

ЗАГАДКИ И ОТКРЫТИЯ В ФИЗИКЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных
исследований (Дубна)



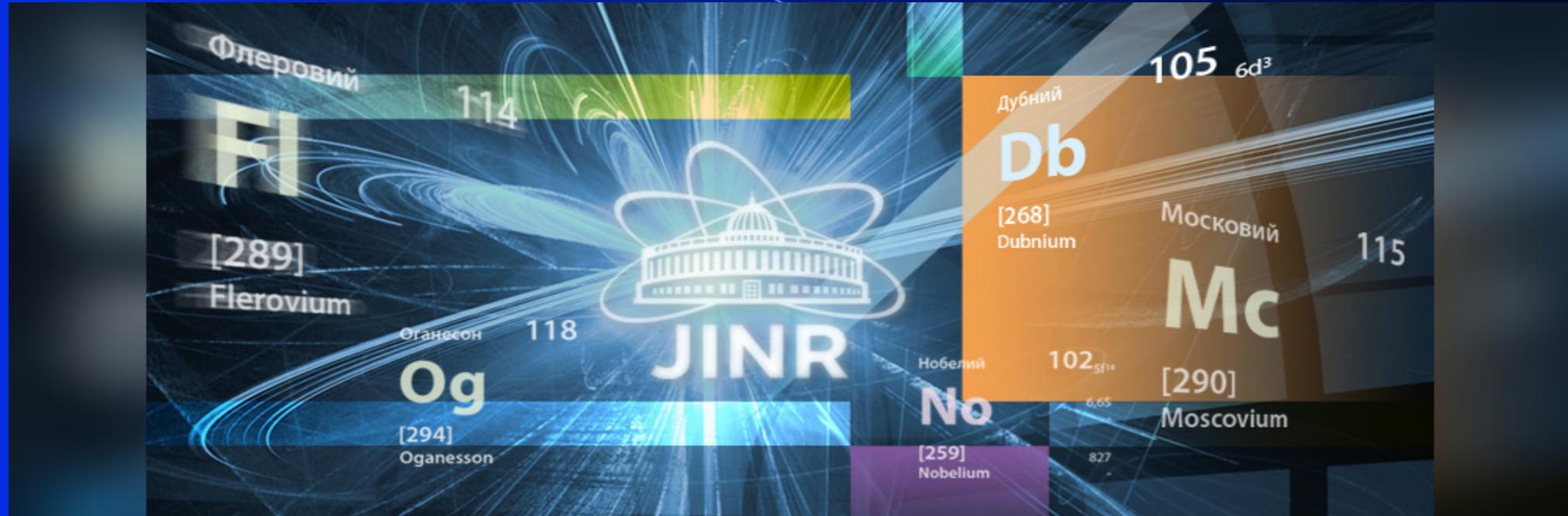
▶ ▶ ПЕРВАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ
С ВИДЕОУРОКАМИ



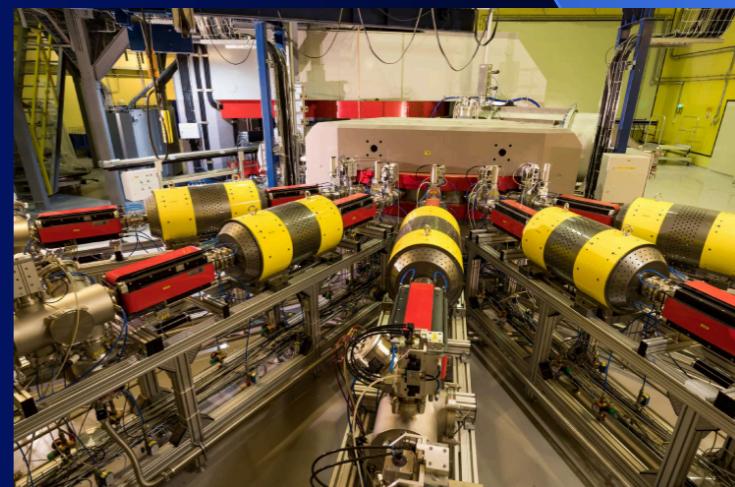
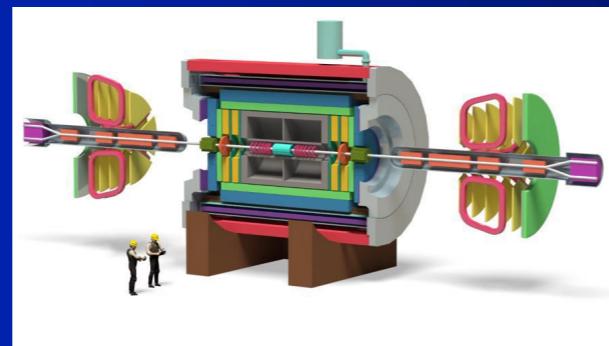
ДМИТРИЙ ИГОРЕВИЧ КАЗАКОВ

ДОКТОР ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР, ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН,
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ Объединенного института
ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне. Д.И. КАЗАКОВ — АВТОРИТЕТНЫЙ
СПЕЦИАЛИСТ В ОБЛАСТИ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ И ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ЧАСТИЦ, АВТОР БОЛЕЕ 250 НАУЧНЫХ РАБОТ, ИЗВЕСТЕН ТАКЖЕ ПОПУЛЯРНЫМИ
ЛЕКЦИЯМИ В ИНТЕРНЕТЕ С НЕСКОЛЬКИМИ МИЛЛИОНАМИ ПРОСМОТРОВ.

Объединённый институт ядерных исследований



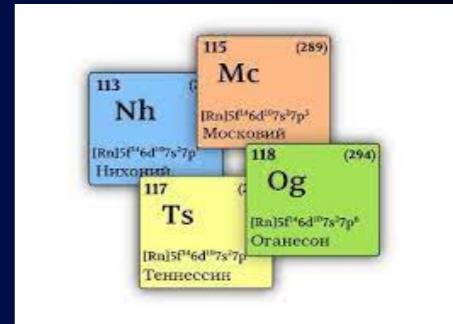
Международная межправительственная организация: 15 стран-участниц, 5 ассоциированных членов, 5000 сотрудников, 7 научных Лабораторий



Ускоритель тяжёлых ионов НИКА

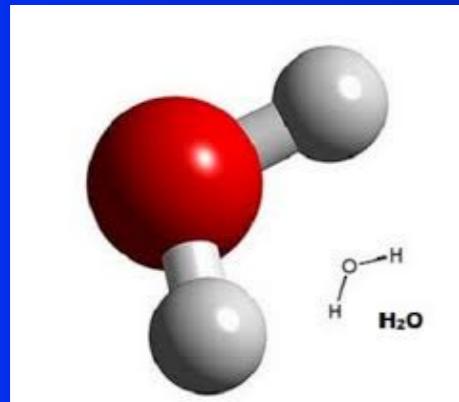


Фабрика сверхтяжёлых элементов

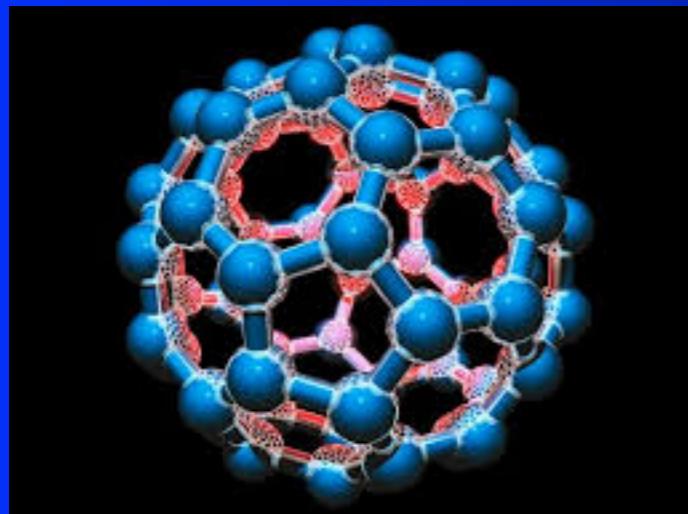
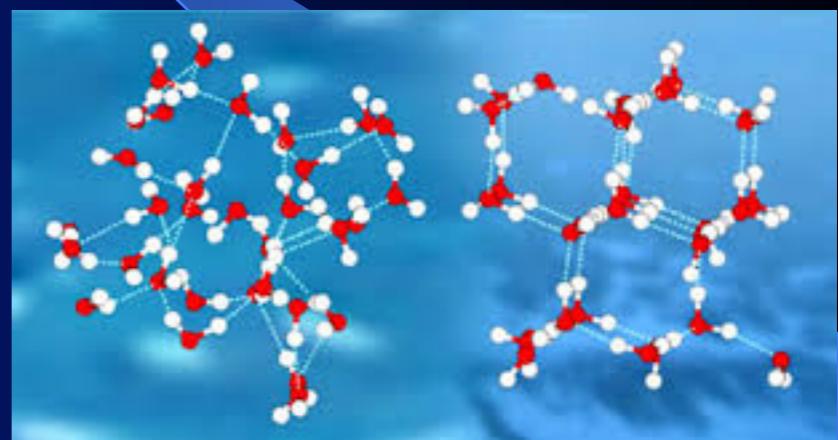


Атомы и Молекулы

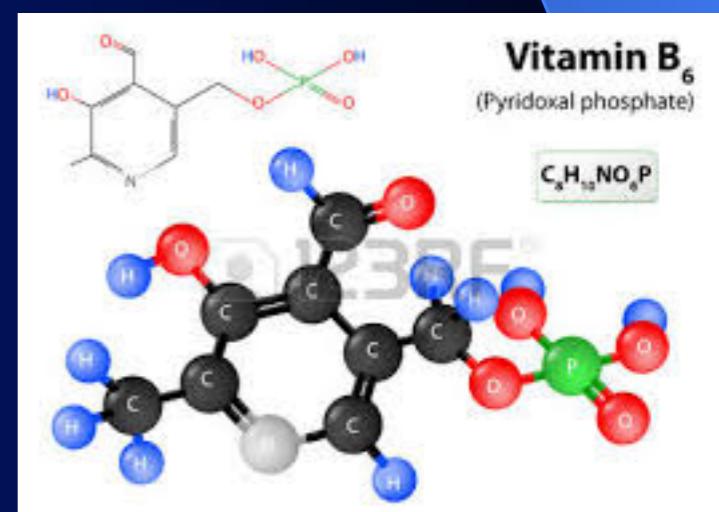
- * Всё в мире состоит из атомов - мельчайших неделимых частиц материи.
- * Атомы собираются в молекулы, которые образуют жидкые и газообразные вещества



Простейшая
молекула воды

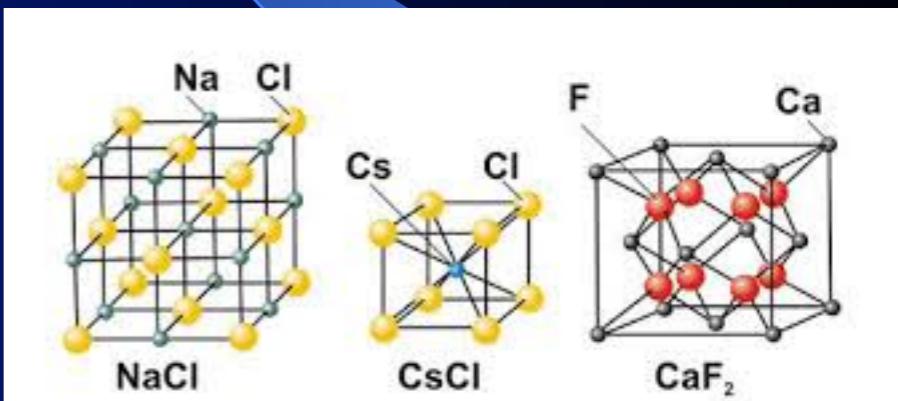
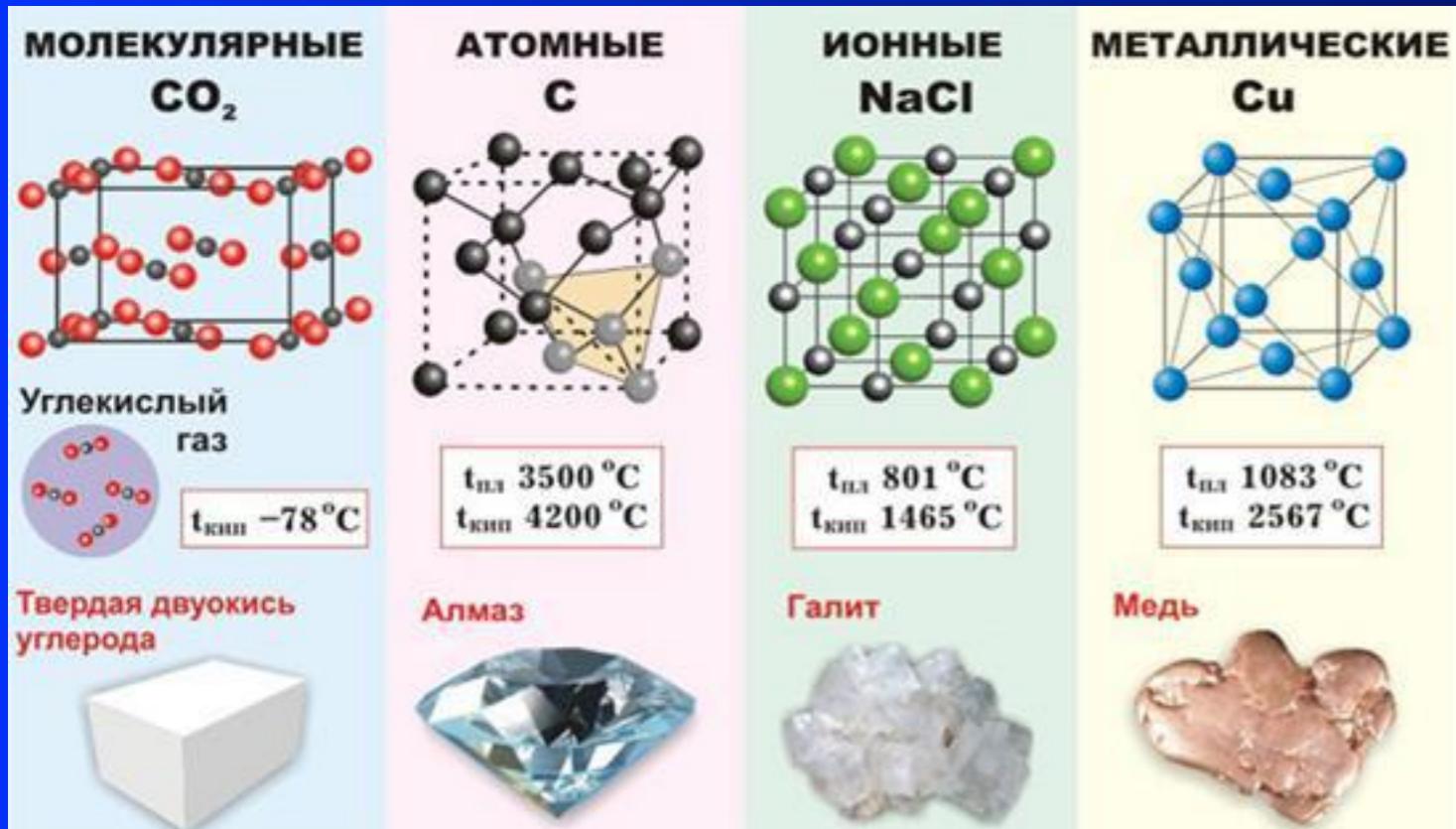


Молекулярная
структура определяет
химические свойства
вещества

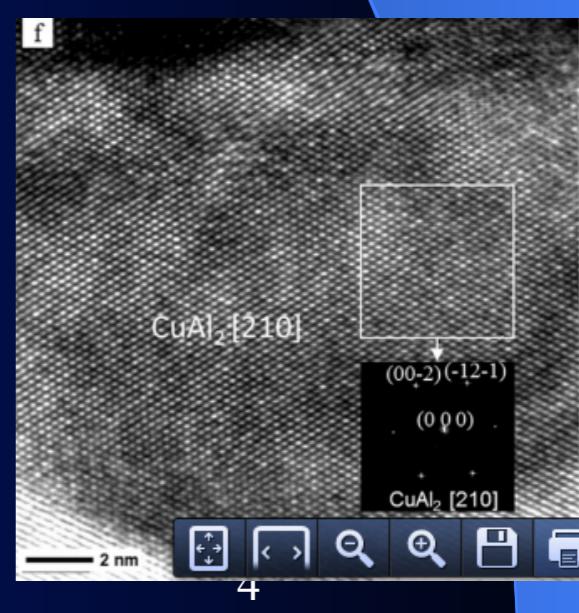


Кристаллы

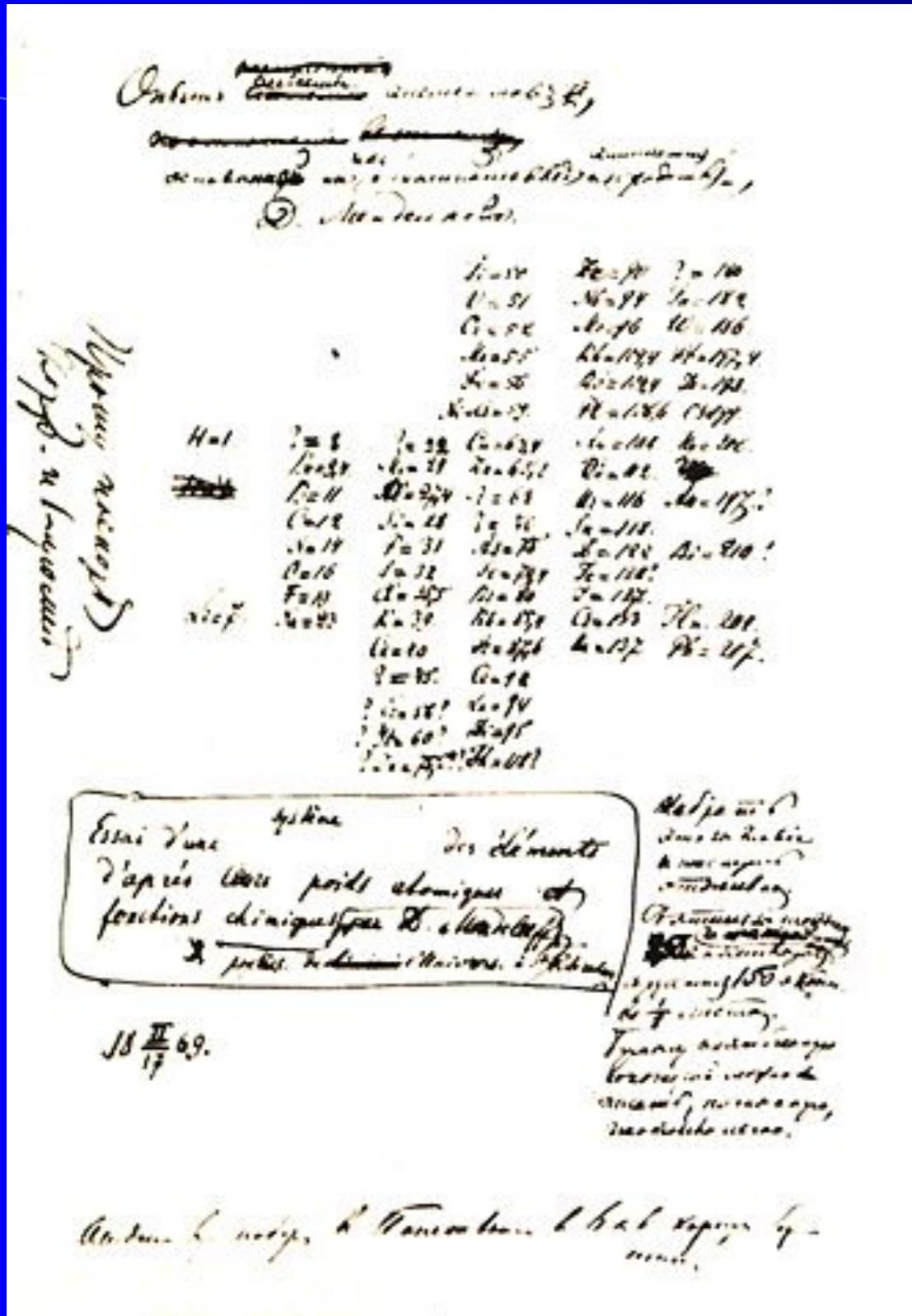
Большинство твёрдых тел имеет кристаллическую структуру, атомы при этом находятся в узлах решётки. Жёсткость твердых тел объясняется жесткостью решёточной конструкции



