



Тайны Физики Микромира

Дмитрий Казаков

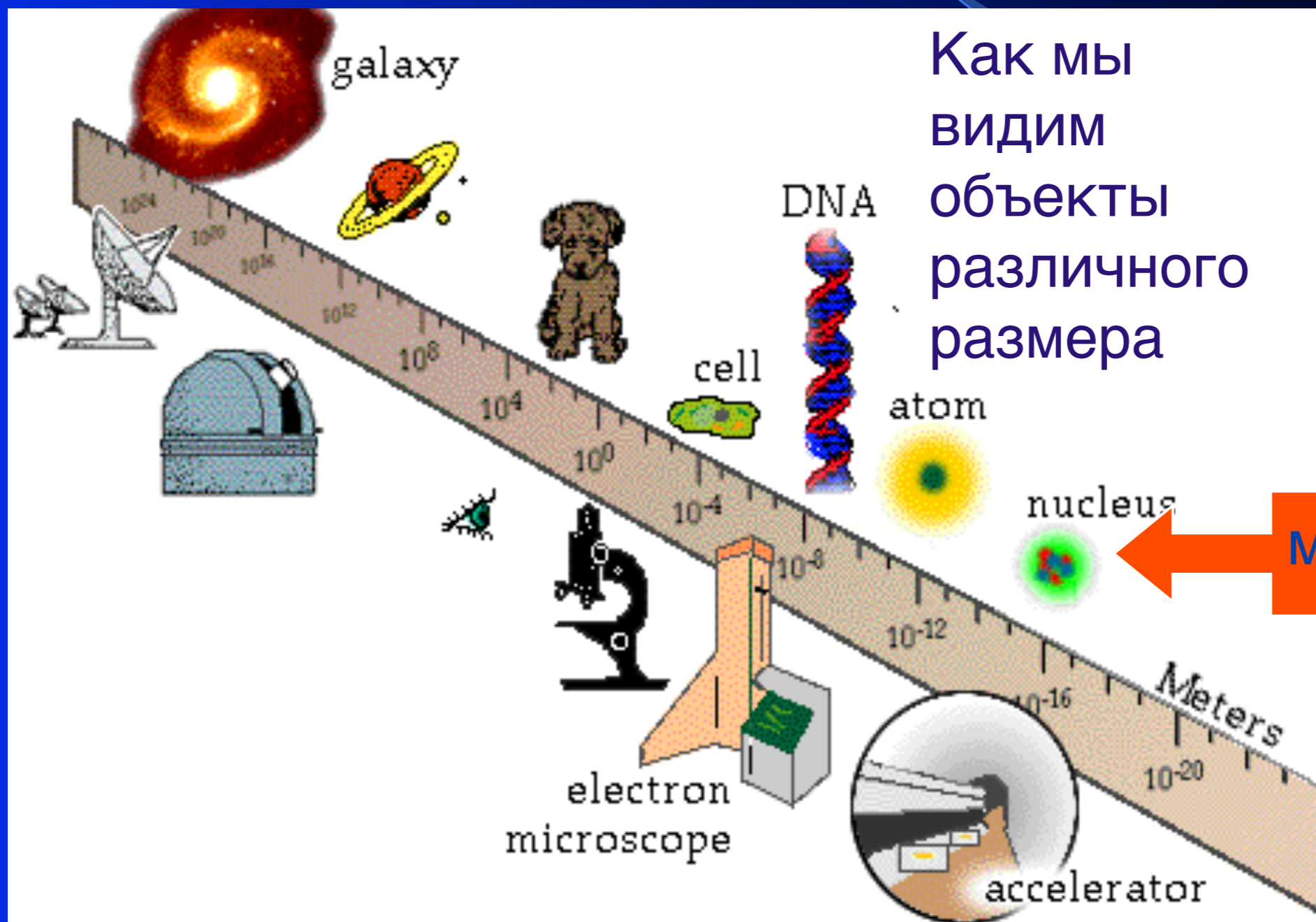
Лаборатория Теоретической физики

Объединённый институт ядерных исследований



Экспериментаниум
Москва, 15 апреля 2017 года

Макро и микро космос на шкале расстояний

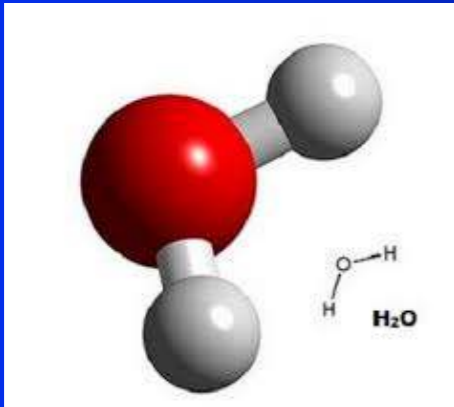


Как мы
ВИДИМ
объекты
различного
размера

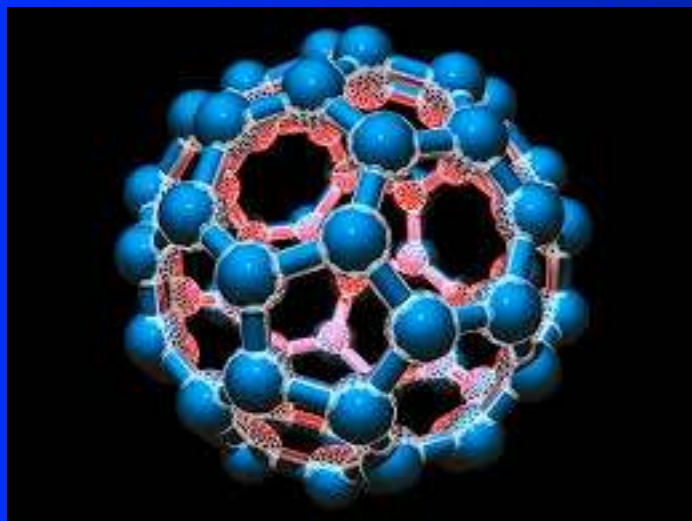
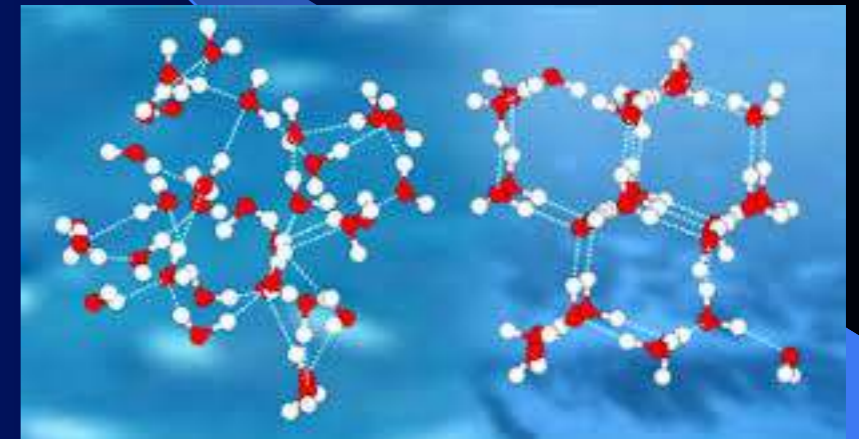
← микромир

Молекулы

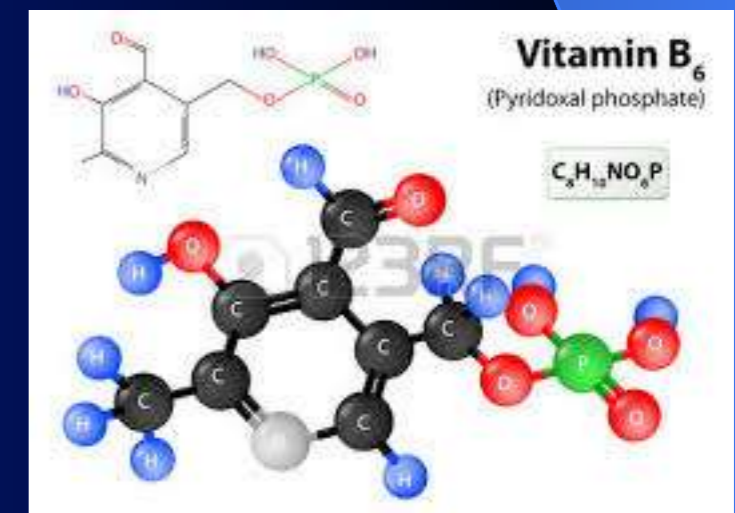
Атомы собираются в молекулы, которые образуют жидкие и газообразные вещества



Простейшая молекула воды

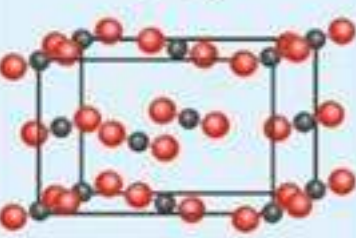





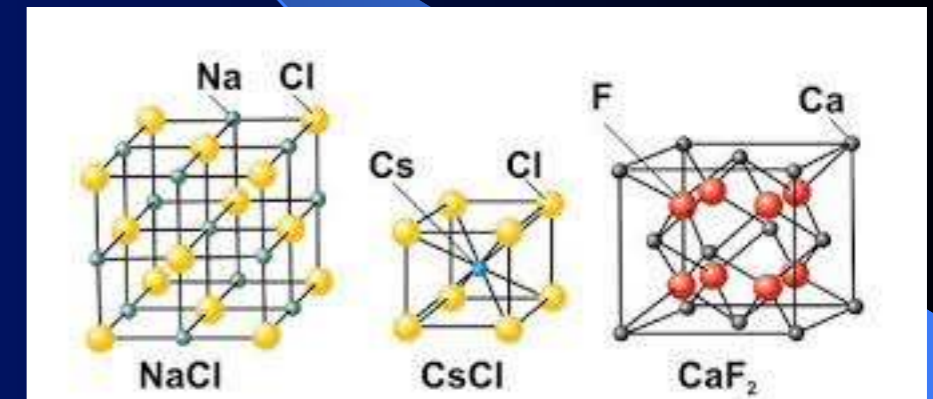
Молекулярная структура определяет химические свойства вещества



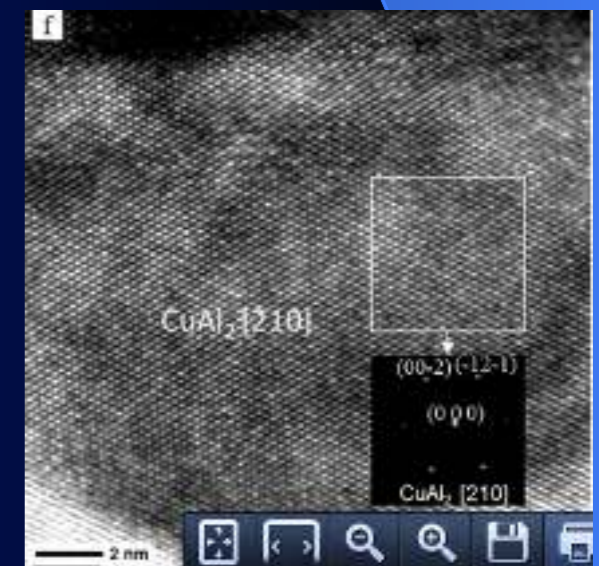
Кристаллы

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

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ CO_2	АТОМНЫЕ C	ИОННЫЕ NaCl	МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ 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

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

1																18									
IA																VIIIA									
1	2															10	11								
H	He															B	C	N	O	F	Ne				
3	4															13	14	15	16	17	18				
Li	Be															Al	Si	P	S	Cl	Ar				
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Na	Mg	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	IIB	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr								
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36								
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr								
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54								
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe								
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86								
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn								
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118								
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og								

Группы элементов
 (I-VII) и (VIII)

Лантаноиды Lanthanides

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

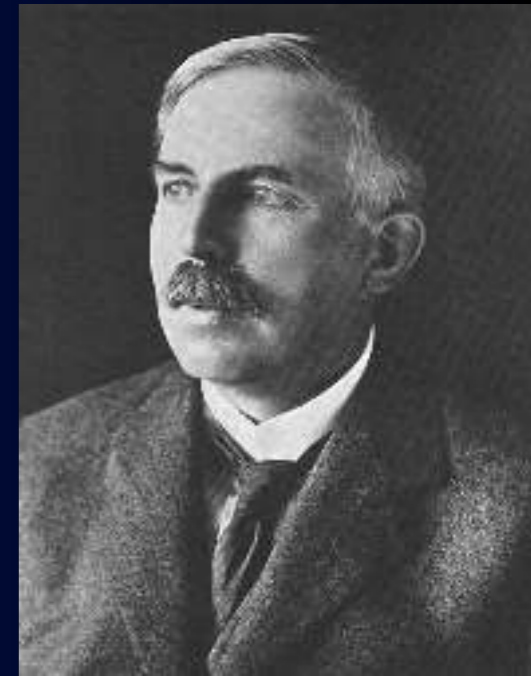
Актиноиды Actinides

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

- Современная таблица элементов (2017)

