

Как устроена Вселенная

Дмитрий Казаков

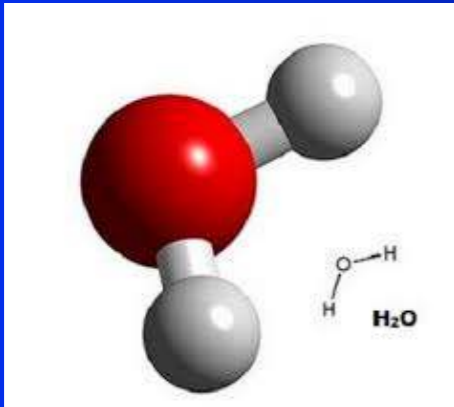
Лаборатория Теоретической физики

Объединённый институт ядерных исследований

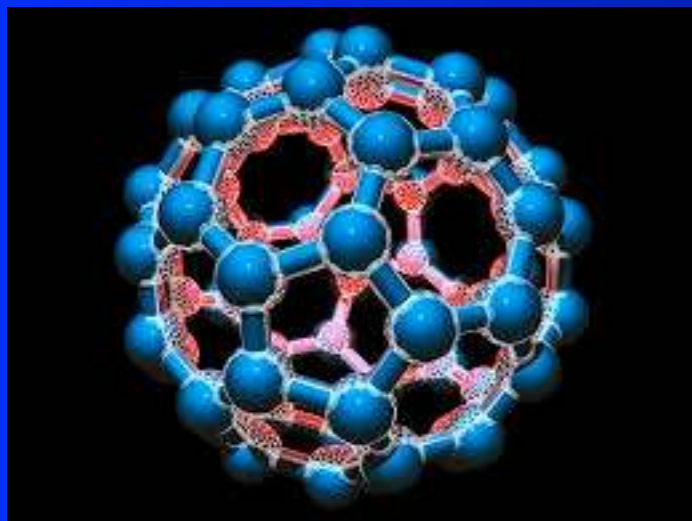
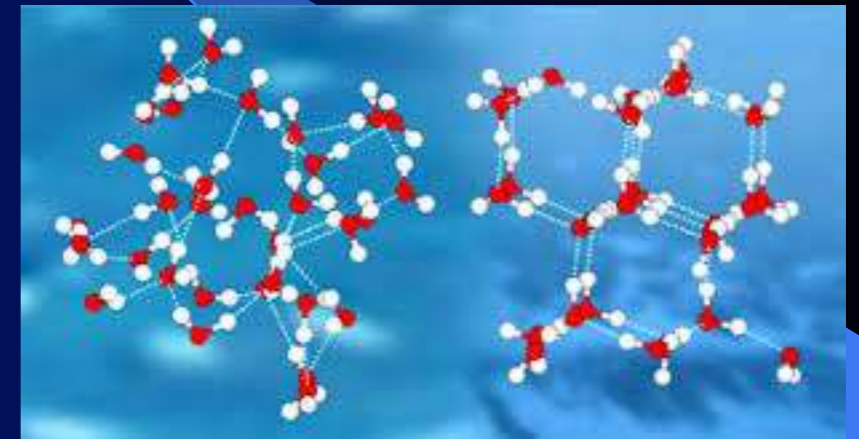


Молекулы

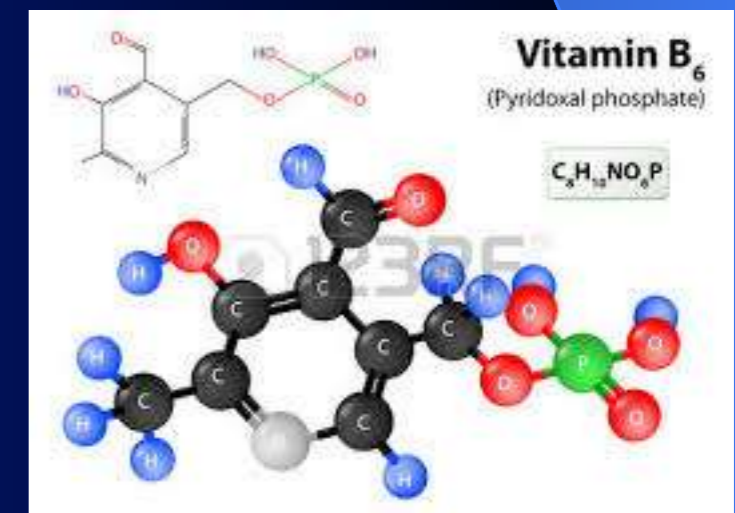
Атомы собираются в молекулы, которые образуют жидкие и газообразные вещества



Простейшая молекула воды

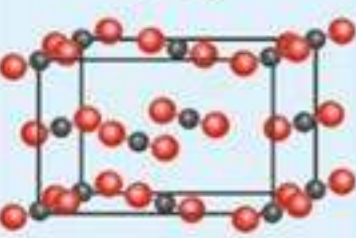



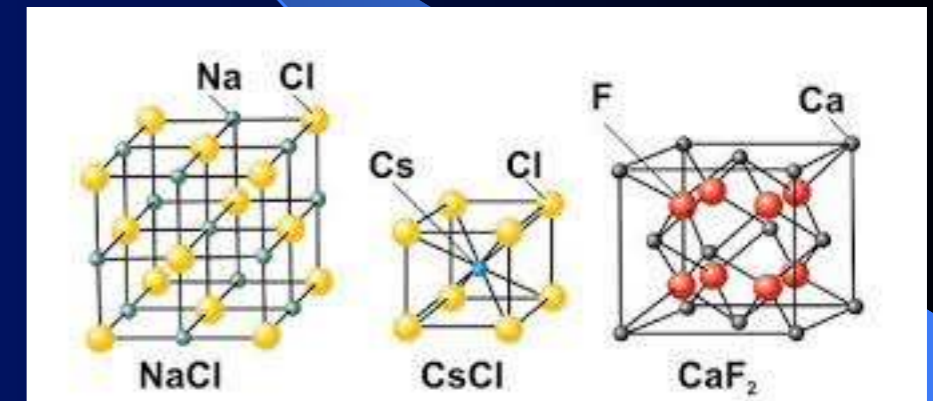
Молекулярная структура определяет химические свойства вещества