Кристаллическая решётка в электронном микроскопе

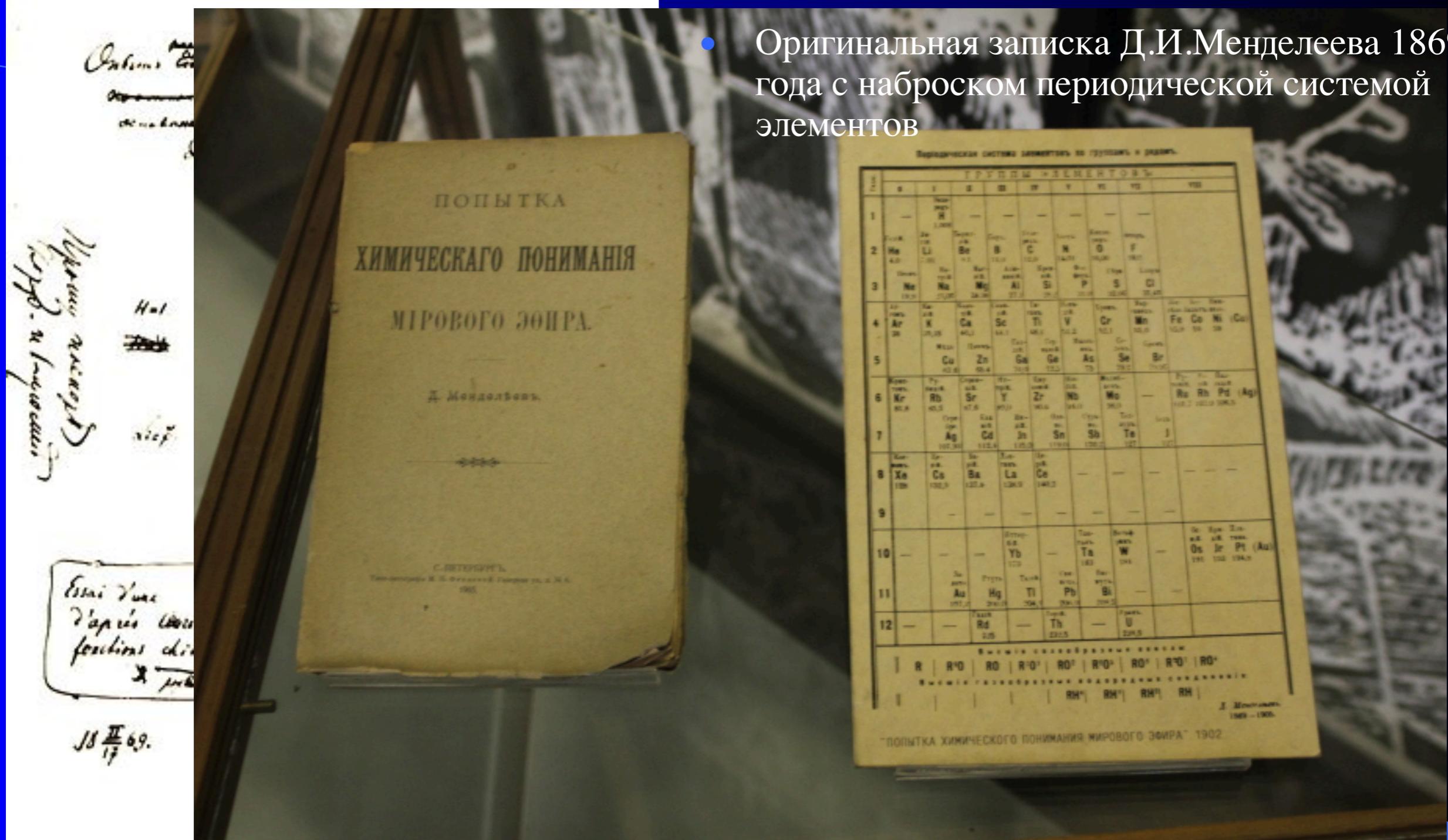


Периодическая система элементов



- 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 по группам и рядам											
Группа	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	—	Гелий He	Литий Li	Бор B	Силиций Si	Кремний Si	Галлий Ga	Алуминий Al	Гранатий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga
2	Гелий He	Литий Li	Бор B	Силиций Si	Кремний Si	Галлий Ga	Алуминий Al	Гранатий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga
3	Литий Li	Бор B	Силиций Si	Кремний Si	Галлий Ga	Алуминий Al	Гранатий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga
4	Литий Li	Бор B	Силиций Si	Кремний Si	Галлий Ga	Алуминий Al	Гранатий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga
5	Бор B	Силиций Si	Кремний Si	Галлий Ga	Алуминий Al	Гранатий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga	Галлий Ga
6	Калий K	Титан Ti	Серебро Ag	Яттори Y	Цирконий Zr	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La
7	Калий K	Титан Ti	Серебро Ag	Яттори Y	Цирконий Zr	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La
8	Ха Ra	Цирконий Zr	Барий Ba	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	Яттори Y	Яттори Y	—	—	—	—	—	—	—
11	—	Диодий Au	Рутений Ru	Титан Ti	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La
12	—	—	Рутений Ru	—	Титан Ti	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La	Лантан La

Альбом 1 изобр. в Париже. 1869 год.

Периодическая система элементов

1 IA																	18 VIIIA
Водород 1 H 1.00794 Hydrogen	2 Be Beryllium	3 Li Lithium	4 Mg Magnesium	5 Sc Scandium	6 Ti Titanium	7 V Vanadium	8 Cr Chromium	9 Mn Manganese	10 Fe Iron	11 Co Cobalt	12 Ni Nickel	13 Cu Copper	14 Zn Zinc	15 Ga Gallium	16 As Arsenic	17 Se Selenium	18 Br Bromine
Натрий 11 Na 22,89768 Sodium	Магний 12 Mg 24,3050 Magnesium	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	Аргон 18 Ar 39,948 Argon	
Калий 19 K 39,0983 Potassium	Кальций 20 Ca 40,078 Calcium	Скандиний 21 Sc 44,95591 Scandium	Цирконий 40 Zr 88,90585 Цирконий	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 107,86862 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
Рубидий 37 Rb 85,4678 Rubidium	Стронций 38 Sr 87,62 Strontium	Иттрий 39 Y 88,90585 Иттрий	Цирконий 40 Zr 91,224 Цирконий	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 107,86862 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 Лантанум	Гафний 72 Hf 178,49 Хафний	Тантал 73 Ta 180,9479 Танталум	Вольфрам 74 W 183,84 Тунгстен	Рений 75 Re 186,207 Рений	Оsmий 76 Os 190,23 Osmium	Иridий 77 Ir 192,22 Иридий	Платина 78 Pt 195,08 Platinum	Золото 79 Au 196,96654 Gold	Ртуть 80 Hg 204,3833 Mercury	Таллий 81 Tl 204,3833 Thallium	Свинец 82 Pb 207,2 Lead	Висмут 83 Bi 208,98037 Bismuth	Полоний 84 Po [210] Polonium	Астат 85 At [222] 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	Сиборгий 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 [287] Nihonium	Флеровий 114 Fl [287] Flerovium	Московий 115 Mc [291] Moscovium	Ливерморий 116 Lv [291] Livermorium	Теннессин 117 Ts [291] Tennessee	Оганесон 118 Og [222] Oganesson

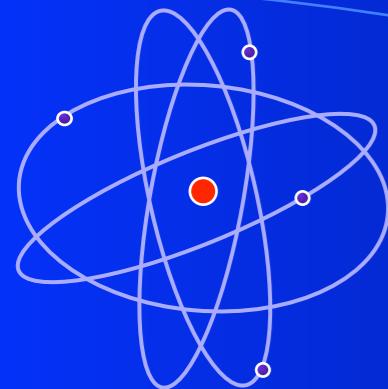
Лантаноиды Lanthanides

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	Лютценций 71 Lu 174,967 Lutetium
--	--	---	---	---	--	---	--	---	---	---	---	---	--

Актиноиды Actinides

Торий 90 Th 232,0381 Thorium	Протактиний 91 Pa 231,03588 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
--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	---	---	---	---

• Современная таблица элементов (2017)



Структура Атома

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

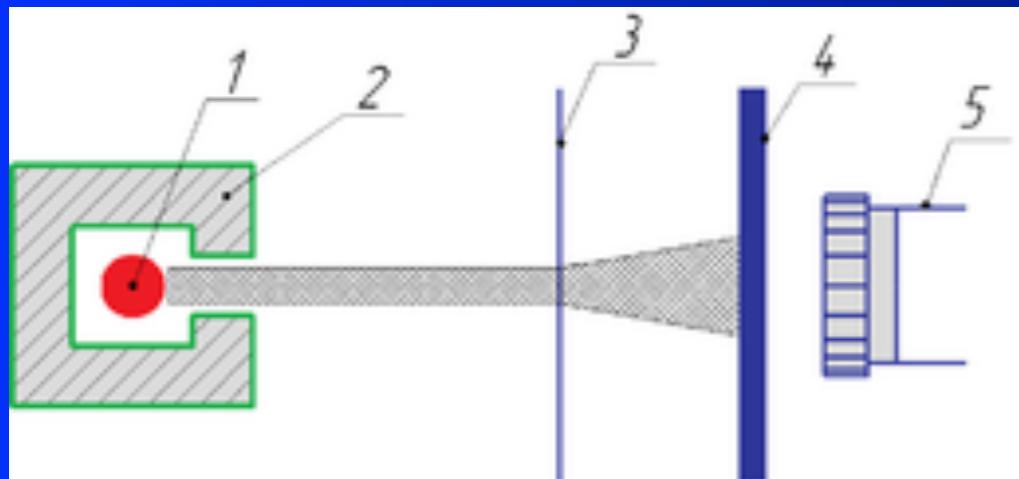
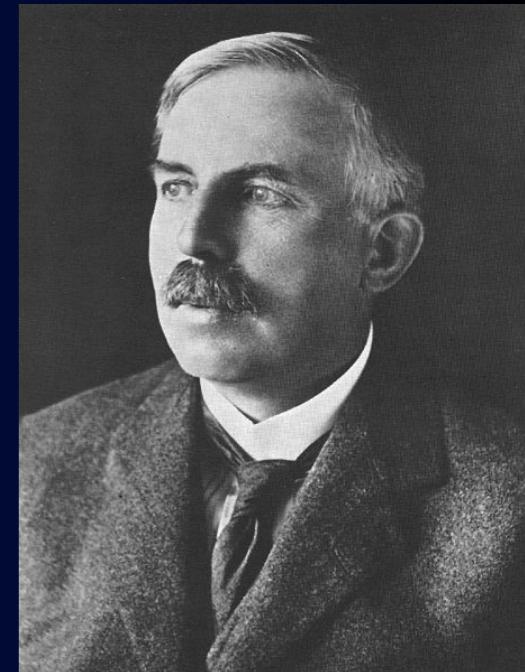
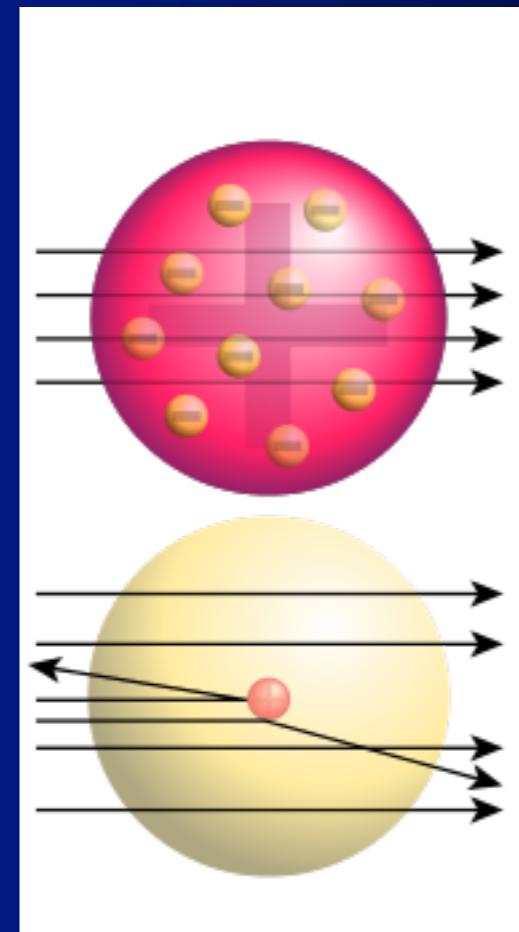


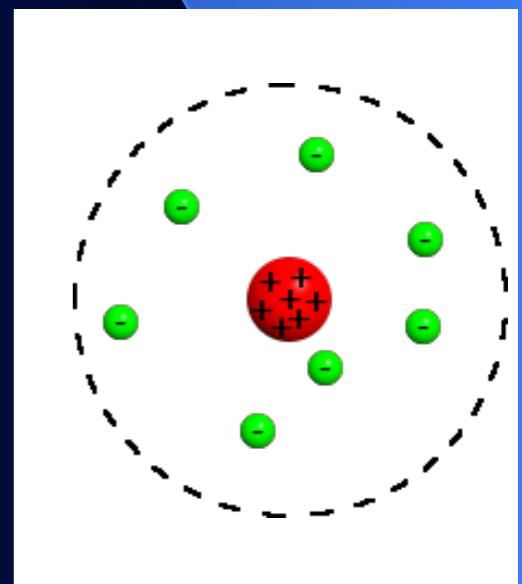
Схема эксперимента Резерфорда

Ожидаемый эффект

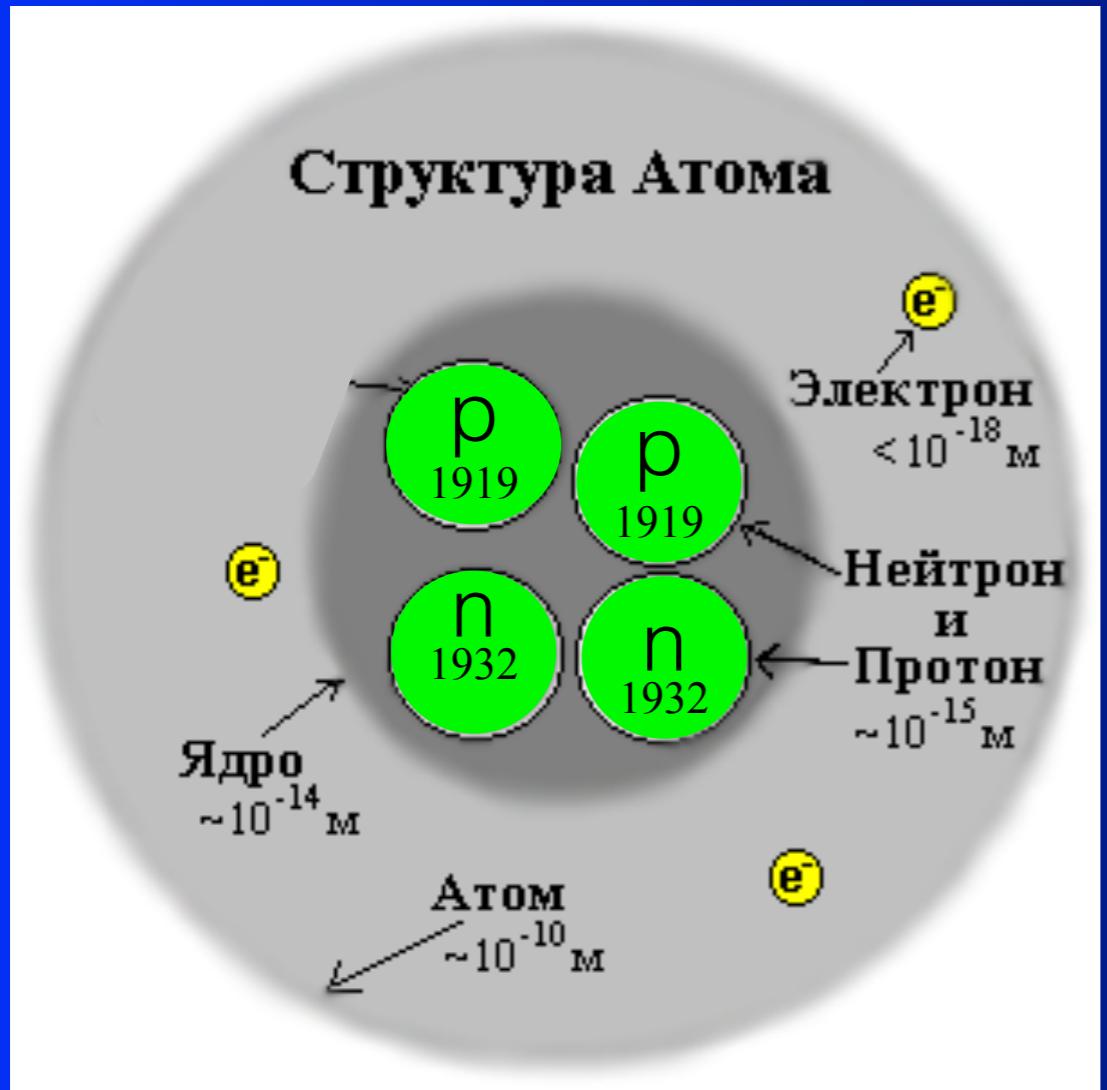
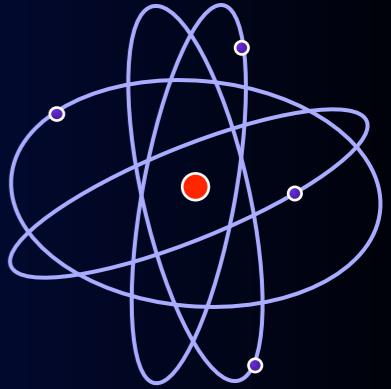