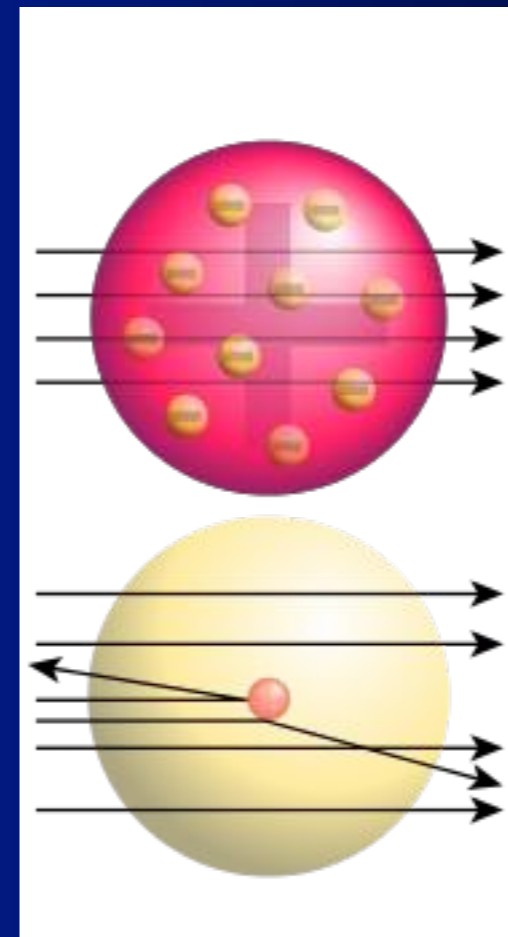
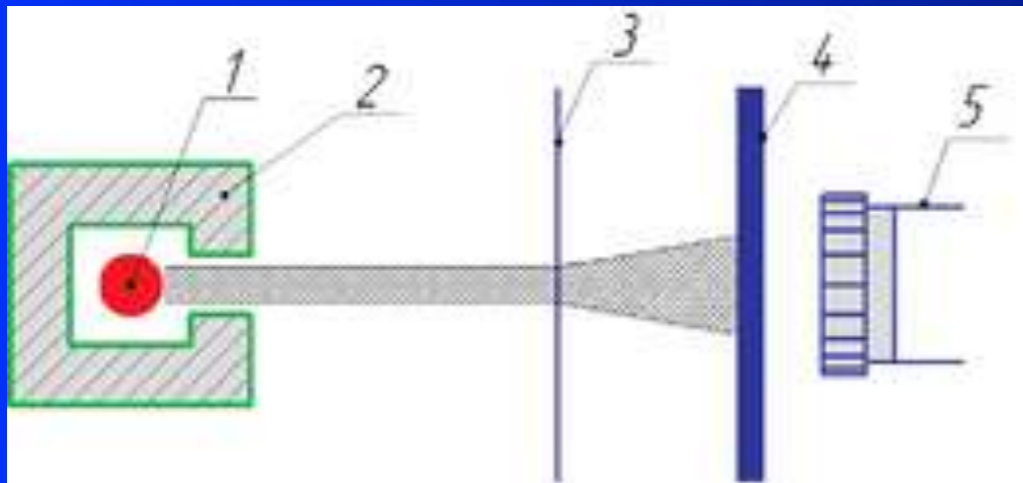


Структура Атома



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

Ожидаемый эффект



Планетарная модель атома Резерфорда

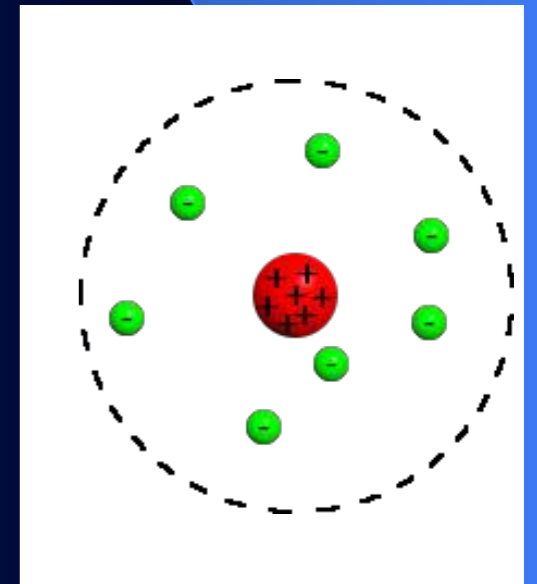
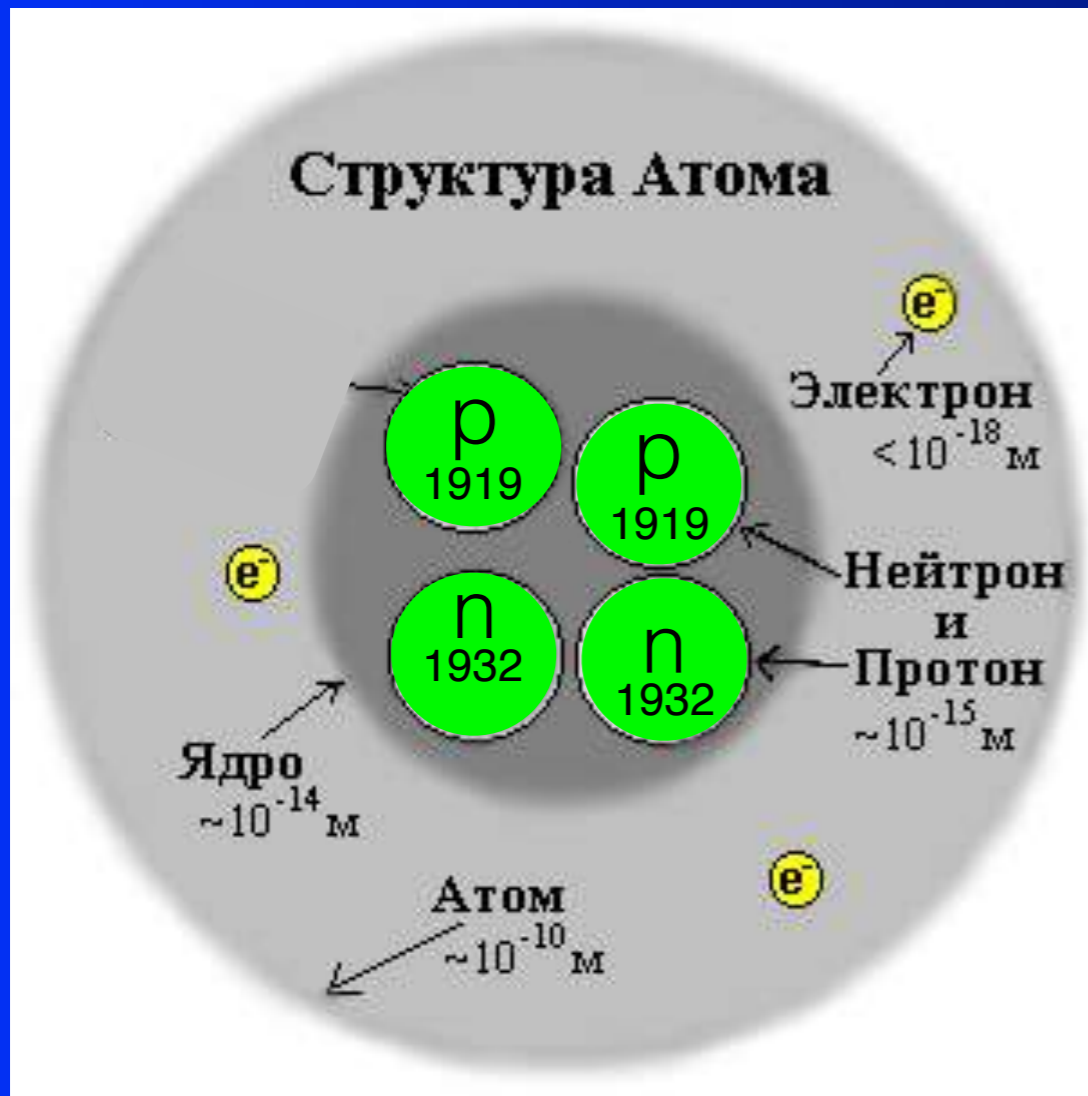
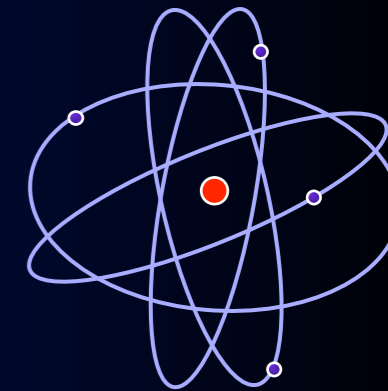


Схема эксперимента Резерфорда

Жесткий отскок

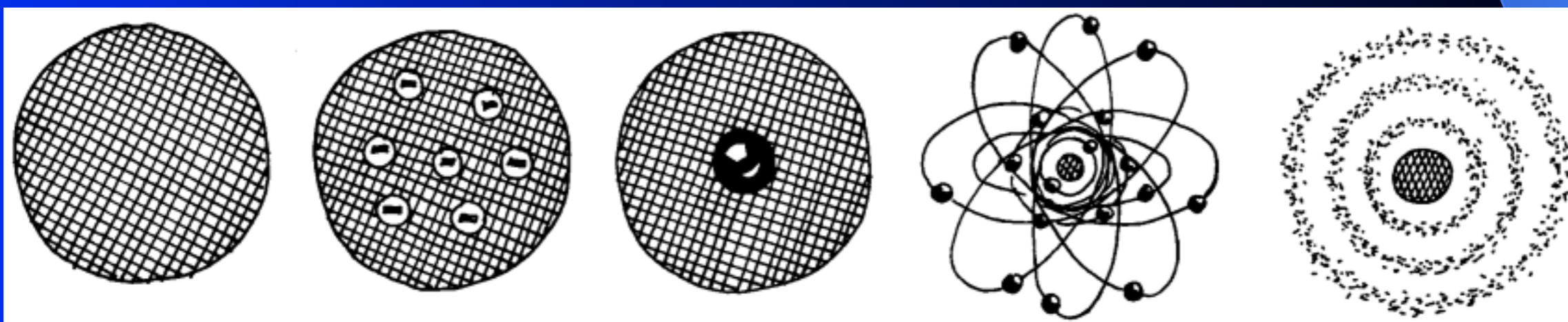
Структура Атома



В центре атома находится плотное ядро имеющее положительный электрический заряд

Оно в 10000 раз меньше размера самого атома

Эволюция в понимании строения атома



Демокрит

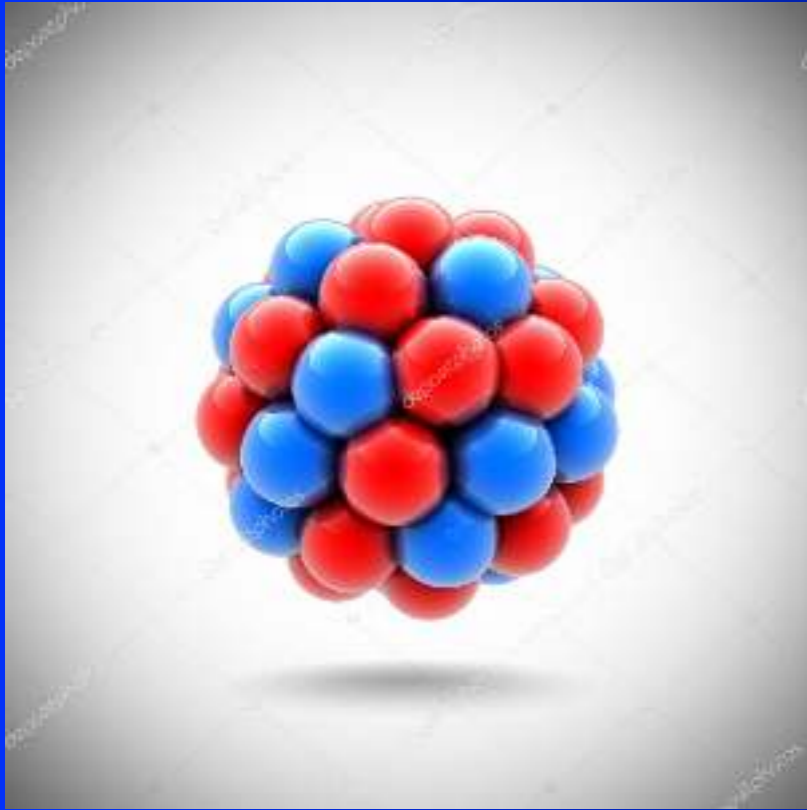
Томпсон

Резерфорд

Бор

Шредингер

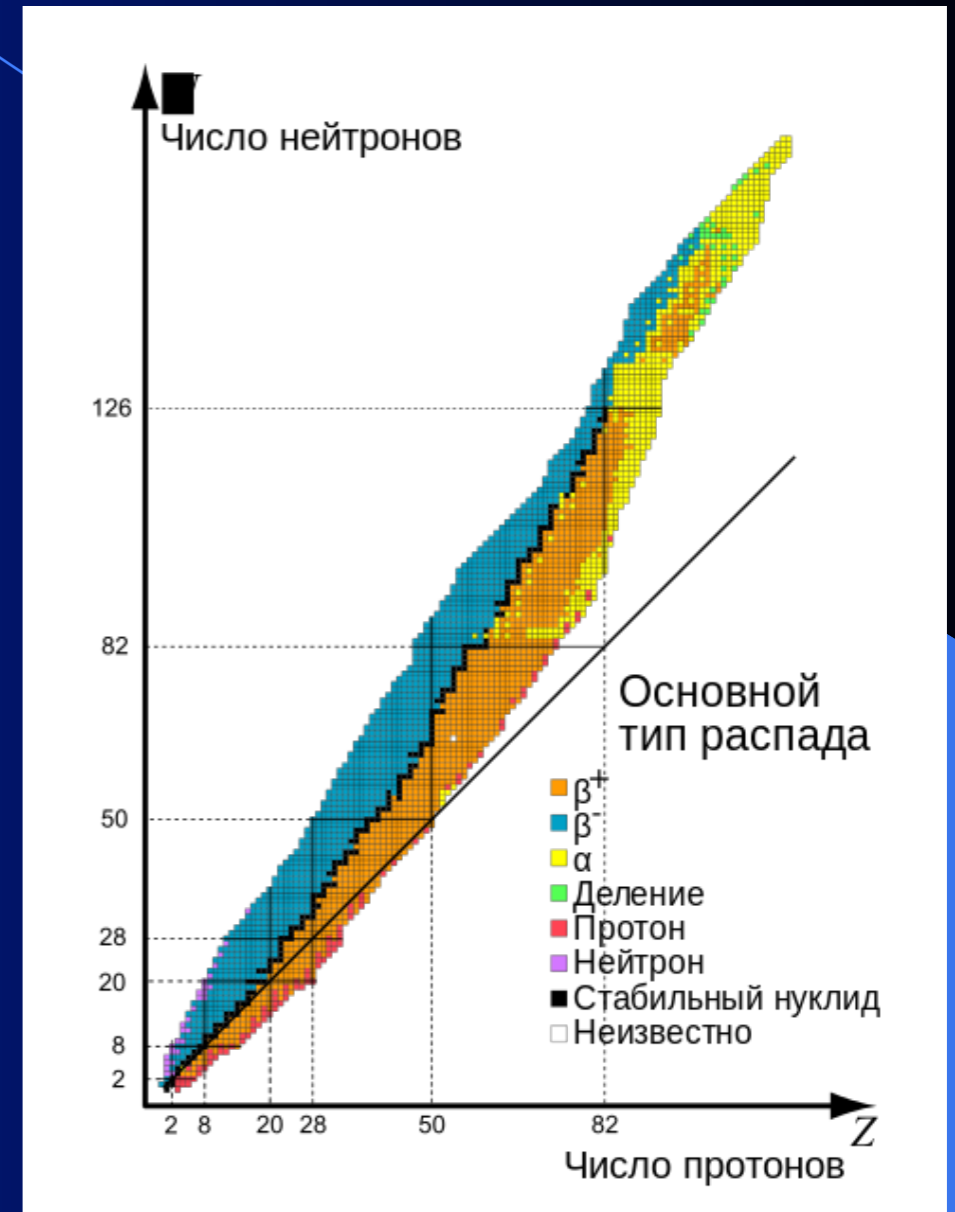
Атомное ядро



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 p^+ стабильная частица

нейтрон n^0 распадается за 9 минут



электрон e^- стабильная частица

нейтрино (маленький нейтрончик)

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

фотон γ квант электромагнитного поля (квант света)

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

Тяжёлый электрон

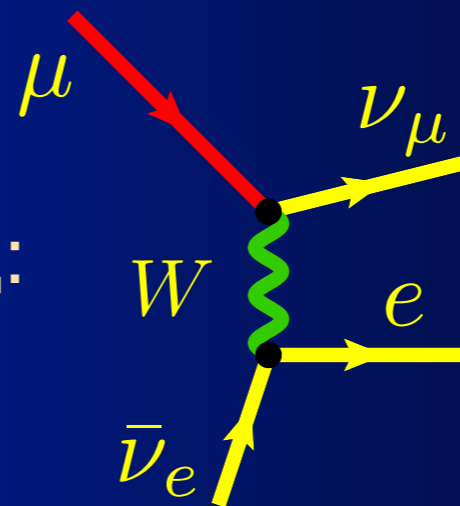
В 1936 году в космических лучах открыт тяжёлый электрон - мюон. Он отличается от электрона только массой, будучи тяжелее электрона в 200 раз!