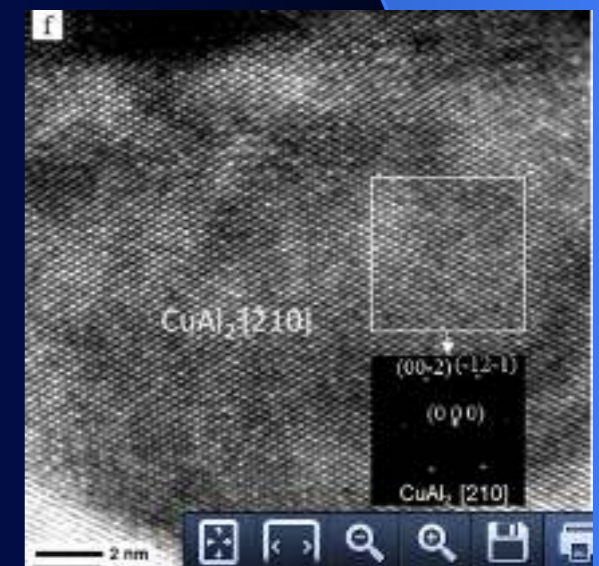
Кристаллы

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															1	2														
H	He															H	He														
3		4														9		10													
Li	Be															F	Ne														
11		12		13		14		15		16		17		18		19															
Na	Mg			Al		Si		P		S		Cl		Ar																	
19		20		21		22		23		24		25		26		27															
K	Ca	Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni															
37		38		39		40		41		42		43		44		45															
Rb	Sr	Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd															
55		56		57		72		73		74		75		76		77															
Cs	Ba	La		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt															
87		88		89		104		105		106		107		108		109															
Fr	Ra	Ac		Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds															
113		114		115		116		117		118		119		120		121															
Nh	Fl	Mc		Lv		Ts		Og																							

Группы элементов
 (I-VII)
 (I-VII)
 (I-VII)

Лантаноиды Lanthanides

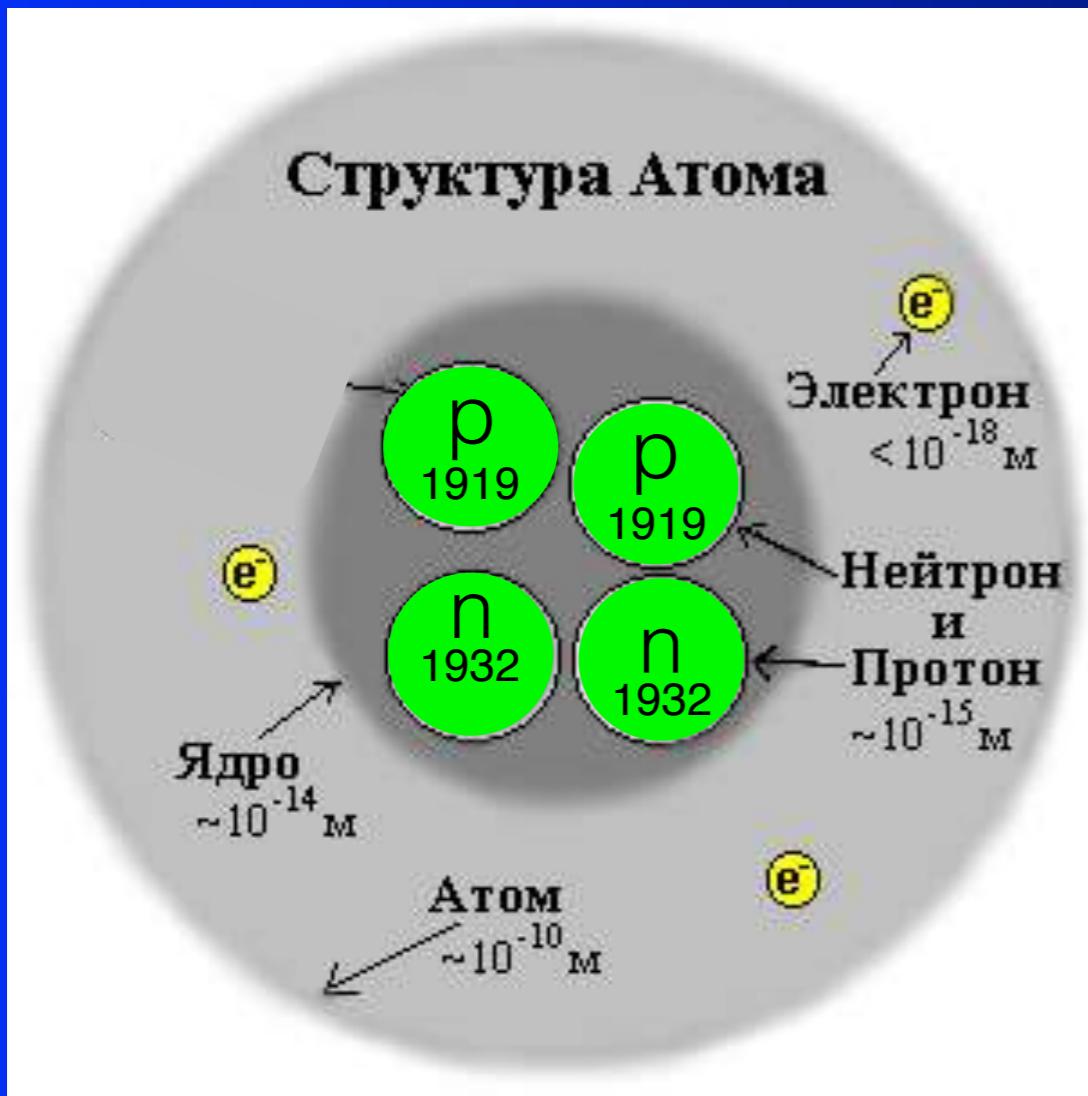
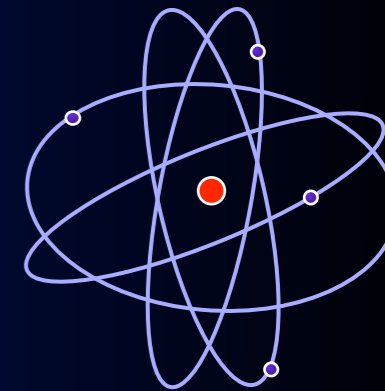
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

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)