Жесткий отскок

Планетарная модель атома Резерфорда



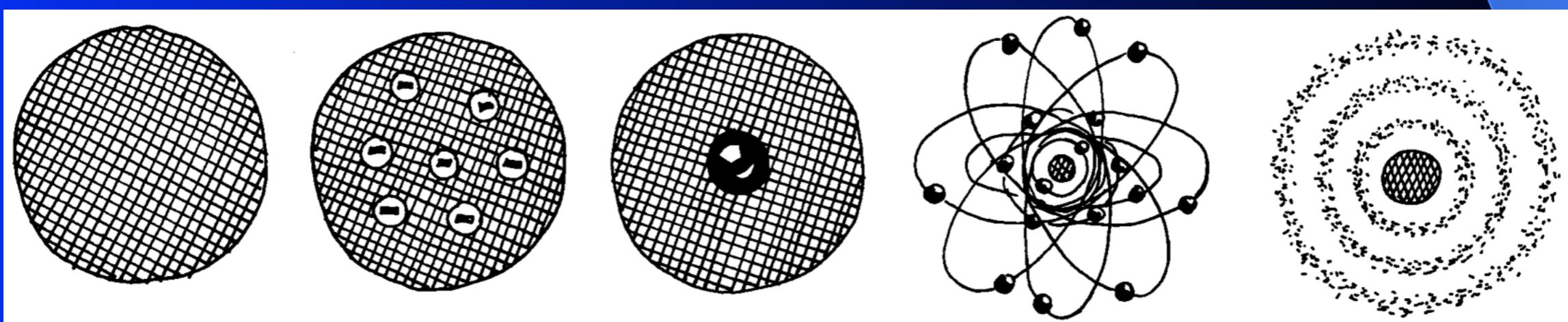
Структура Атома



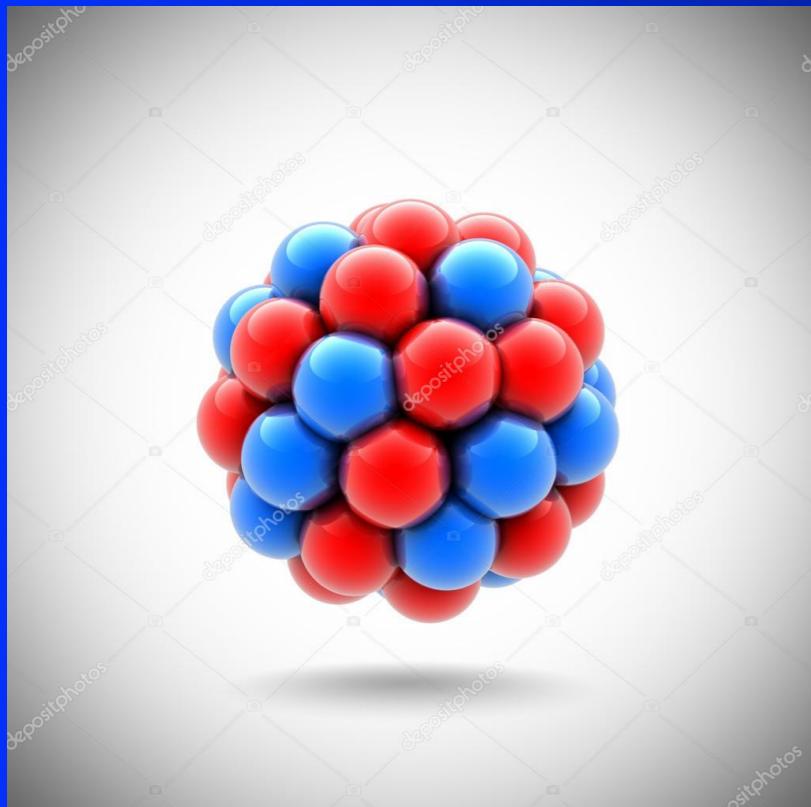
В центре атома находится плотное ядро имеющее положительный электрический заряд

Оно в 10000 раз меньше размера самого атома

Эволюция в понимании строения атома

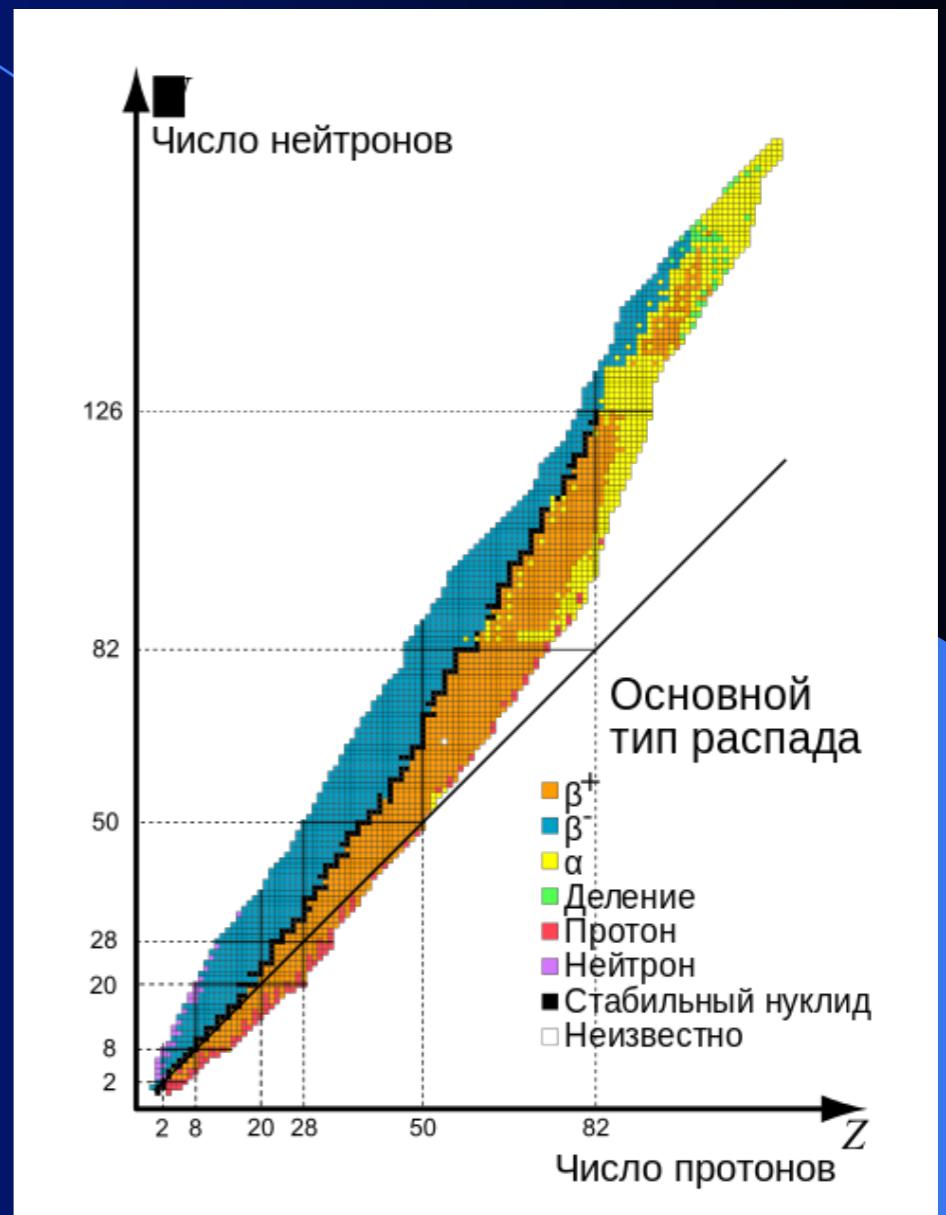


Атомное ядро



Ядро состоит
их 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

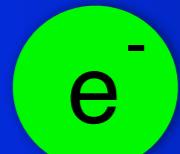


распадается за 15 минут

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \tilde{\nu}$$



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



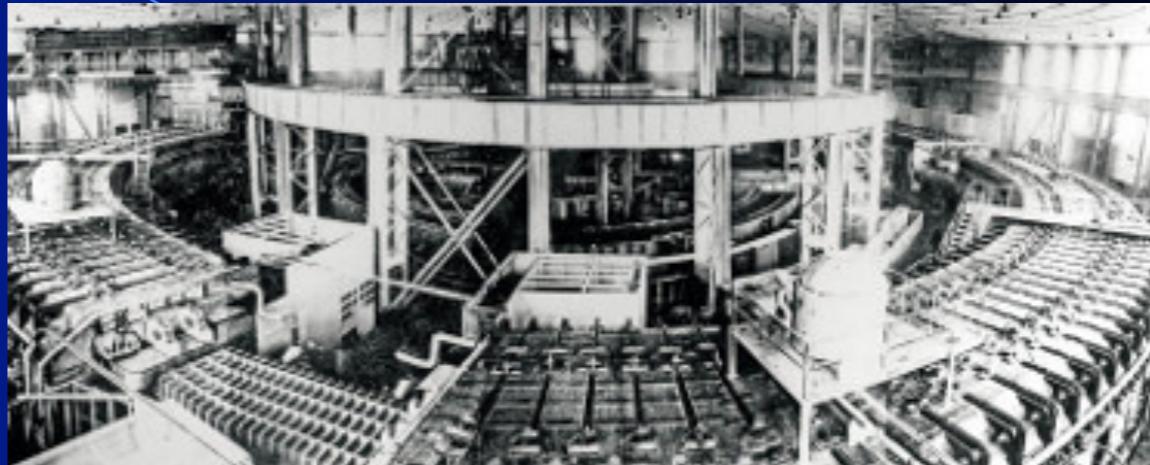
или π-мезоны (π^+, π^-, π^0)

Ими обмениваются протоны и нейтроны в ядре

Ускорители протонов



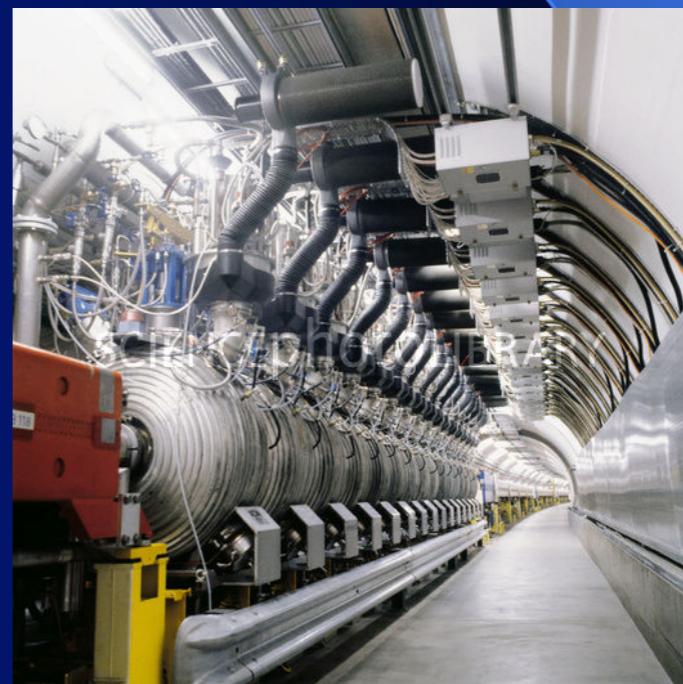
BNL Cosmotron (1952-1966) 3.3 ГэВ



Синхрофазоторон Дубна ОИЯИ 1957 10 ГэВ



Синхрофазоторон Протвино ИФВЭ 1967 70 ГэВ



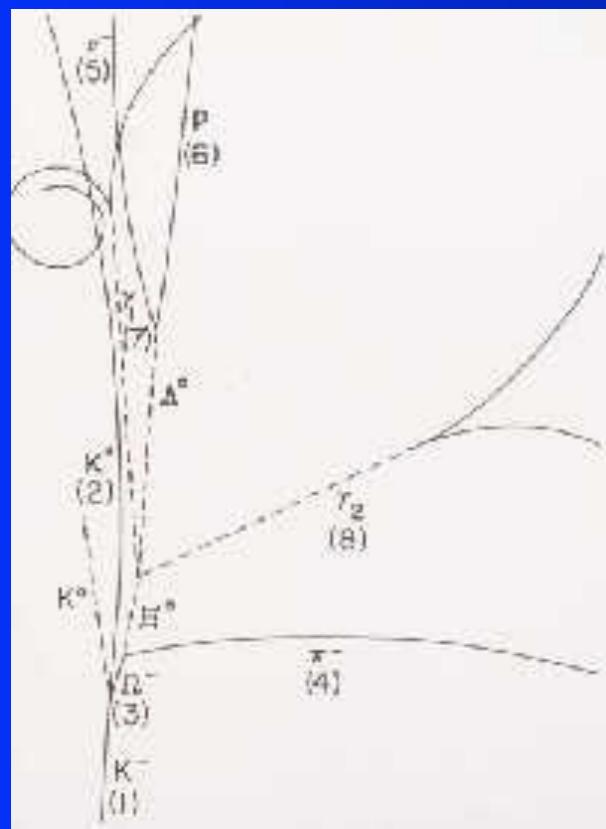
Super-proton-synchrotron CERN 1976 450 ГэВ

Открытие элементарных частиц



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

Кварковая Модель



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

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

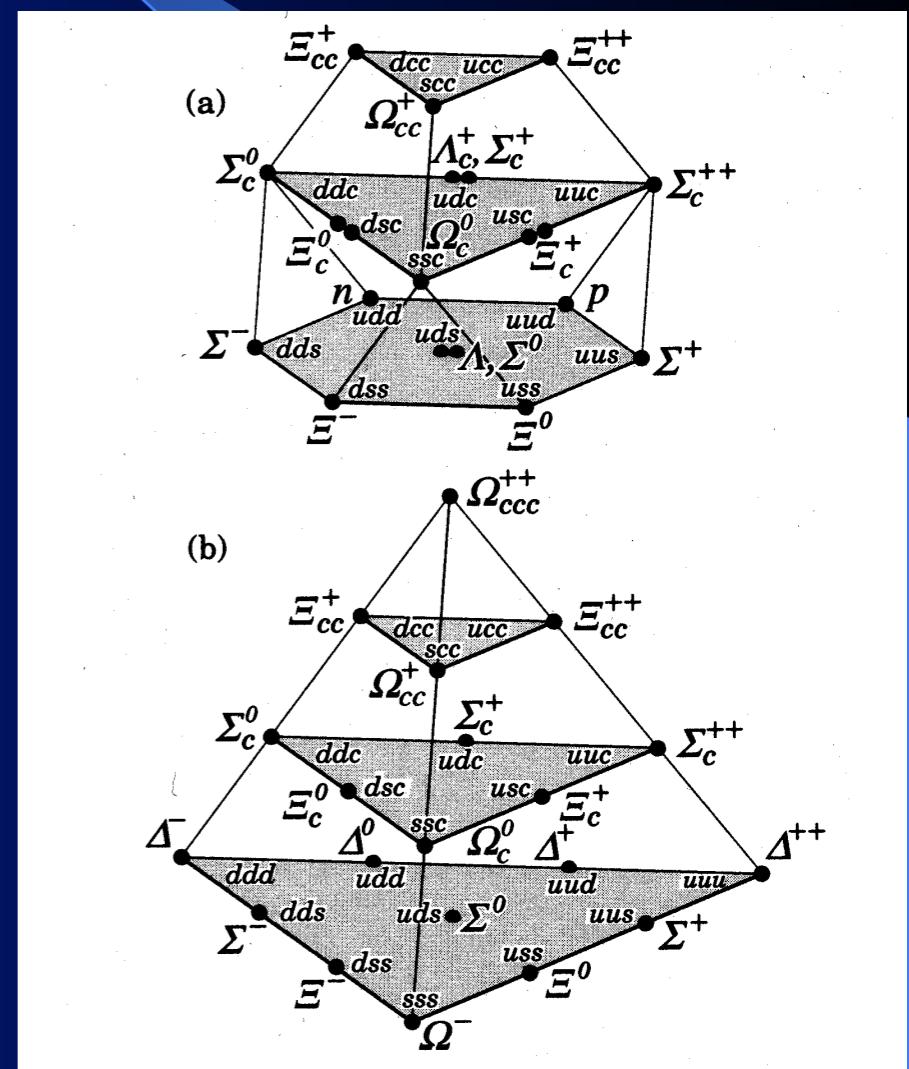
$$\Xi^+(d \uparrow c \uparrow c \downarrow)$$

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

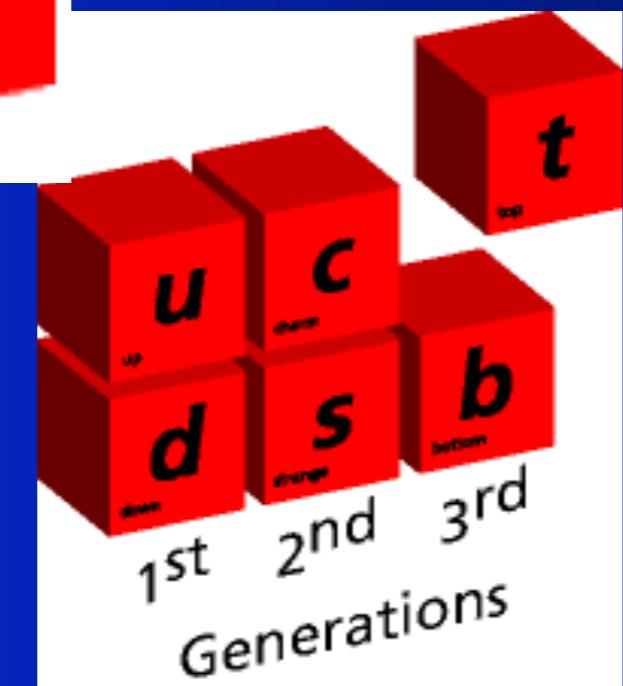
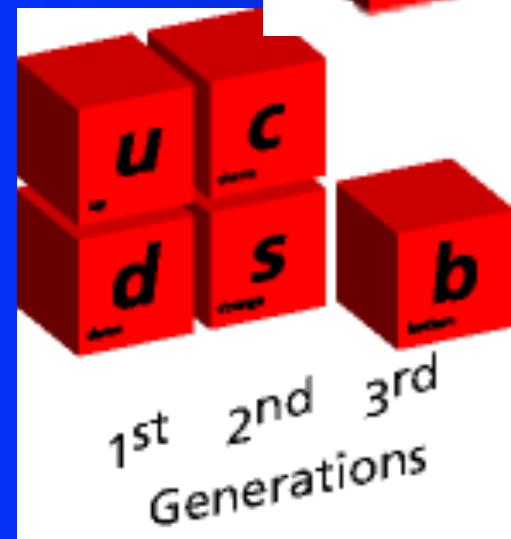
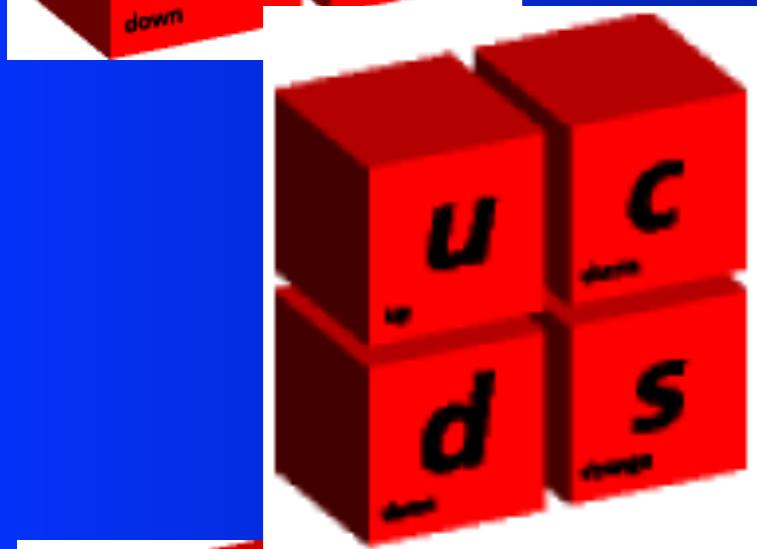
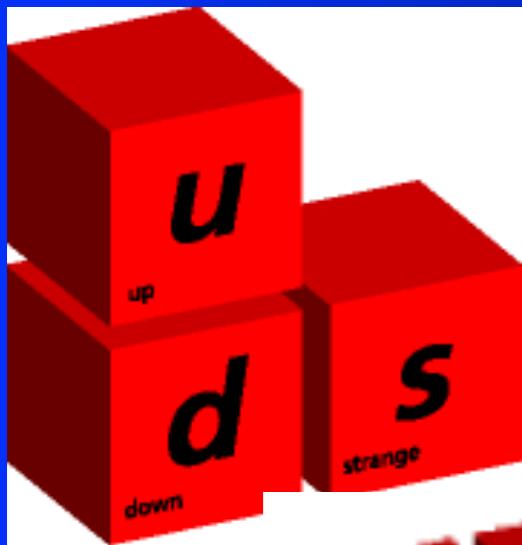
$$\Delta^- = \epsilon^{ijk} (d_i^\dagger d_j^\dagger d_k^\dagger)$$