В свободном состоянии мюон живёт 10^{-6} секунды и распадается на электрон и два нейтрино

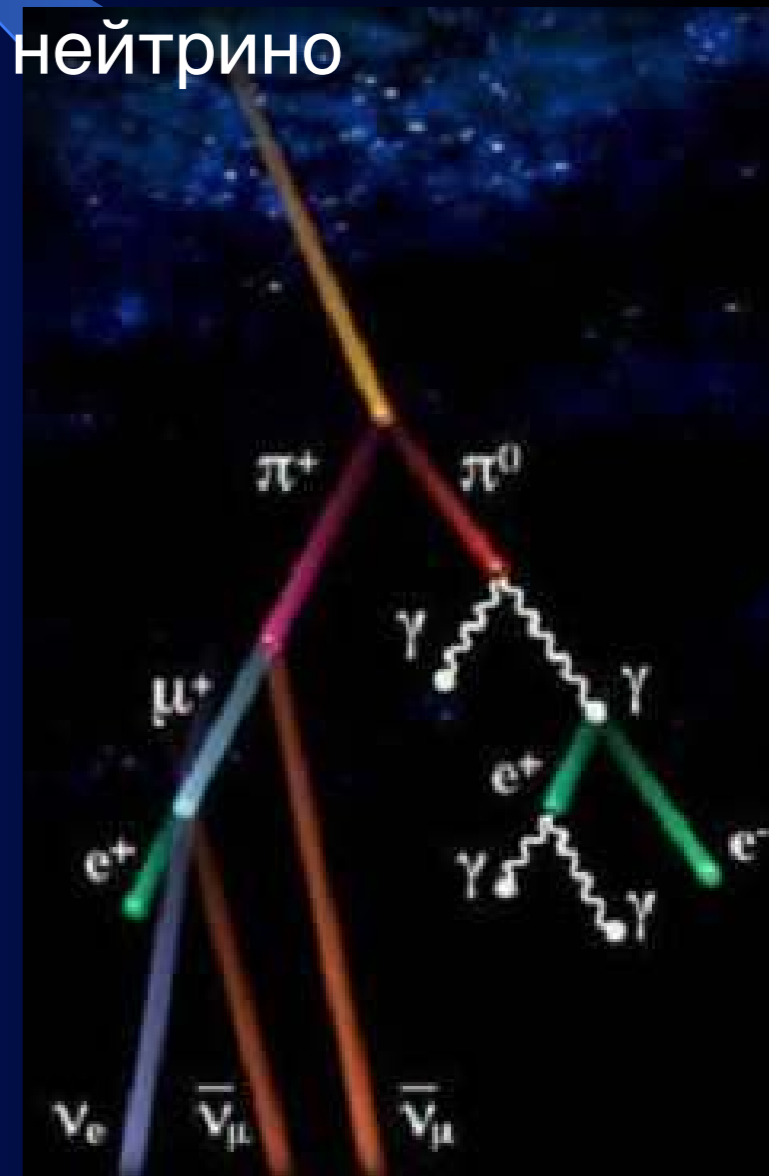
$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Так появились две новые частицы:

Зачем они нужны?



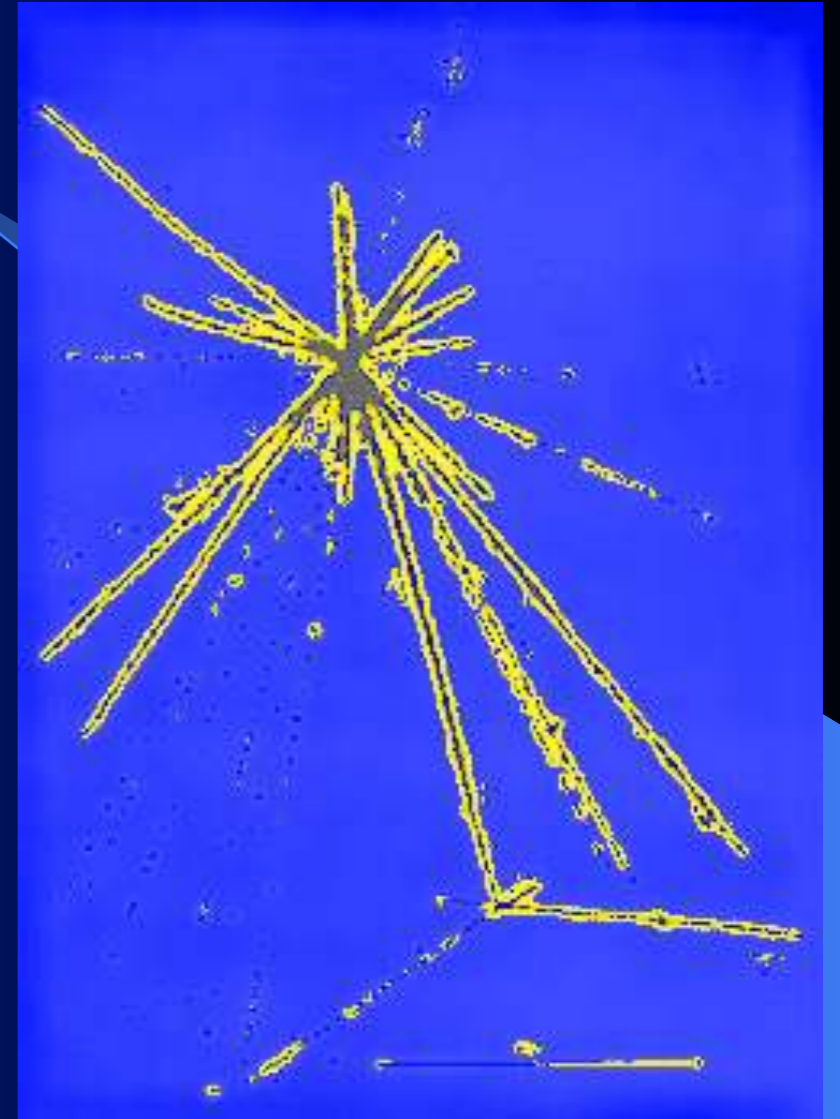
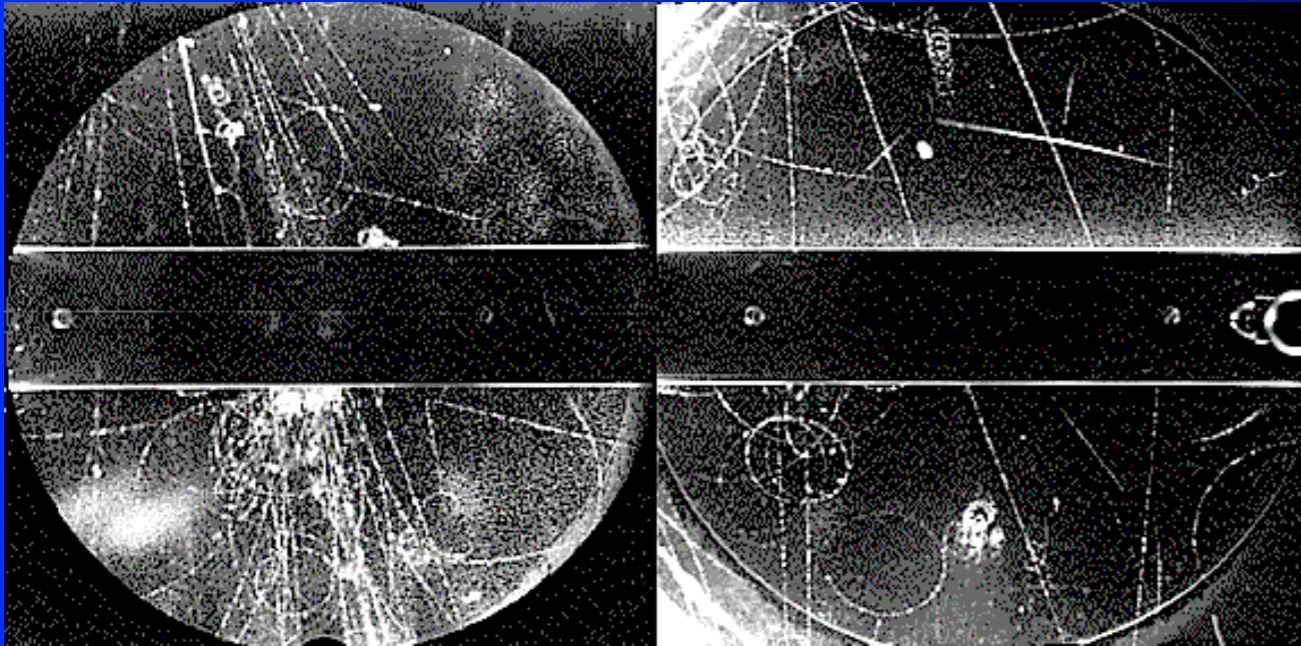
Мюоны рождаются от распада П-мезонов в космических лучах и распадаются на электроны и два нейтрино



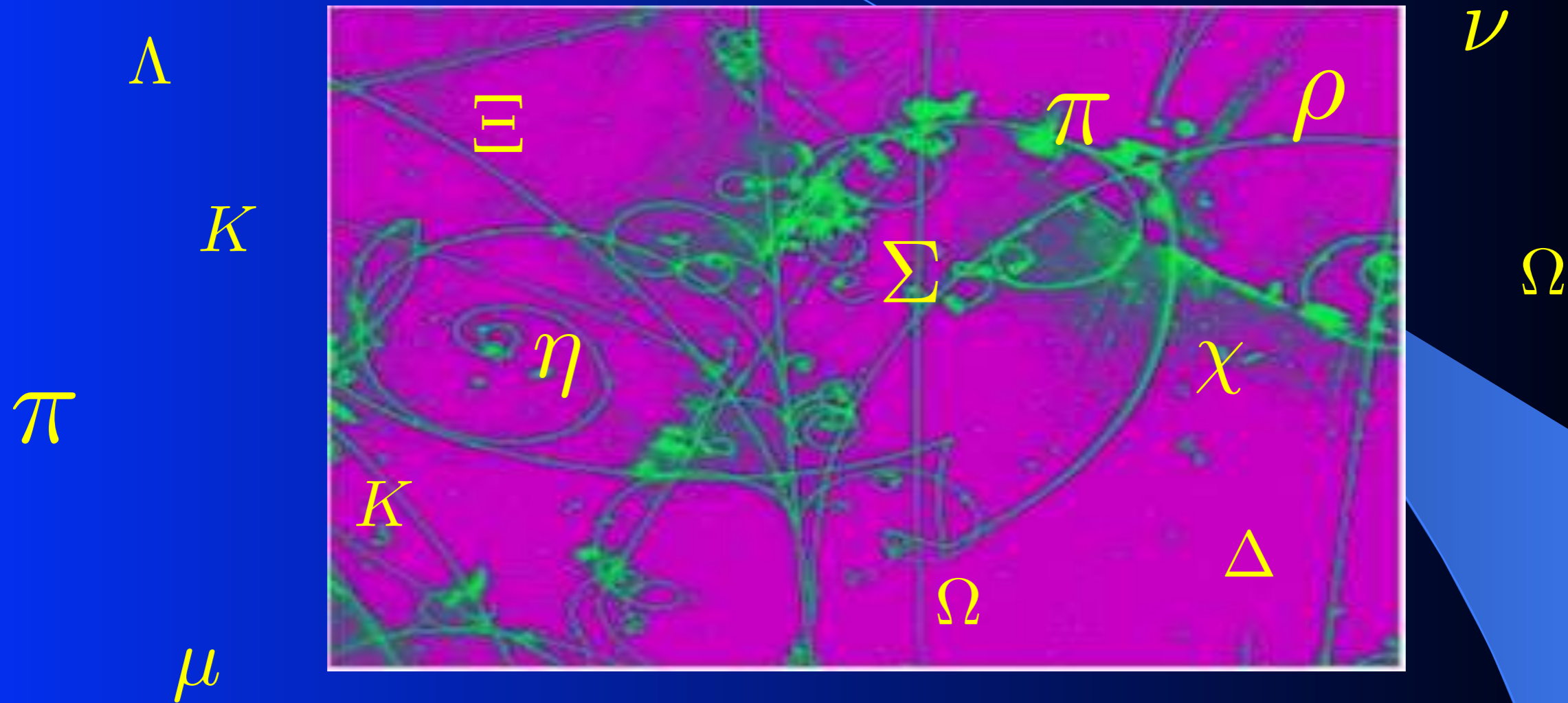
Открытие Странности

Открытие К-мезона в 1947 г. и Λ - 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!