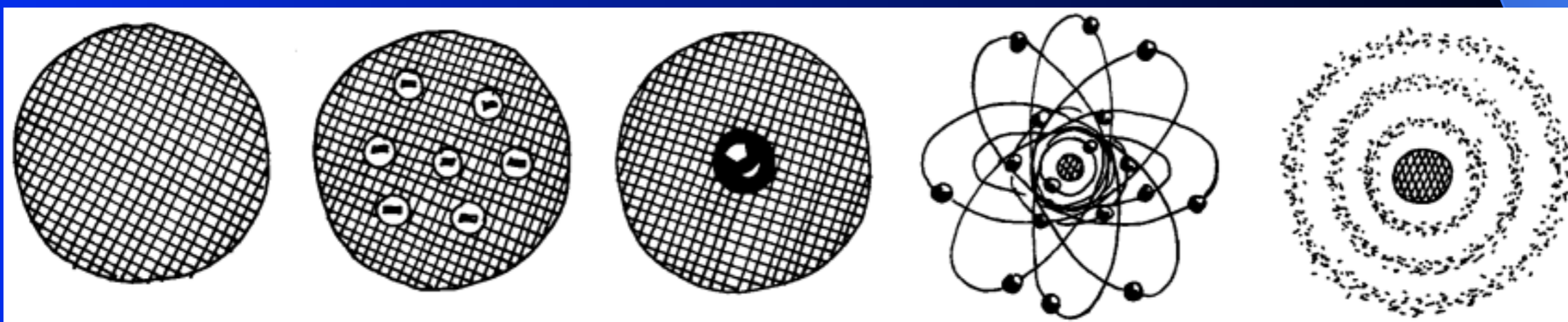
Структура Атома



В центре атома находится плотное ядро имеющее положительный электрический заряд

Оно в 10000 раз меньше размера самого атома

Эволюция в понимании строения атома



Демокрит

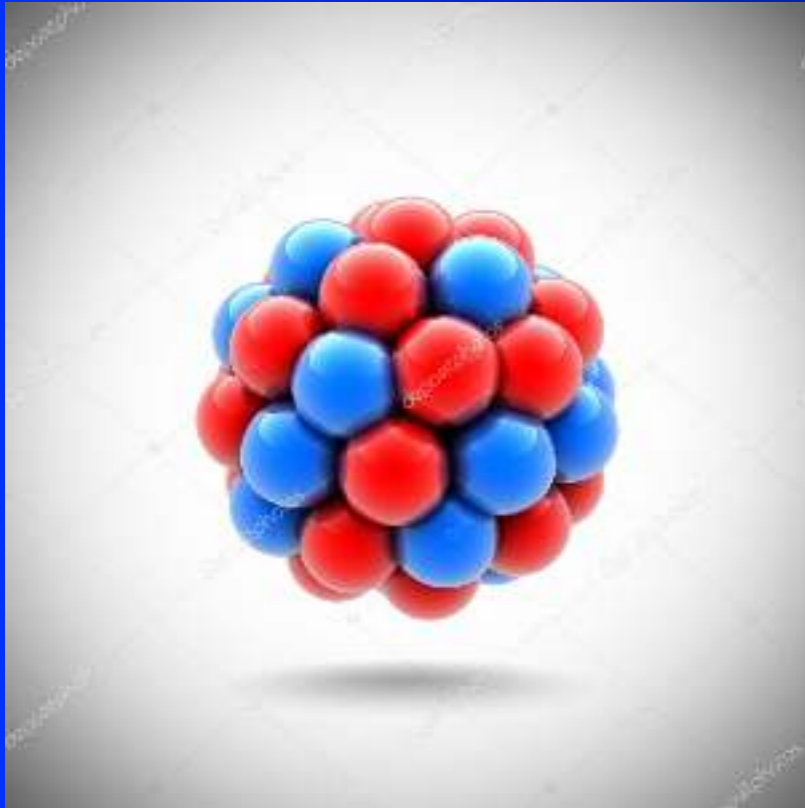
Томпсон

Резерфорд

Бор

5
Шредингер

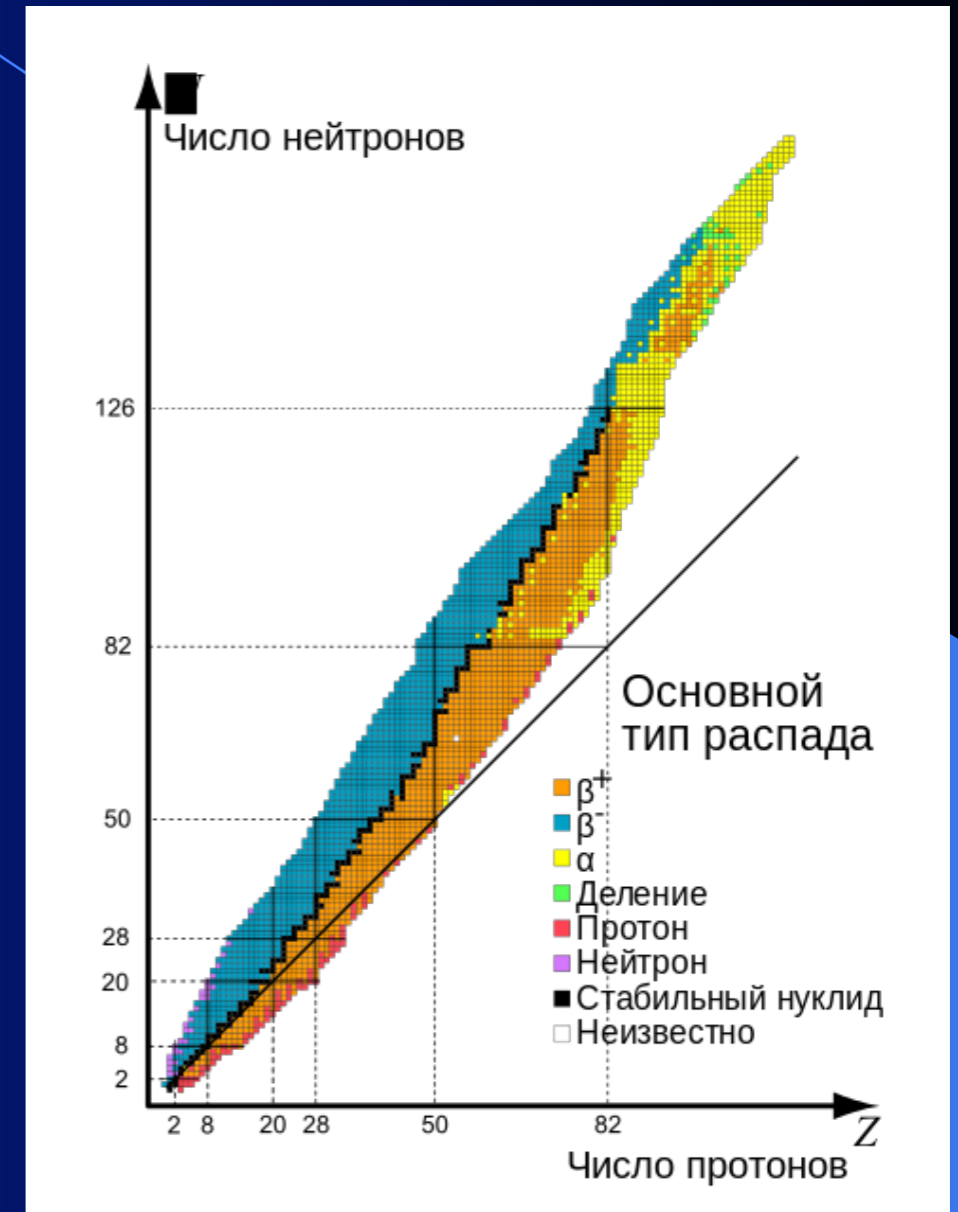
Атомное ядро



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

Кварки – “кирпичики”

