

# ЗАГАДКИ И ОТКРЫТИЯ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики  
Объединённый институт ядерных  
исследований (Дубна)



Аванта

аст  
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА АСТ





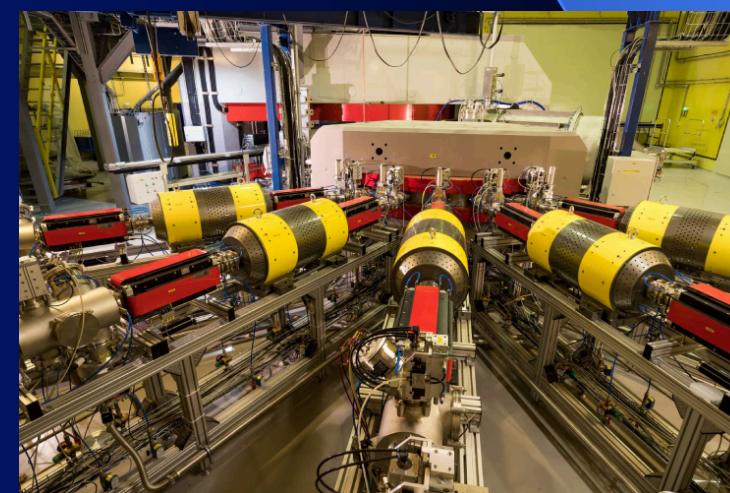
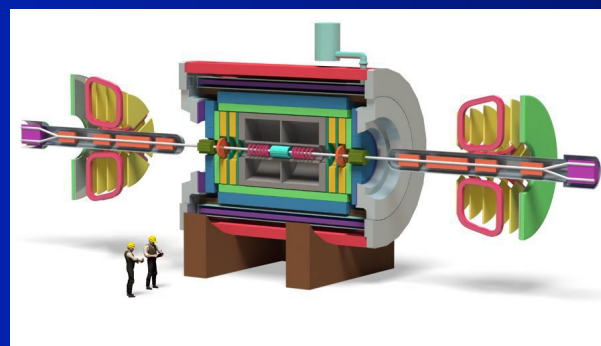
# Объединённый институт ядерных исследований



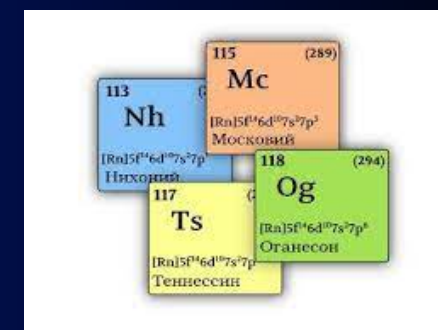
Международная межправительственная организация: 15 стран-участниц, 5 ассоциированных членов, 5000 сотрудников, 7 научных Лабораторий



Ускоритель тяжёлых ионов НИКА



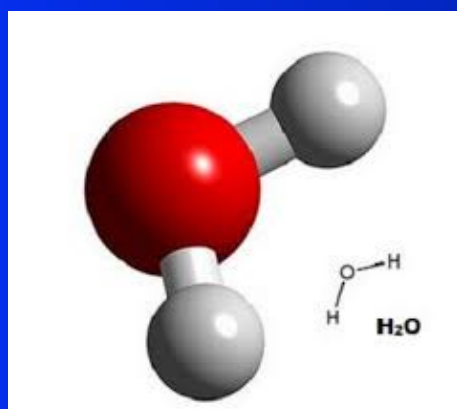
Фабрика сверхтяжёлых элементов



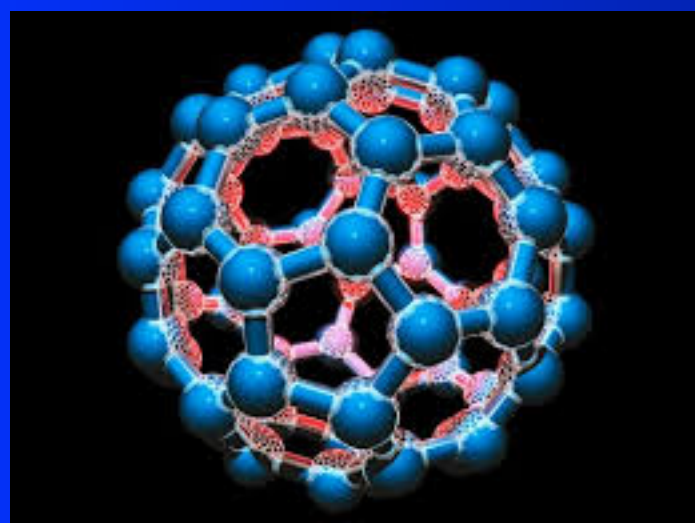
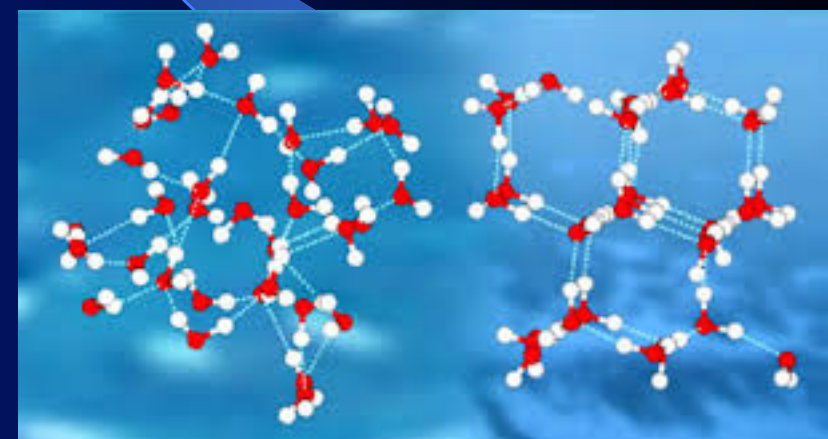


# Атомы и Молекулы

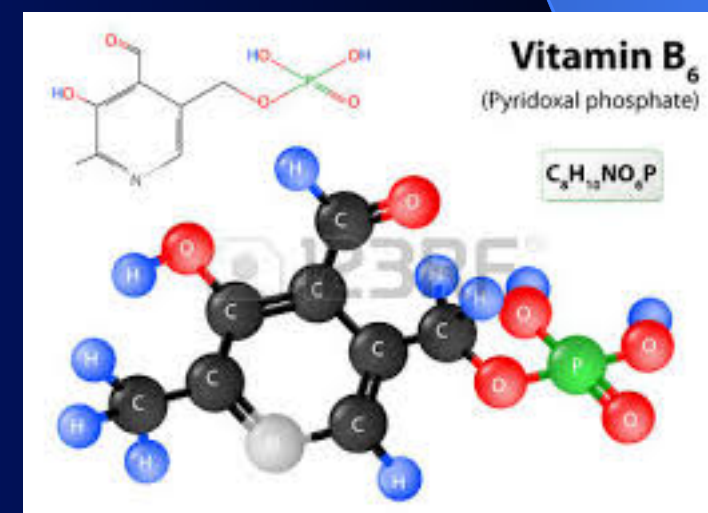
- \* Всё в мире состоит из атомов - мельчайших неделимых частиц материи.
- \* Атомы собираются в молекулы, которые образуют жидкие и газообразные вещества



Простейшая молекула воды

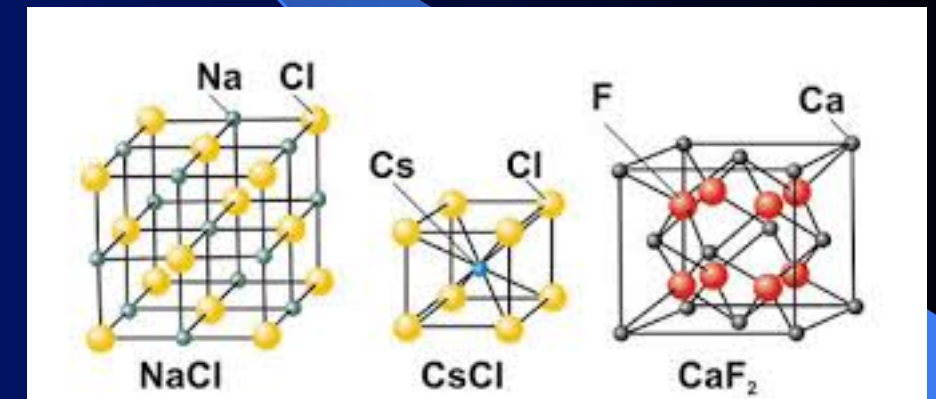
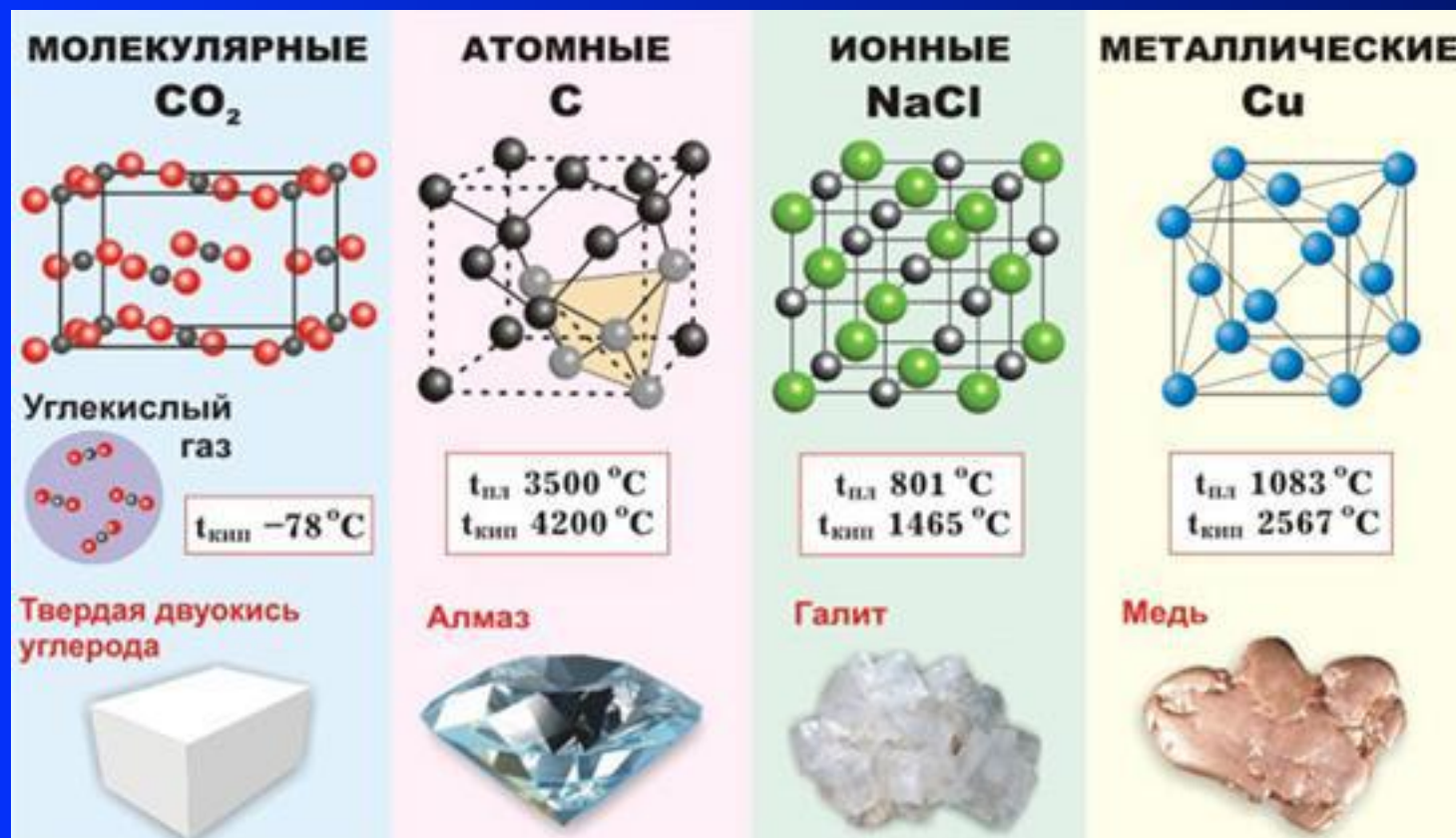


Молекулярная структура определяет химические свойства вещества

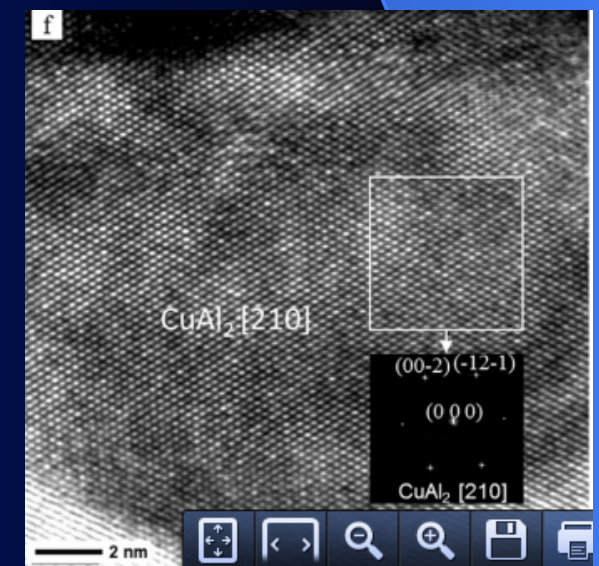


# Кристаллы

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



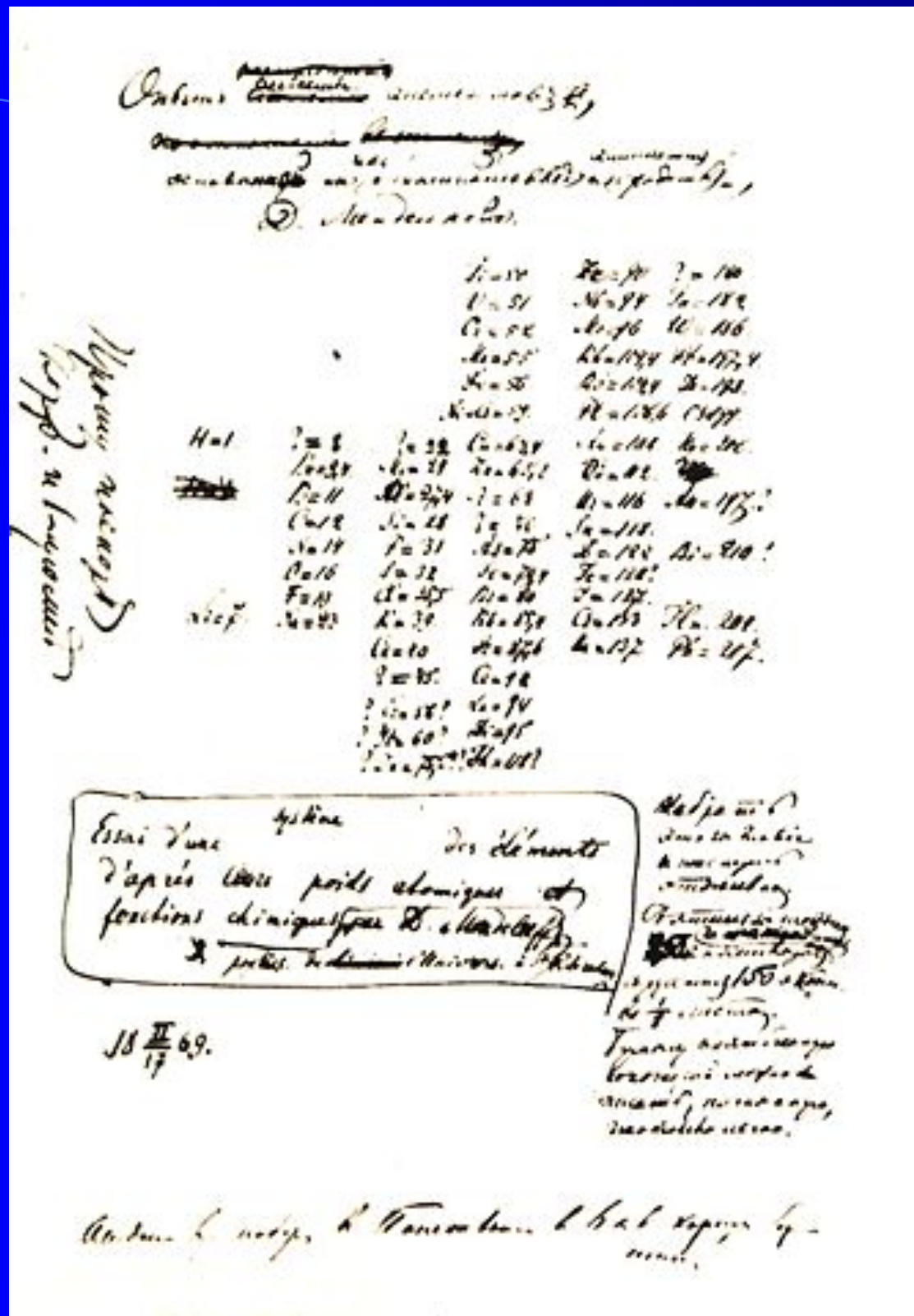
Кристаллическая  
решётка в электронном  
микроскопе