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

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

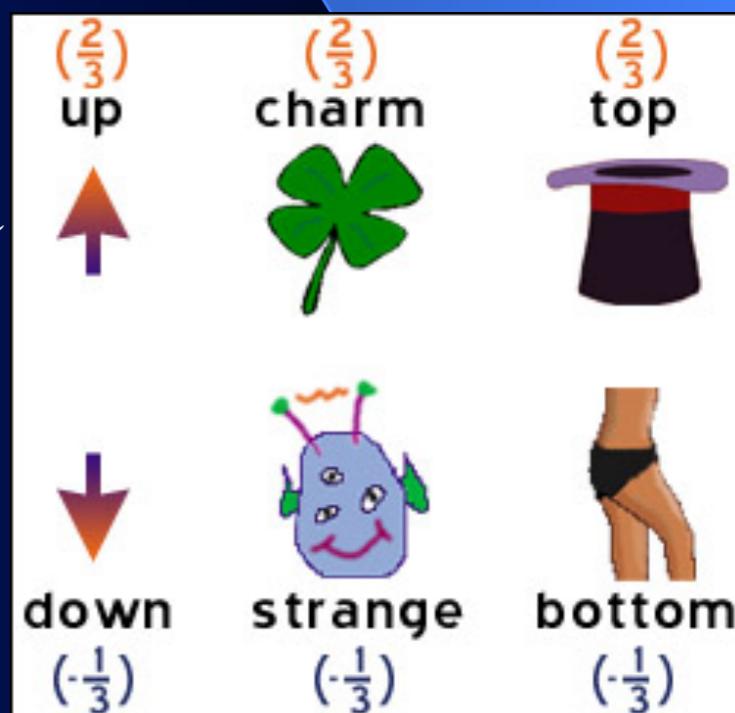


Кварки – “кирпичики мироздания”

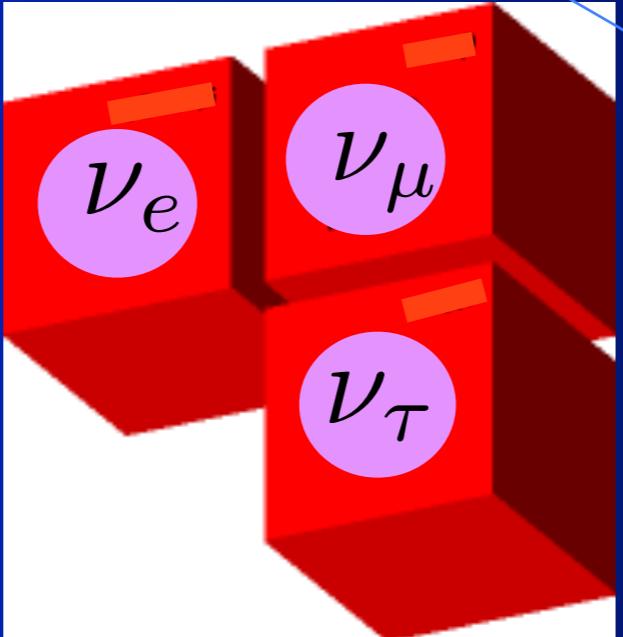
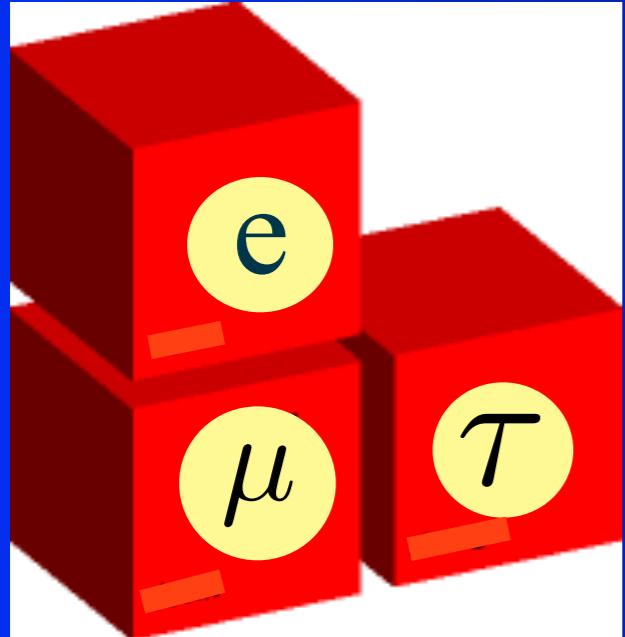


По непонятной причине природа создала 3 копии (поколения) кварков и лептонов

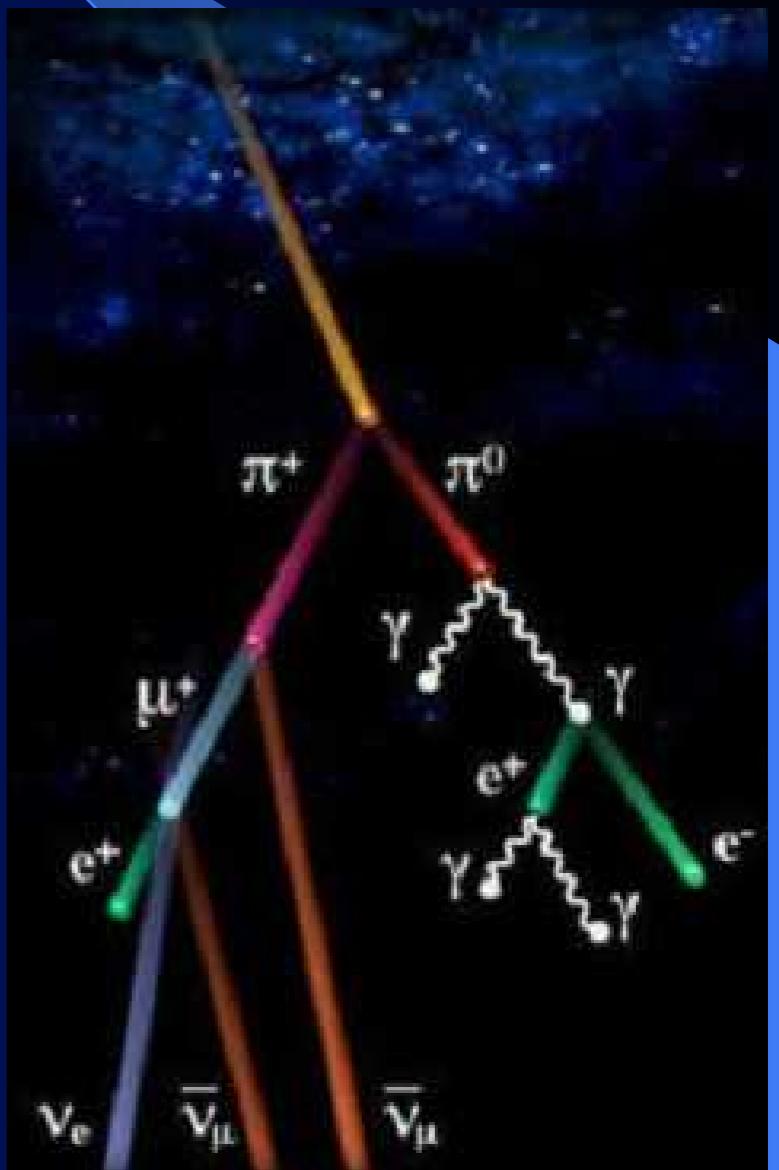
- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $\frac{1}{3}$
- Каждый夸克 несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло шести



Лептоны от слова λεπτός

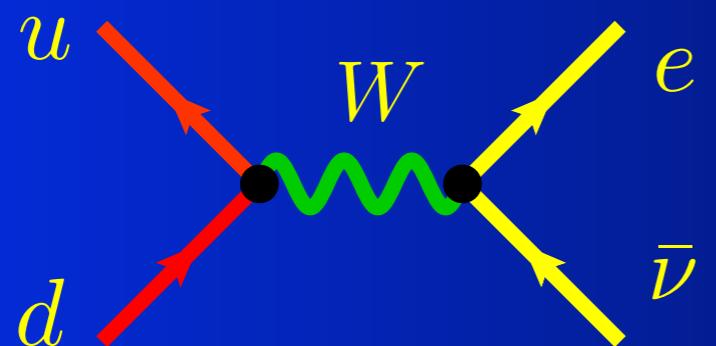


Мюоны рождаются от распада
Π-мезонов в космических
лучах и распадаются на
электроны и два нейтрино



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

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



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.

SU(3)

Стандартная Модель

SU(2)

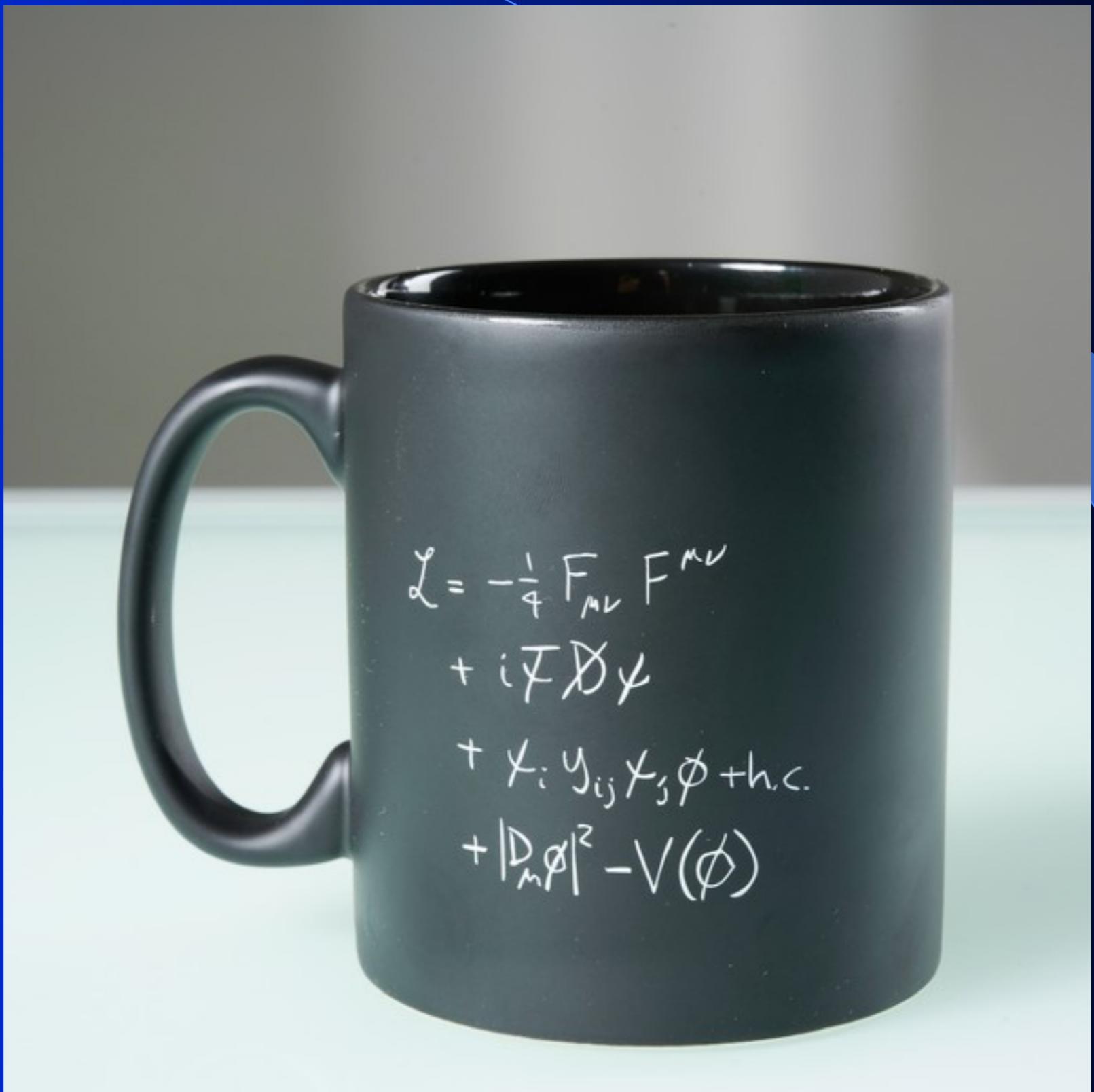
U(1)

Частицы

Three Generations of Matter (Fermions)					Bosons (Forces)
	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	Higgs
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z^0 weak force	
	0.511 MeV e electron	106 MeV μ muon	1.78 GeV τ tau	W^\pm weak force	

Силы
Электромагнитные
Сильные
Слабые

Стандартная Модель



Стандартная Модель

ЛАГРАНЖИАН

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

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

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

$$+ y_{\alpha\beta}^N \bar{L}_\alpha N_\beta \tilde{H}$$

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

Станда ЛАГРАНЖИАН

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

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4}G$$

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

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

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

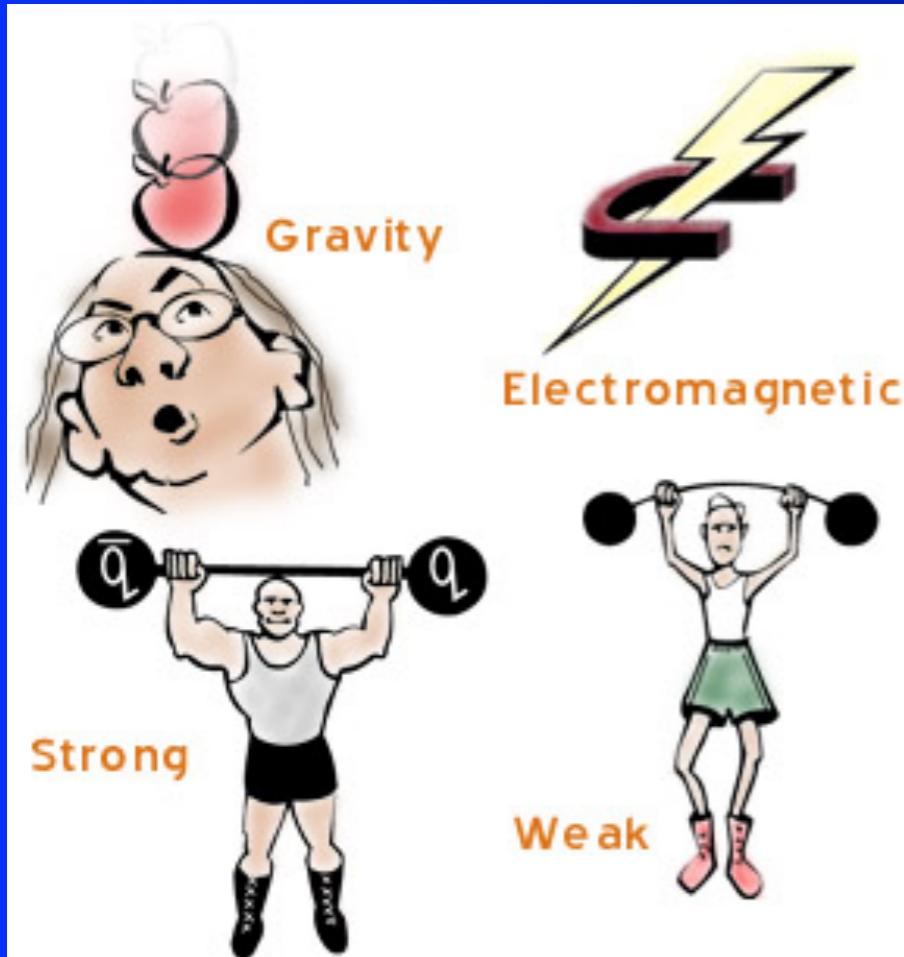
$$\mathcal{L}_{Higgs} = -V$$

$$\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 - ig c_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_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\mu W_\nu^+ 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\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 m_\nu^\lambda}{2M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\ & \frac{g m_e^\lambda}{2M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig m_\nu^\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig m_e^\lambda}{2M} \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 m_u^\lambda}{2M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\ & \frac{g m_d^\lambda}{2M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig m_d^\lambda}{2M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig m_d^\lambda}{2M} \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 + ig c_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) + ig c_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^+) + ig c_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}$$

Задача № 1:

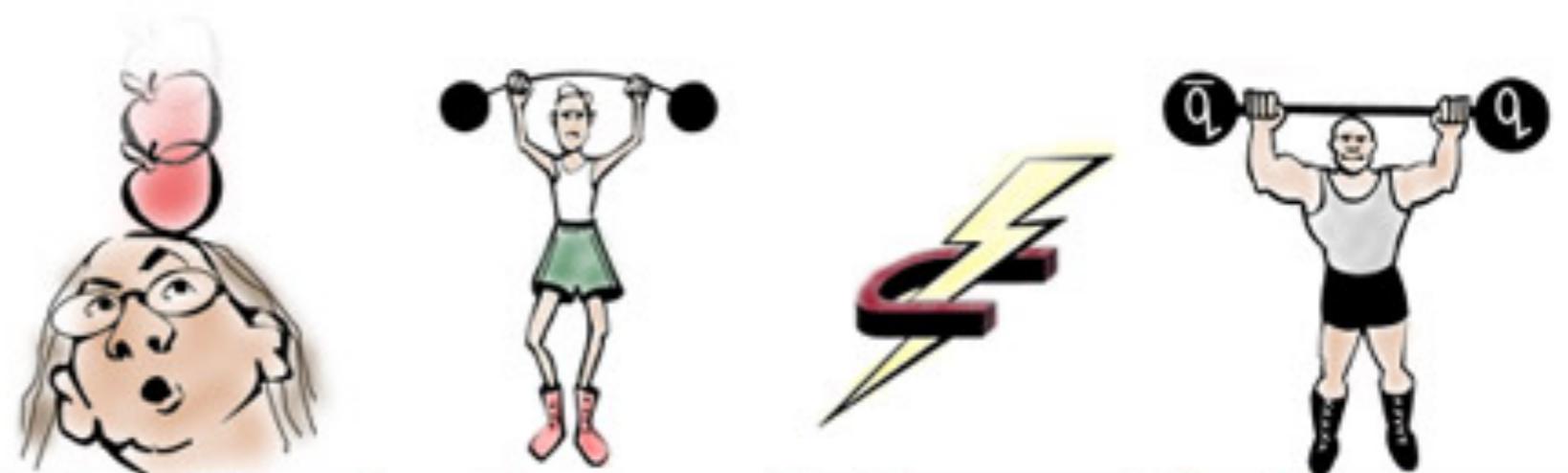
Почему в природе
появляются три поколения
зеленых марионеток?