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:

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

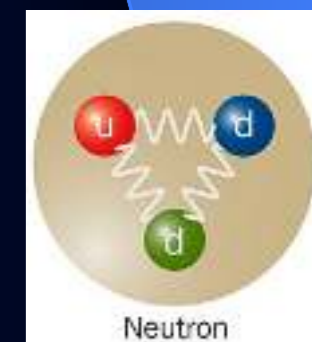
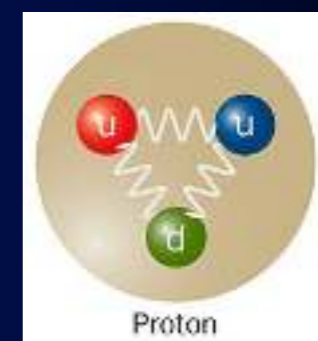
Все частицы сделаны из кварков как из кубиков.

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

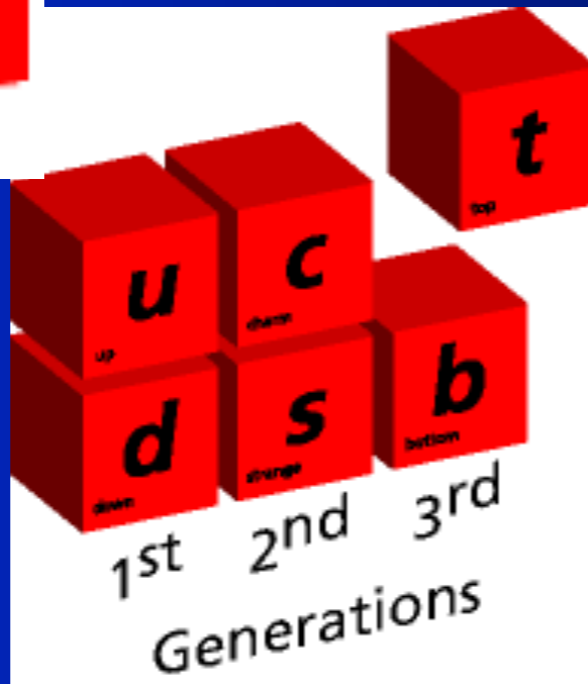
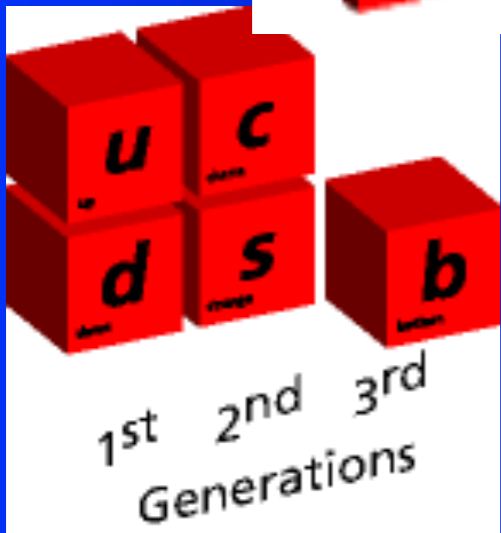
протон $p = uud, \quad Q_p = 2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$

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

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

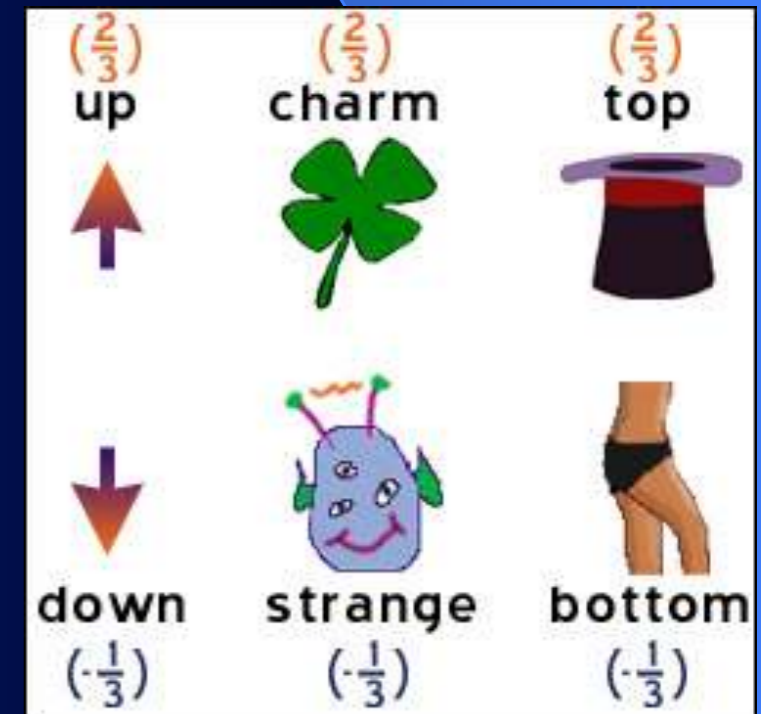


Кварки – “кирпичики”

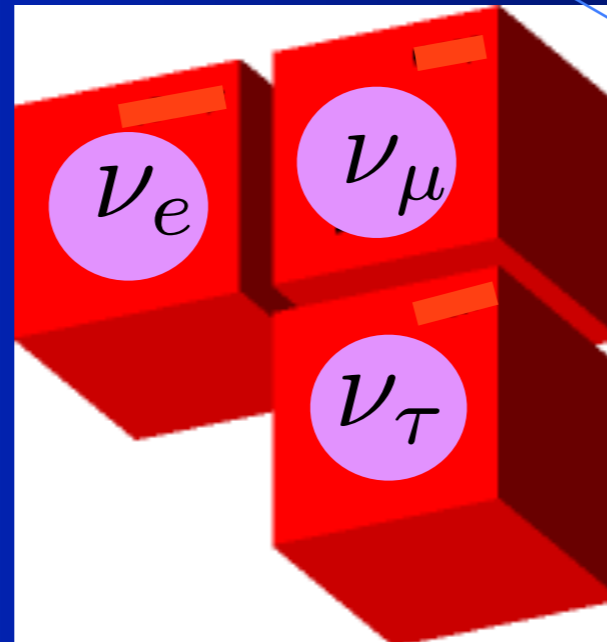
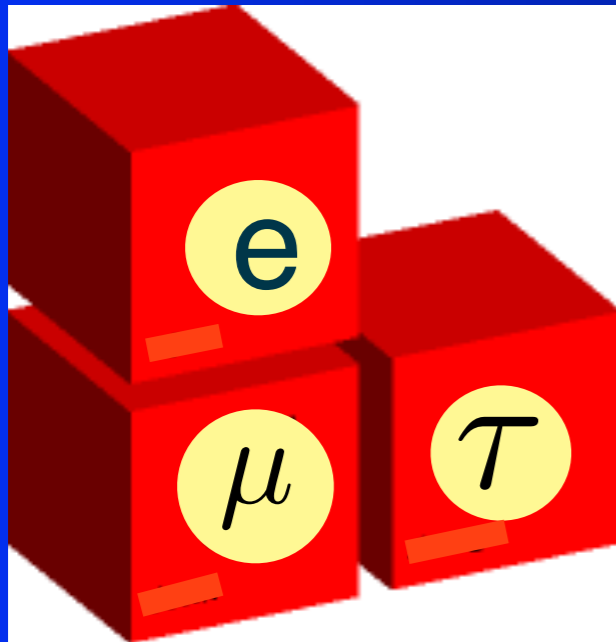