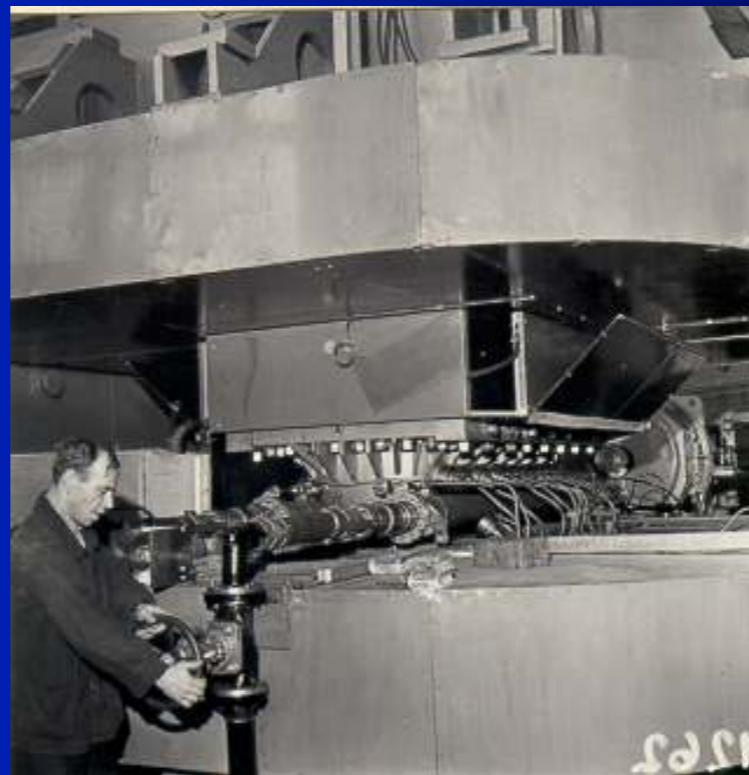


Открытие элементарных



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

Σ^- - Гиперон в Дубне

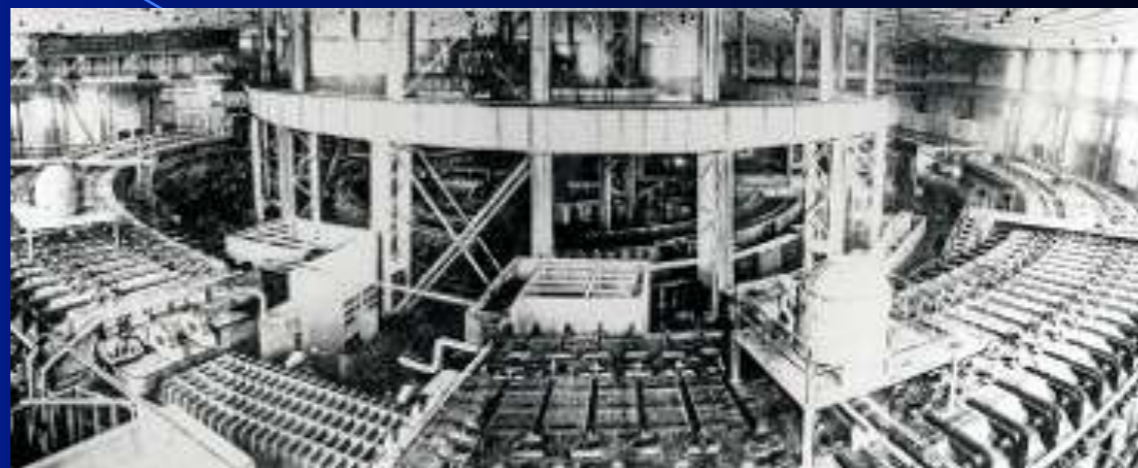


- Σ^- - гиперон был открыт в 1960 г. в Дубне на синхрофазотроне ОИЯИ с помощью пропановой пузырьковой камеры

Ускорители протонов



BNL Cosmotron (1952-1966) 3.3 GeV



Синхрофазотрон Дубна ОИЯИ 1957 10 ГэВ

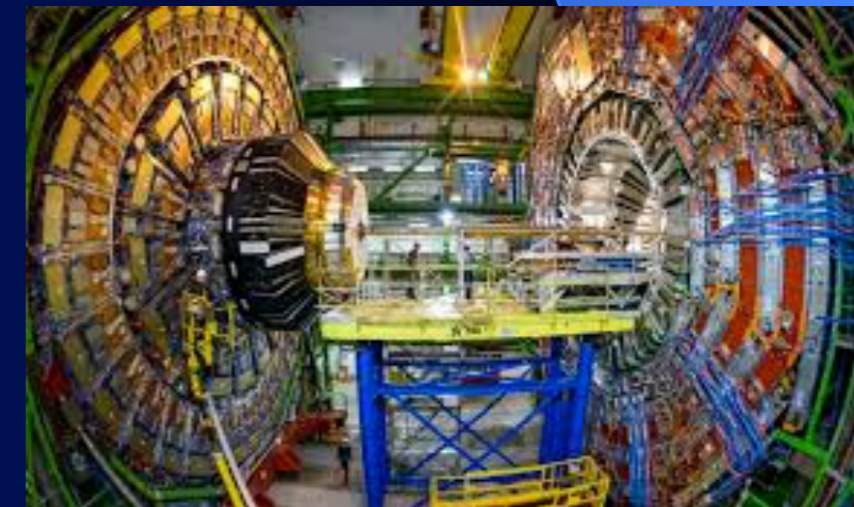
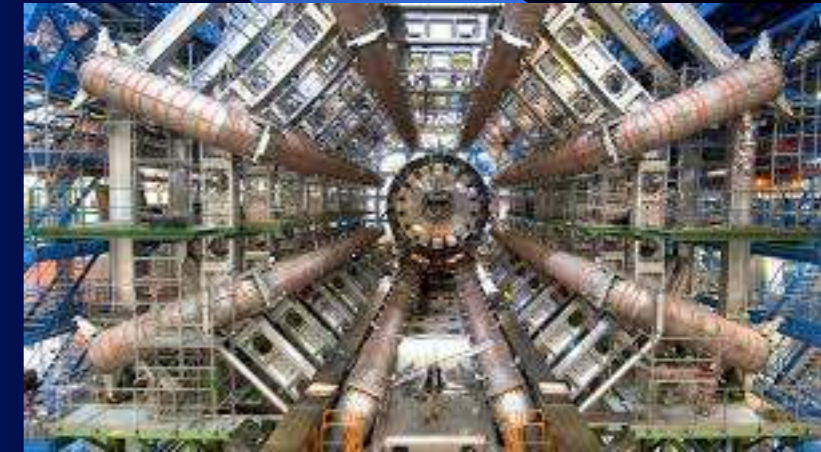
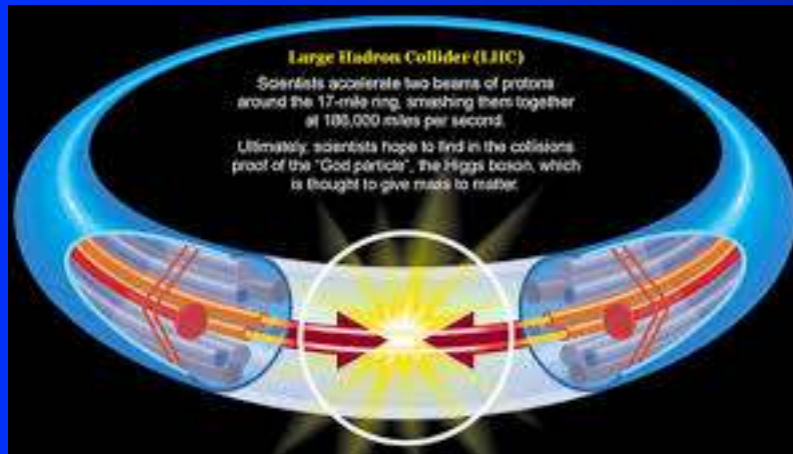
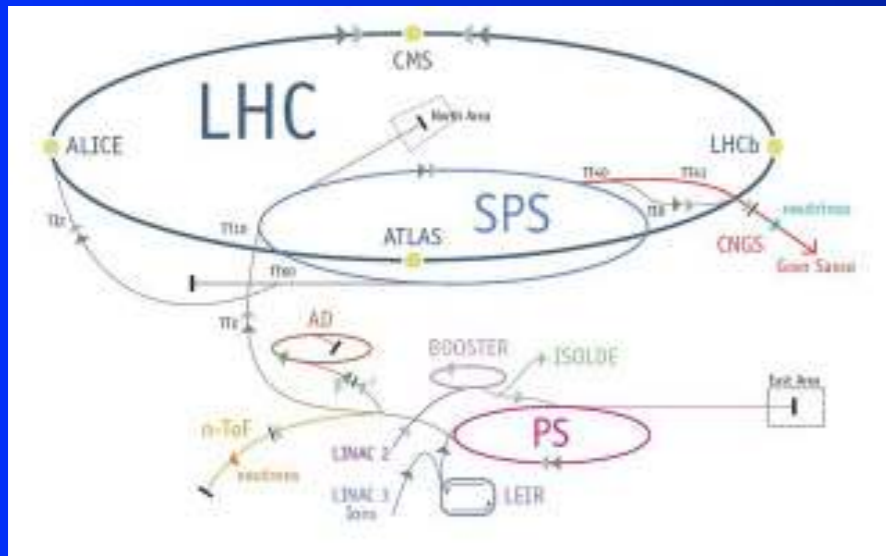


Синхрофазотрон Протвино ИФВЭ 1967 70 ГэВ

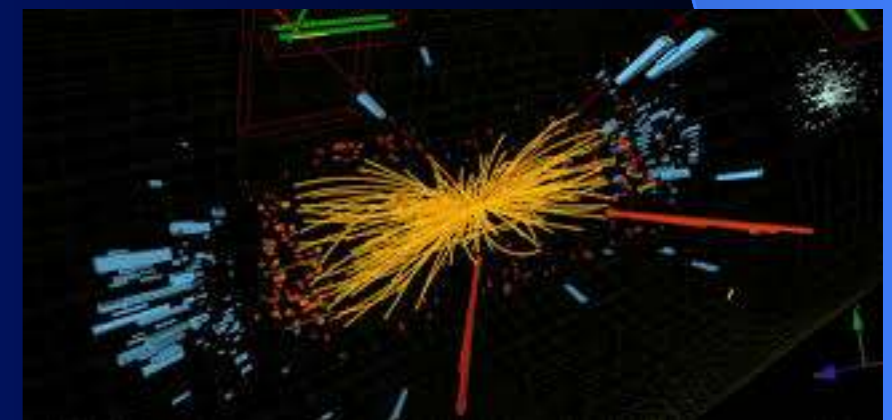
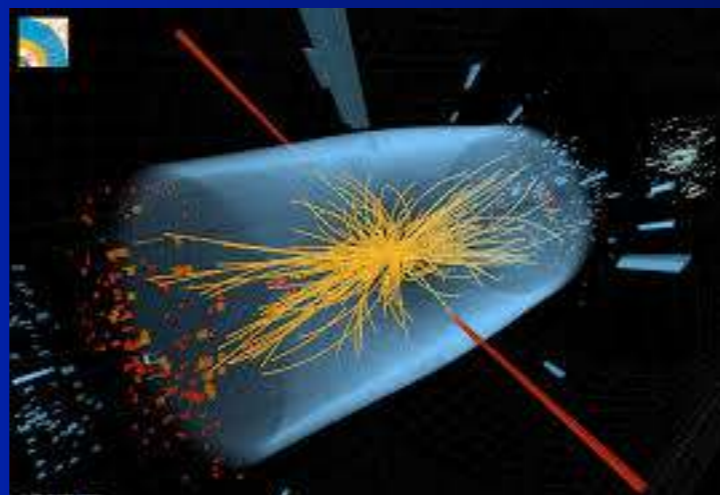
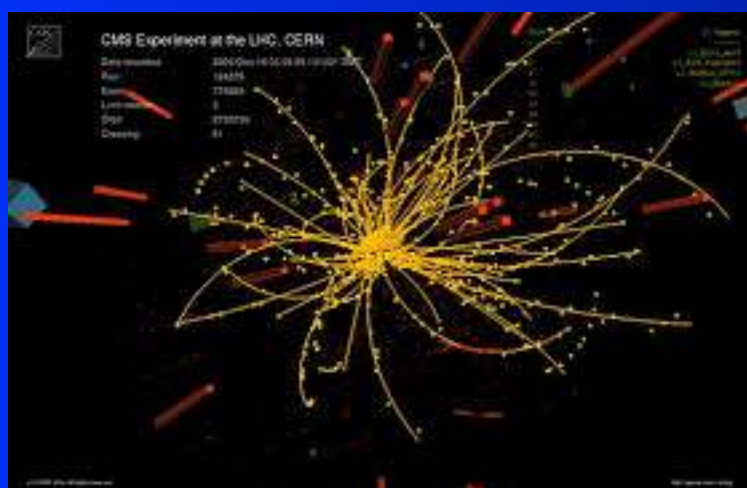
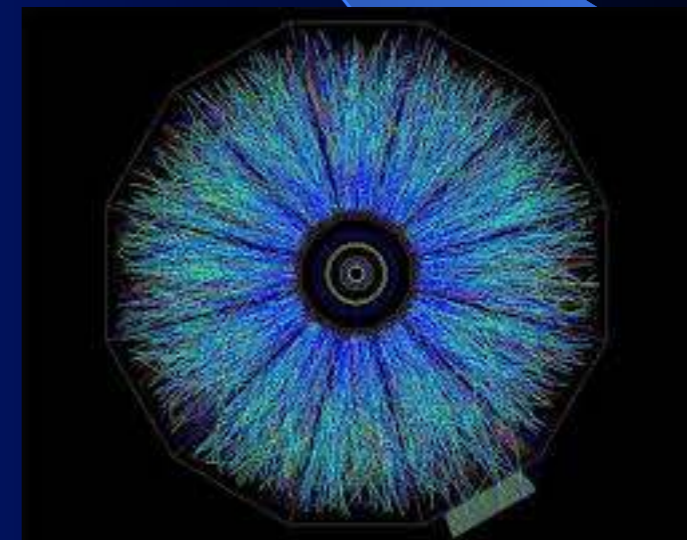
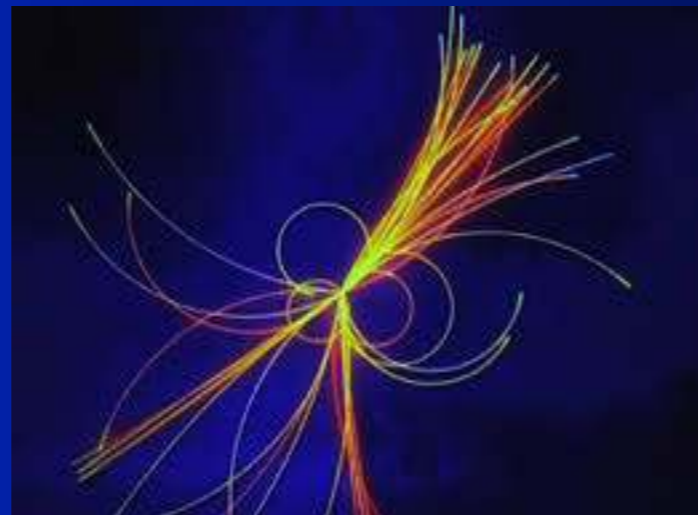
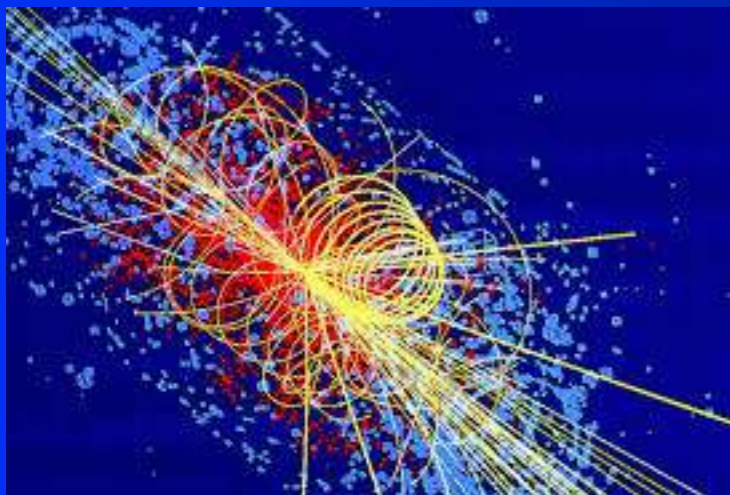
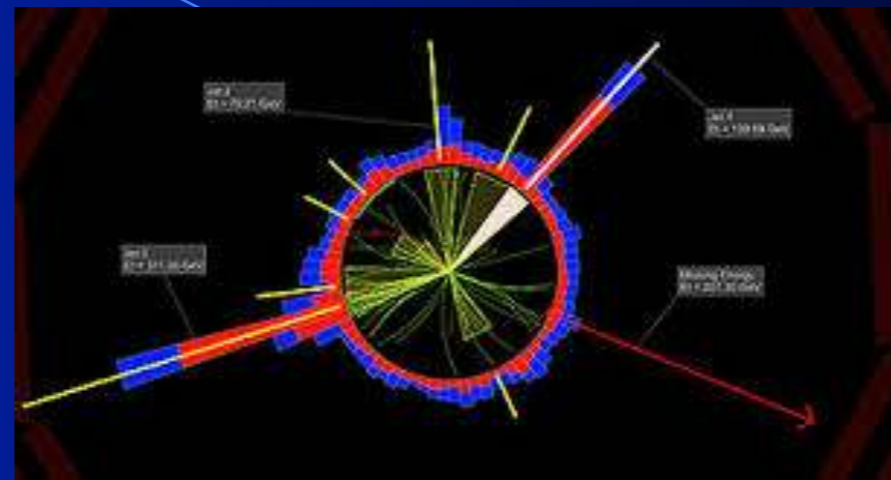
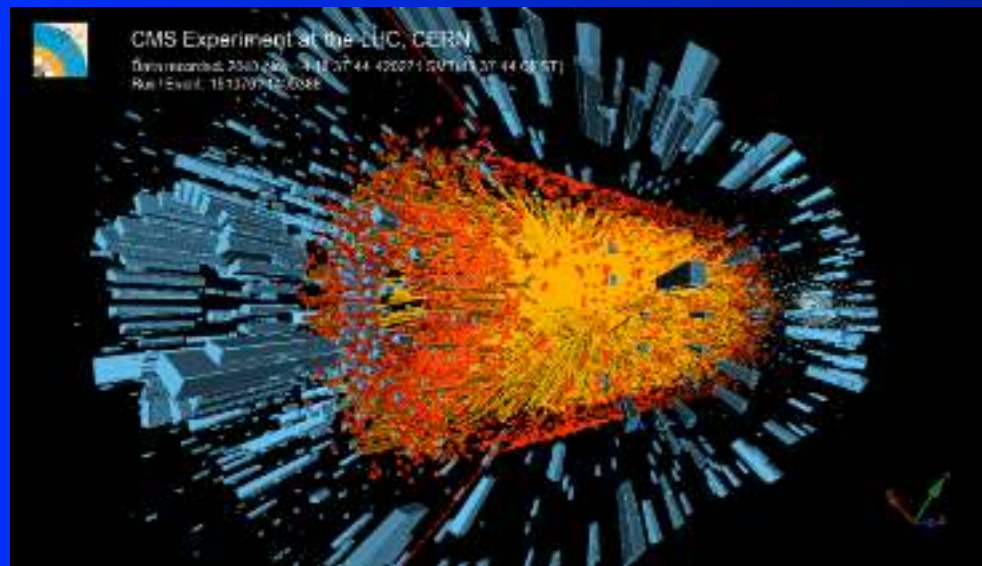