# Периодическая система элементов

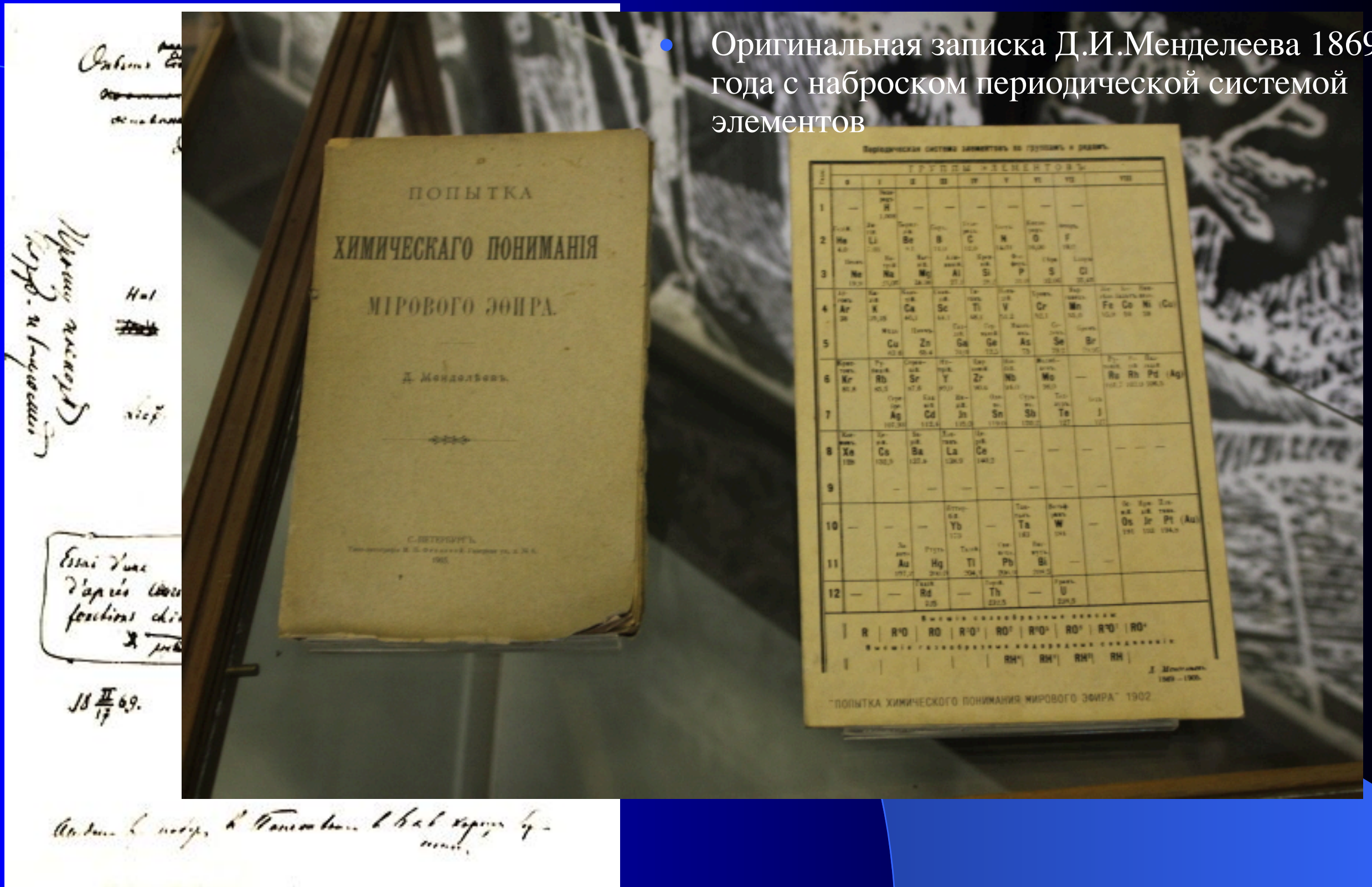
- Оригинальная записка Д.И.Менделеева 1869 года с наброском периодической системой элементов





# 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																		VIIIA																	
Водород 1 H 1,00794 Hydrogen		2																		Гелий 2 He 4,0026 Helium															
		IIA																																	
Литий 3 Li 6,941 Lithium		Бериллий 4 Be 9,01218 Beryllium																		Неон 10 Ne 20,1797 Neon															
Натрий 11 Na 22,989768 Sodium		Магний 12 Mg 24,3050 Magnesium		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		Алюминий 13 Al 26,981539 Aluminum		Кремний 14 Si 28,0855 Silicon		Фосфор 15 P 30,97376 Phosphorus		Сера 16 S 32,066 Sulfur		Хлор 17 Cl 35,4527 Chlorine		Аргон 18 Ar 39,948 Argon	
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		Йод 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		Сибгоргий 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		Коперникий 112 Cn [277] Copernicium		Нихоний 113 Nh [285] Nihonium		Флеровий 114 Fl [289] Flerovium		Московий 115 Mc [289] Moscovium		Ливерморий 116 Lv [293] Livermorium		Теннесси 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  
 $\sim 10^{-14}m$

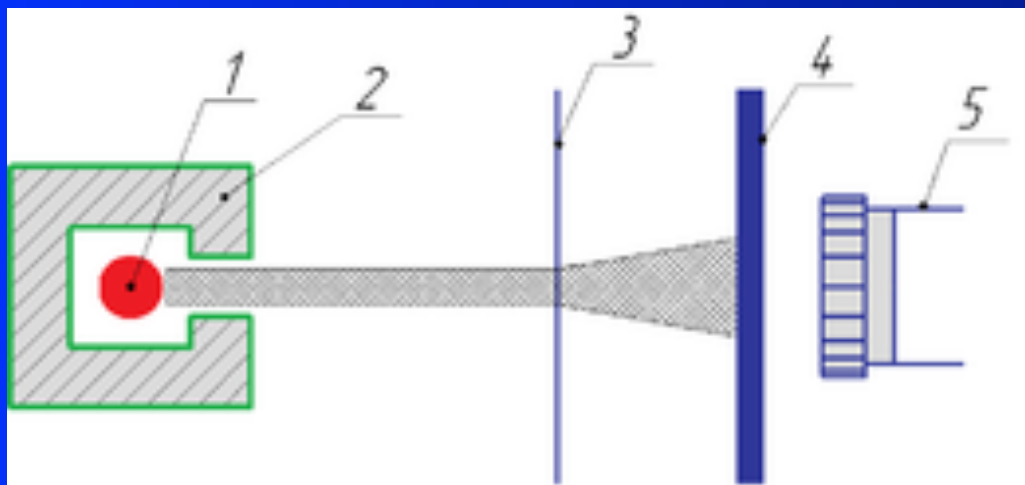
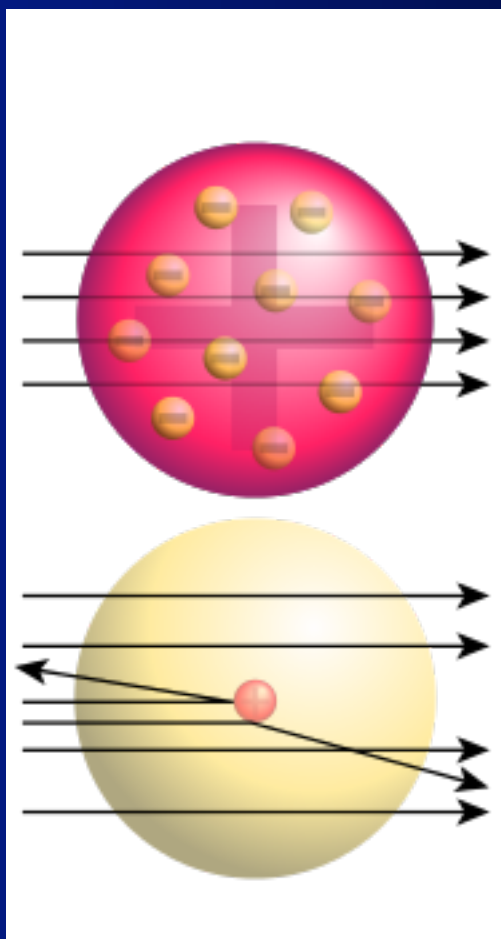
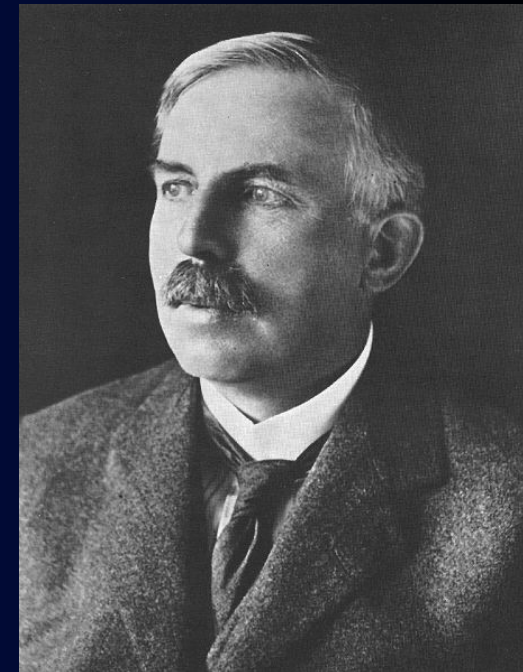


Схема эксперимента Резерфорда

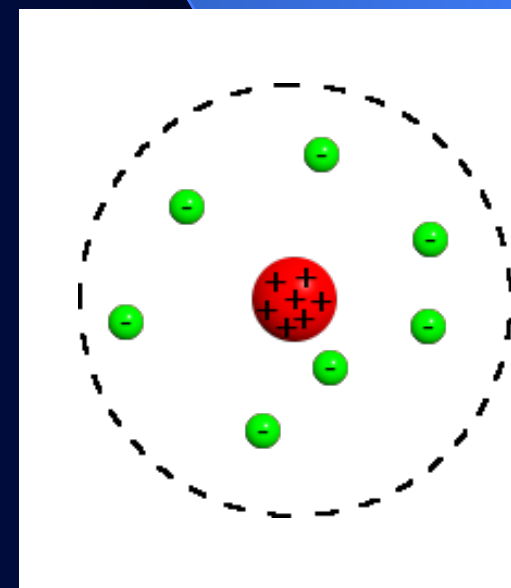
Ожидаемый эффект



Жесткий отскок

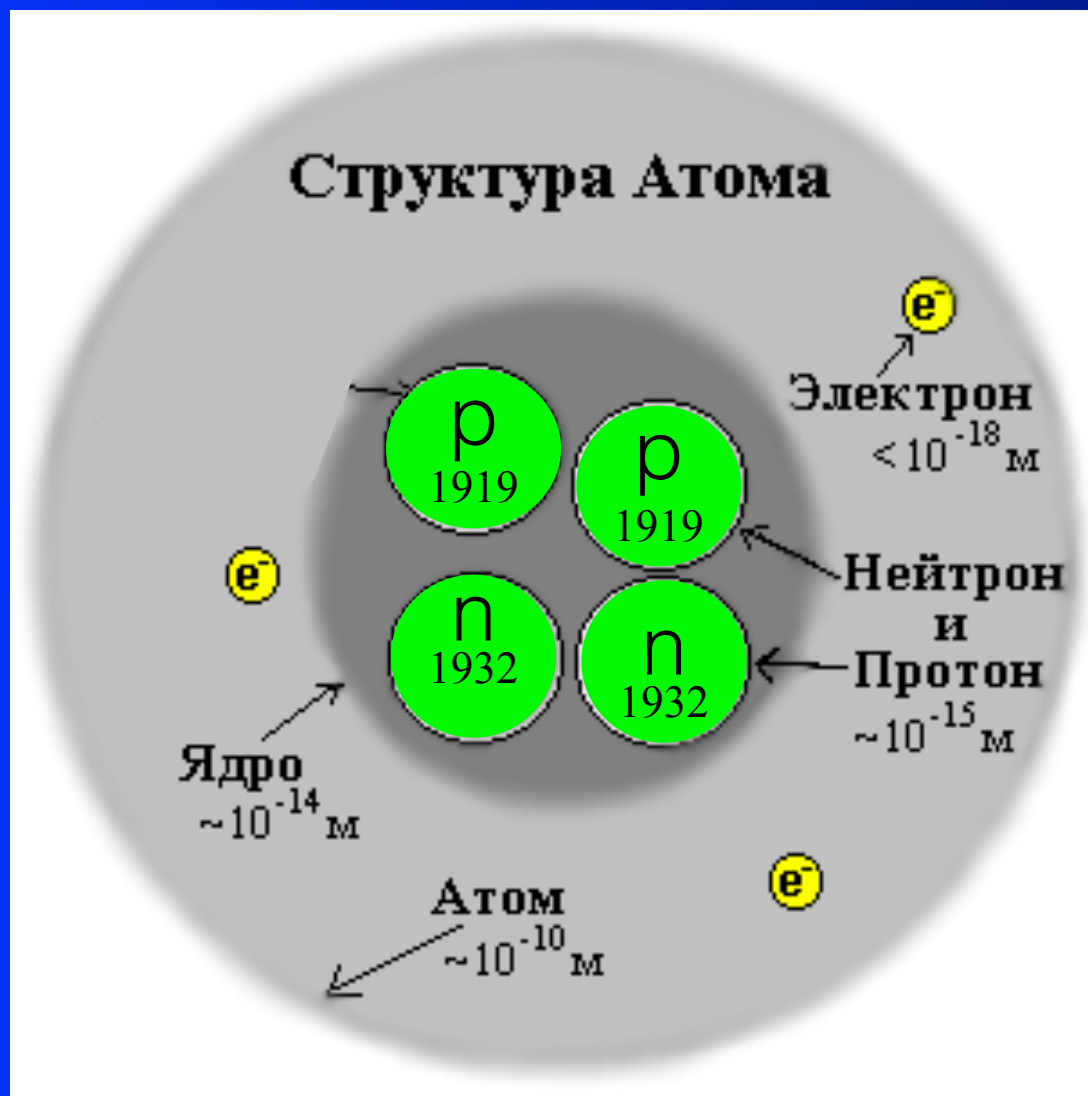
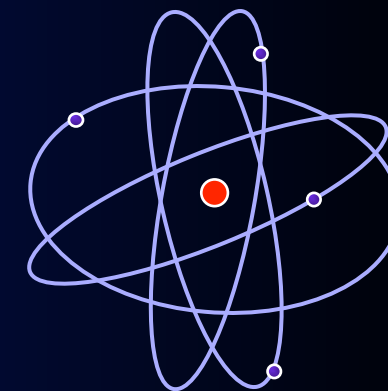