Силы в Природе



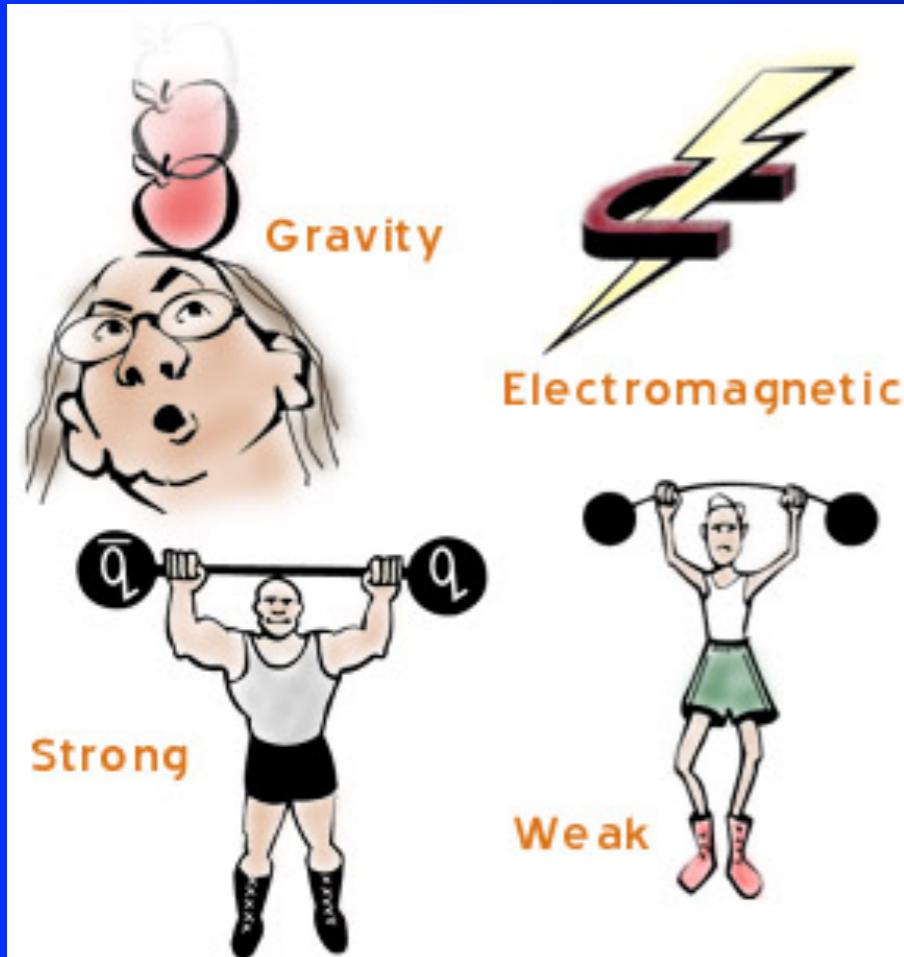
Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

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

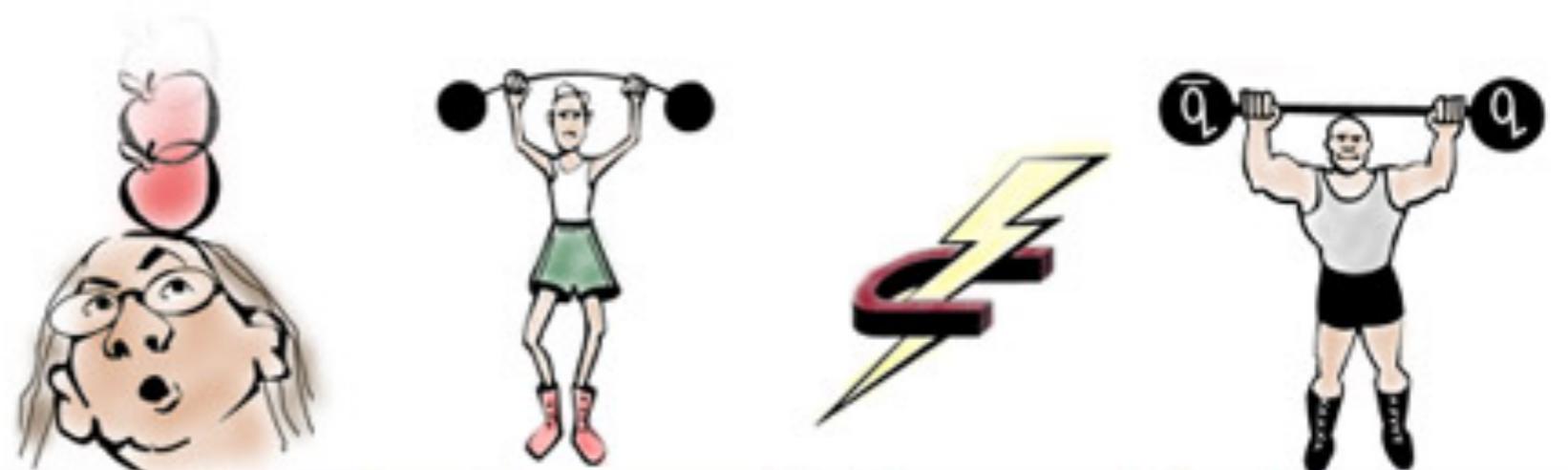


Пятая сила - обмен
Хиггсовским бозоном



Сила – это результат
взаимодействия между частицами
путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных
взаимодействий в природе

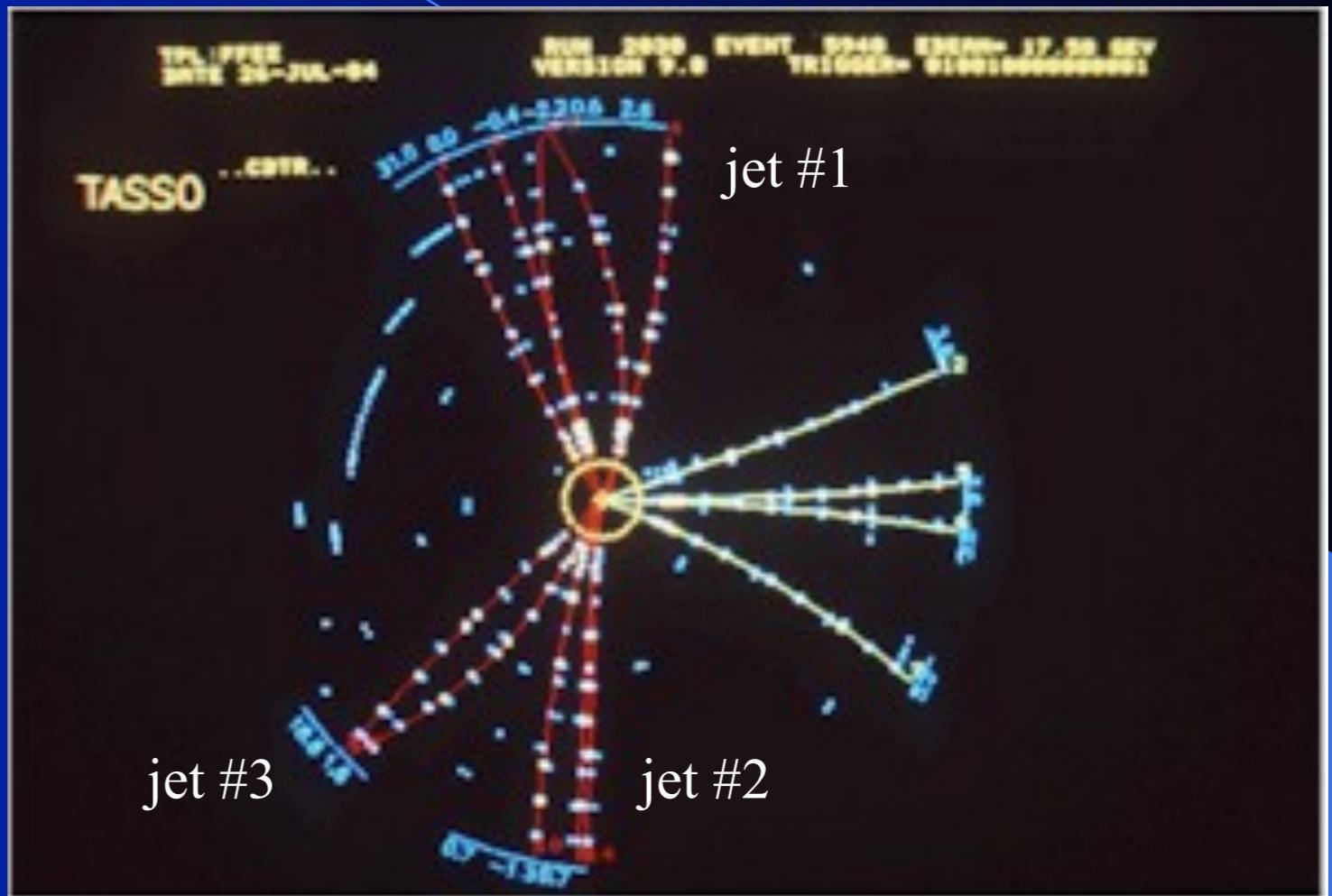


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons



Открытие глюона

- Глюон – переносчик сильных взаимодействий был открыт в 1979 году на ускорителе PETRA (DESY)
- Свидетельством открытия глюона явились наличие трёх-струйного события в рассеянии адронов



$$g_{ij}^a$$

$$a = 1, \dots, 8$$

$i, j = 1, 2, 3$ ← «цвет»

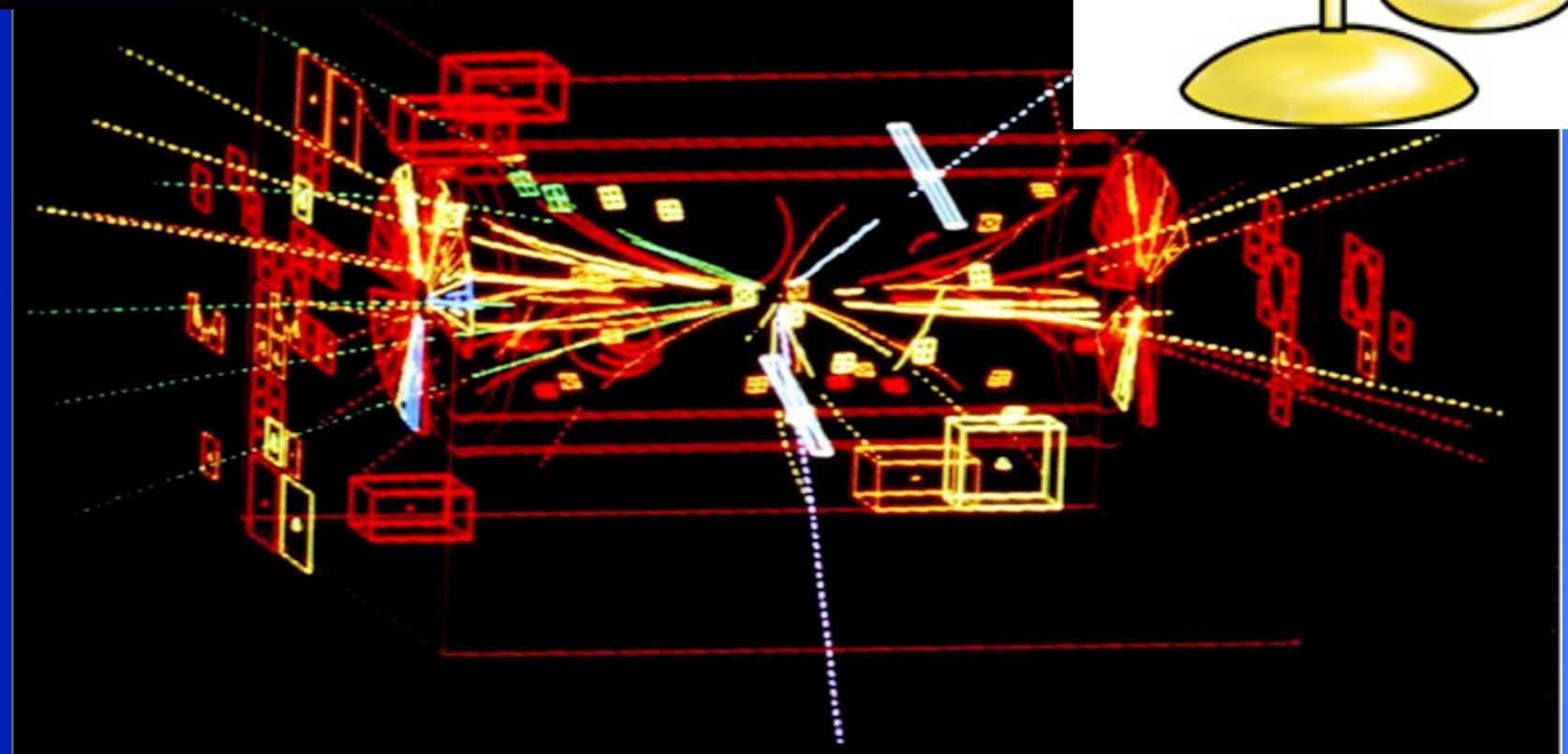
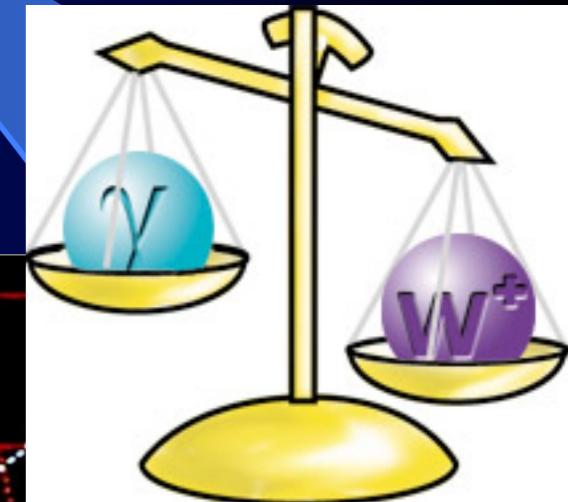
Color	Quarks
Red	Green
Anti-Color	Anti-Quarks
Blue	Anti-Blue

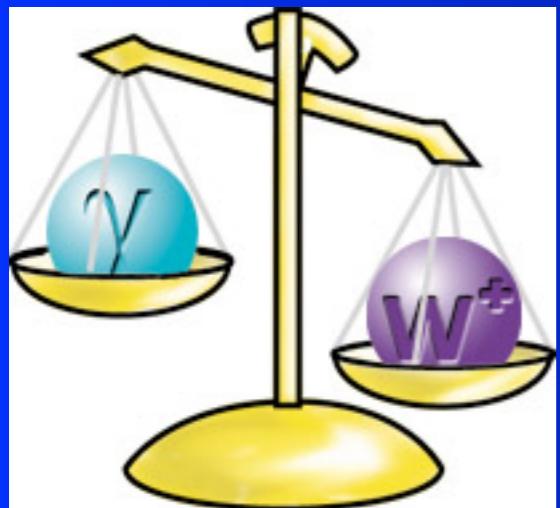
Открытие W и Z бозонов



явилось триумфом
Стандартной модели
фундаментальных
взаимодействий

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





ХИГСОВСКИЙ БОЗОН

Поле Браута-Энглера-Хигgsа

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

среднее значение поля

Массы элементарных частиц
в Стандартной Модели

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

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

$$m_W = g \cdot v$$

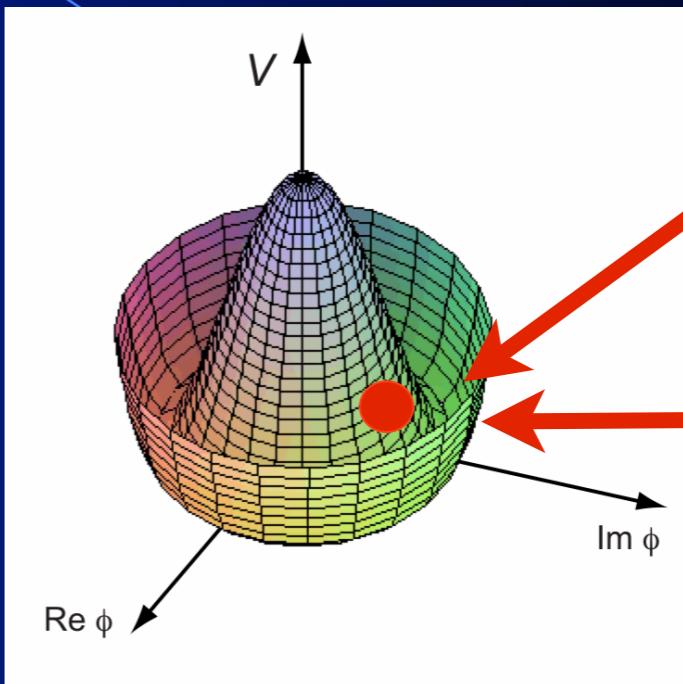
$$m_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \cdot v$$