Super-proton-synchrotron CERN 1976 450 ГэВ

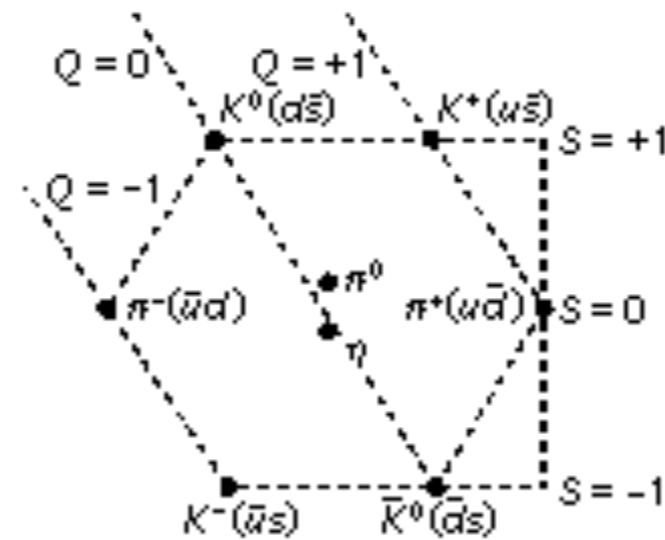
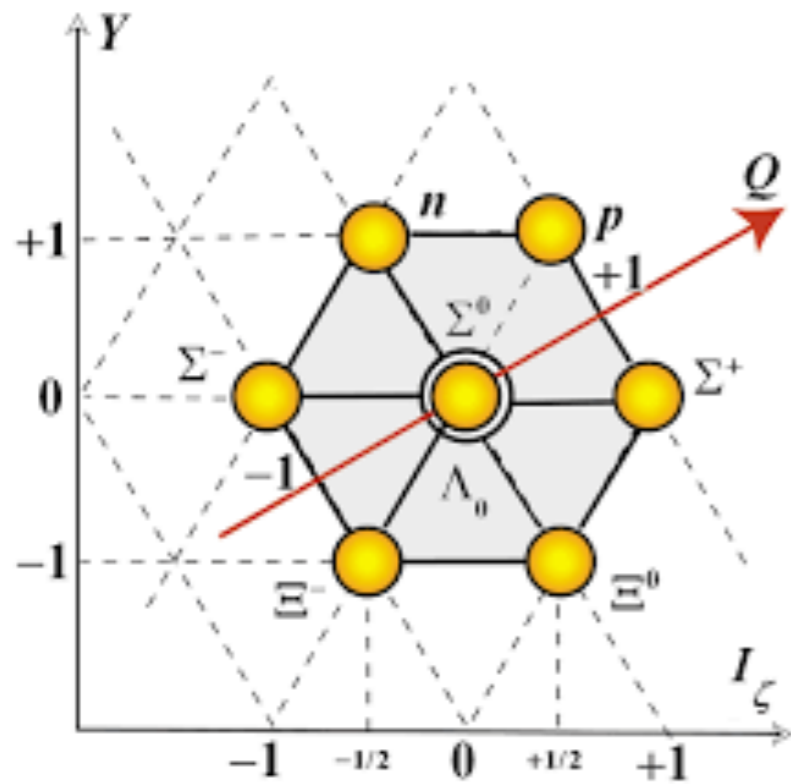
Большой адронный коллайдер



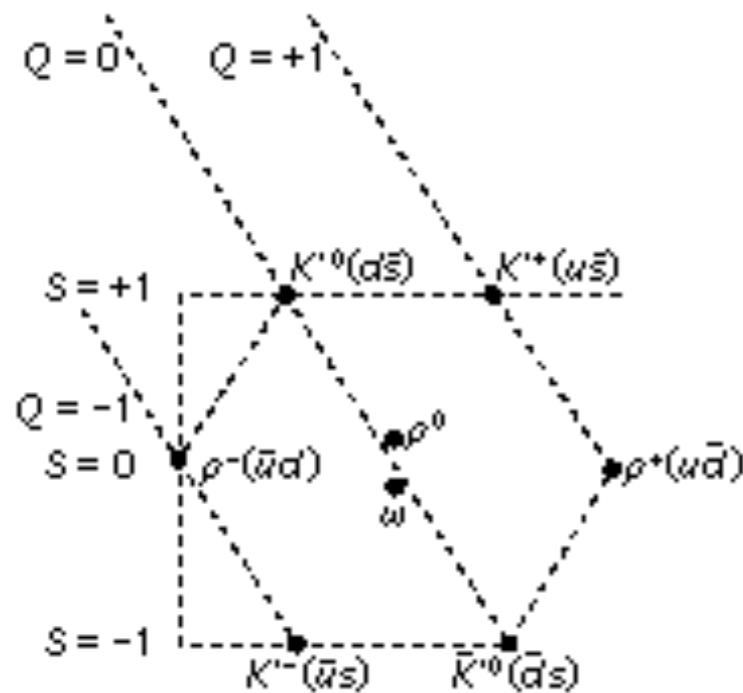
Большой адронный коллайдер



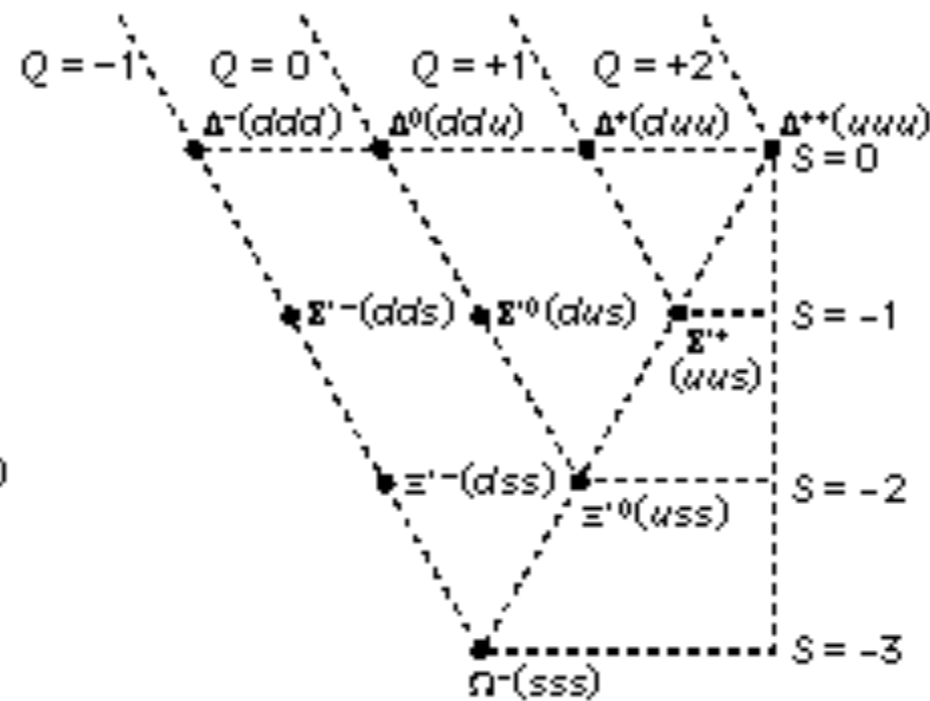
Таблицы элементарных частиц



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:

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

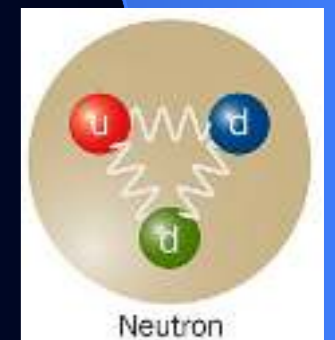
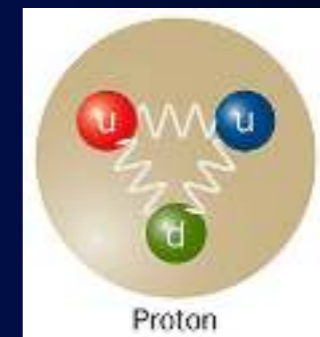
Все частицы сделаны из кварков как из кубиков.