Планетарная модель  
атома Резерфорда





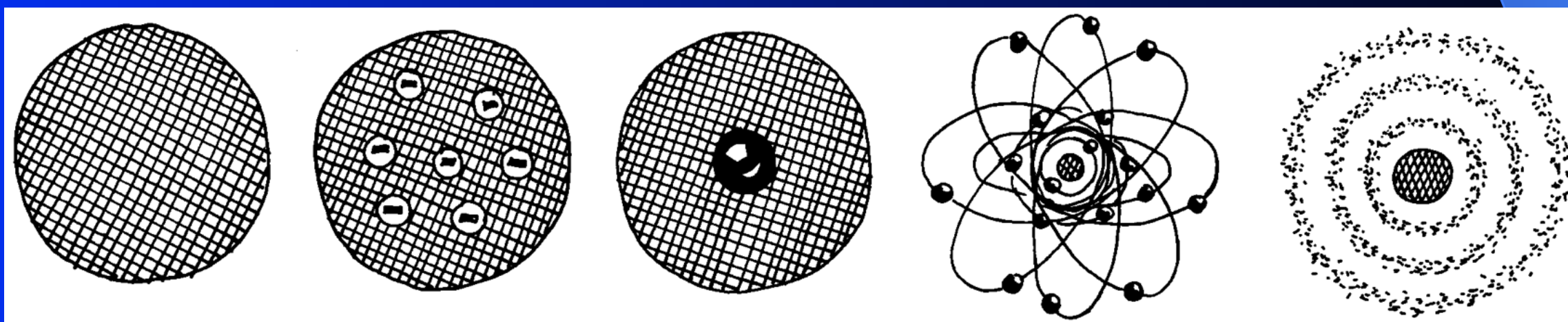
# Структура Атома



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

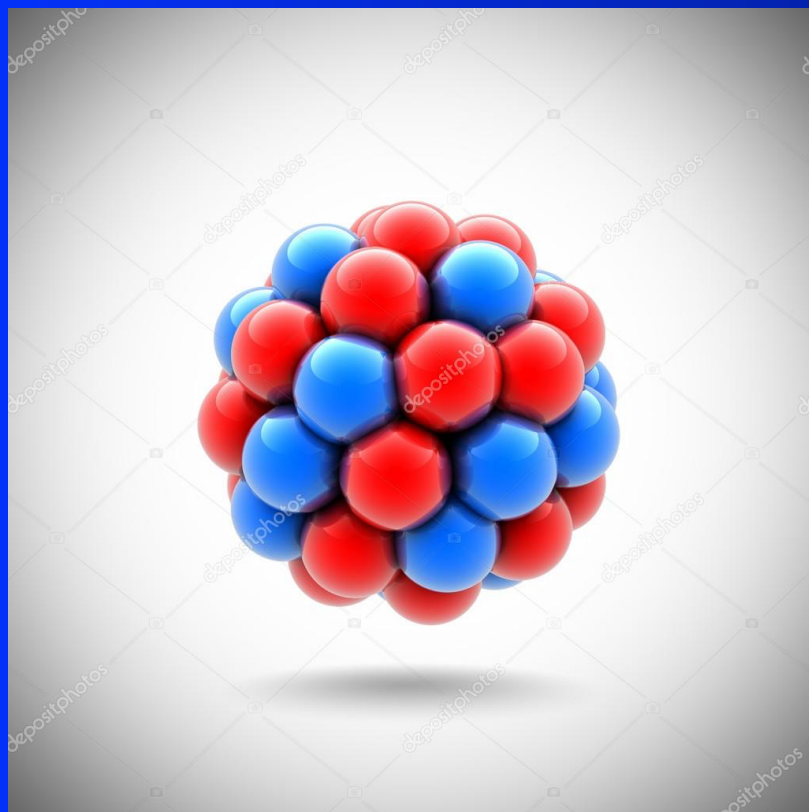
Резерфорд

Бор

7  
Шредингер



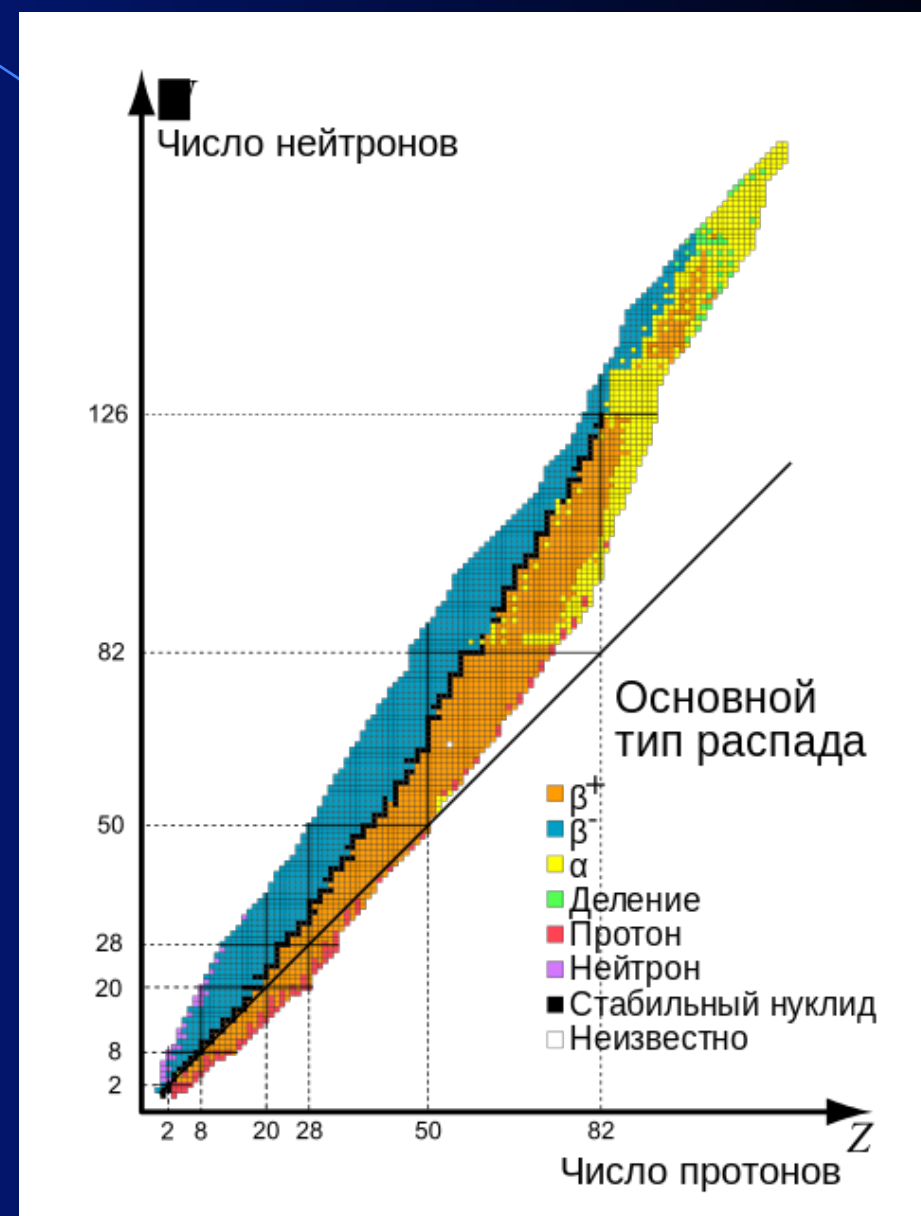
# Атомное ядро



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

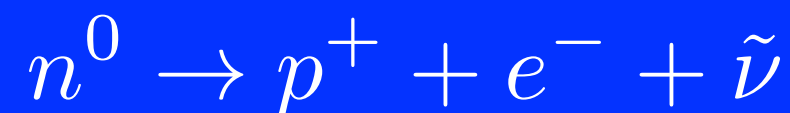




# Элементарные частицы

протон  $p^+$  стабильная частица

нейтрон  $n^0$  распадается за 15 минут



электрон  $e^-$  стабильная частица

нейтрино (маленький нейтрончик)

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

фотон  $\gamma$  квант электромагнитного поля (квант света)

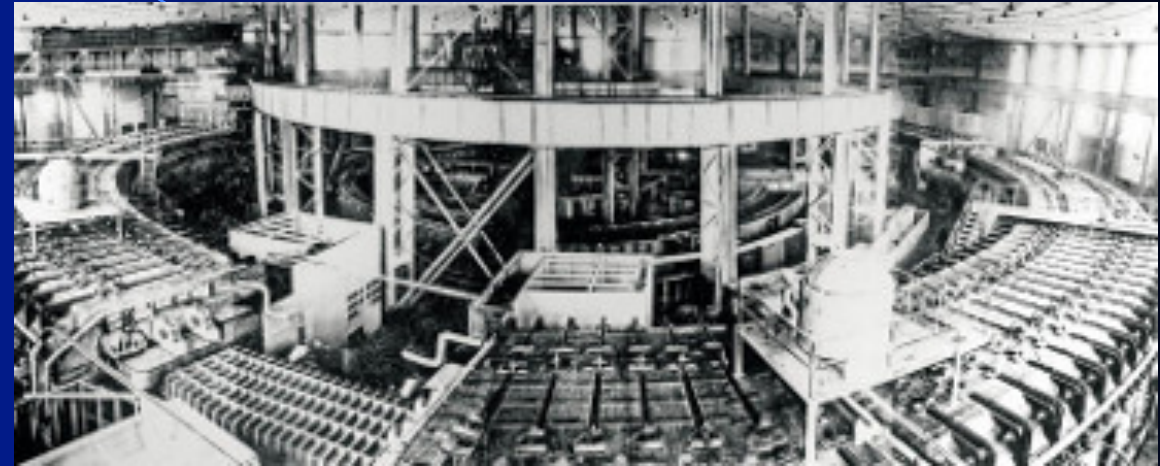
пионы  $\pi$  или  $\pi$ -мезоны ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ )  
Ими обмениваются протоны и нейтроны в ядре



# 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



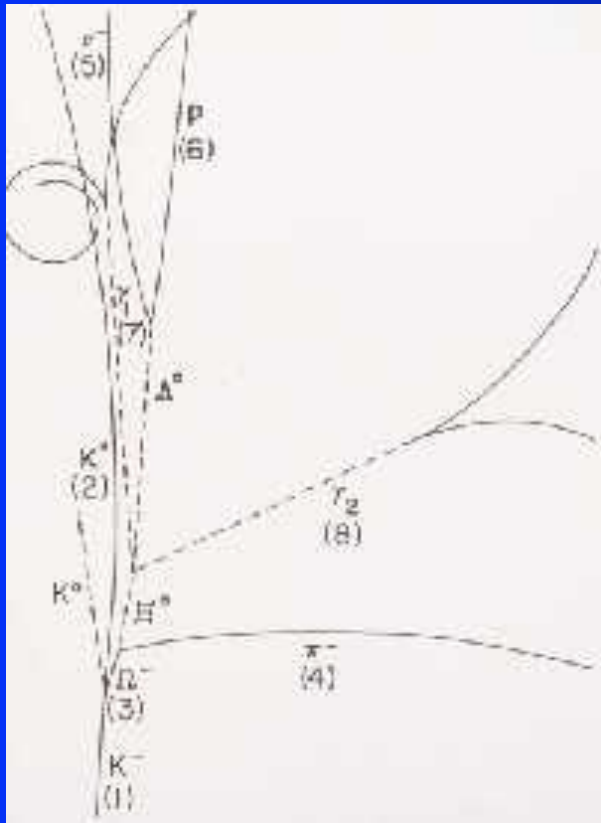
# Открытие элементарных частиц



- Целый зоопарк элементарных частиц был открыт на ускорителях
- Это было окном в новый мир - микромир



# Кварковая Модель



- Открытие «омега-минус» в Брукхэйвене в 1964 г. было последним элементом субатомной мозаики.

- Оно явилось подтверждением угадываемой связи между частицами, которая была вскоре понята на языке их внутренней структуры в форме кварков.

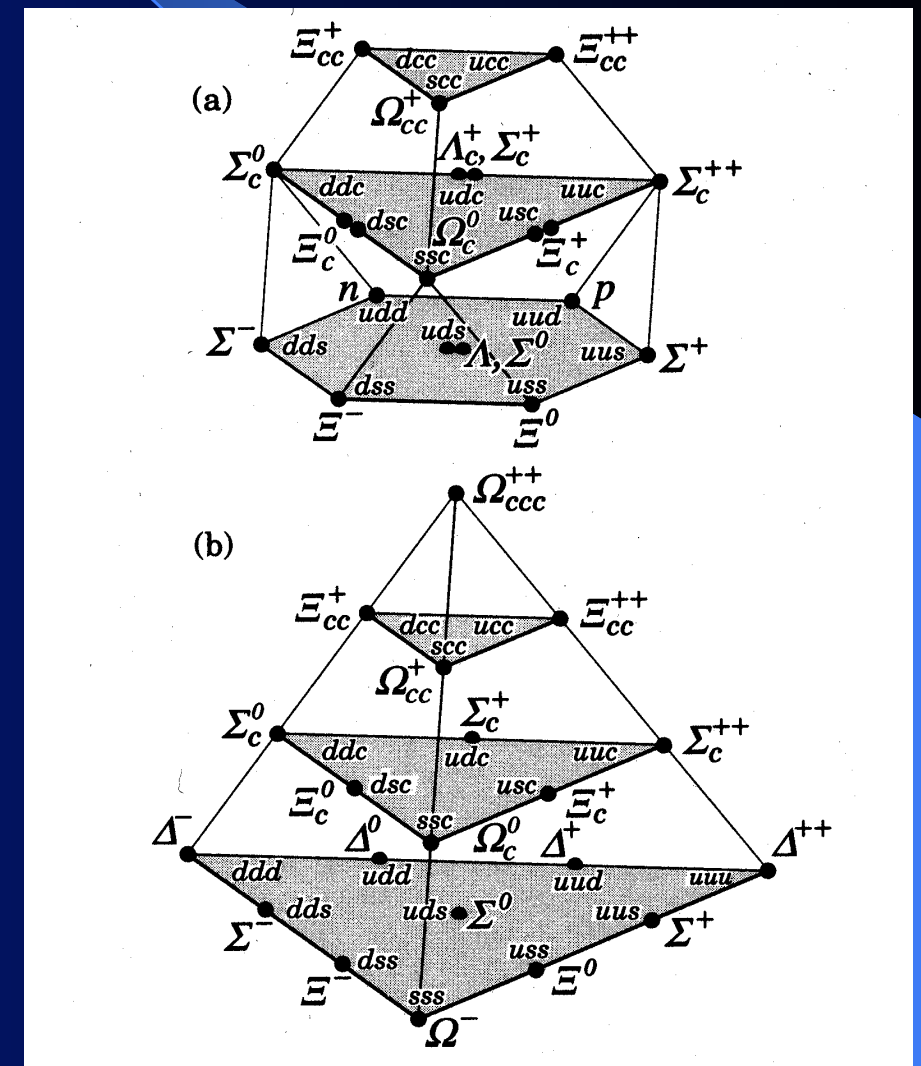
$$\Sigma^0(d \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

$$\Xi^+(d \uparrow c \uparrow c \downarrow)$$

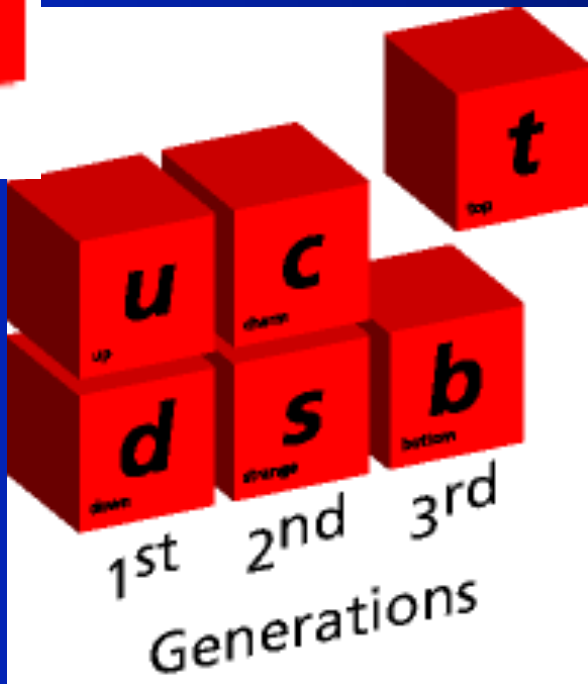
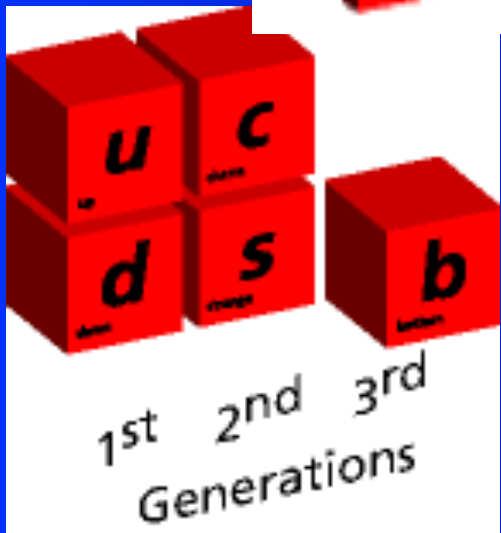
$$\Lambda^+(u \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

$$\Delta^- = \varepsilon^{ijk} (d_i \uparrow d_j \uparrow d_k \uparrow)$$

Для преодоления принципа запрета Паули была введена антисимметризация по «цвету»

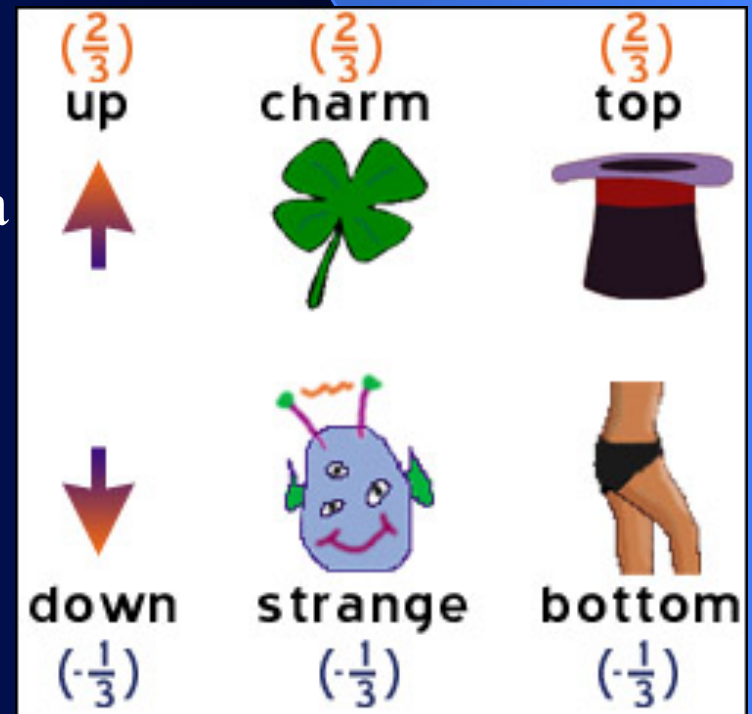


# Кварки — “кирпичики мироздания”



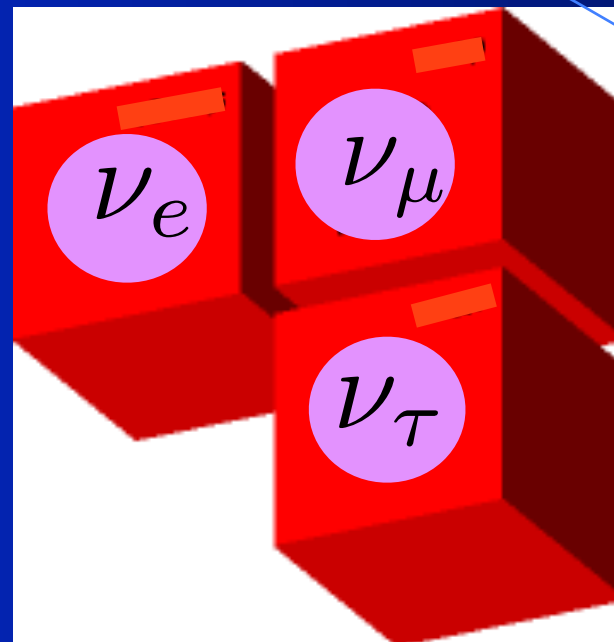
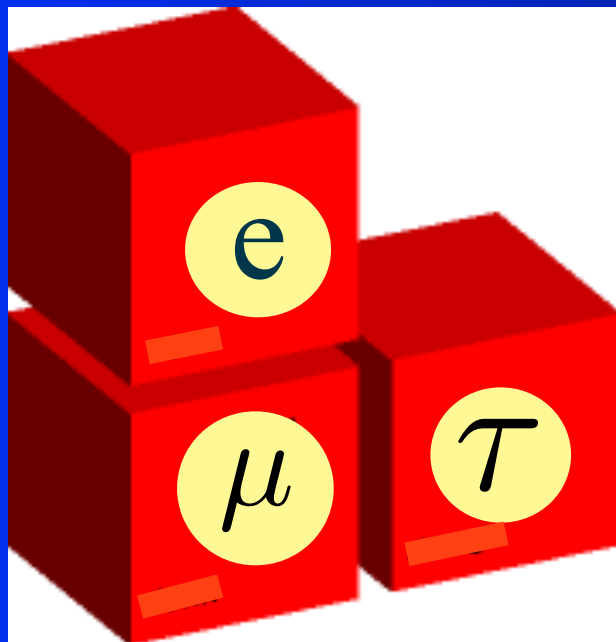
- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен  $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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