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

$$m_\gamma = 0$$

$$m_{gluon} = 0$$

Потенциал



Основное
состояние

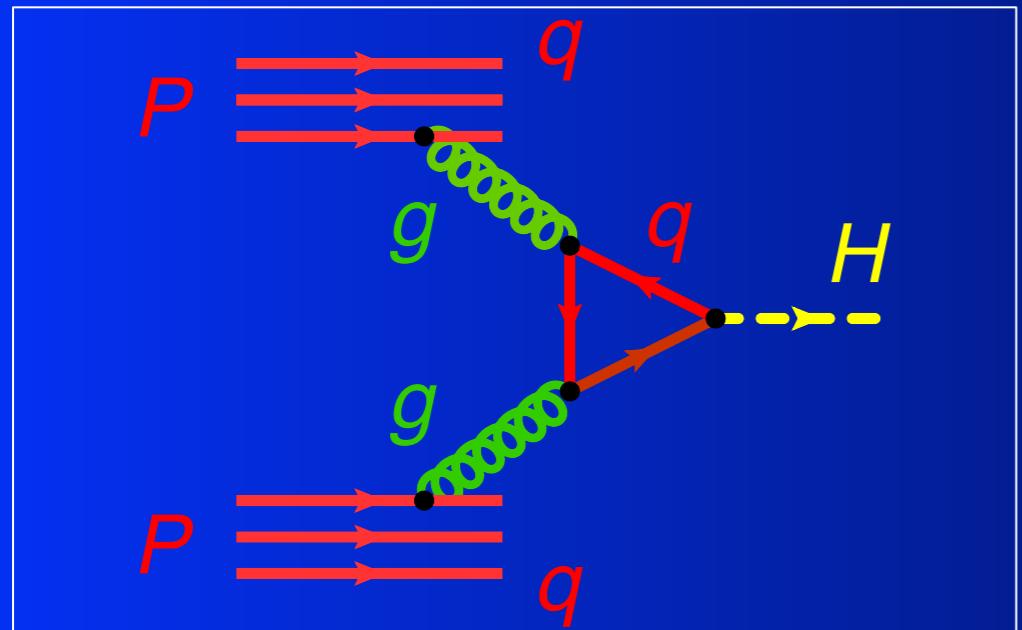
Спонтанное
нарушение
симметрии

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

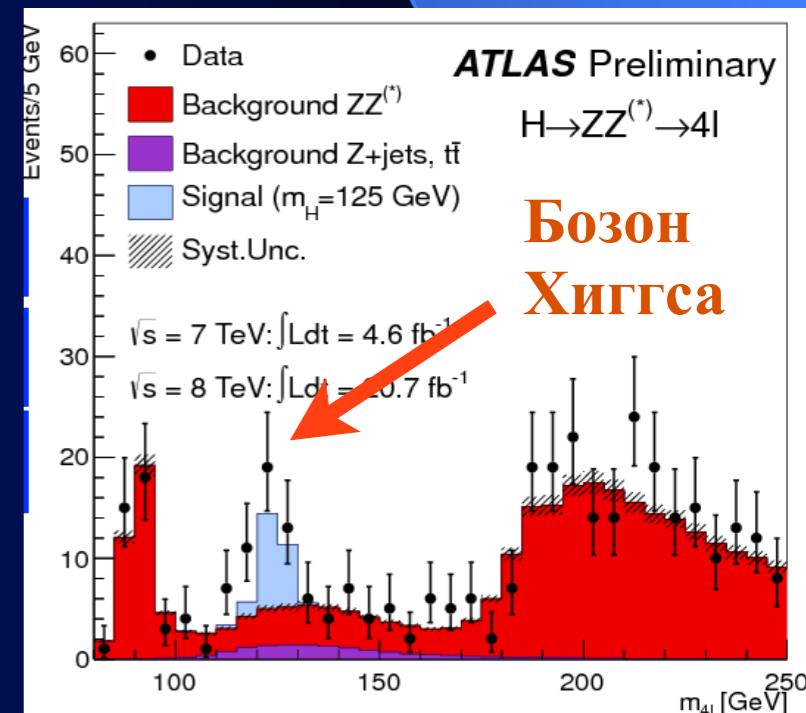
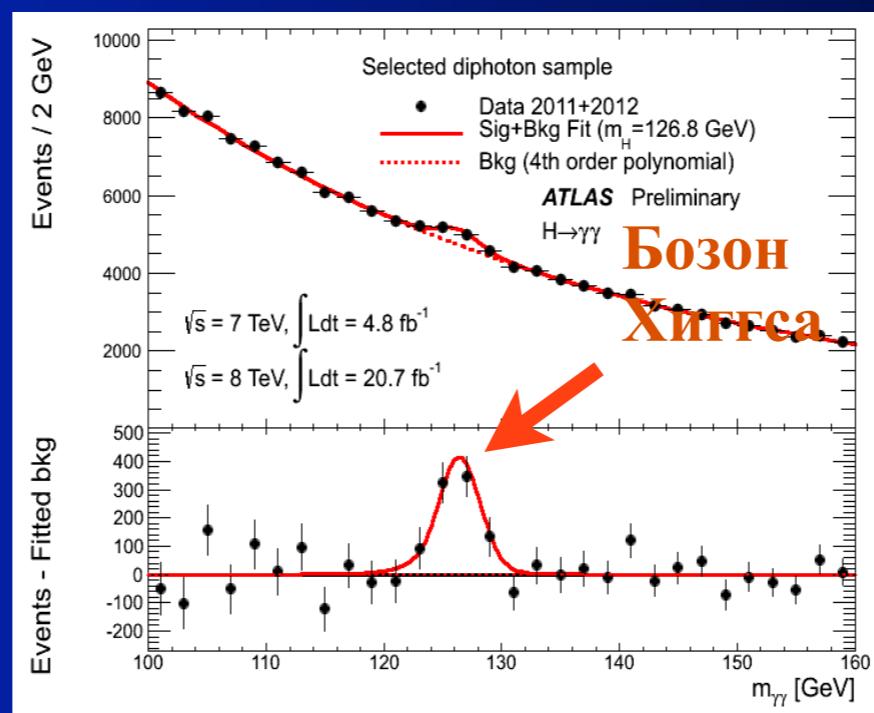
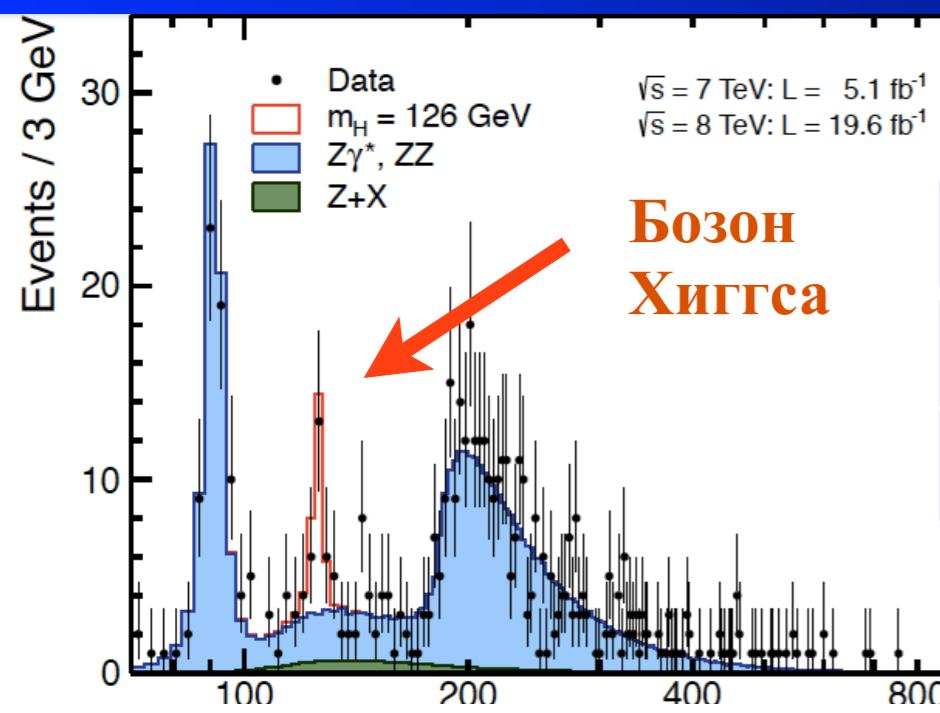
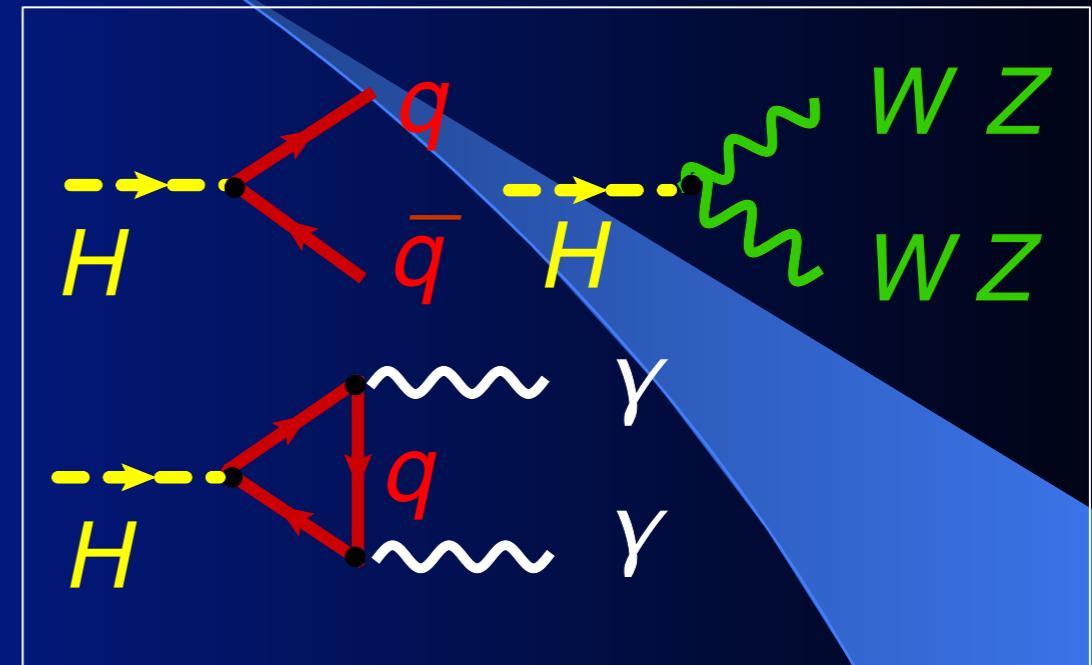
Открытие Хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

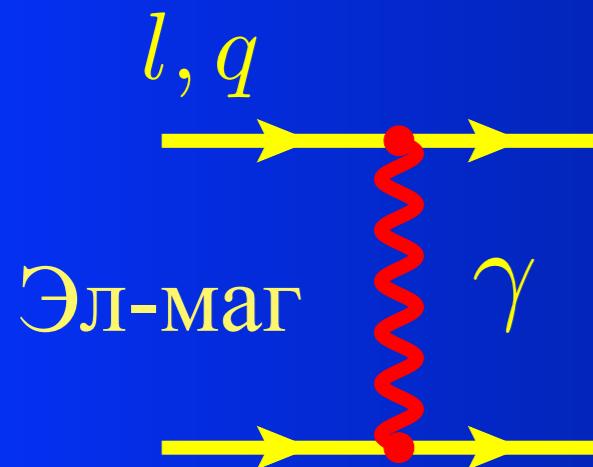
Рождение на протонном коллайдере



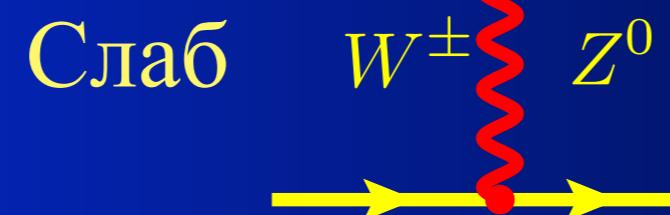
Процессы распада



Пять фундаментальных сил Природы



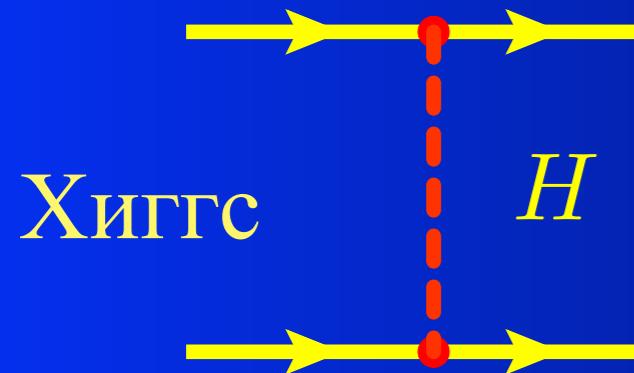
$$V(r) = -\frac{e_1 e_2}{r}$$



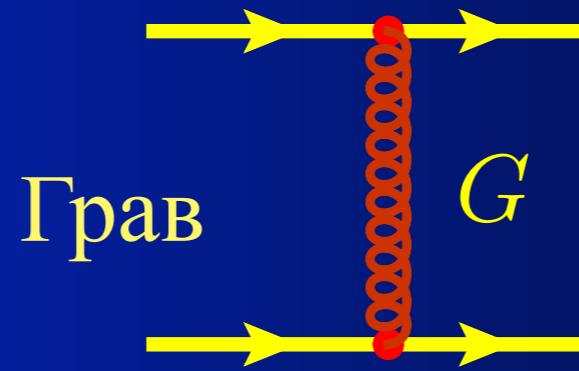
$$V(r) = -\frac{g^2}{r} e^{-M_W r}$$



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



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



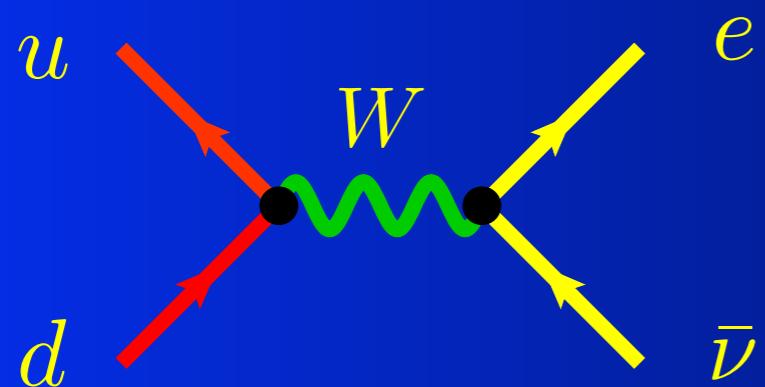
$$V(r) = -\frac{m_1 m_2}{M_{PL}^2 r}$$

Спин

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

Нейтрино-загадочная частица

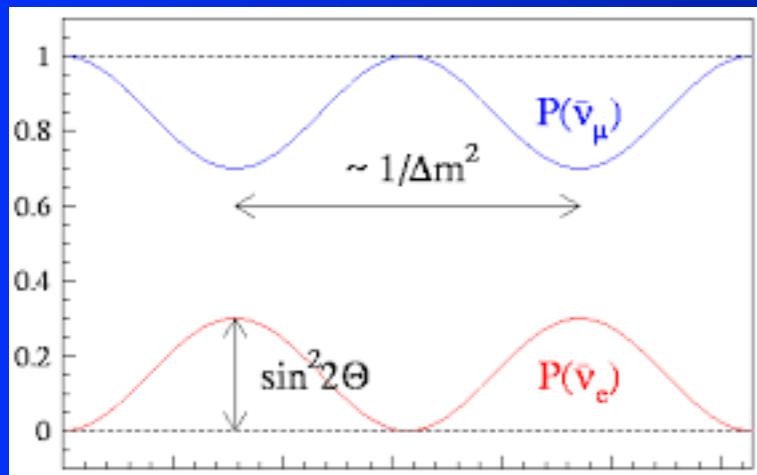
Нейтрино рождаются в процессах слабого распада адронов



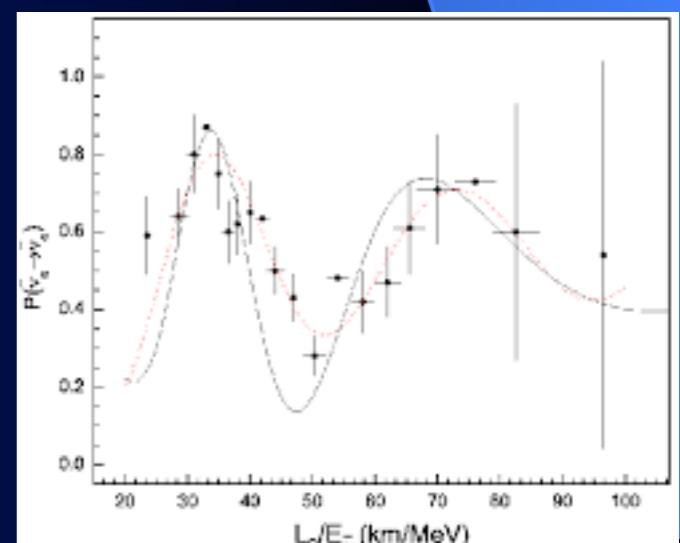
Нейтрино

- не имеют электрического заряда
- не участвуют в эл-маг вз-иях
- не участвуют в сильных вз-иях
- участвуют в слабых вз-иях
- возможно взаимодействуют с полем Хиггса
- имею 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



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



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

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

β-распад

Троицк-Майнц

KATRIN

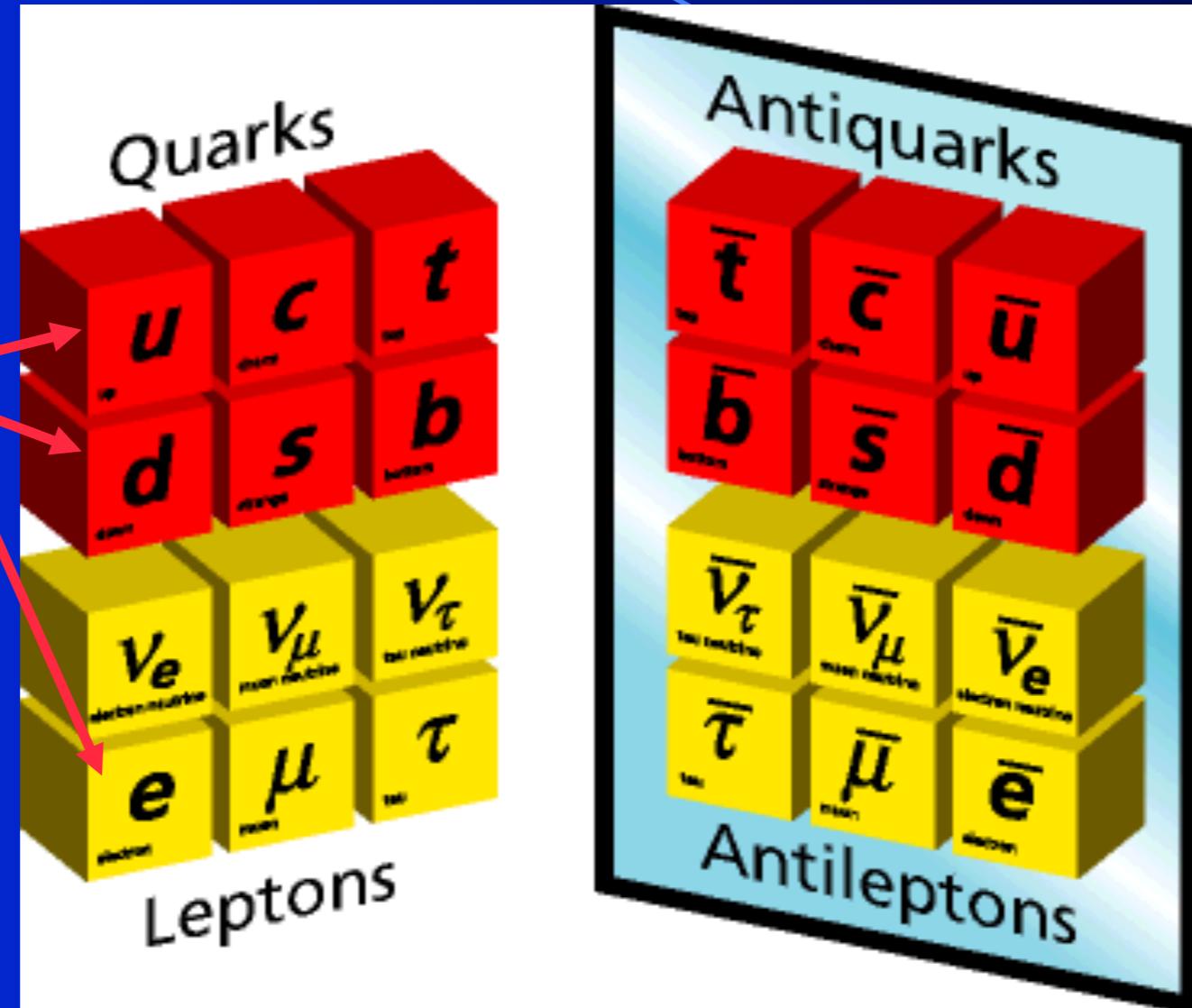
Нейтринные
осцилляции

Спектр
реликтового
микроволнового
фона

Planck

Материя и Антиматерия

Первое поколение - это то из чего мы состоим



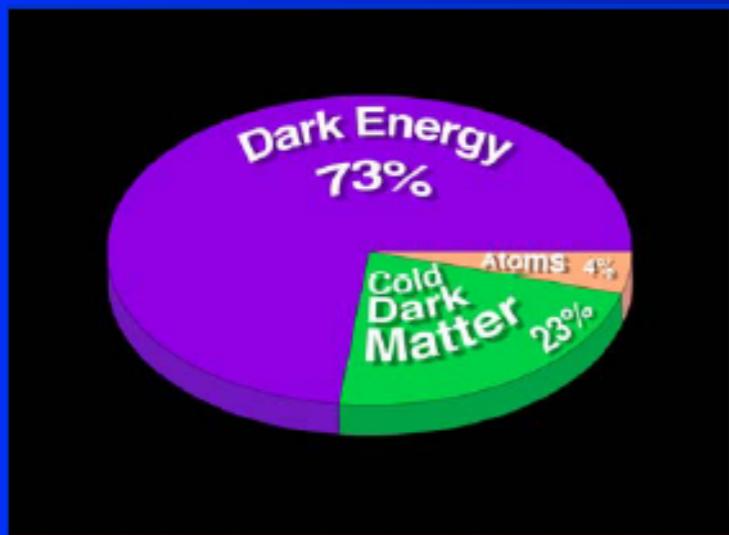
Антиматерия родилась вместе с материей во время «Большого взрыва»