- Кварки “заперты” внутри адронов
- Электрический заряд кварков кратен $1/3$
- Каждый кварк несёт новое квантовое число - цвет, принимающее три значения
- Число сортов кварков росло с открытием новых частиц и достигло **шести**

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



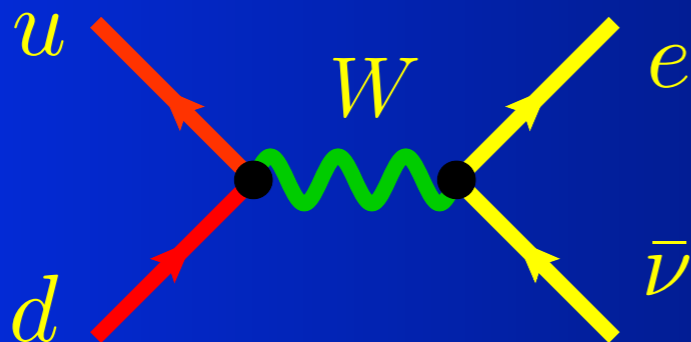
Лептоны от слова λεπτός



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

Стандартная Модель



Ч
Д
И
Л
С
А
Ц
Ы

Three Generations of Matter (Fermions)

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

Bosons (Forces)

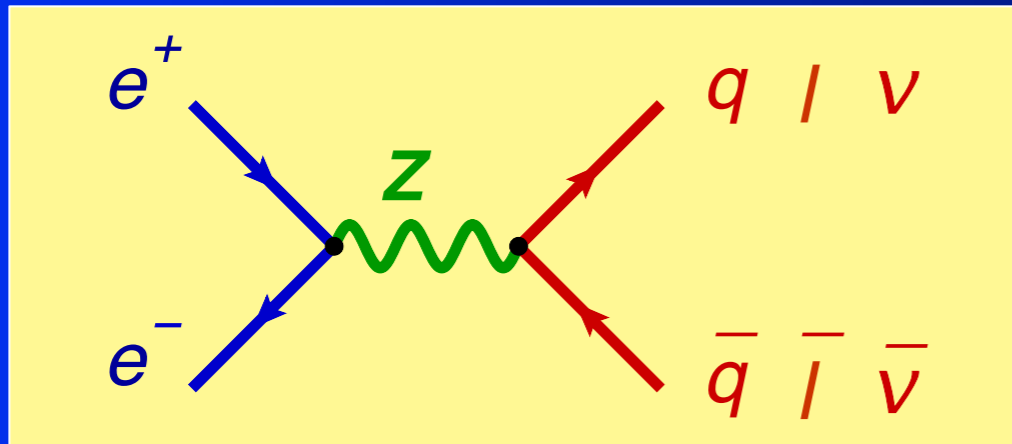
Силы

Электромагнитные

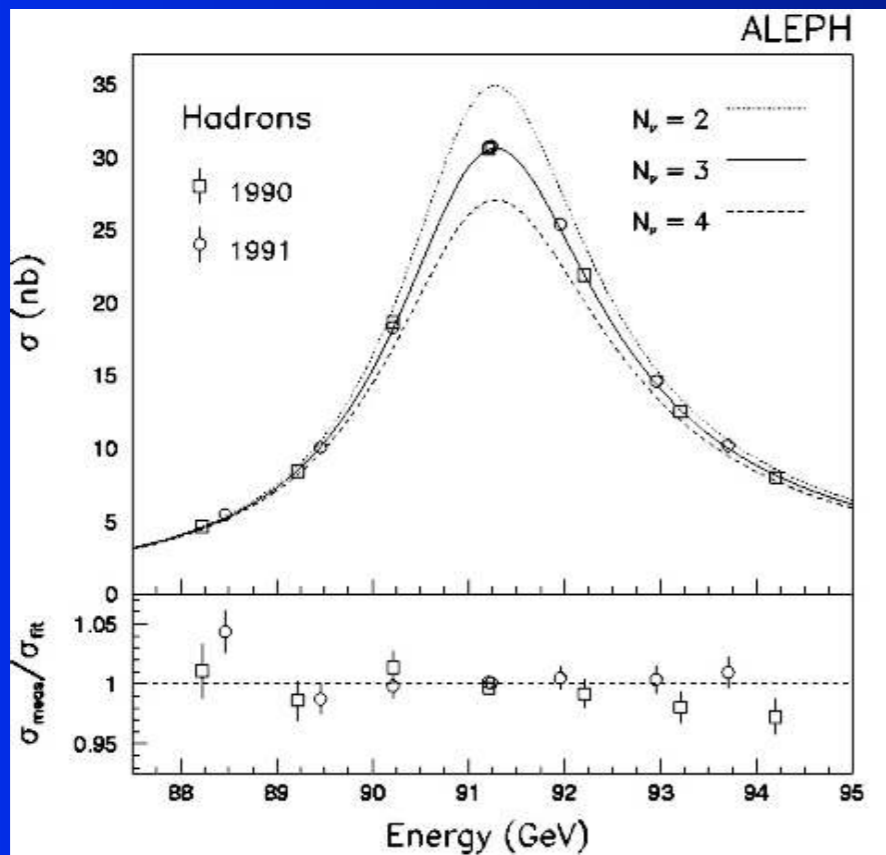
Сильные

Слабые

Число поколений в СМ (ускорительные данные)



Форма Z-линии полученная на ускорителе LEP зависит от числа поколений и позволяет определить число (лёгких) нейтрино или число поколений в Стандартной Модели