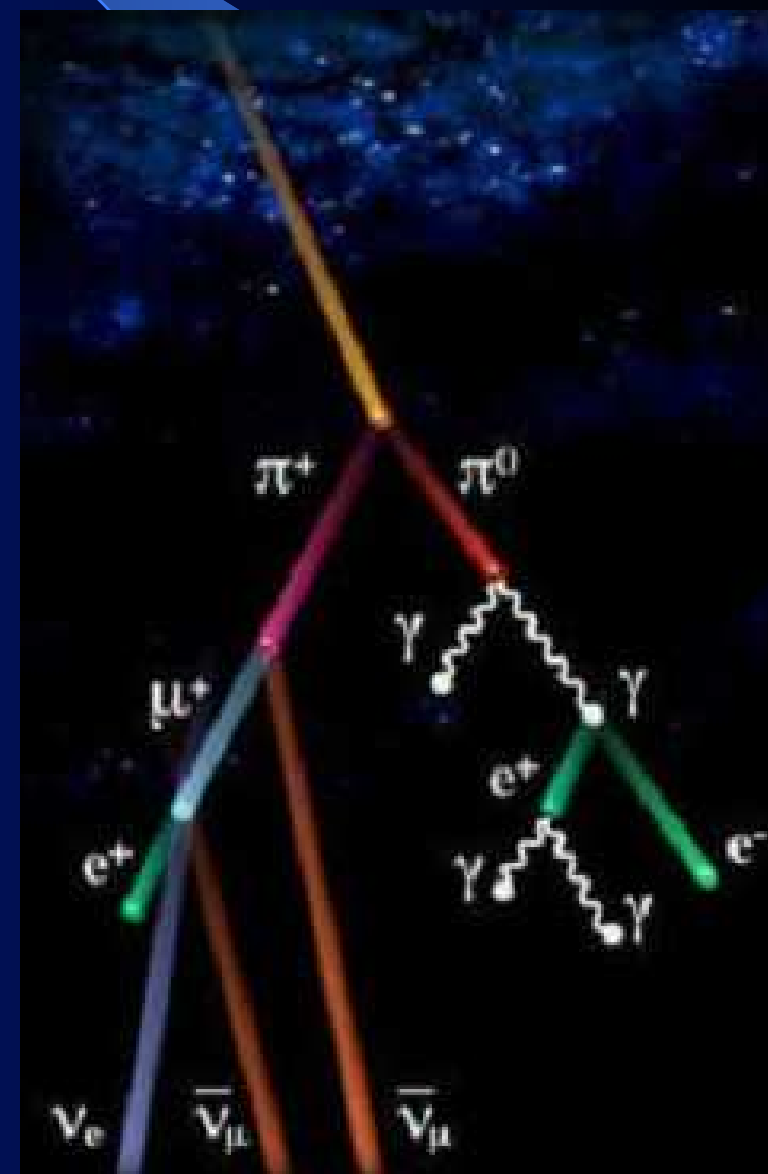
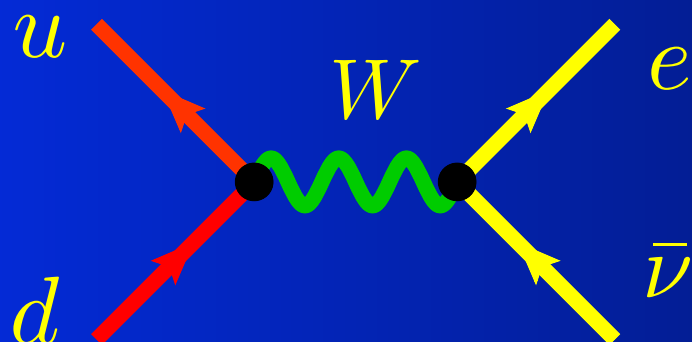
# Лептоны от слова λειπτός



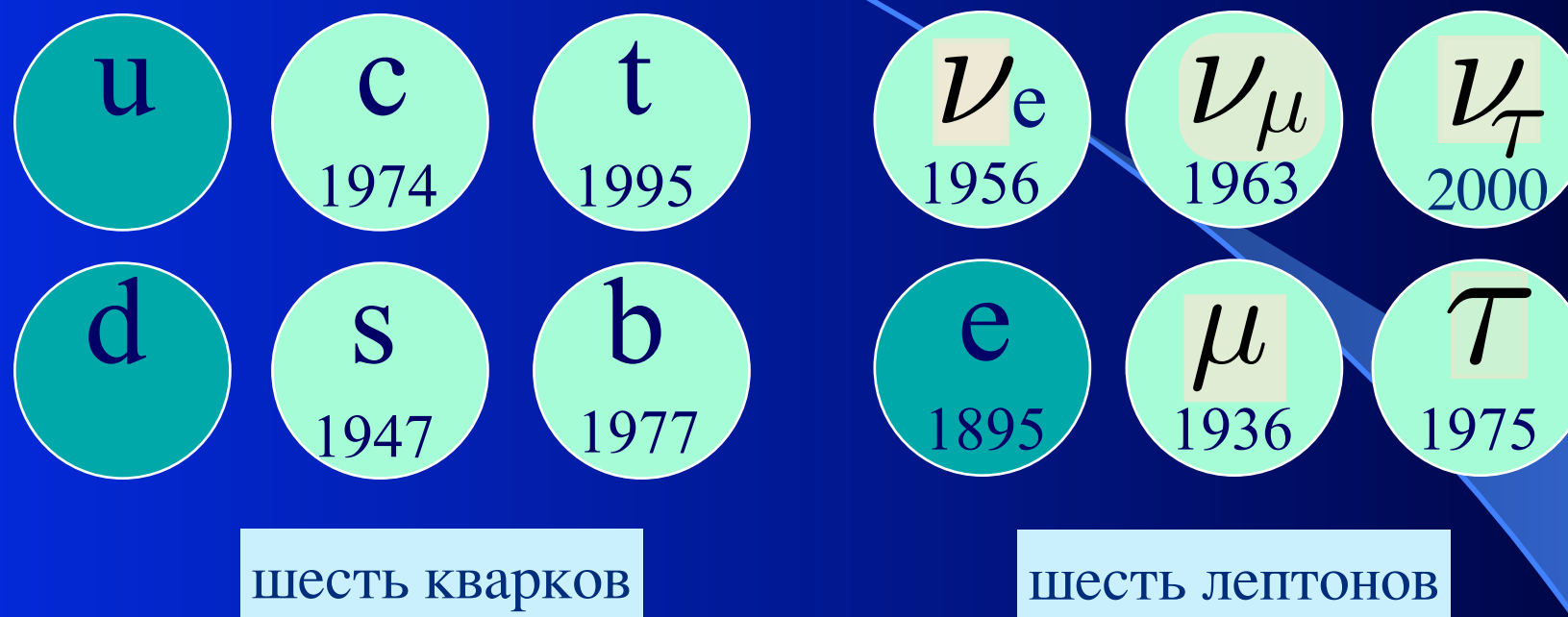
Мюоны рождаются от распада  $\pi$ -мезонов в космических лучах и распадаются на электроны и два нейтрино

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

Нейтрино рождаются в процессах распада адронов  $n(udd) \rightarrow p( uud) + e + \bar{\nu}$



# История открытий



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.



# Стандартная Модель



Частицы

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)

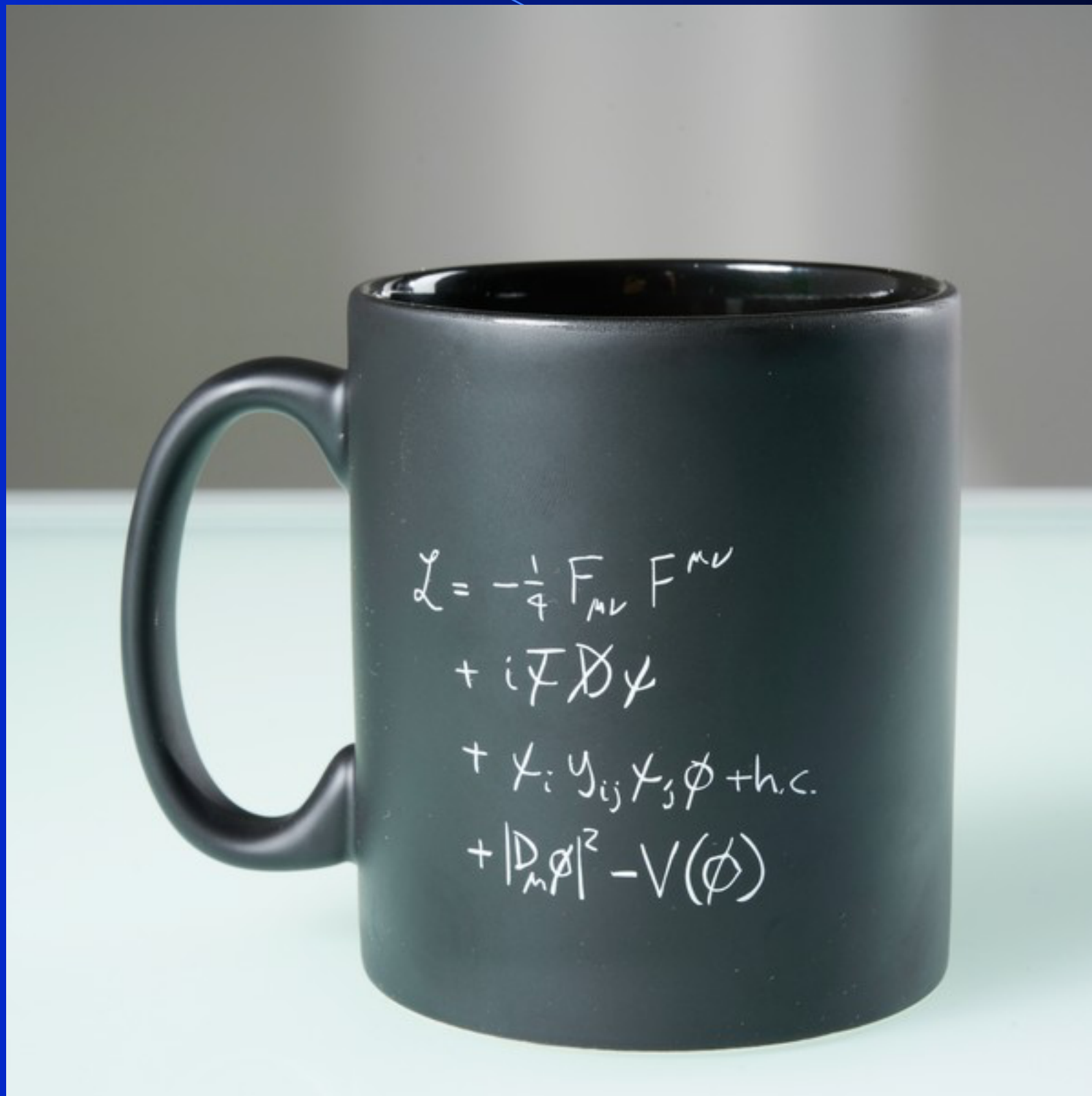
Силы

Электромагнитные

Сильные

Слабые

# Стандартная Модель





# Стандартная Модель

## ЛАГРАНЖИАН

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

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

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

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

# Стандартный ЛАГРАНЖИАН

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

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} - \frac{1}{4}F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - \frac{1}{2}D_\mu H^\dagger D^\mu H - \frac{1}{2}D_\mu \phi^\dagger D^\mu \phi$$

$$+ i\bar{L}_\alpha \gamma^\mu D_\mu L_\alpha + i\bar{U}_\alpha \gamma^\mu D_\mu U_\alpha + i\bar{N}_\alpha \gamma^\mu D_\mu N_\alpha$$

$$\mathcal{L}_{Yukawa} = y_{\alpha\beta}^L \bar{L}_\alpha E_\beta H + y_{\alpha\beta}^N \bar{L}_\alpha \bar{L}_\beta \bar{H} + y_{\alpha\beta}^E \bar{E}_\alpha H E_\beta + y_{\alpha\beta}^U \bar{U}_\alpha H U_\beta + y_{\alpha\beta}^D \bar{D}_\alpha H D_\beta + y_{\alpha\beta}^N \bar{N}_\alpha \bar{H} N_\beta$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V(H, \phi)$$

$$\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_w \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\dagger}_{\kappa\lambda} \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\dagger}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (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}gM (\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} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\ & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\ & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) . \end{aligned}$$



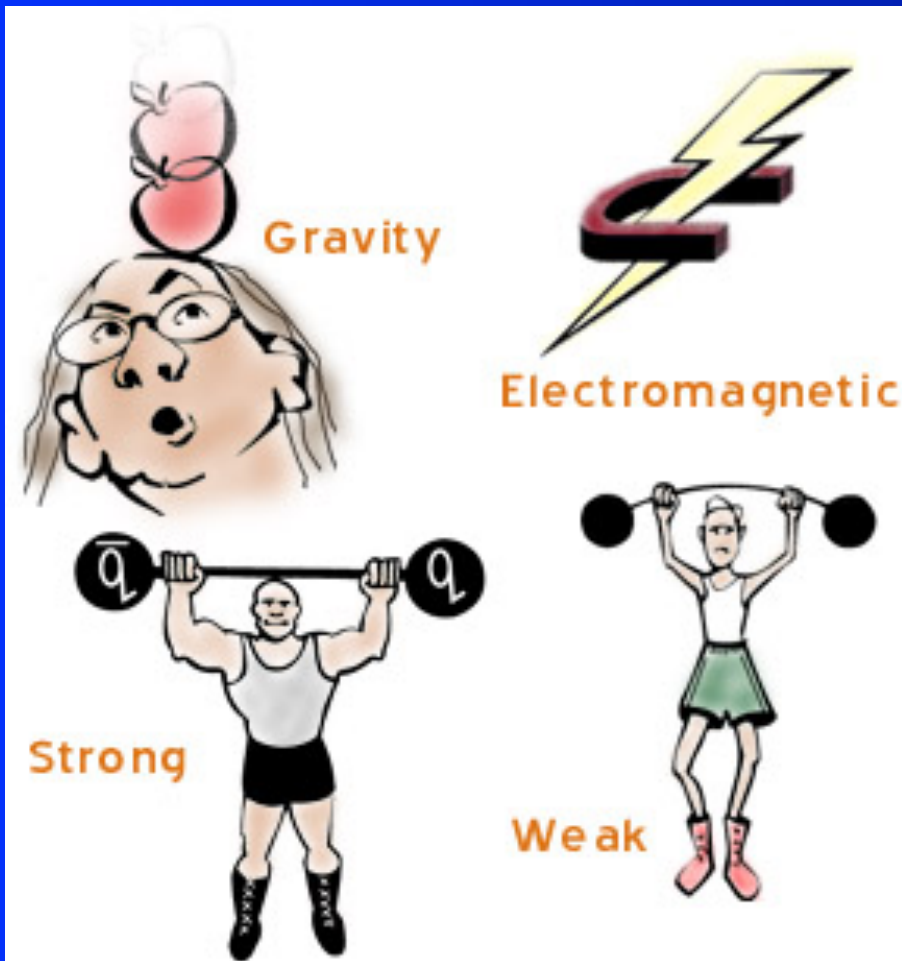
Загадка № 1:

Почему 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



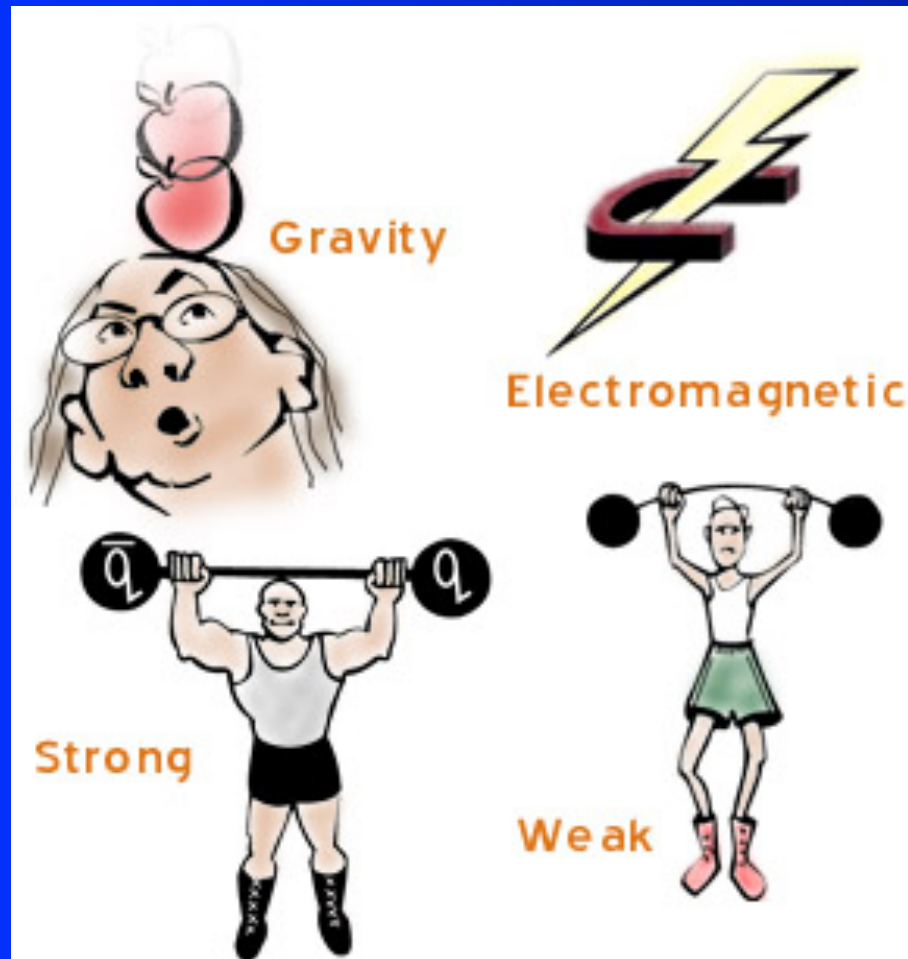
	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons



# 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

- 
- TAP: FREE  
DATE: 24-JUL-84
- RUN: 2000 EVENT: 0040 EBeam: 17.20 GeV  
VERSION: 9.0 TRIGGER: 0100100000000001
- TASSO ...CTR...
- jet #1
- jet #2
- jet #3

$$g_{ij}^a$$

$$i, j = 1, 2, 3$$



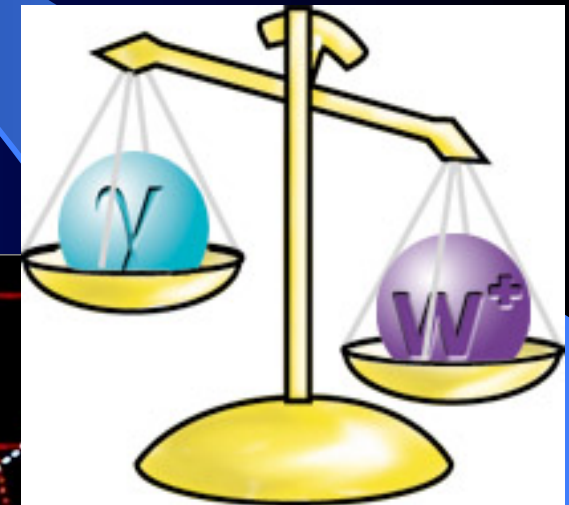
			Color
Red	Green	Blue	Quarks
			Anti-Color
Anti-Red	Anti-Green	Anti-Blue	Anti-Quarks