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

Задача № 2:

*Как объяснить отсутствие
антиматерии во Вселенной?*

Тёмная материя



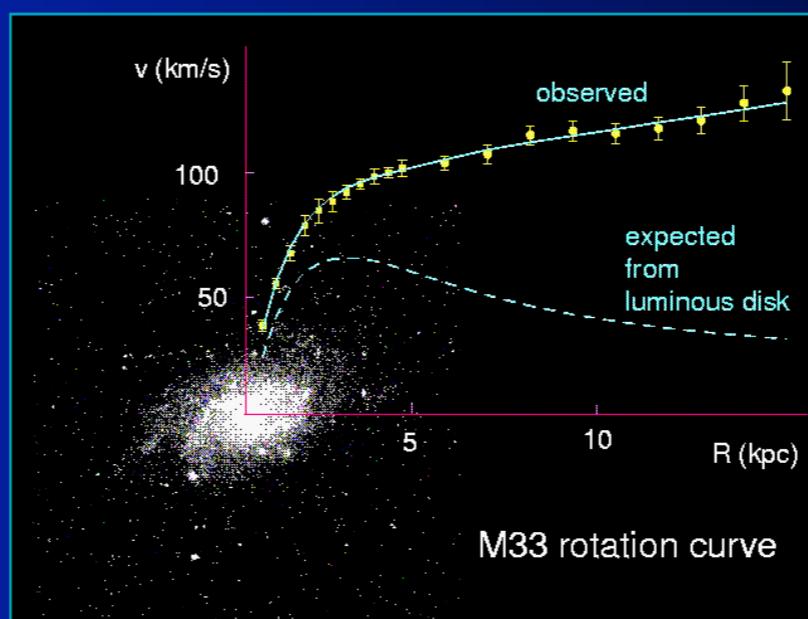
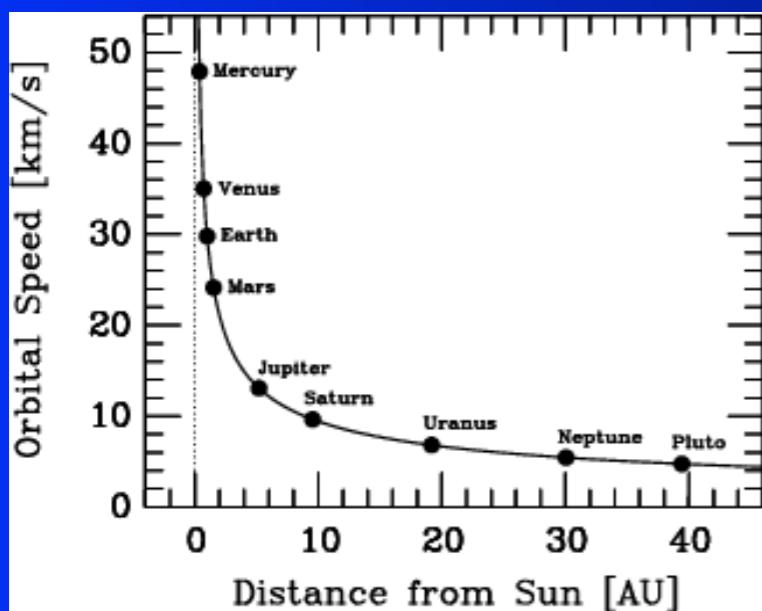
HEAVY ELEMENTS	0.03 %
MASSIVE NEUTRINOS	0.3 %
STARS	0.5 %
H AND He	4 %
DARK MATTER	23 %
DARK ENERGY	72 %

Температурные флуктуации микроволнового фона
Взрывы сверхновых

центростремительная сила

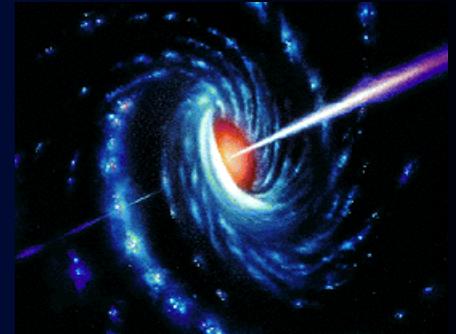
$$\frac{mv^2}{r} = G \frac{mM(r)}{r^2}$$

гравитация



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

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



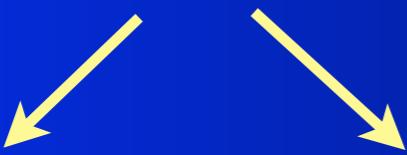
Задача № 3:

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

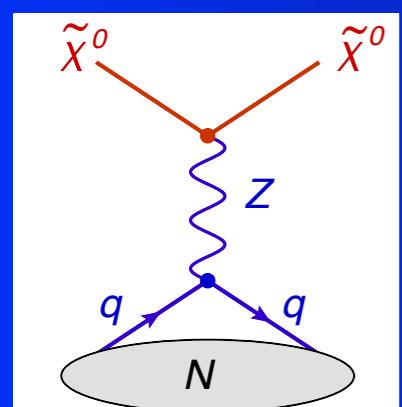
Что есть тёмная материя?



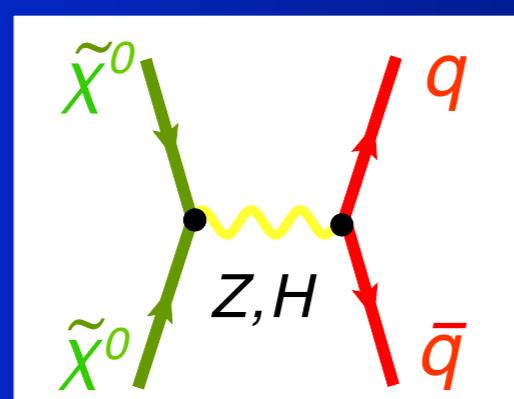
Поиск частиц тёмной материи



Прямое вз-е
с веществом



Аннигиляция -> новая
компоненты в космических
лучах



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

Тёмная материя сделана из:

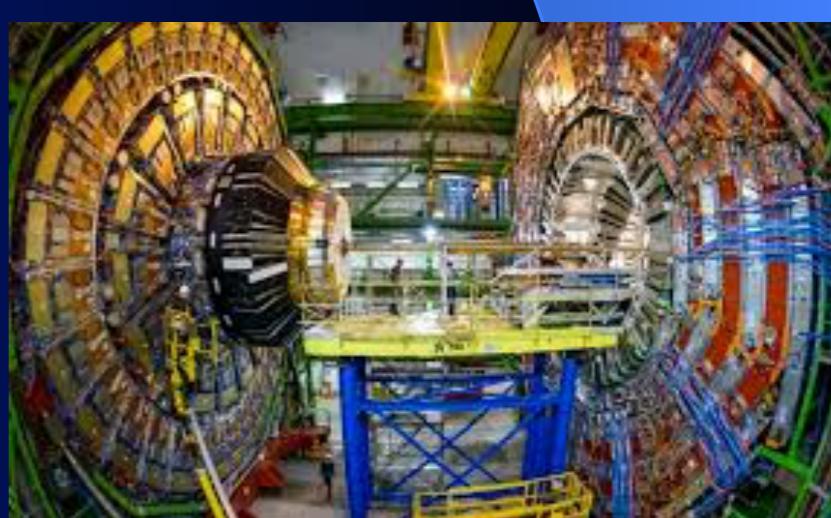
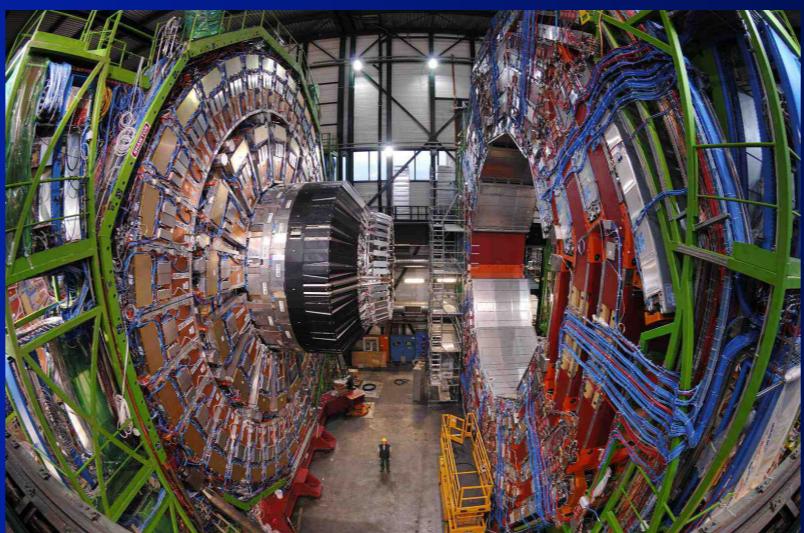
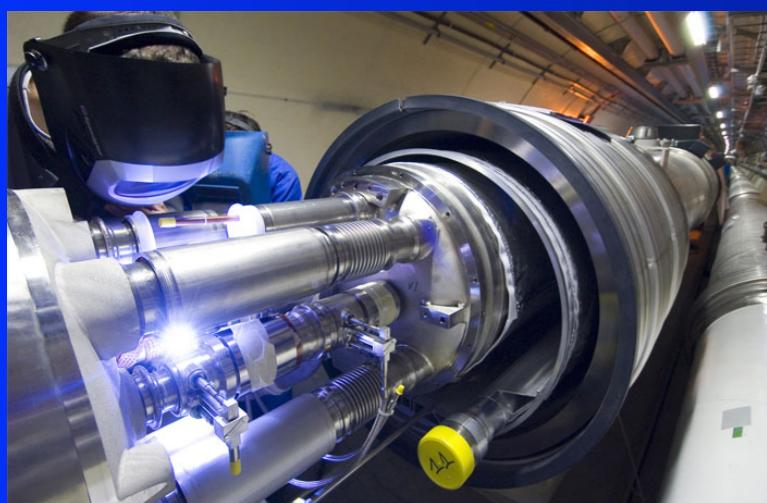
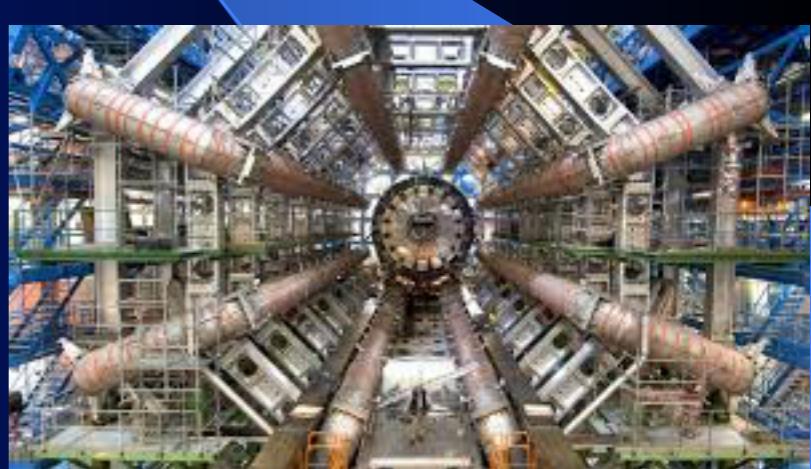
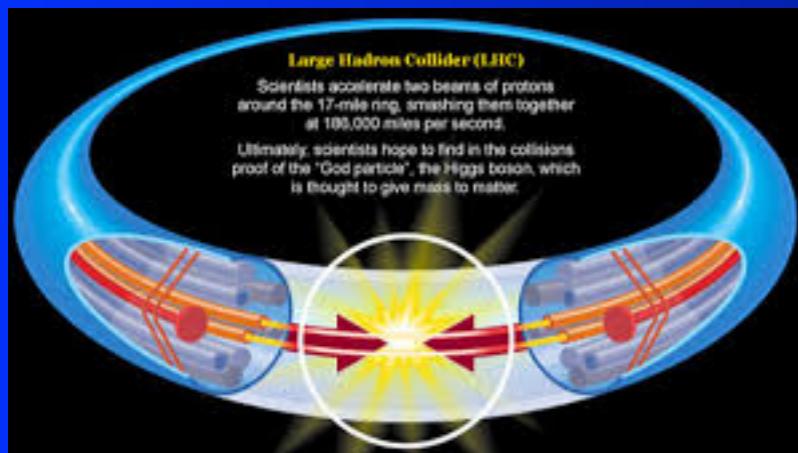
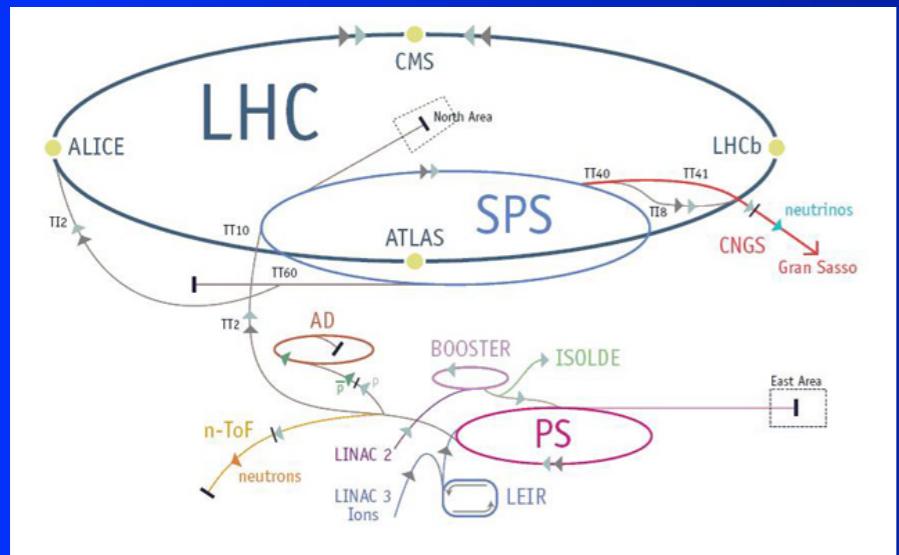
- Макро объектов - не наблюдаются
- Новых нейтральных частиц
 - правые нейтрино
 - нейтралино
 - снейтрино
 - аксион (аксино)
 - гравитино
 - тяжёлый фотон
 - лёгкий стерильный хиггс

?