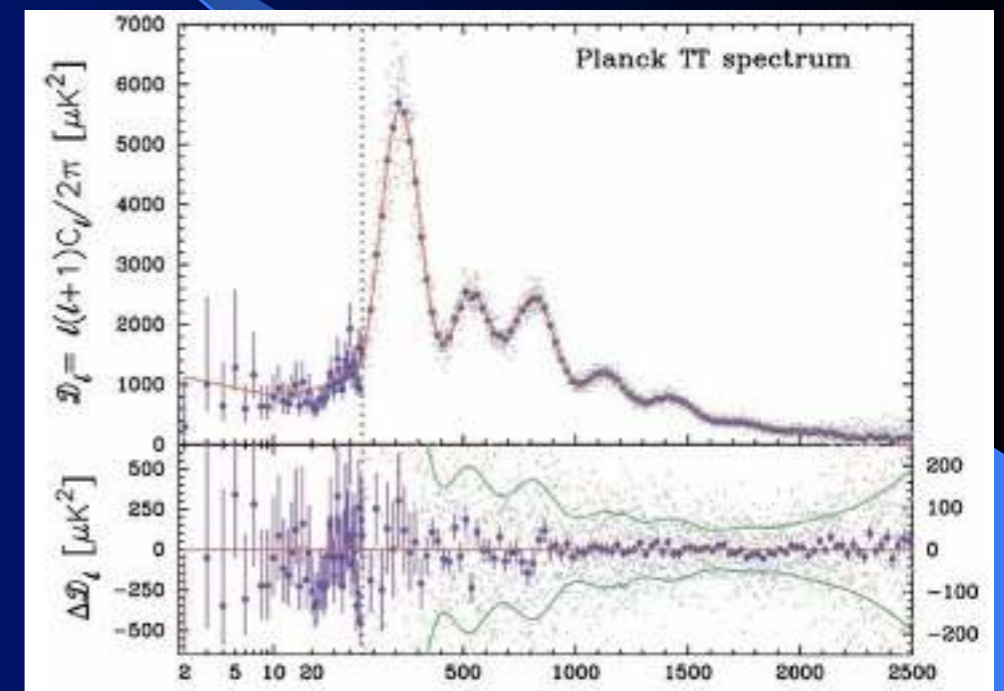
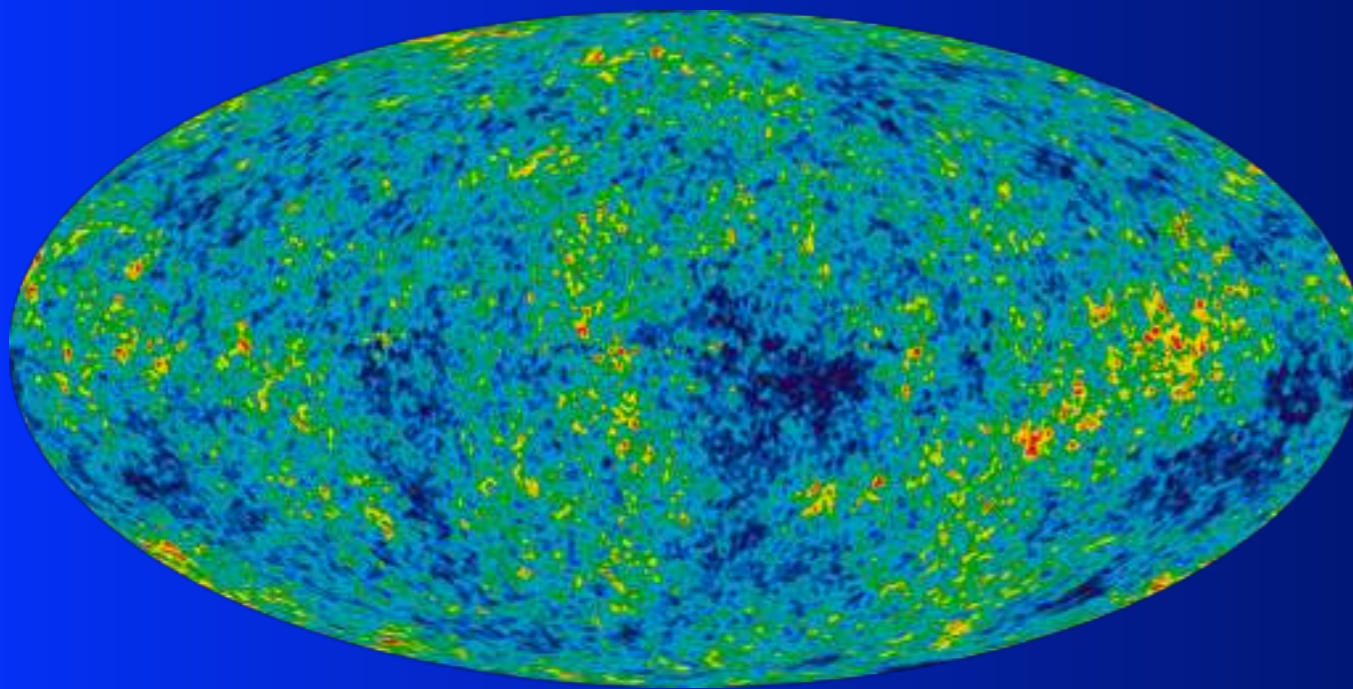
$$N_g = 2.982 \pm 0.013$$