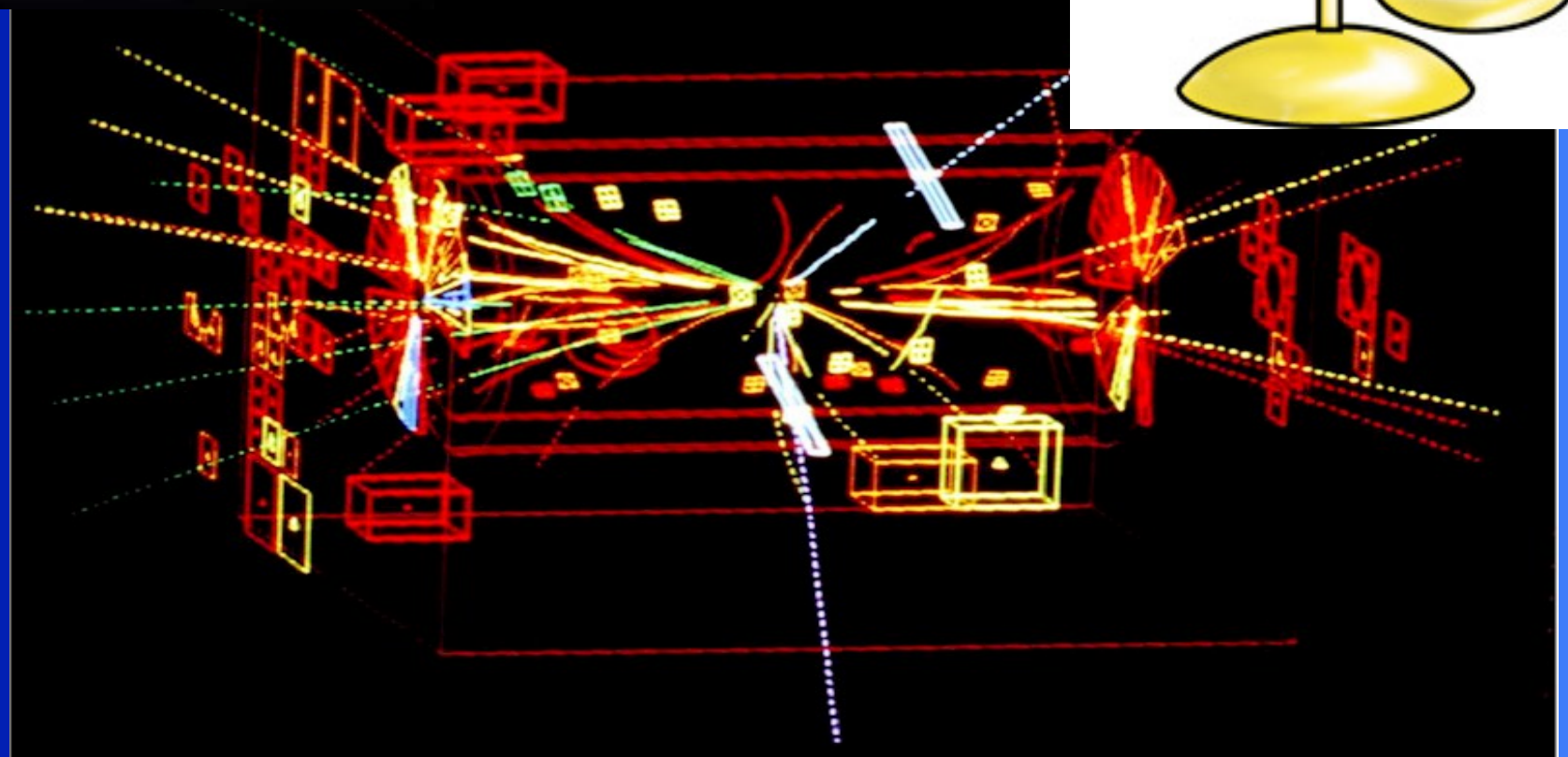
# Открытие W и Z бозонов



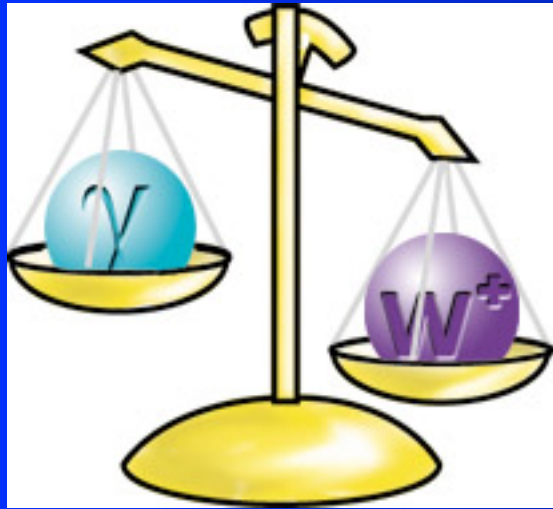
- Открытие W и Z бозонов – переносчиков слабых взаимодействий на ускорителе SPS (CERN) в 1983 году



явилось триумфом  
Стандартной модели  
фундаментальных  
взаимодействий



# Хиггсовский Бозон



Поле Браута-Энглера-Хиггса

$$\langle H(x) \rangle = v$$

среднее значение поля

Массы элементарных частиц  
в Стандартной Модели

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

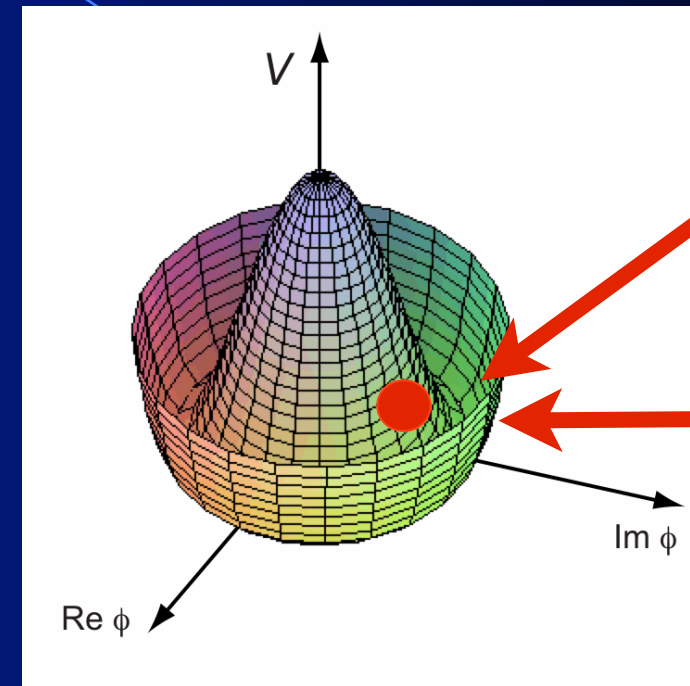
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

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

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Потенциал



Основное  
состояние

Спонтанное  
нарушение  
симметрии

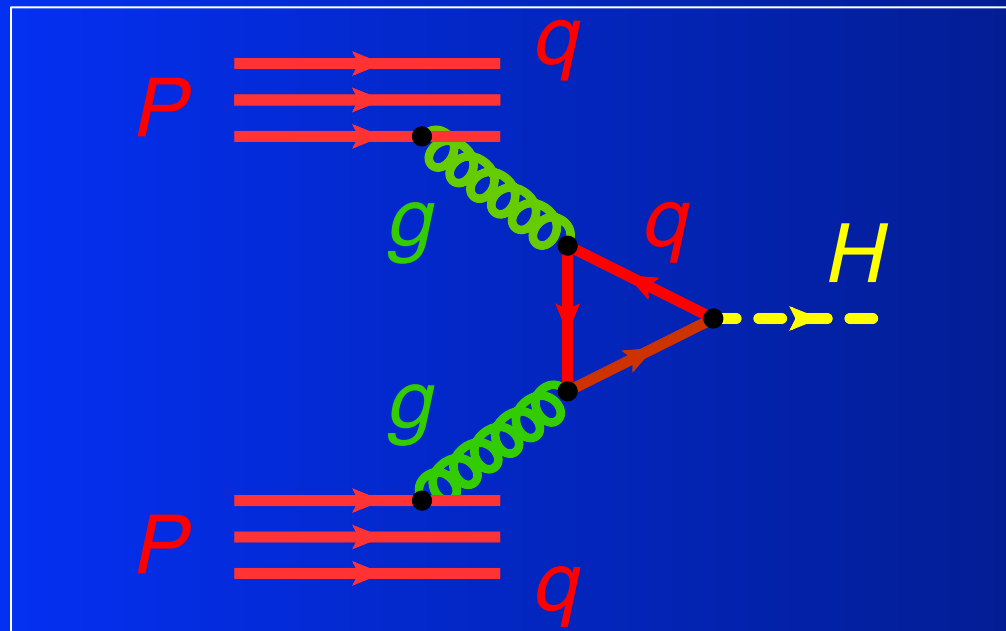
Хиггсовский бозон - квантовое возбуждение поля Браута-Энглера-Хиггса, безспиновая нейтральная частица - переносчик «пятой силы»



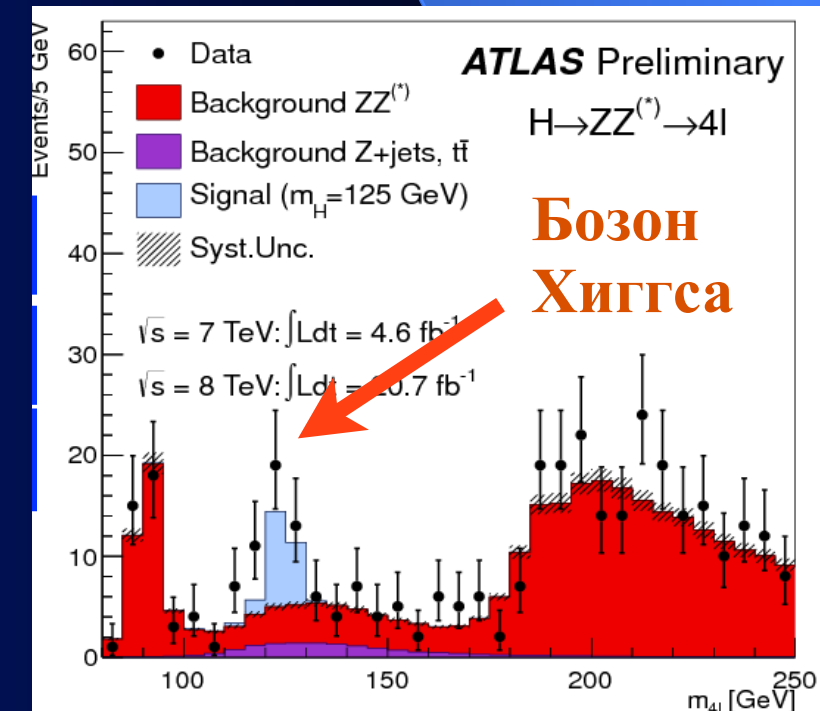
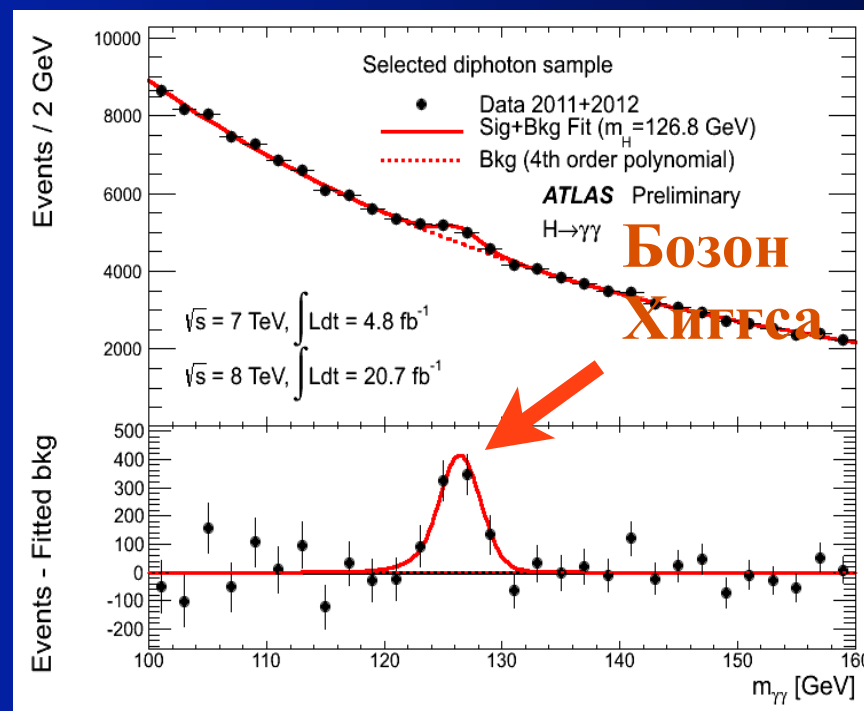
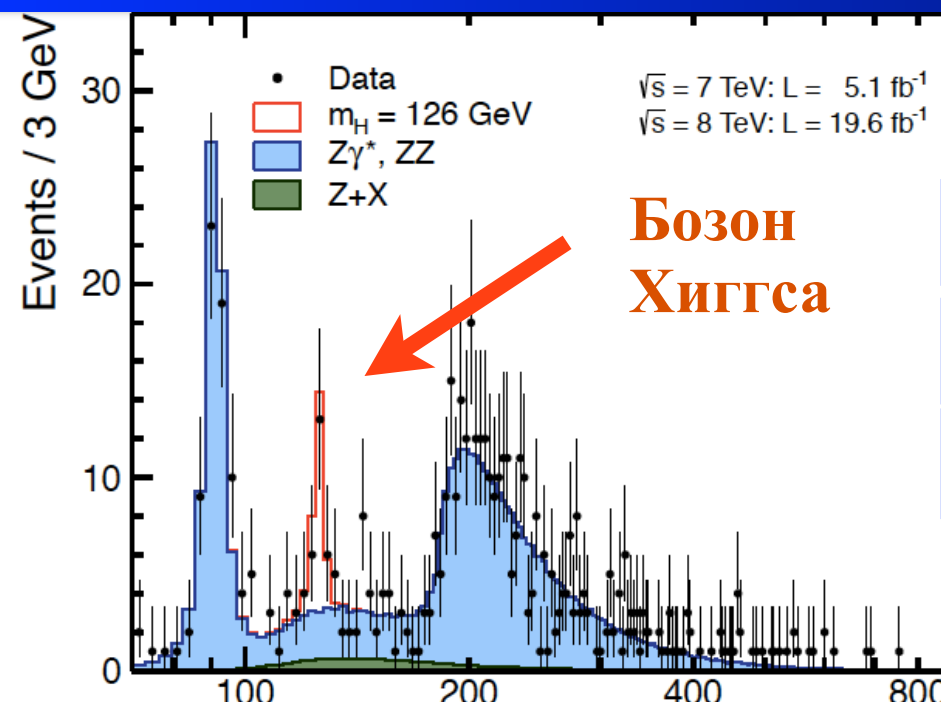
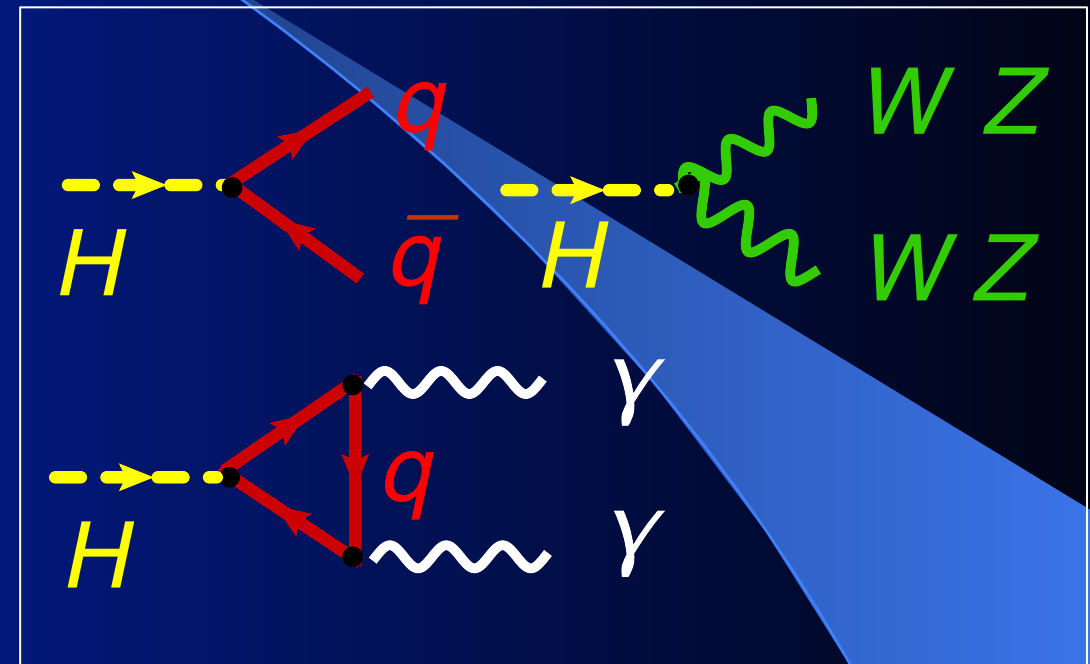
# Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

