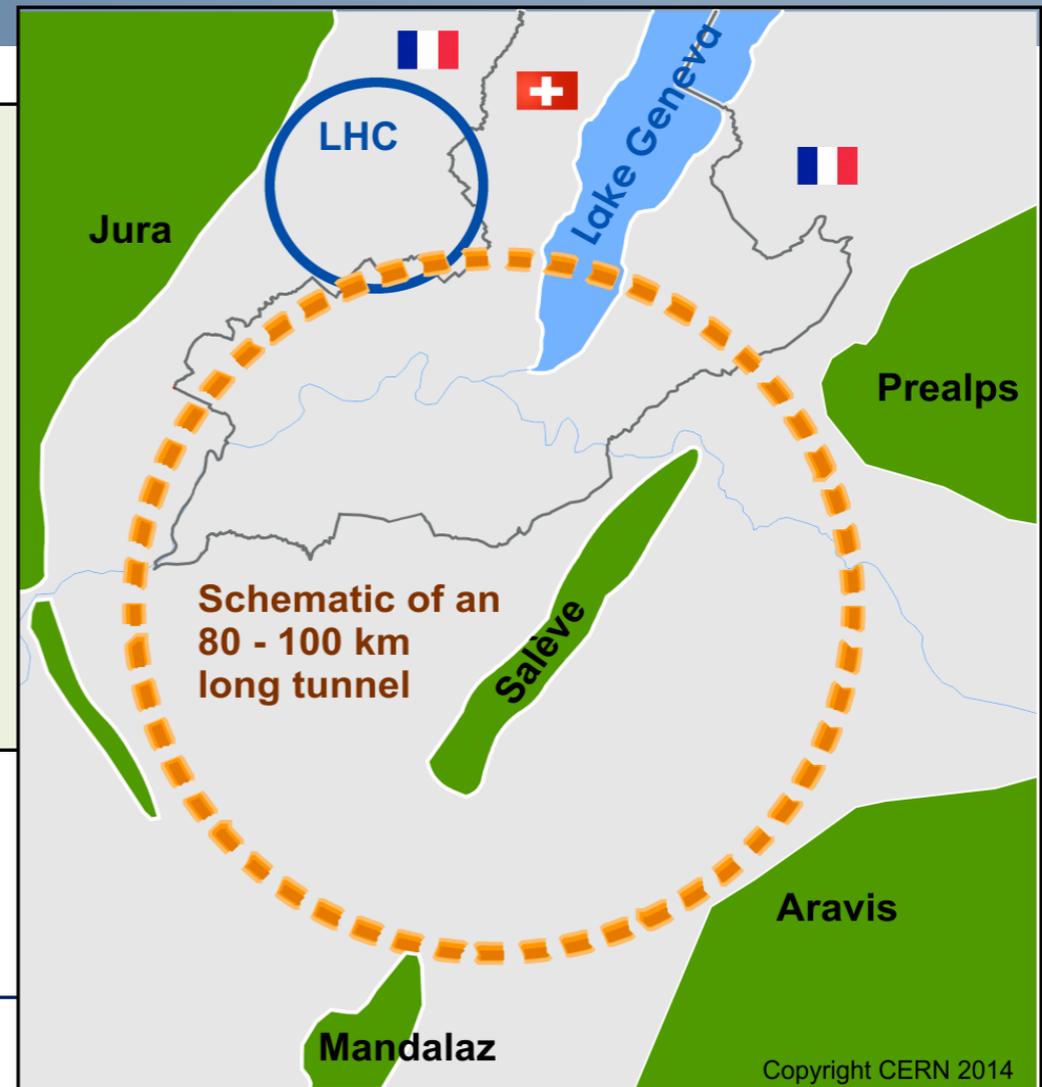


## Future Circular Colliders (FCC)

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<sup>+</sup>e<sup>-</sup> 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



Copyright CERN 2014

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,  $\Delta M_W < 1 \text{ MeV}$ ,  $\Delta m_{\text{top}} \sim 10 \text{ MeV}$