Форма Z-линии

Реликтовое микроволновое излучение

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

Разложение по угловым гармоникам



Температурные флуктуации микроволнового фона

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



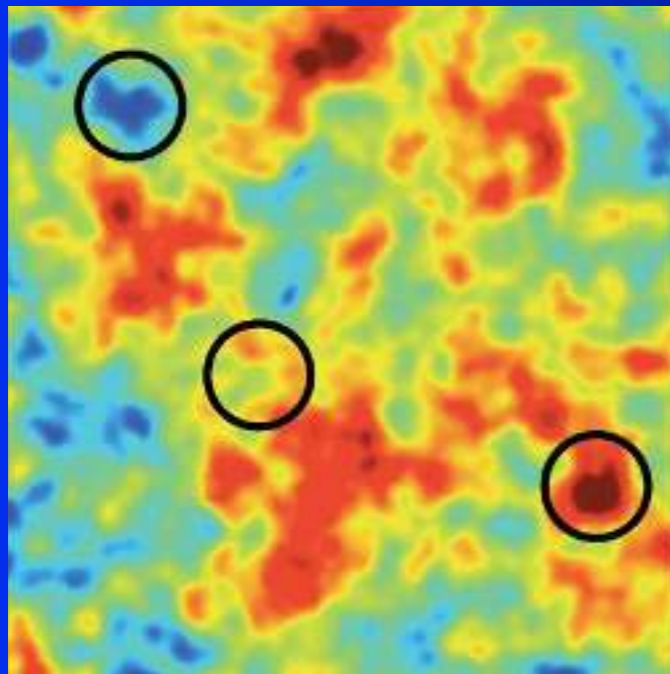
$$\Omega_{UsualMatter} = 4.9\%$$

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

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

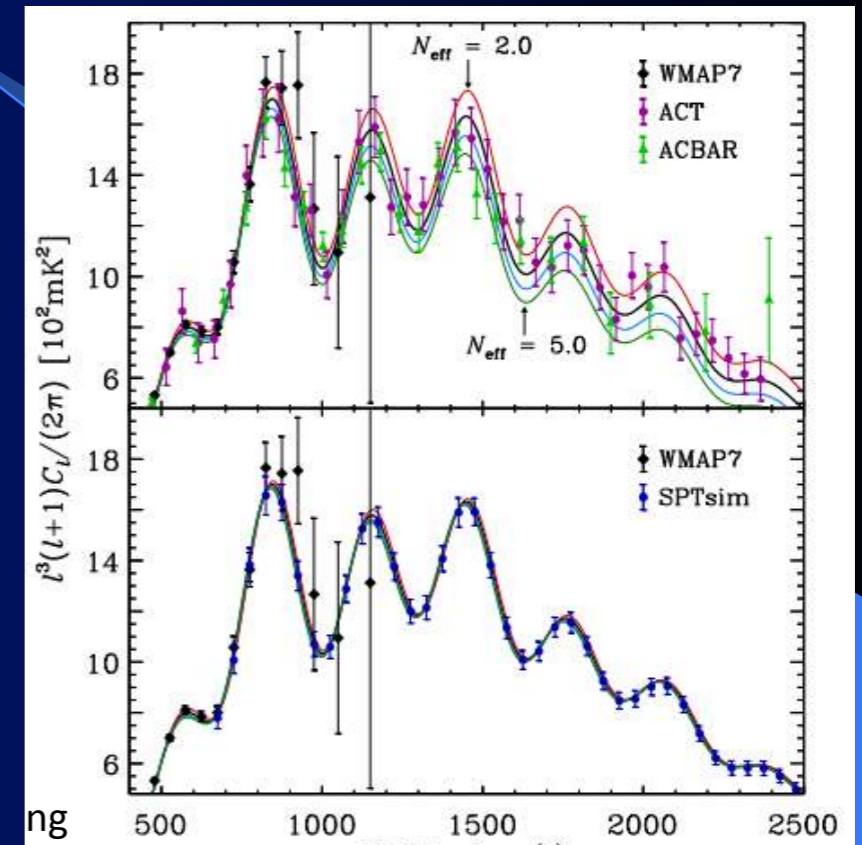
$$\Omega = 1.02 \pm_{\mp 3} 0.02$$

Число поколений в СМ

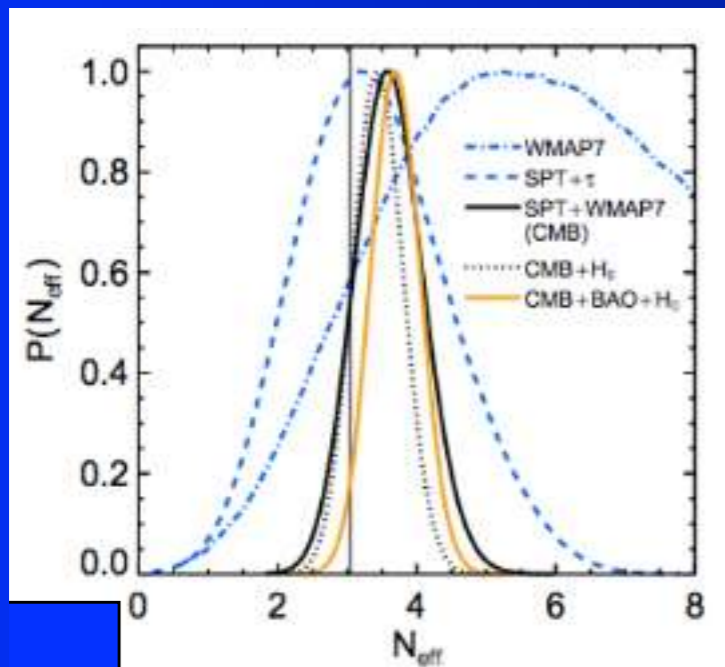


Температурные
флуктуации
микроволнового
фона
реликтового
излучения

Число
сортов
активных
нейтрино



Разложение по гармоникам



CMB + HST

$$N_{eff}^{\nu} = 3.62^{+0.50}_{-0.48}$$

CMB + SNLS

$$N_{eff}^{\nu} = 3.51^{+0.67}_{-0.63}$$

CMB + Union2

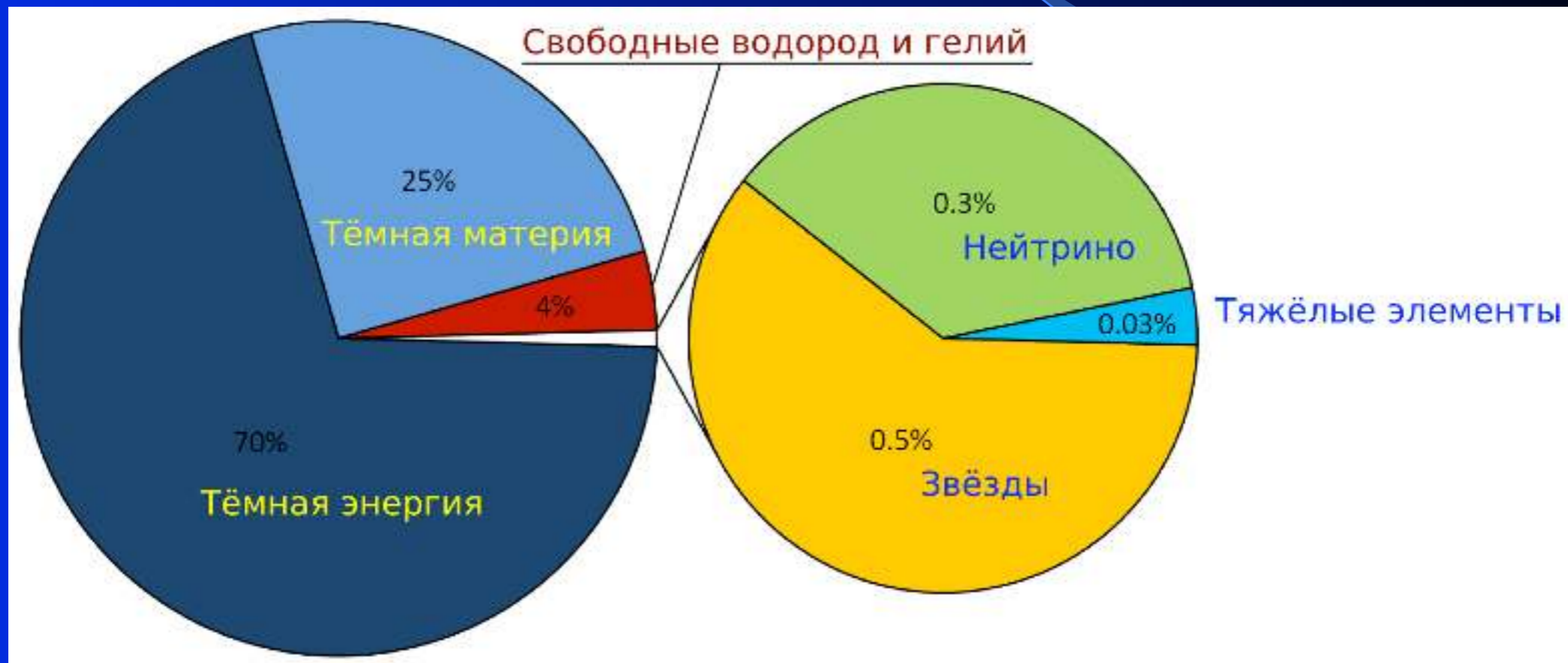
$$N_{eff}^{\nu} = 3.40^{+0.67}_{-0.63}$$