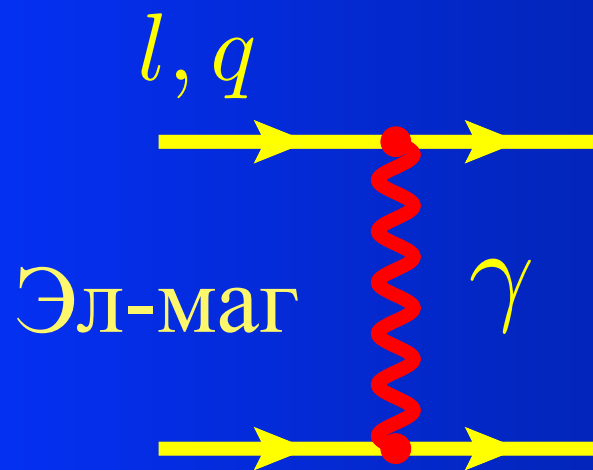
Рождение на протонном коллайдере



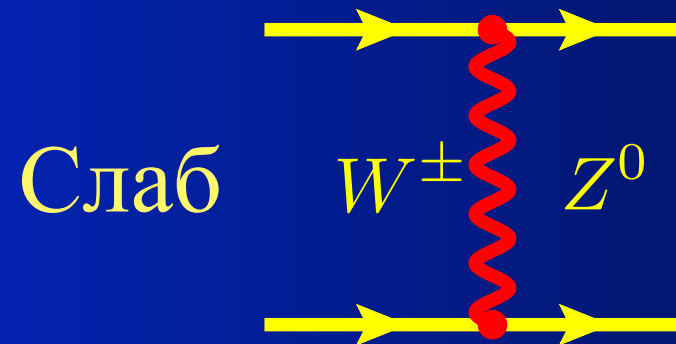
Процессы распада



# Пять фундаментальных сил Природы



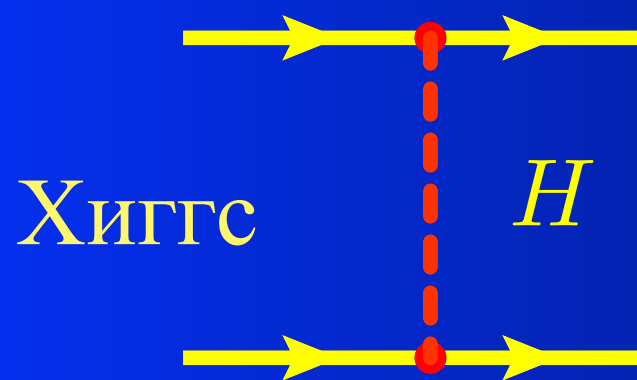
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



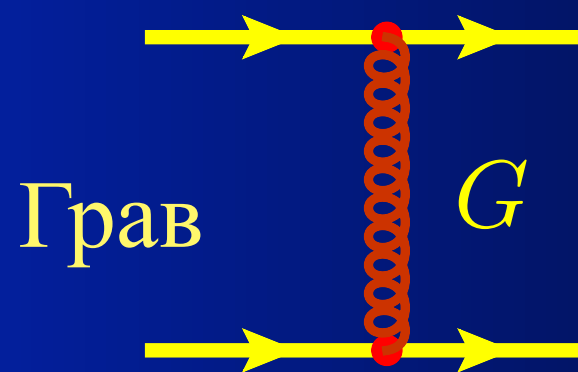
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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



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

Спин

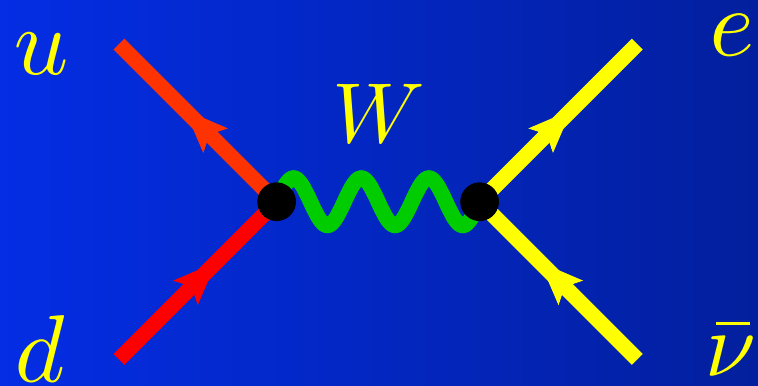
$\gamma$	$W^\pm Z^0$	$g$	=1
$H$			=0
$G$			=2



# Нейтрино-загадочная частица

Нейтрино рождаются в процессах слабого распада адронов

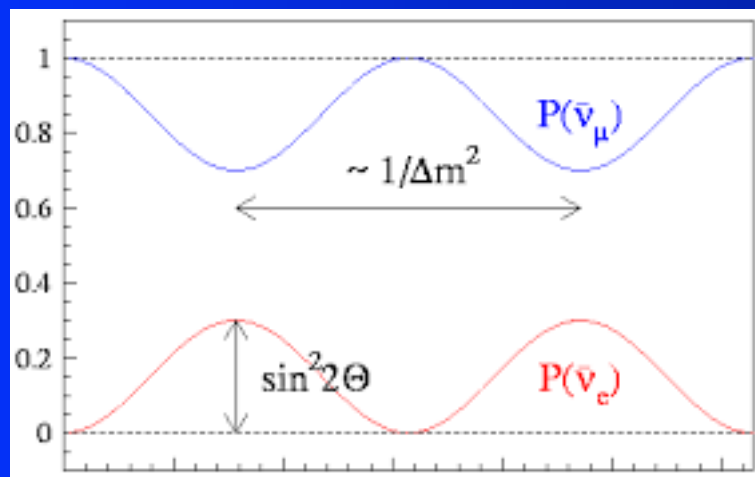
$$n(udd) \rightarrow p( uud) + e + \bar{\nu}$$



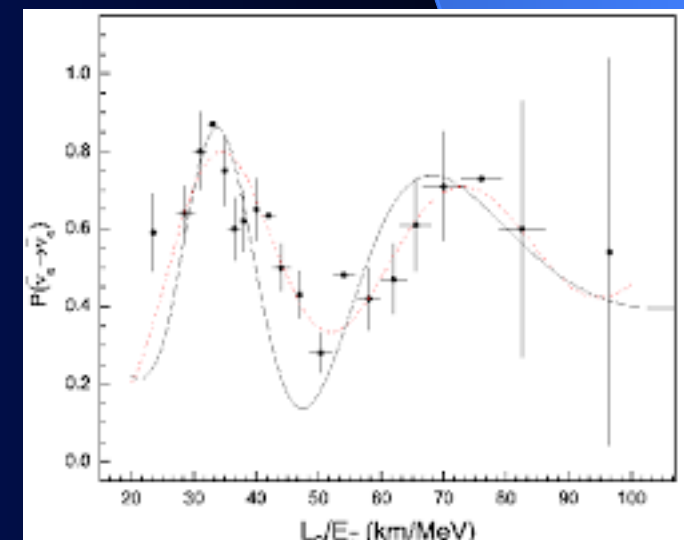
Нейтрино

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

Наличия массы у нейтрино следует из наблюдения нейтринных осцилляций

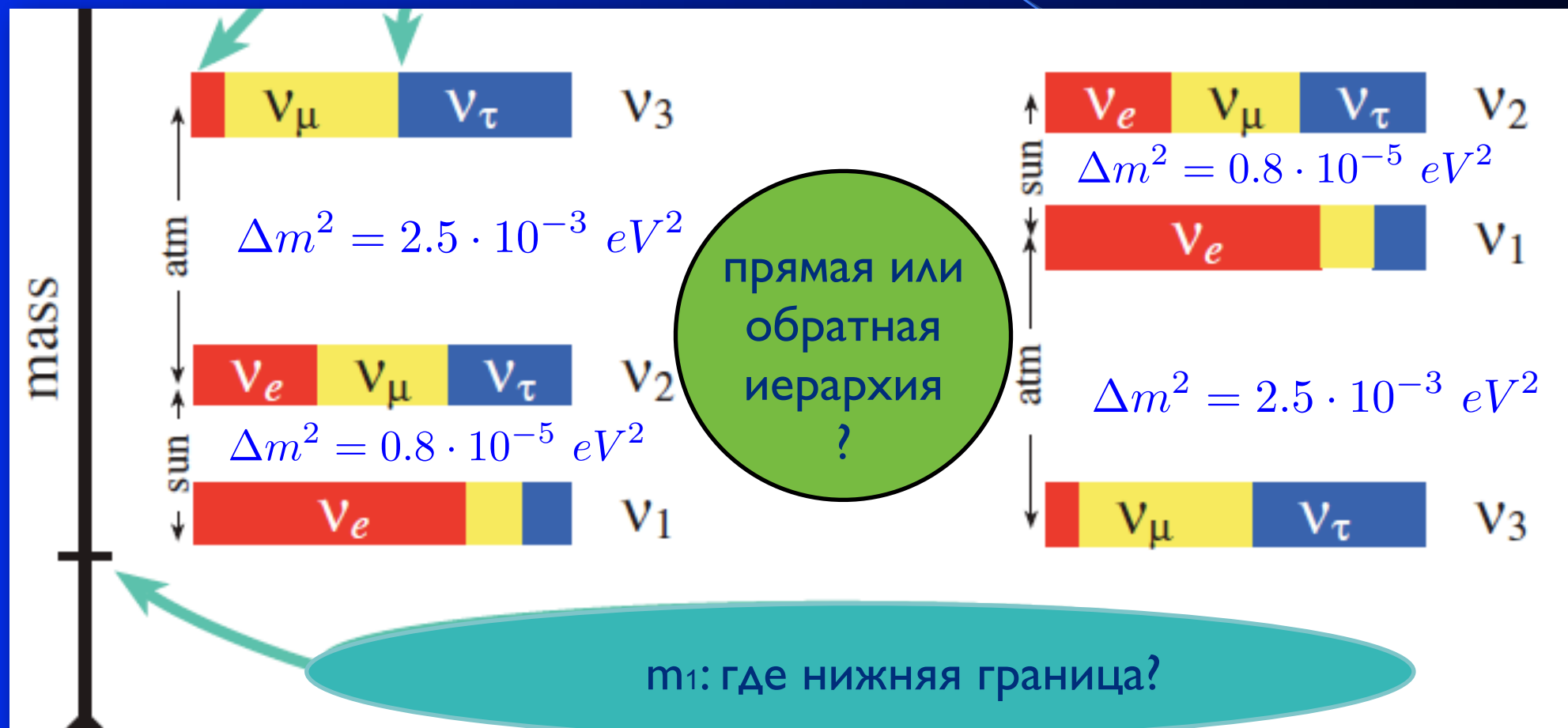


$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{\alpha\beta}^2 L}{4E} \right)$$



# Нейтрино-загадочная частица

## Нейтринные массы



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



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

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

$\beta$ -распад

KATRIN

Нейтринные  
осцилляции

Спектр  
реликтового  
микроволнового  
фона

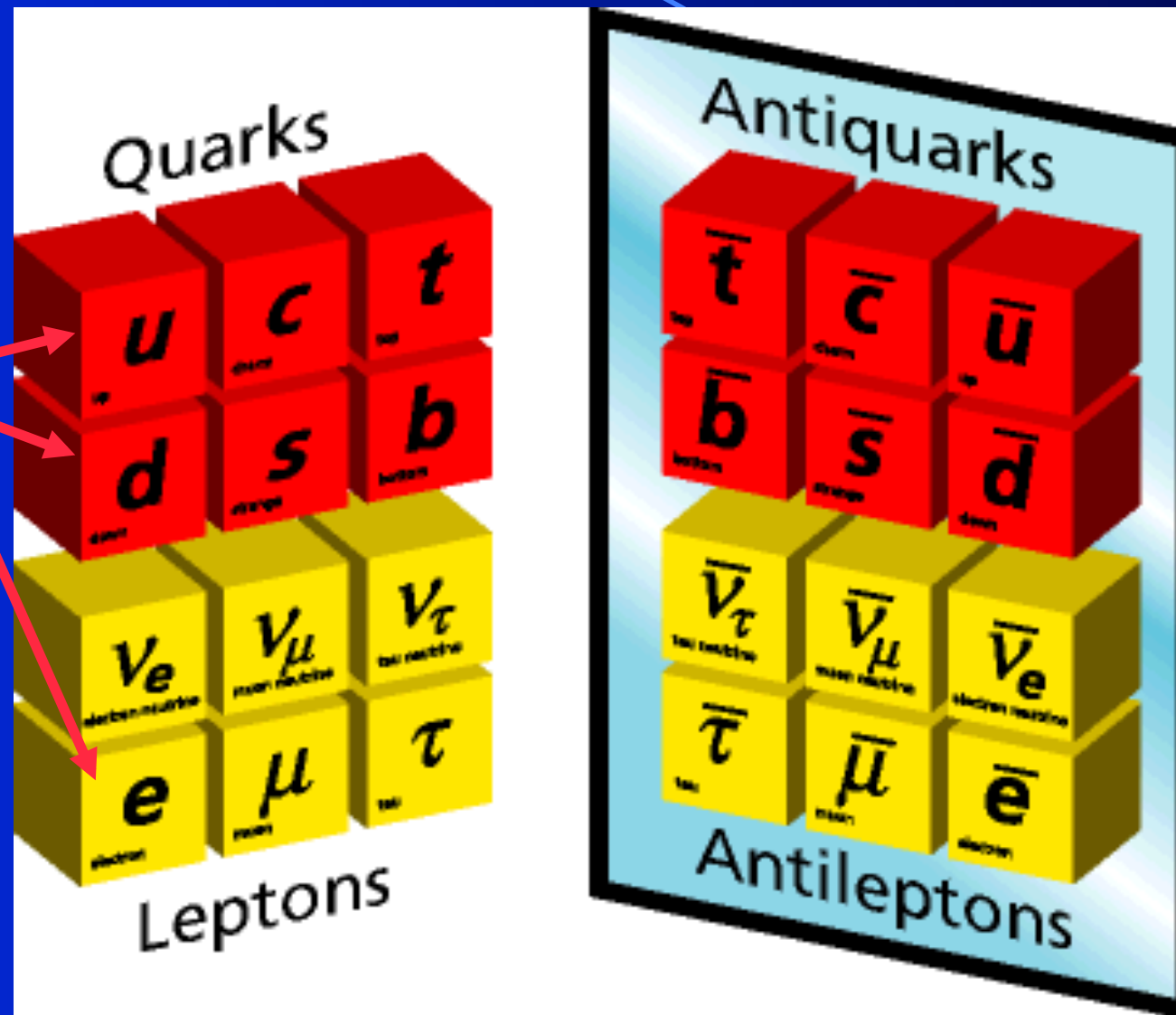
Planck

Троицк-Майнц



# Материя и Антиматерия

Первое поколение - это то из чего мы состоим



Антиматерия  
родилась  
вместе с  
материей во  
время  
«Большого  
взрыва»

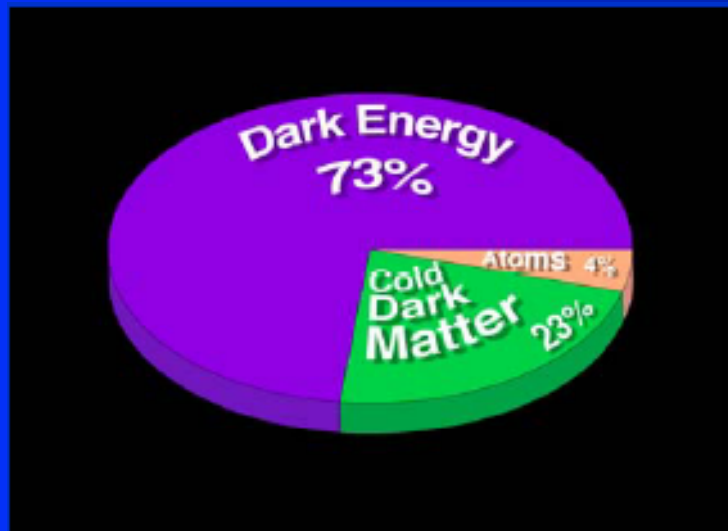
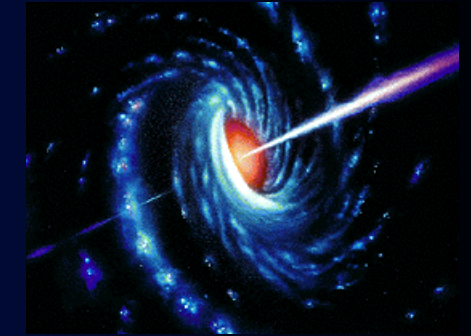
Античастицы рождаются вместе с частицами на ускорителях,  
но мир вокруг нас не содержит антивещества

Загадка № 2:

Как объяснить отсутствие  
антиматерии во Вселенной?