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

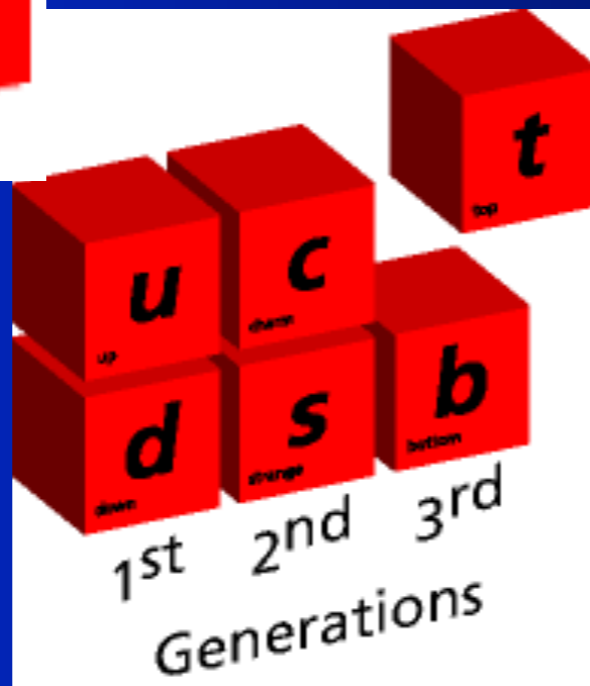
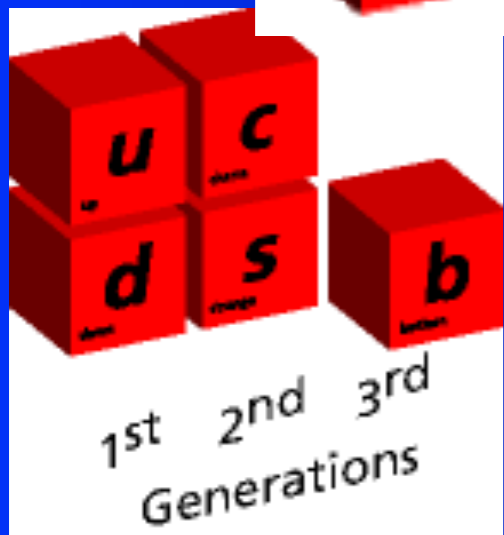
протон $p = uud, \quad Q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$

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

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



Кварки – “кирпичики”

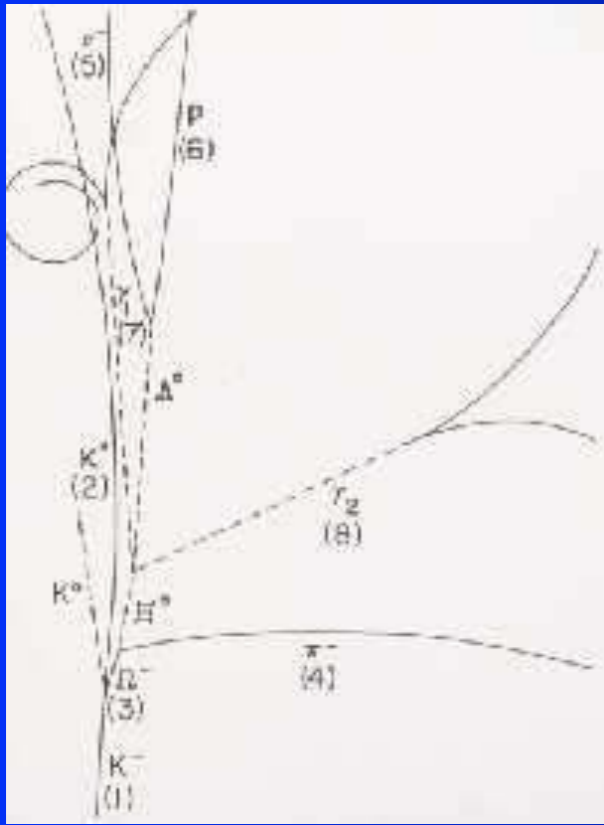


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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

$(\frac{2}{3})$ up ↑	$(\frac{2}{3})$ charm ☘	$(\frac{2}{3})$ top 🎩
↓	👾	👙
$(-\frac{1}{3})$ down	$(-\frac{1}{3})$ strange	$(-\frac{1}{3})$ bottom

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.

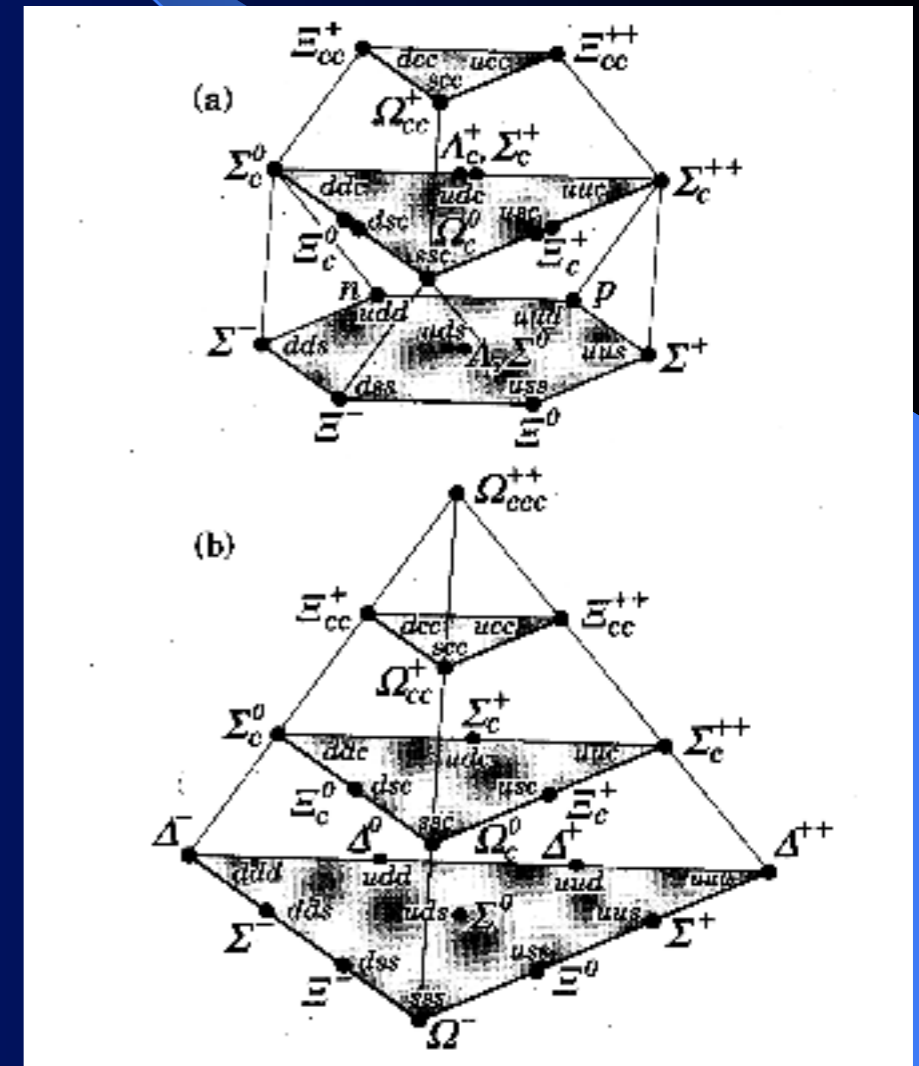
$$\Sigma^0 (d \uparrow d \downarrow c \uparrow)$$

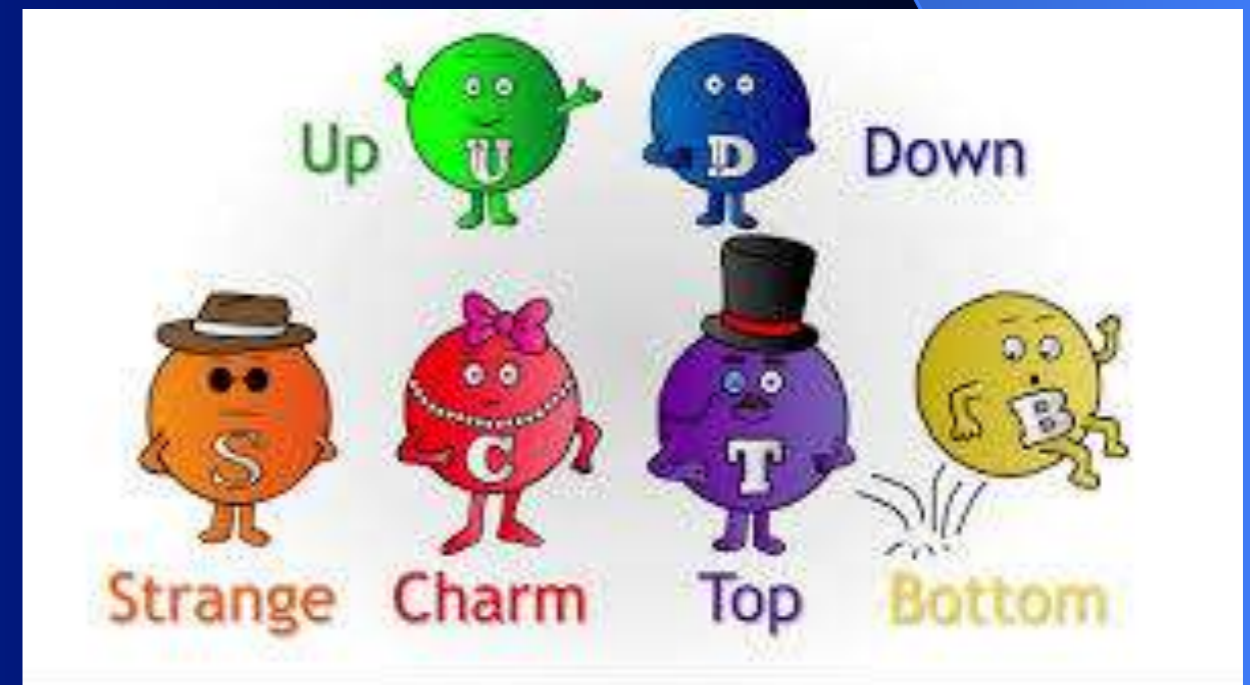
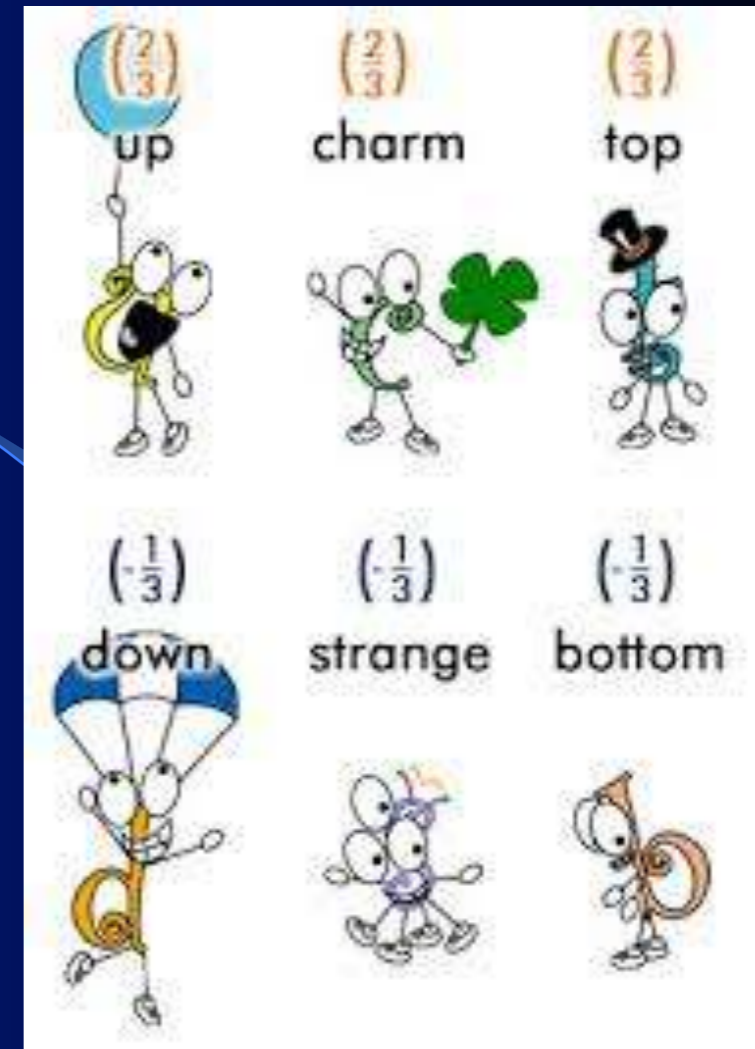
$$\Xi^+ (d \uparrow c \uparrow c \downarrow)$$

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

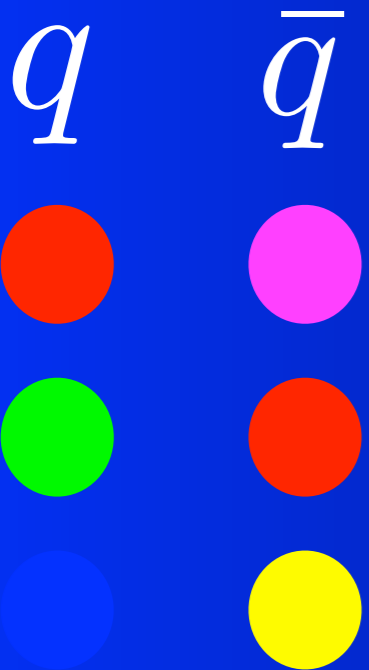
$$\Delta^- = \varepsilon^{ijk} (d_i \uparrow d_j \uparrow d_k \uparrow)$$

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





Цветные кварки



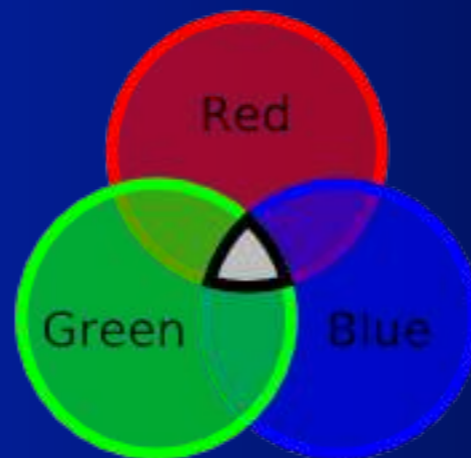
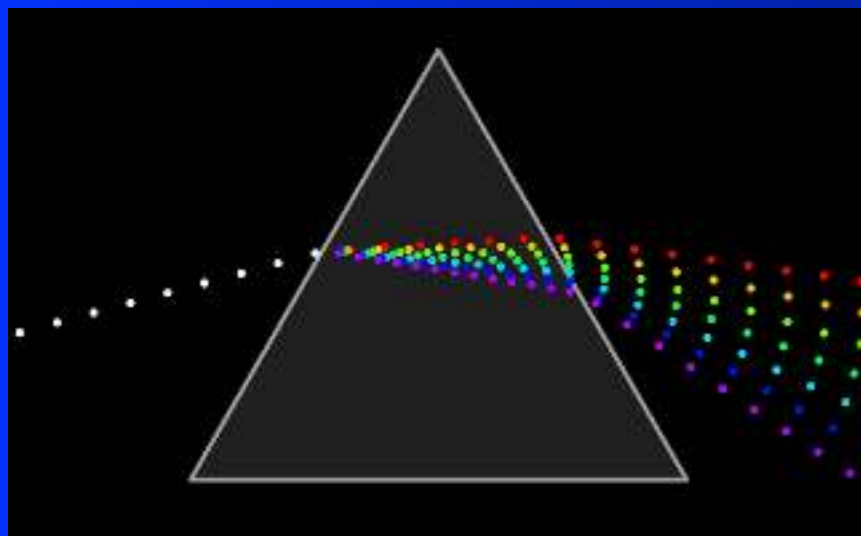
Каждый аромат (тип) кварков может иметь три цветных заряда **красный**, **зелёный**, **синий**

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

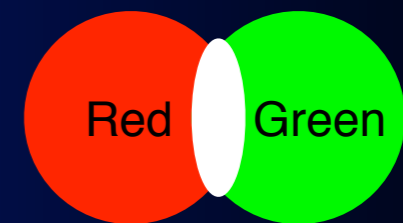
Глюоны имеют восемь цветов: **красный-антисиний**, **зелёный-антикрасный**, ...



Все связанные состояния кварков, барионы и мезоны - бесцветны !