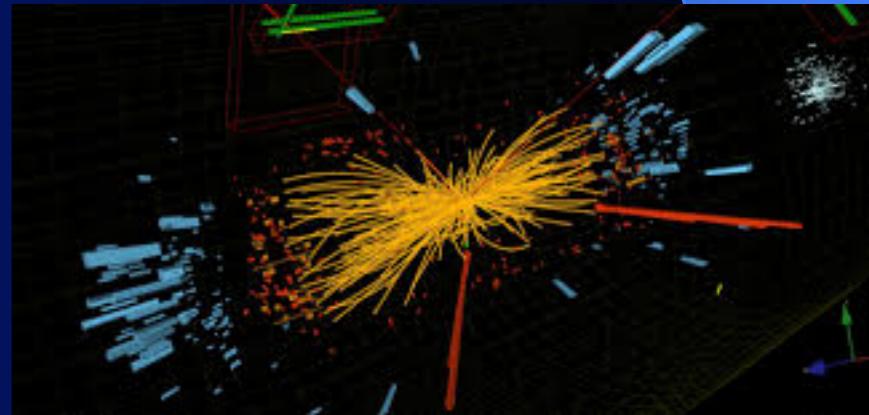
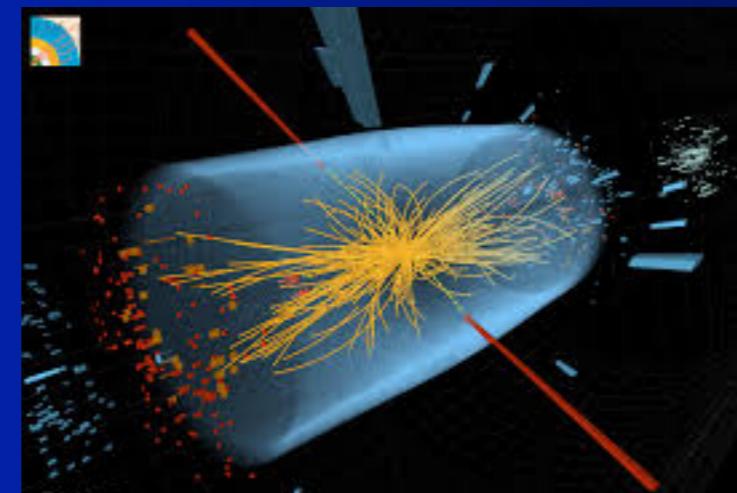
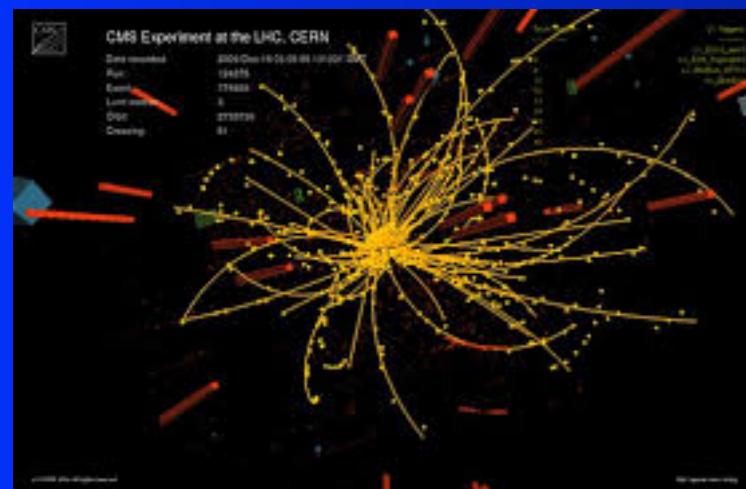
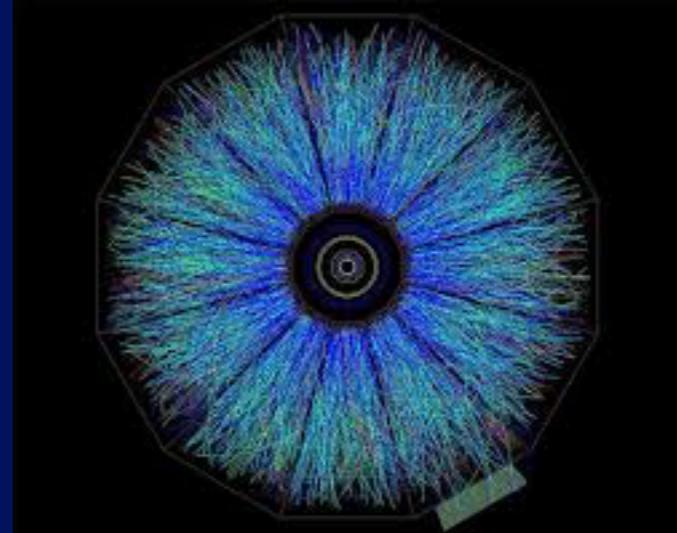
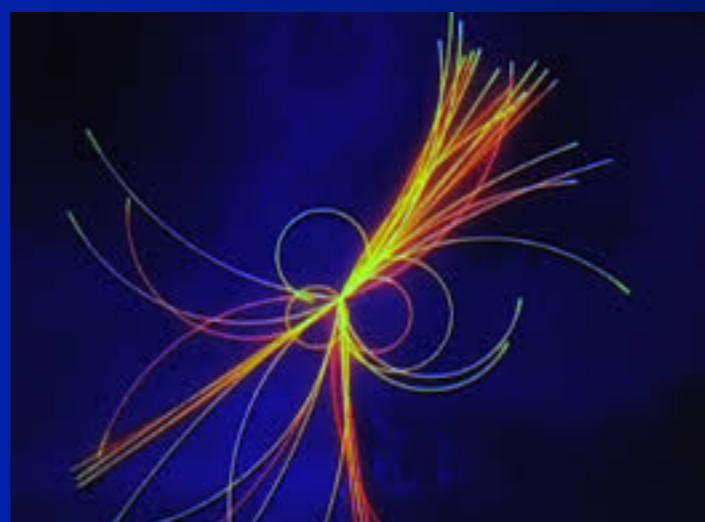
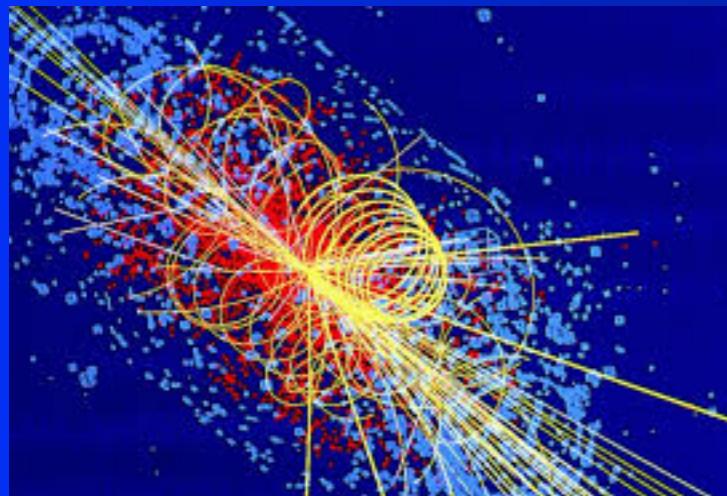
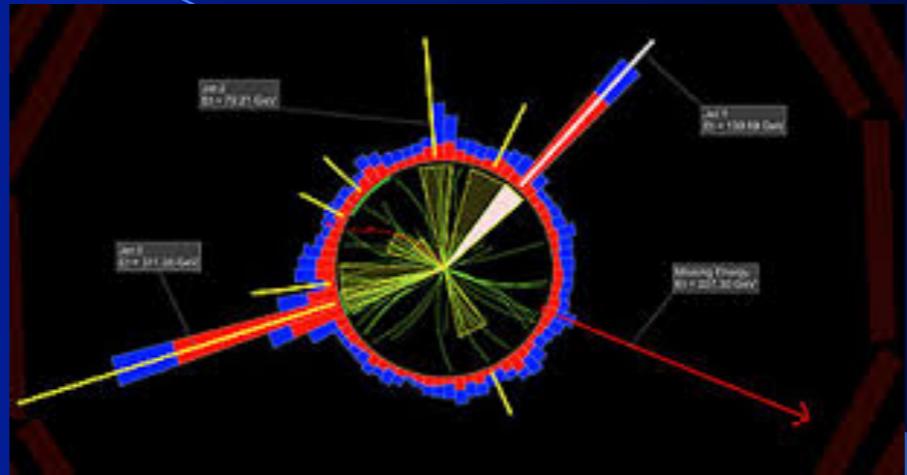
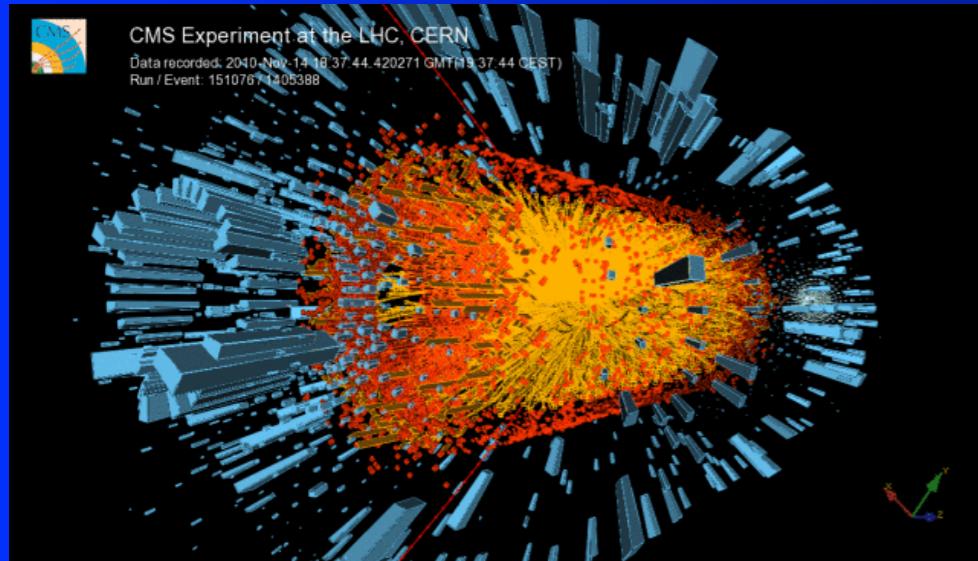
Сигнал пока отсутствует

Большой адронный коллайдер

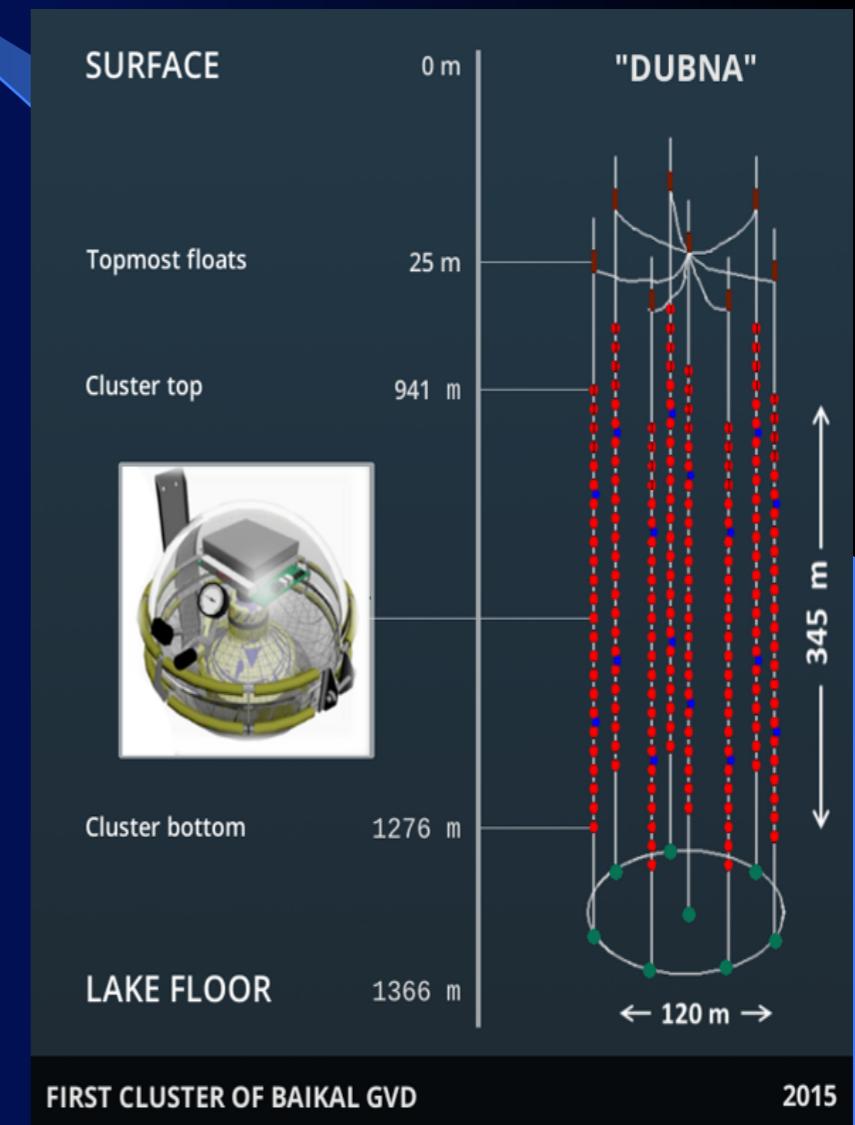
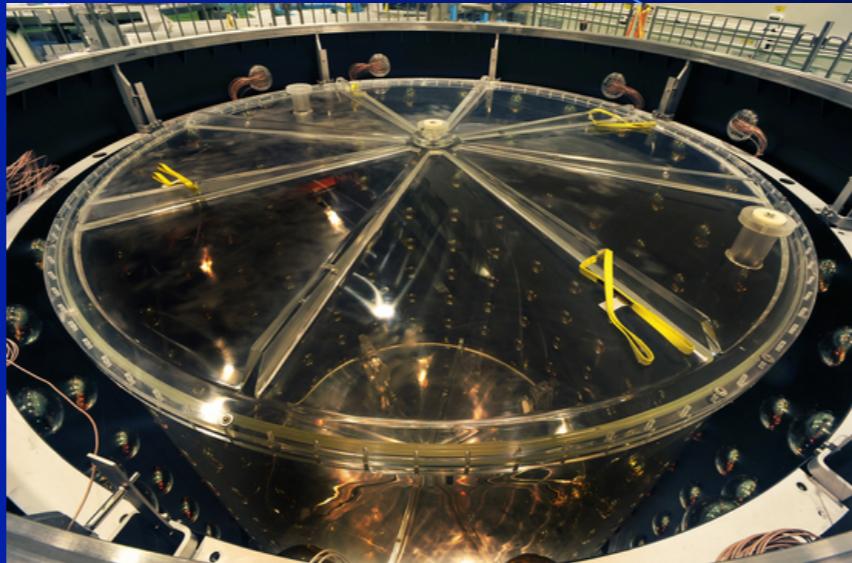
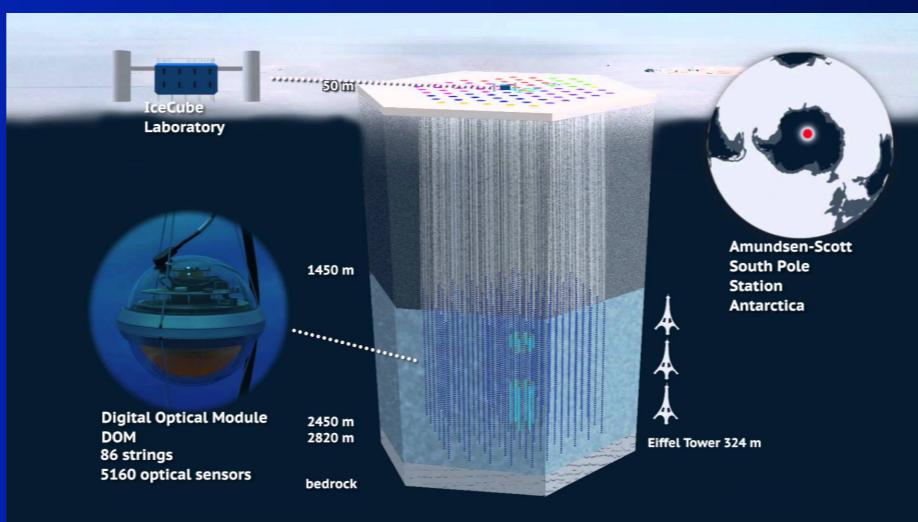
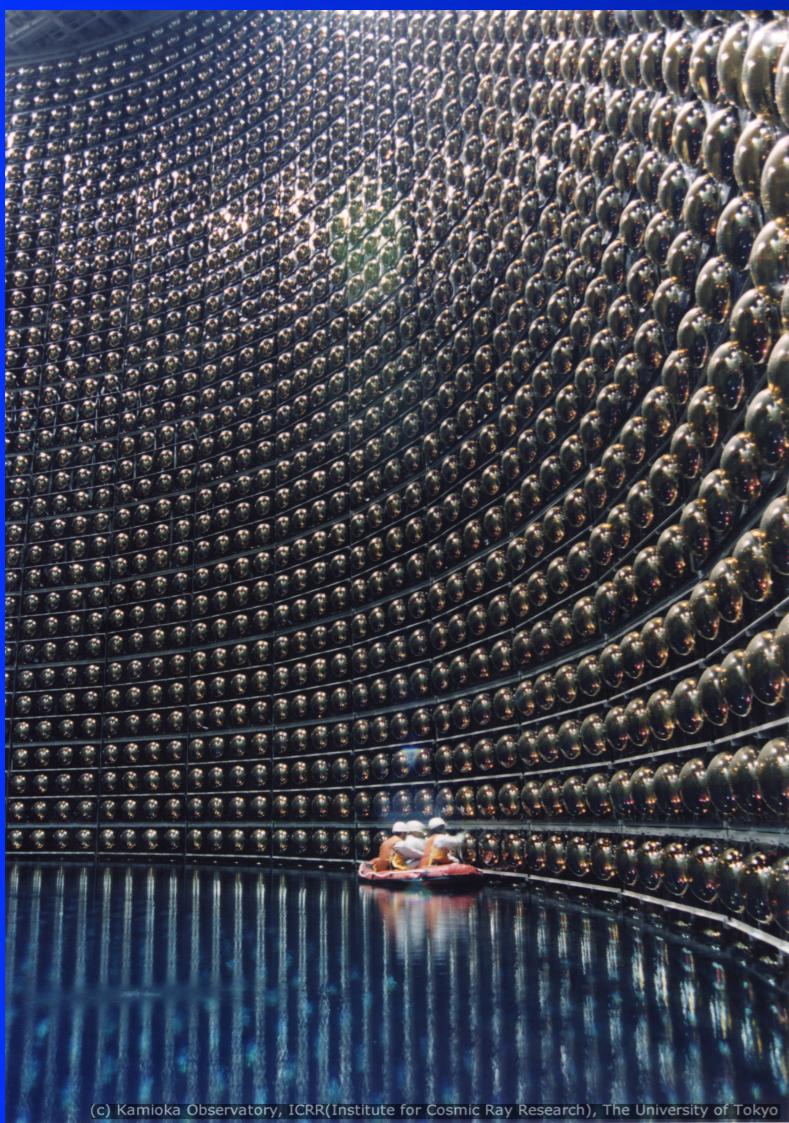
Большой адронный коллайдер ЦЕРН 2009- 14 000 ГэВ



Большой адронный коллайдер



Подземные эксперименты



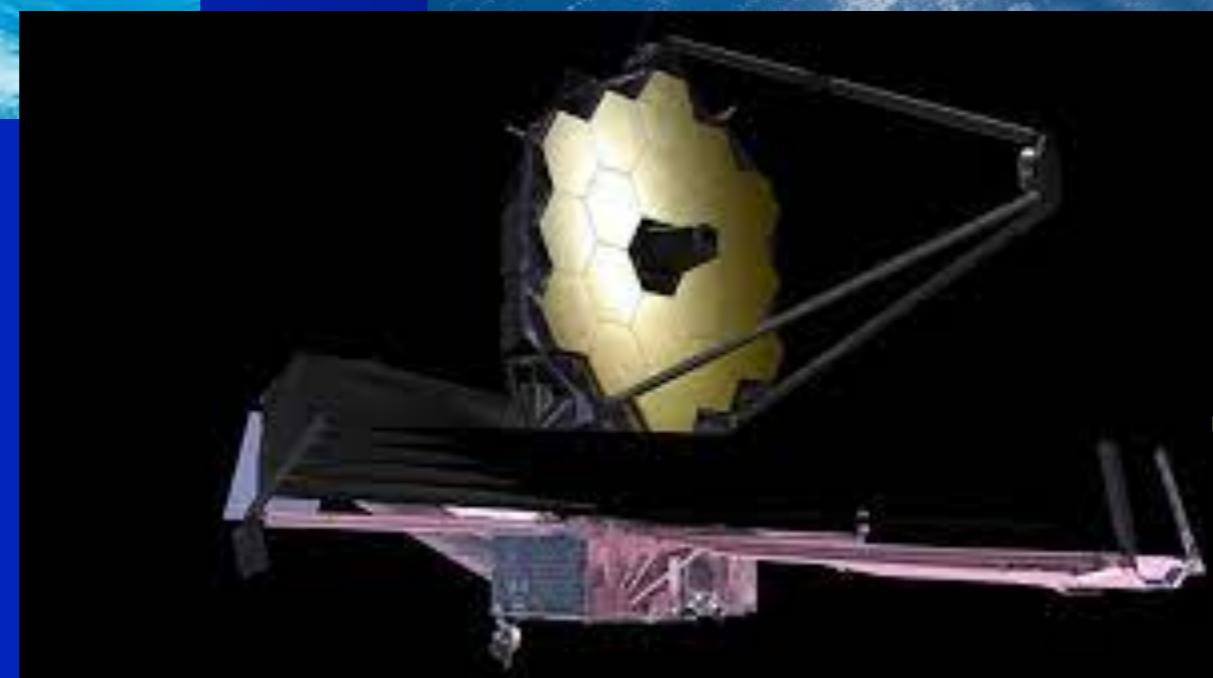
Космические эксперименты



Хаббл Телескоп



Международная
космическая станция



Джеймс Вебб
Телескоп



Что ждёт нас за пределами Стандартной Модели? СМ

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