# Тёмная материя



HEAVY ELEMENTS	0.03 %
MASSIVE NEUTRINOS	0.3 %
STARS	0.5 %
H AND He	4 %
DARK MATTER	23 %
DARK ENERGY	72 %

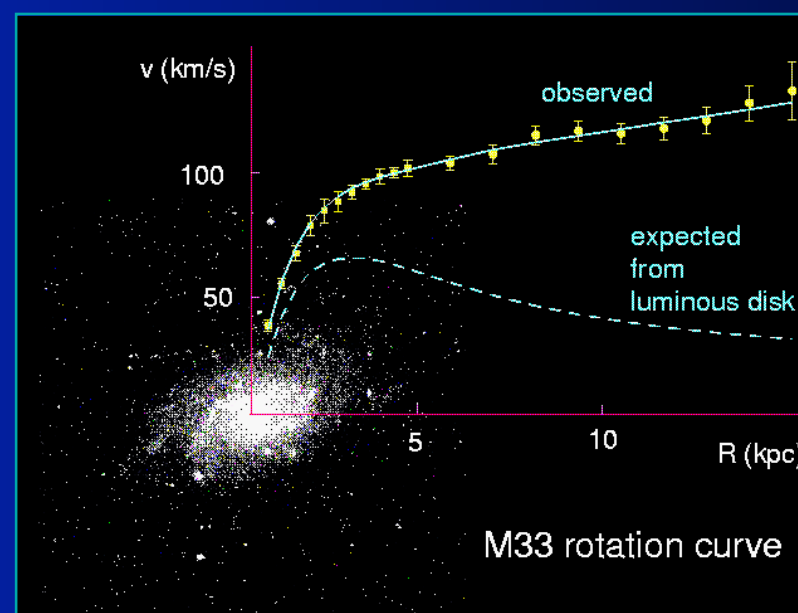
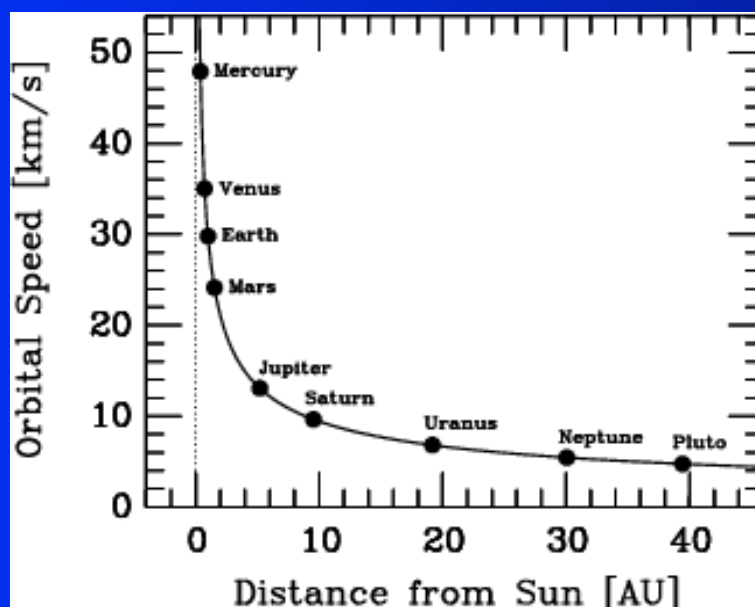
Температурные флуктуации микроволнового фона  
Взрывы сверхновых

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

центробежная сила

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

гравитация



- В настоящее время известны тысячи ротационных кривых и все они свидетельствуют в пользу существования массы в гало галактики десятикратно превышающей массу звёзд в диске

*Загадка № 3:*

*Что такое тёмная  
материя и из чего она  
состоит?*



# Что есть тёмная материя?



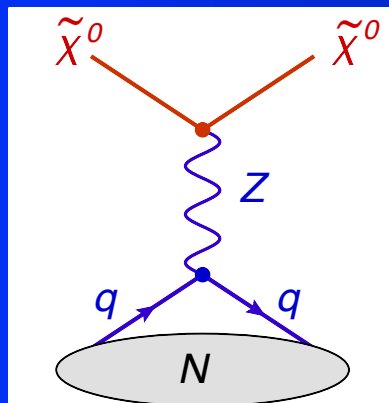
- Спиральные галактики состоят из центрального ядра и очень тонкого диска и окружены приблизительно сферическим гало из тёмной материи

Тёмная материя сделана из:

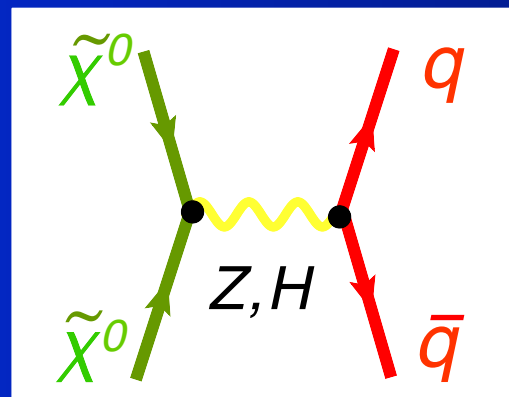
- ☉ Макро объектов - не наблюдаются
- ☉ Новых нейтральных частиц

Поиск частиц тёмной материи

Прямое вз-е  
с веществом



Аннигиляция -> новая  
компонента в космических  
лучах



- правые нейтрино
- нейтралино
- sneйтрино
- аксион (аксино)
- гравитино
- тяжёлый фотон
- лёгкий стерильный хиггс

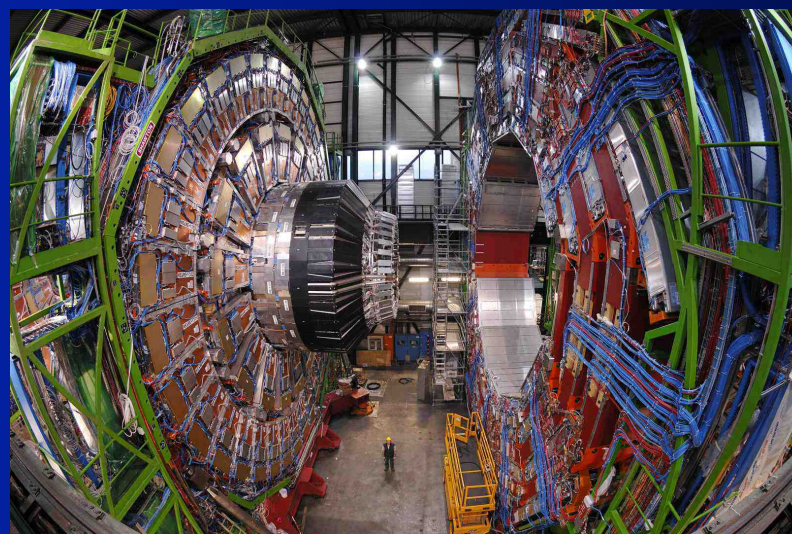
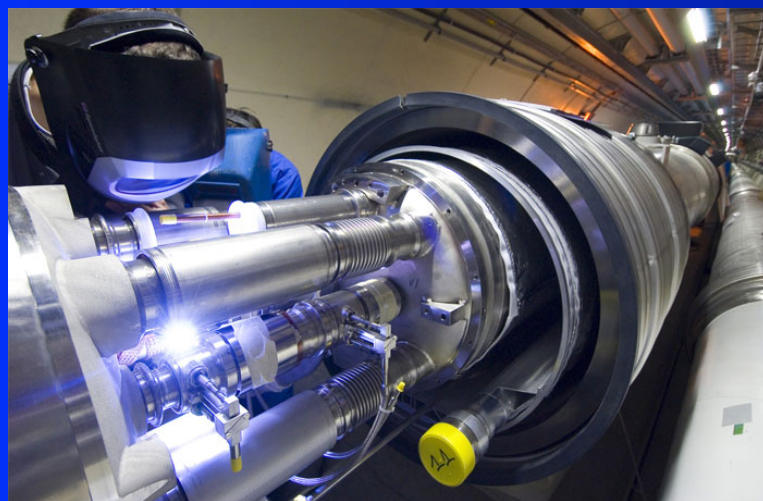
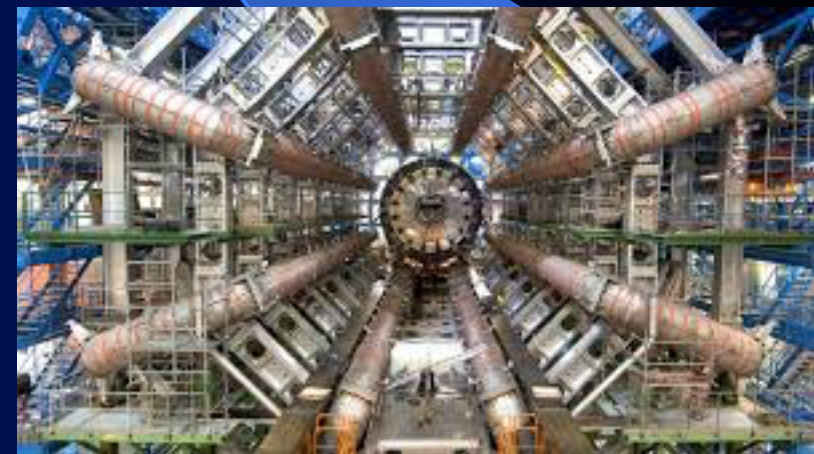
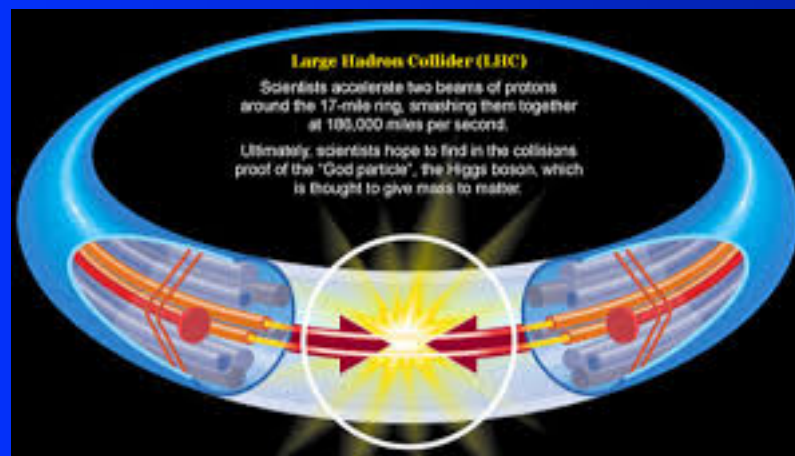
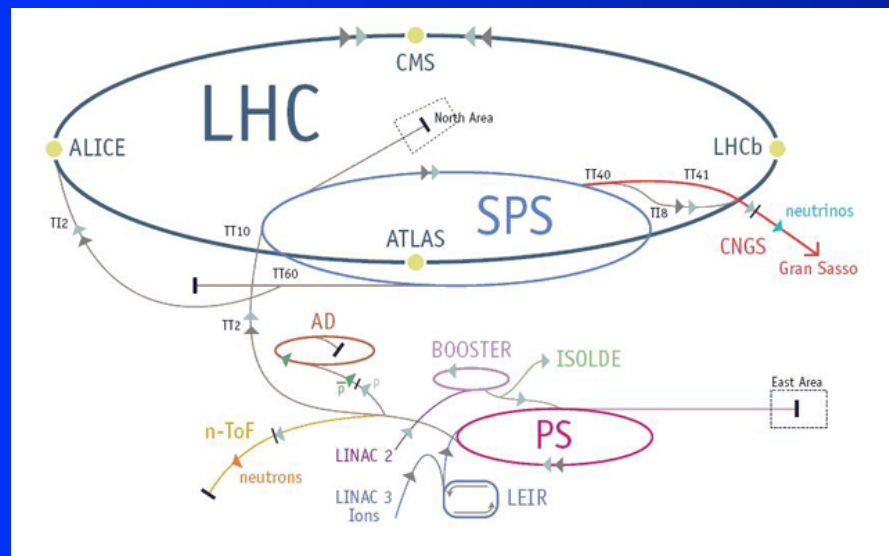
?

Сигнал пока отсутствует



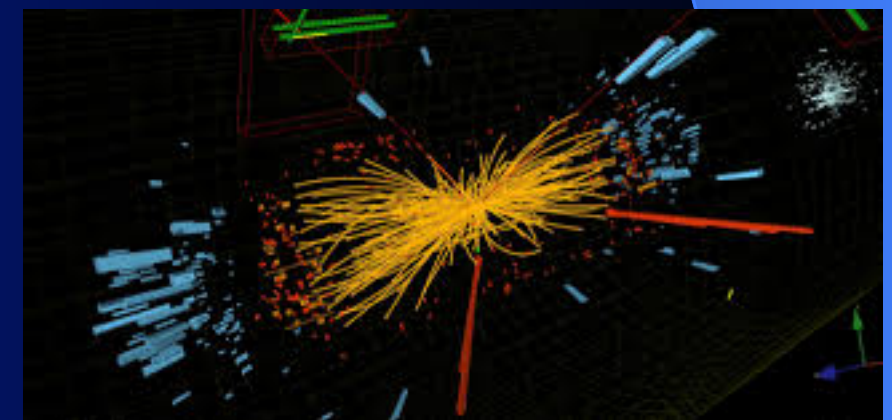
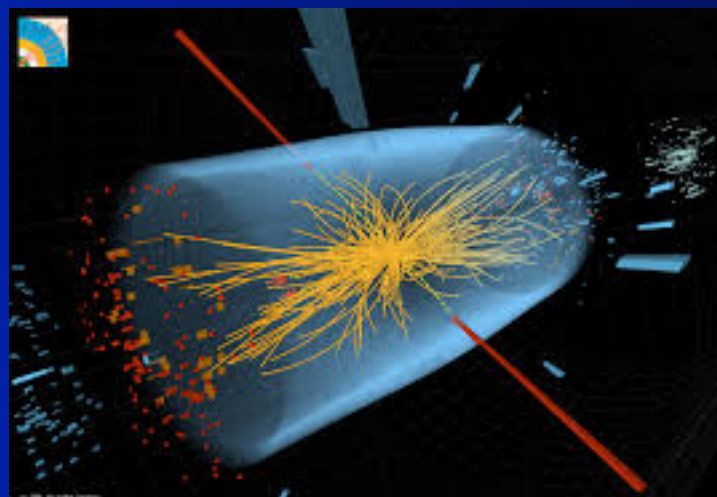
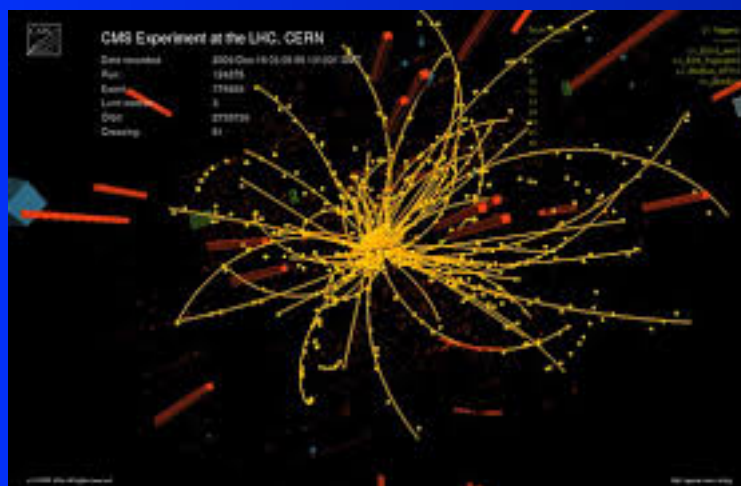
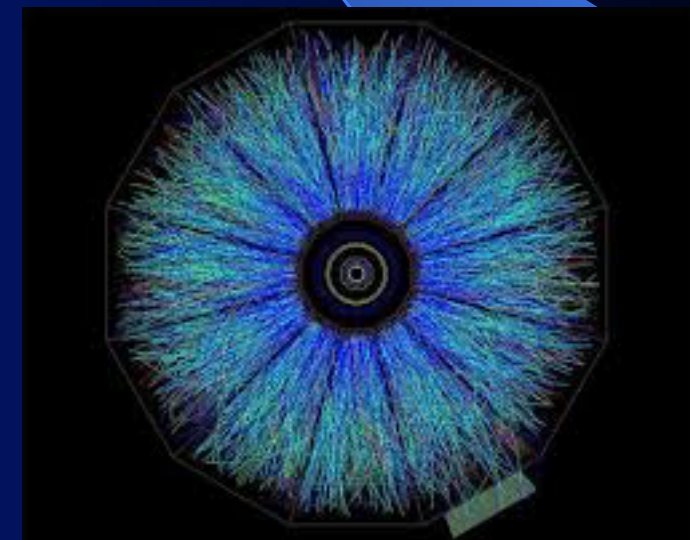
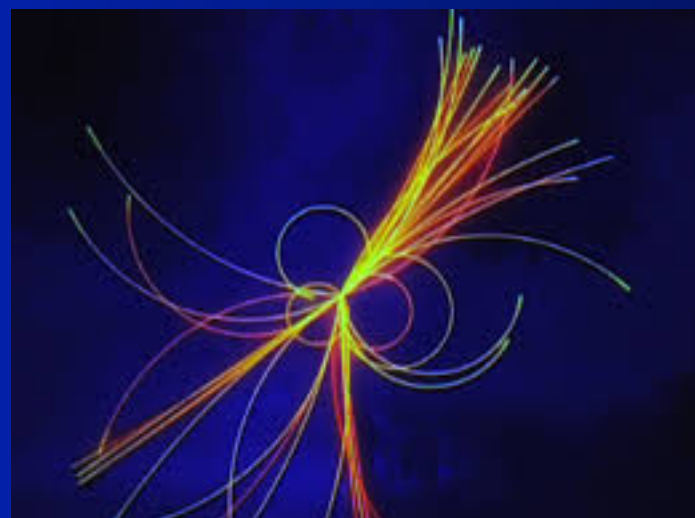
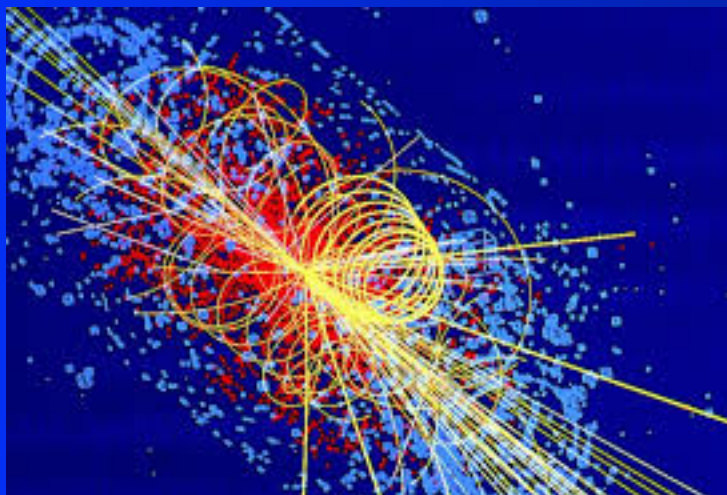
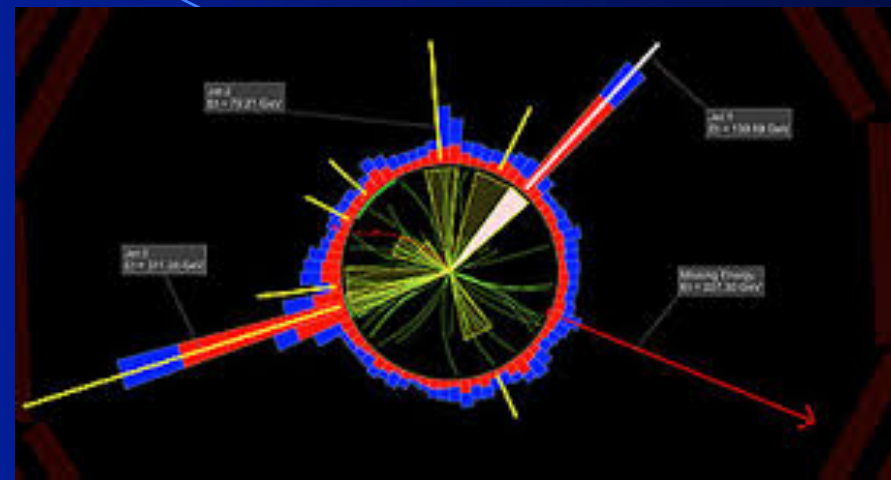
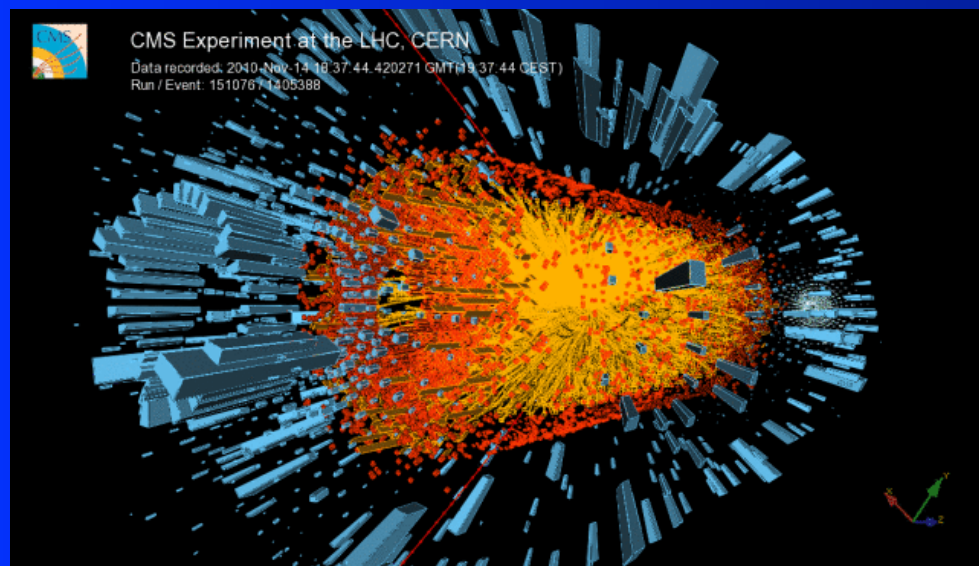
# Большой адронный коллайдер