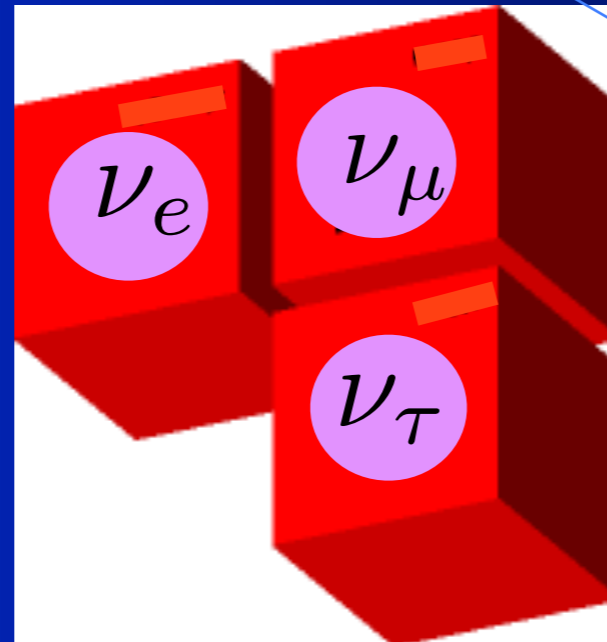
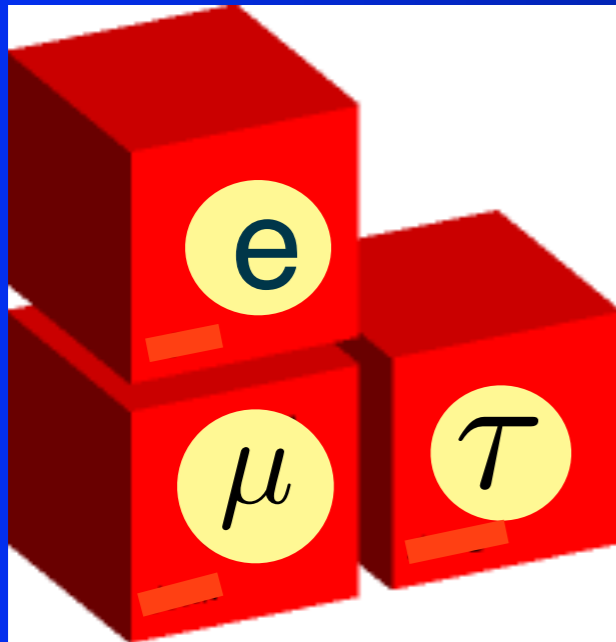


барион



МЕЗОН

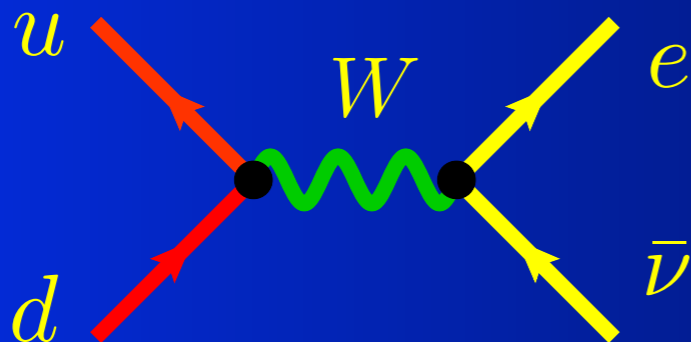
Лептоны от слова λεπτός



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



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

ν_e
1956

ν_μ
1963

ν_τ
2000

d

s
1947

b
1977

e
1895

μ
1936

τ
1975

шесть кварков

шесть лептонов

γ

g
1979

W, Z
1983

H
2012

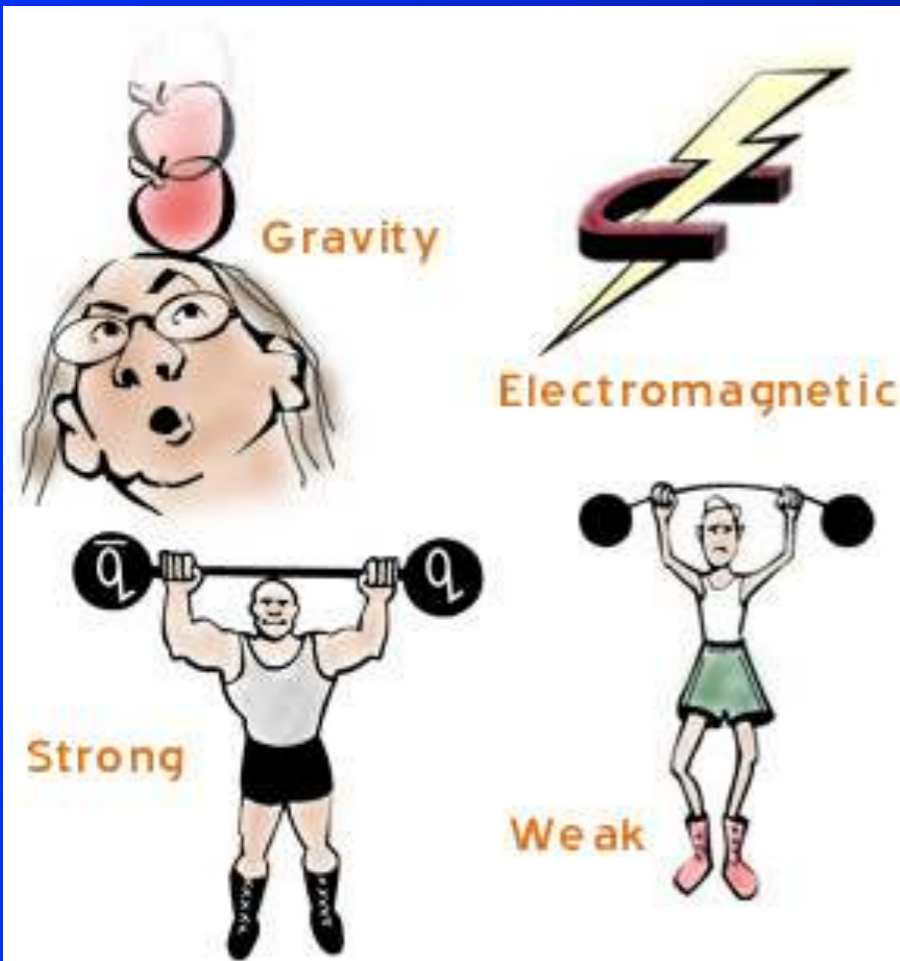
G

Теперь у нас есть замечательная картина из трёх пар кварков и трёх пар лептонов и пяти переносчиков фундаментальных взаимодействий. Здесь показана также история их открытия.

Силы в Природе

Сила – это результат взаимодействия между частицами путём обмена квантами поля

Известны 4 вида фундаментальных взаимодействий в природе



Пятая сила - обмен хиггсовским бозоном

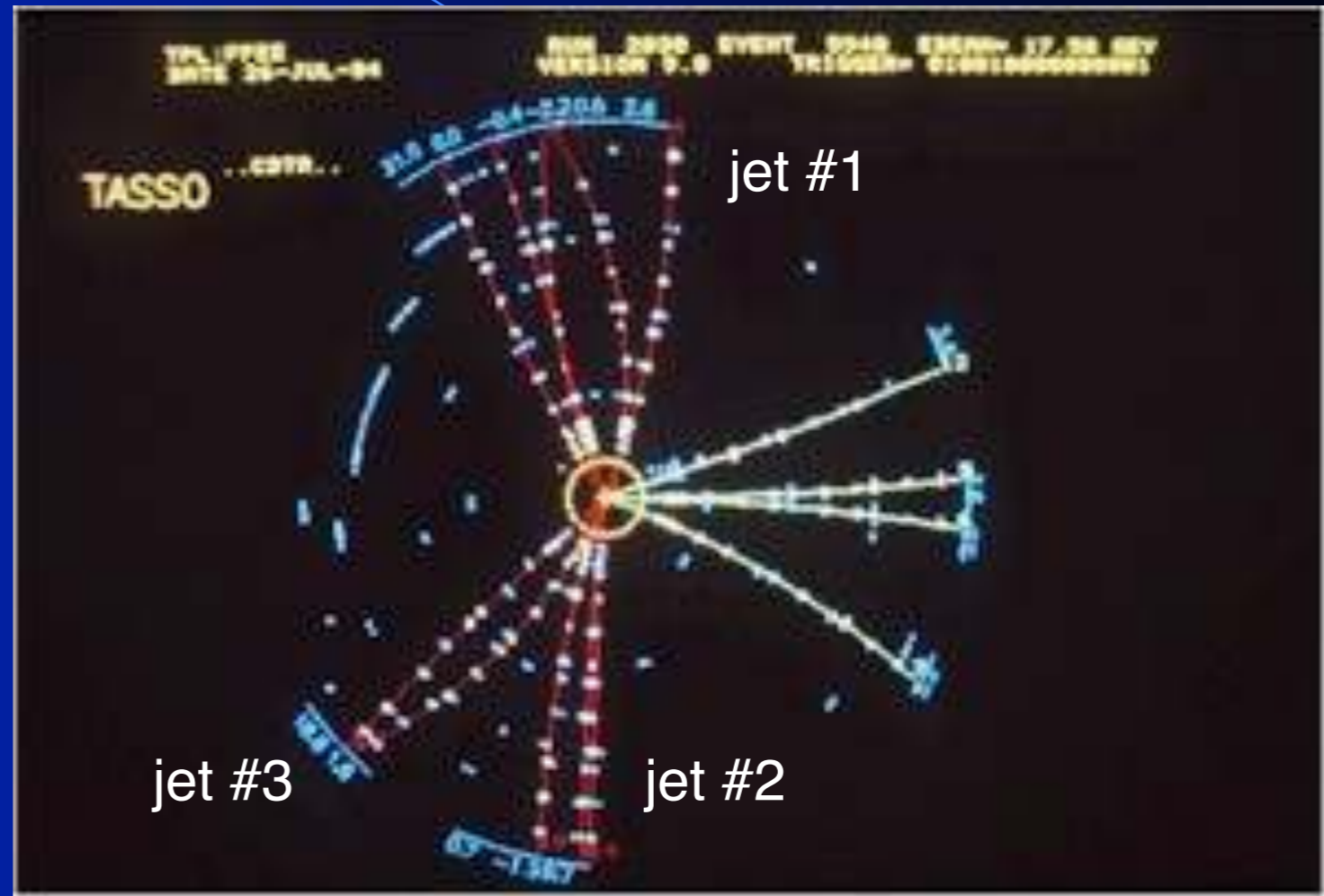


	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons



Открытие глюона

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



$$g_{ij}^a$$

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

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

← «ЦВЕТ»

			Color
			Quarks
			Anti-Quarks
			Anti-Color

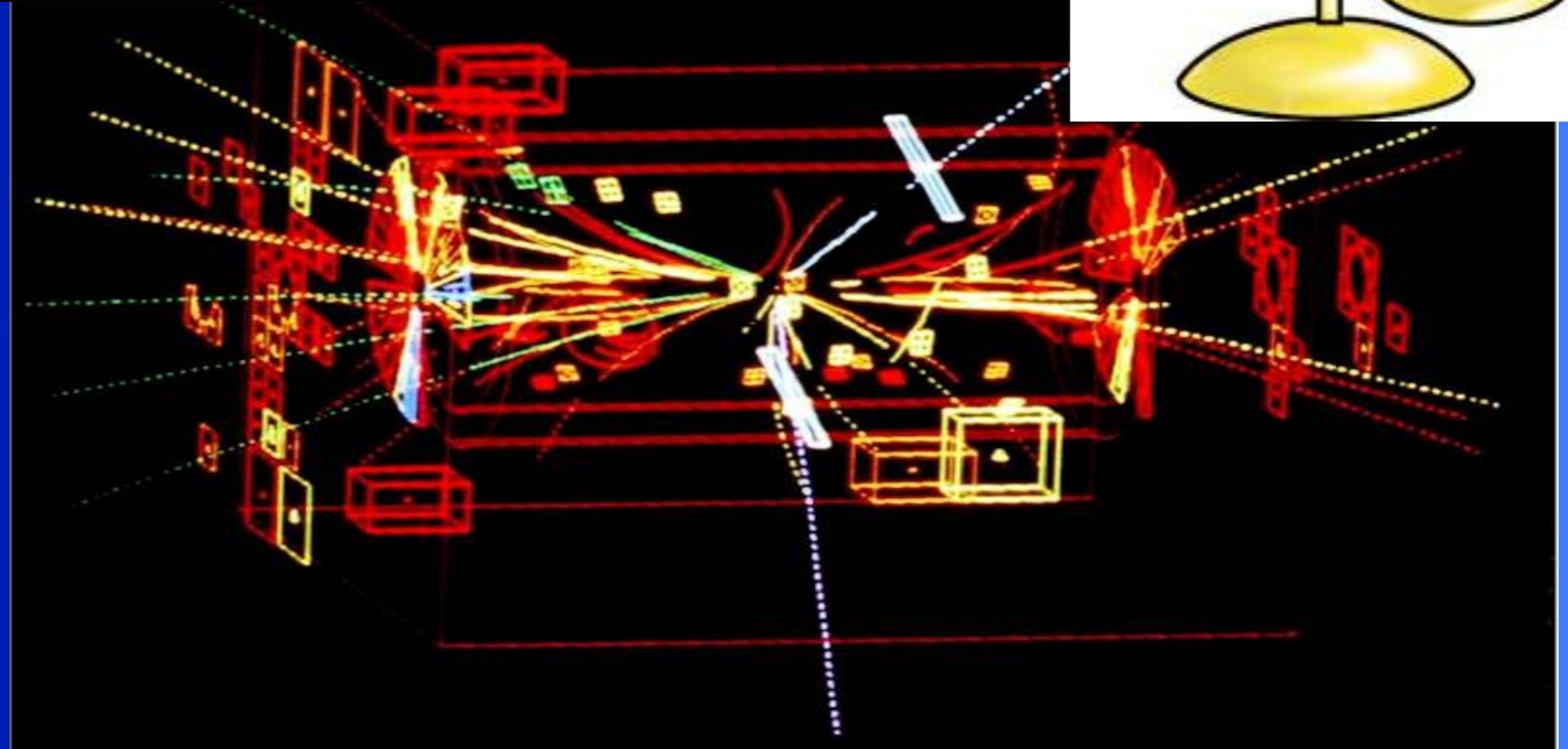
Открытие W и Z бозонов



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



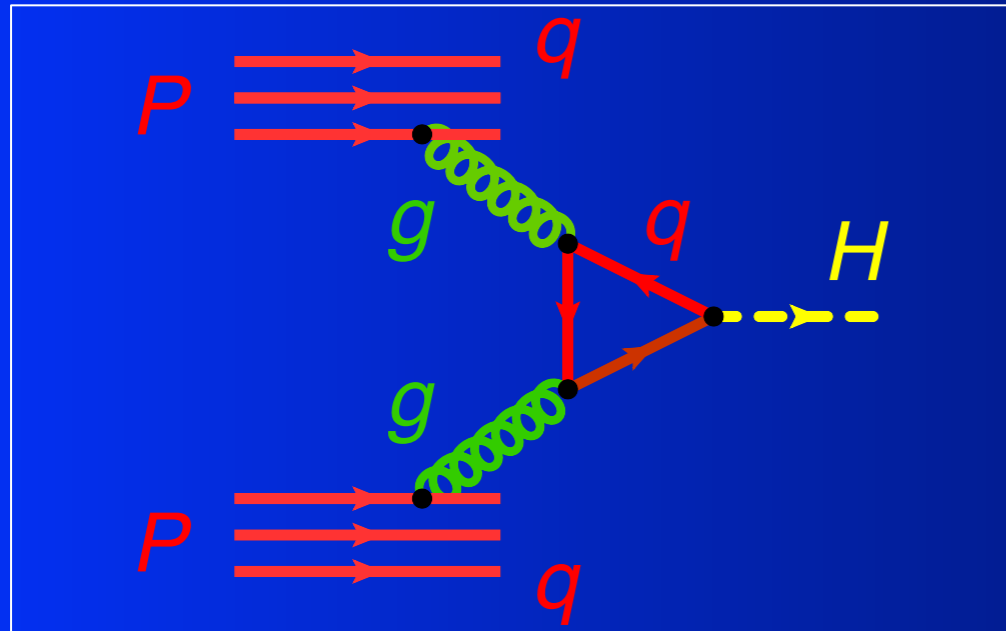
явилось триумфом
Стандартной модели
фундаментальных
взаимодействий