Большой адронный коллайдер ЦЕРН 2009- 14 000 ГэВ



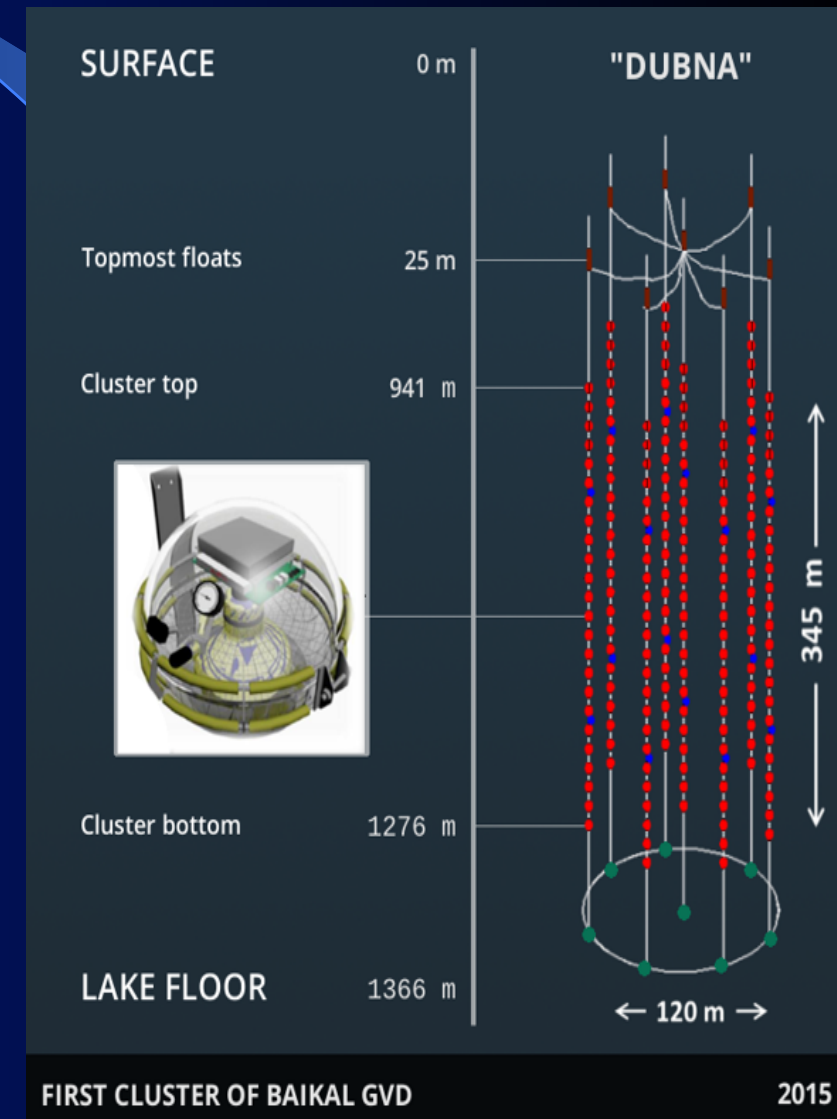
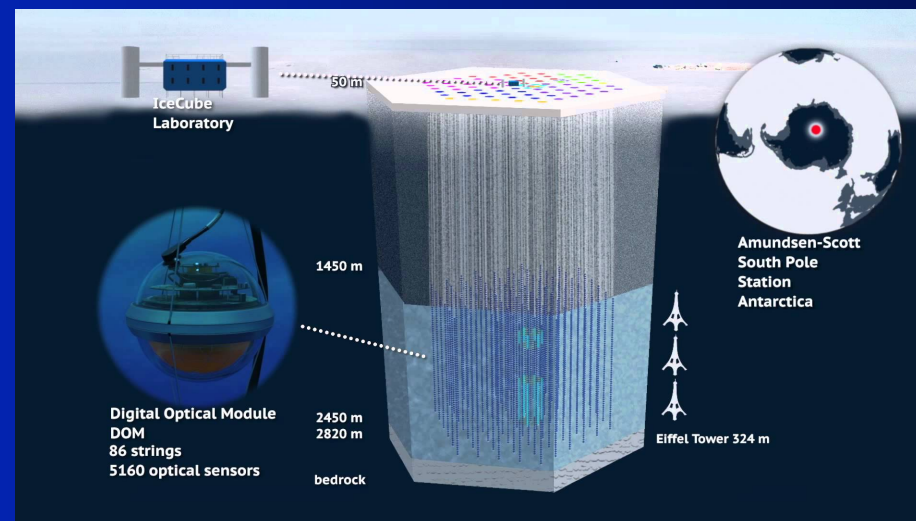
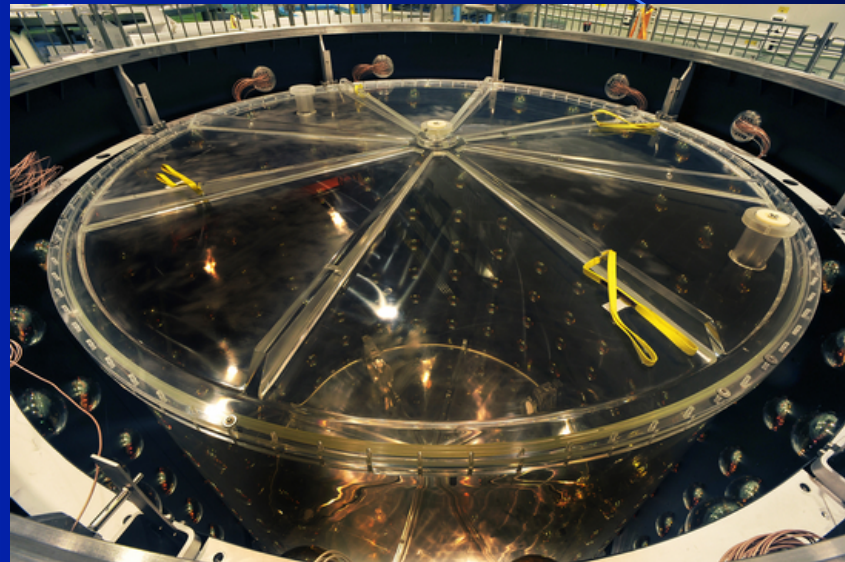
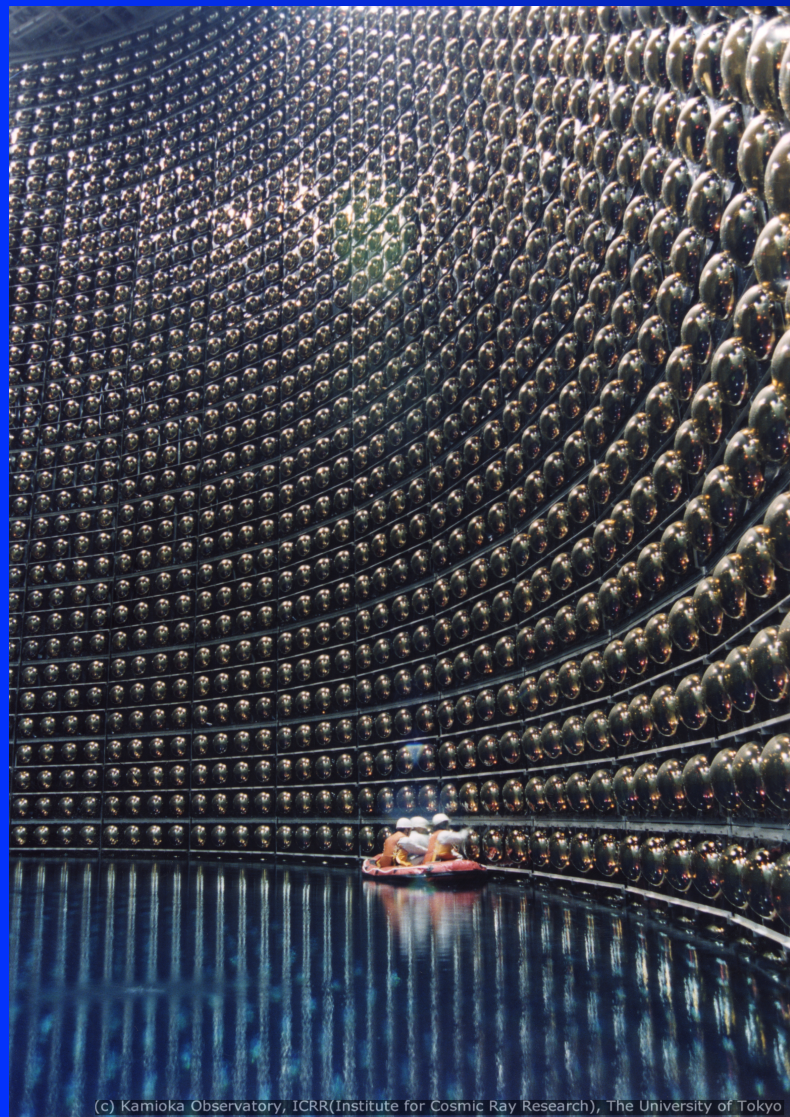


# Большой адронный коллайдер





# Подземные эксперименты

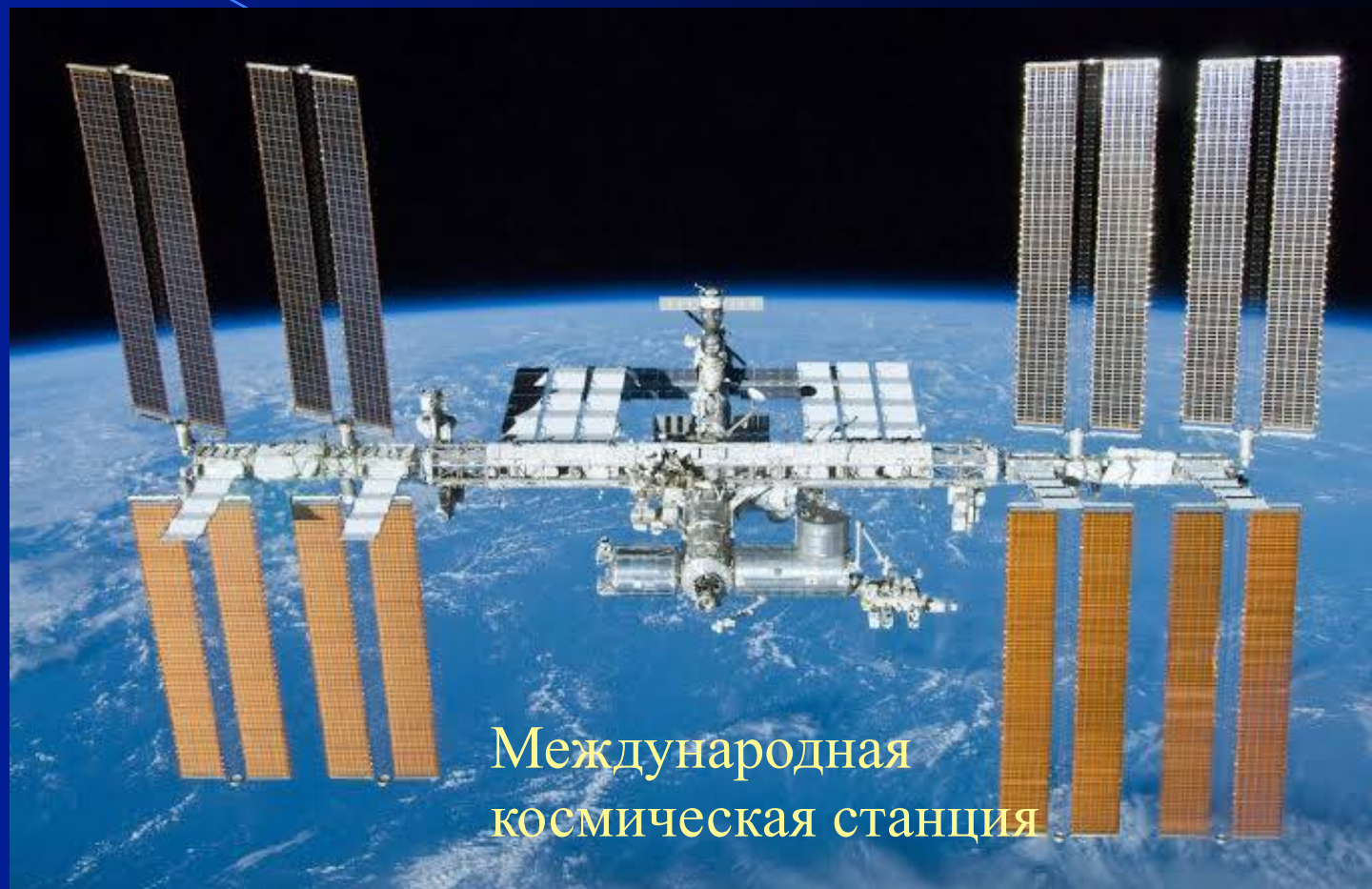




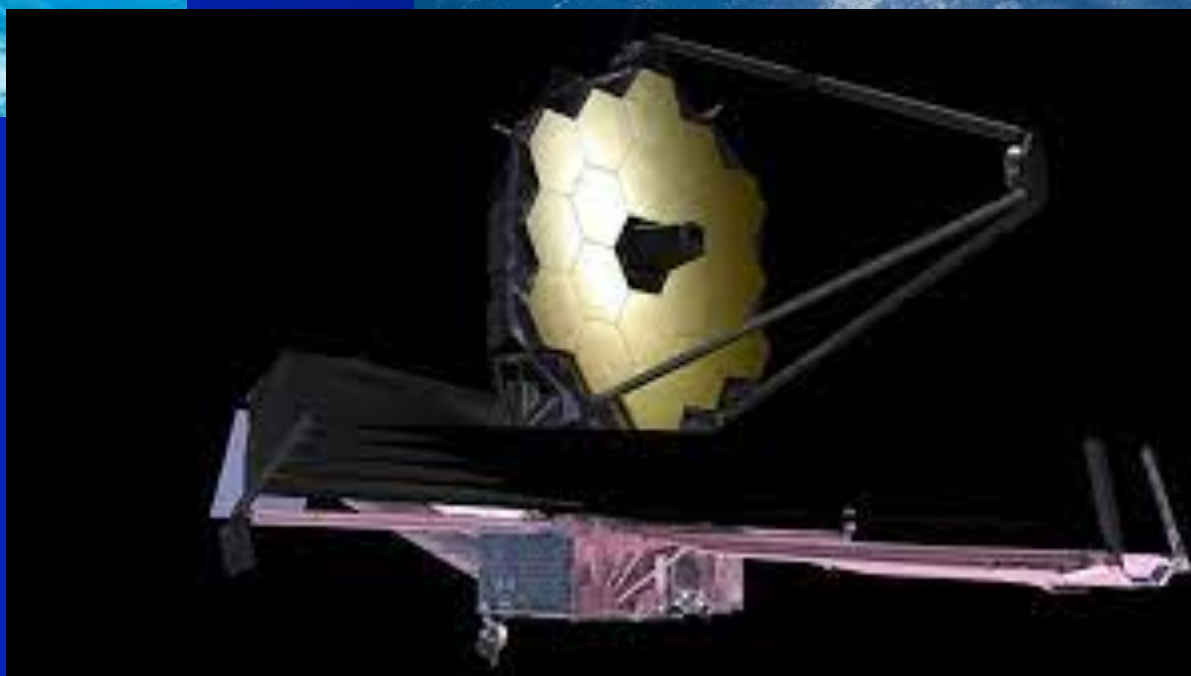
# Космические эксперименты



Хаббл Телескоп




Международная  
космическая станция



Джеймс Вебб  
Телескоп





If it turns out there is a simple ultimate law which explains everything, so be it — that would be very nice to discover. If it turns out it's like an onion with millions of layers... then that's the way it is. R.Feynman

Что ждёт нас за пределами  
Стандартной Модели?

СМ