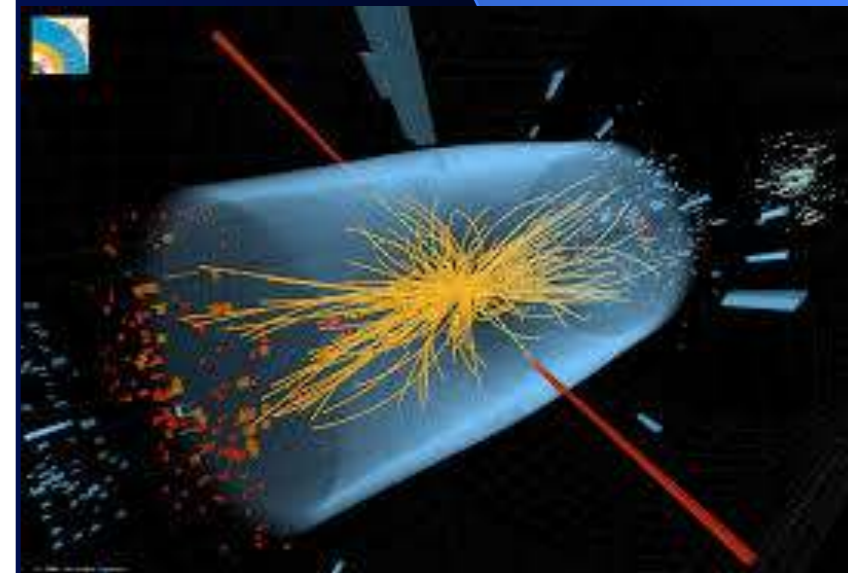
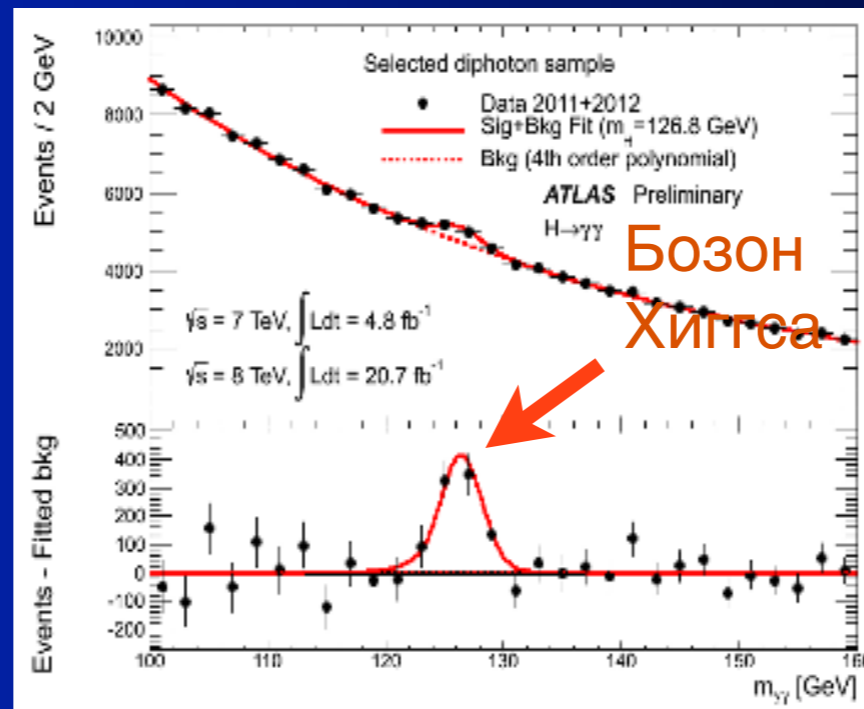
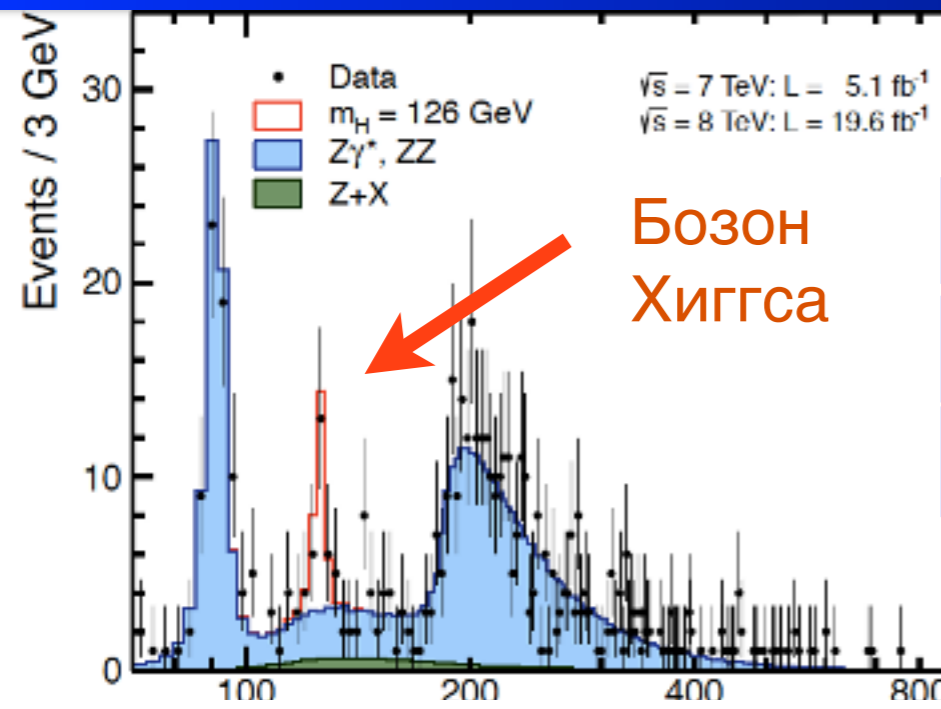
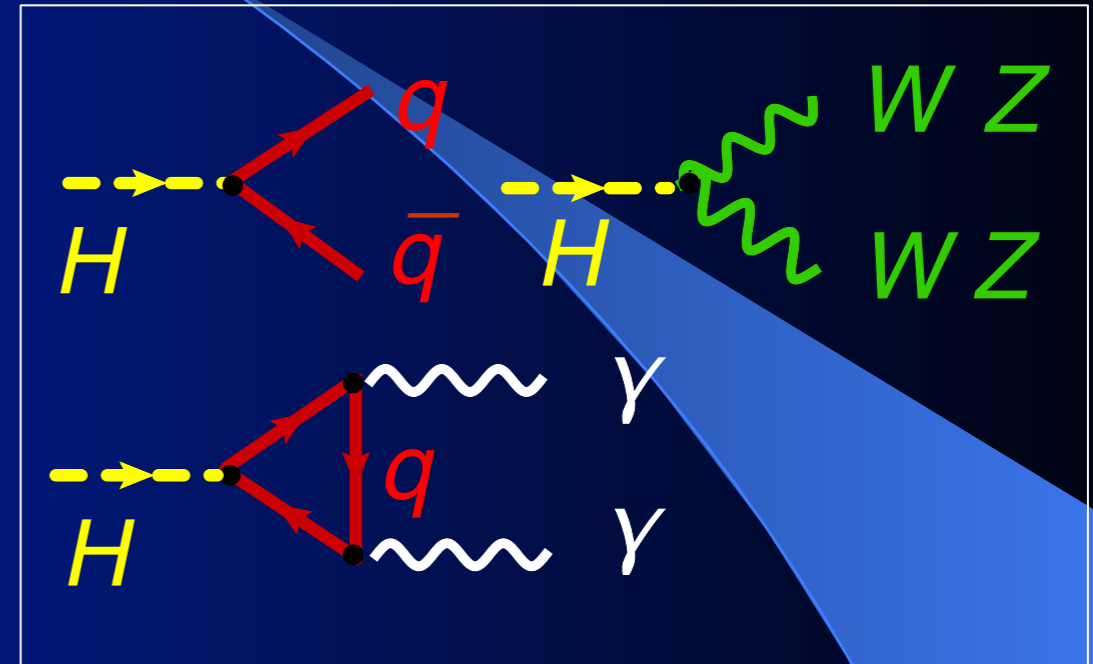
Открытие хиггсовского бозона

ЦЕРН, Большой Адронный Коллайдер, 2012 г.

Рождение на протонном коллайдере



Процессы распада





Стандартная Модель



УДК 517.511.01

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III		
mass→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0	125.7 GeV
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name→	u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs
Quarks	6 MeV	95 MeV	4.2 GeV	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
	d down	s strange	b bottom	g gluon	G Graviton
Leptons	<2 eV	<0.19 MeV	<18.2 MeV	90.2 GeV	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ weak force	
	0.511 MeV	106 MeV	1.78 GeV	80.4 GeV	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force	

Bosons (Forces)

Силы

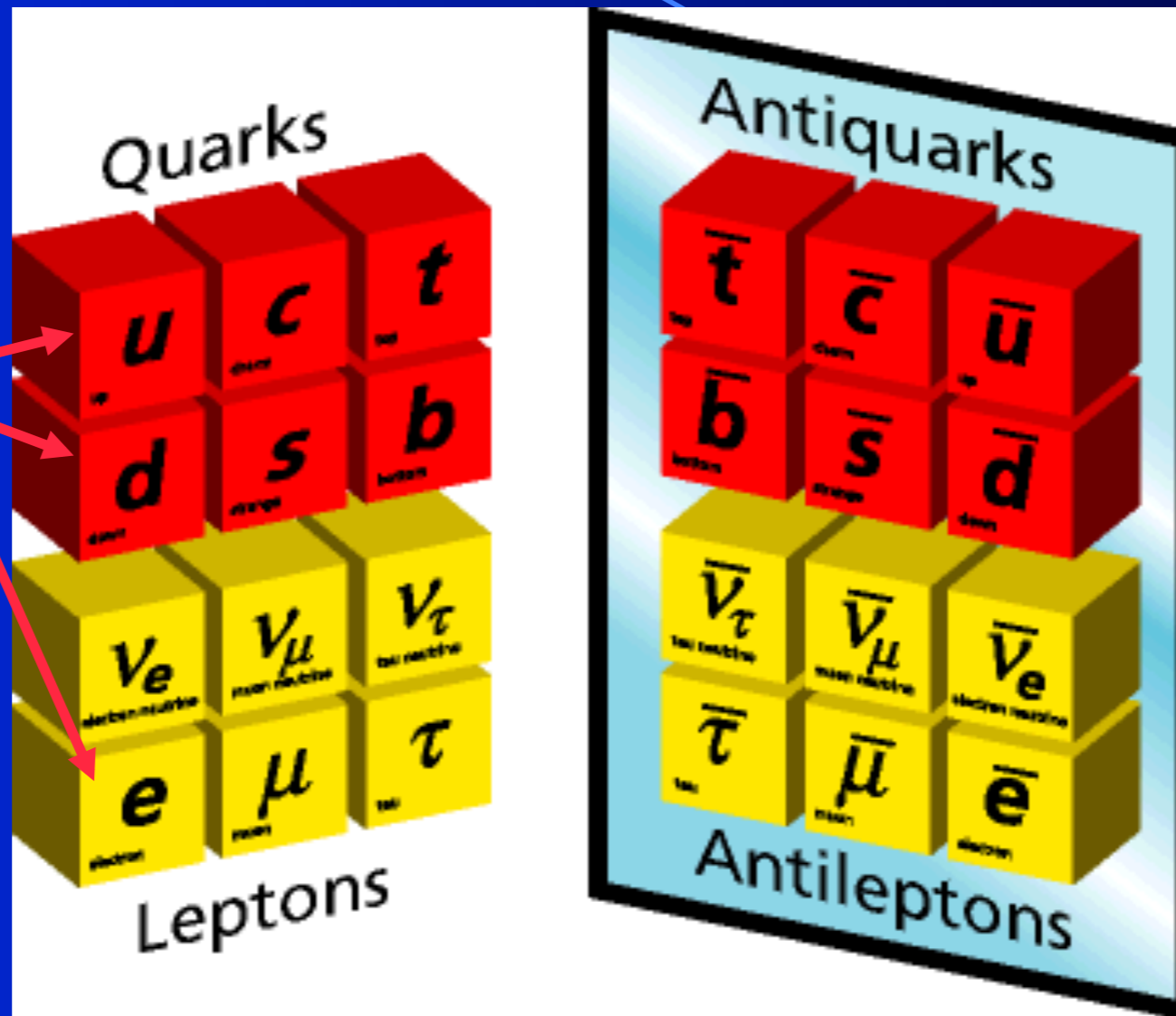
Электромагнитные

Сильные

Слабые

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

Тёмная материя

Энергетический баланс Вселенной



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