CMB + BAO

$$N_{eff}^{\nu} = 3.30^{+0.54}_{-0.51}$$

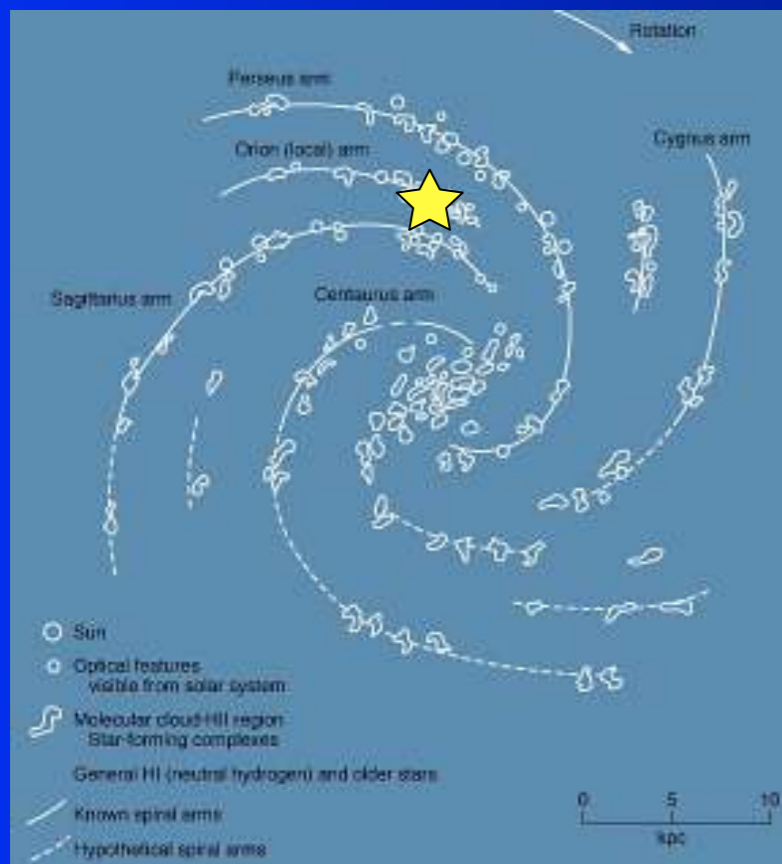
Тёмная материя

Энергетический баланс Вселенной



Наше знание касается лишь малой части Вселенной, однако возможно нам известны 90% (50%) элементарных частиц

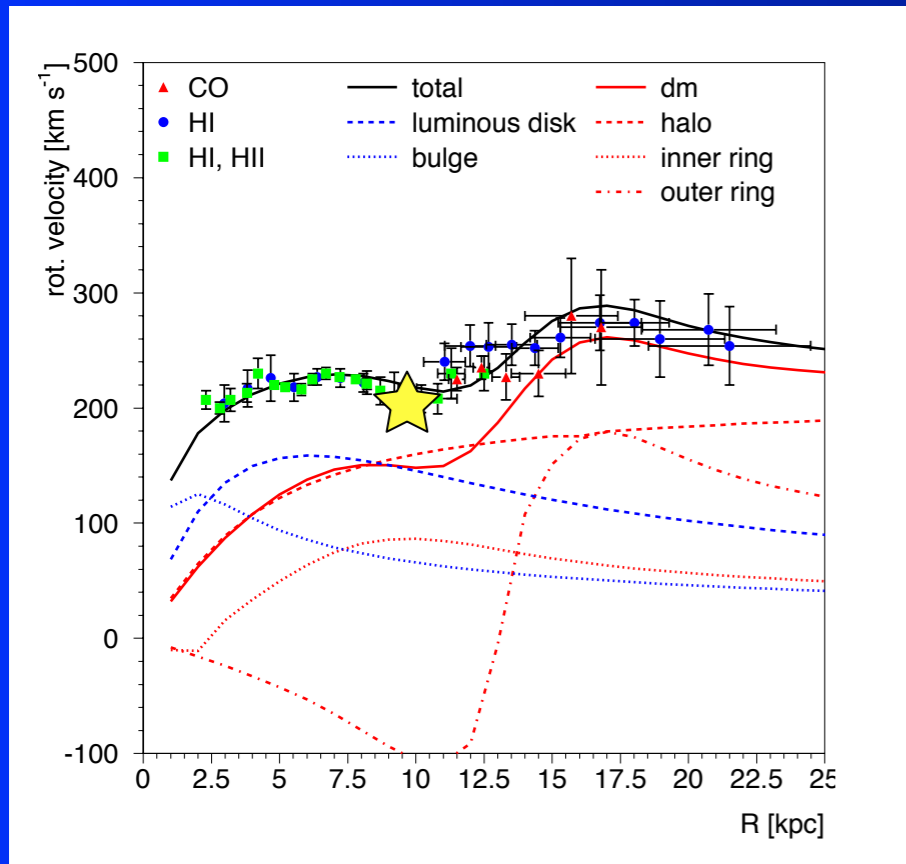
Млечный путь



Спиральные рукава

Млечный путь - типичная спиральная галактика, представляет собой диск размером около 20 кПс, с центральным сферическим ядром размером около 2 кПс. Солнце расположено в спиральном рукаве Орион на расстоянии ~ 8 кПс от центра

Млечный путь

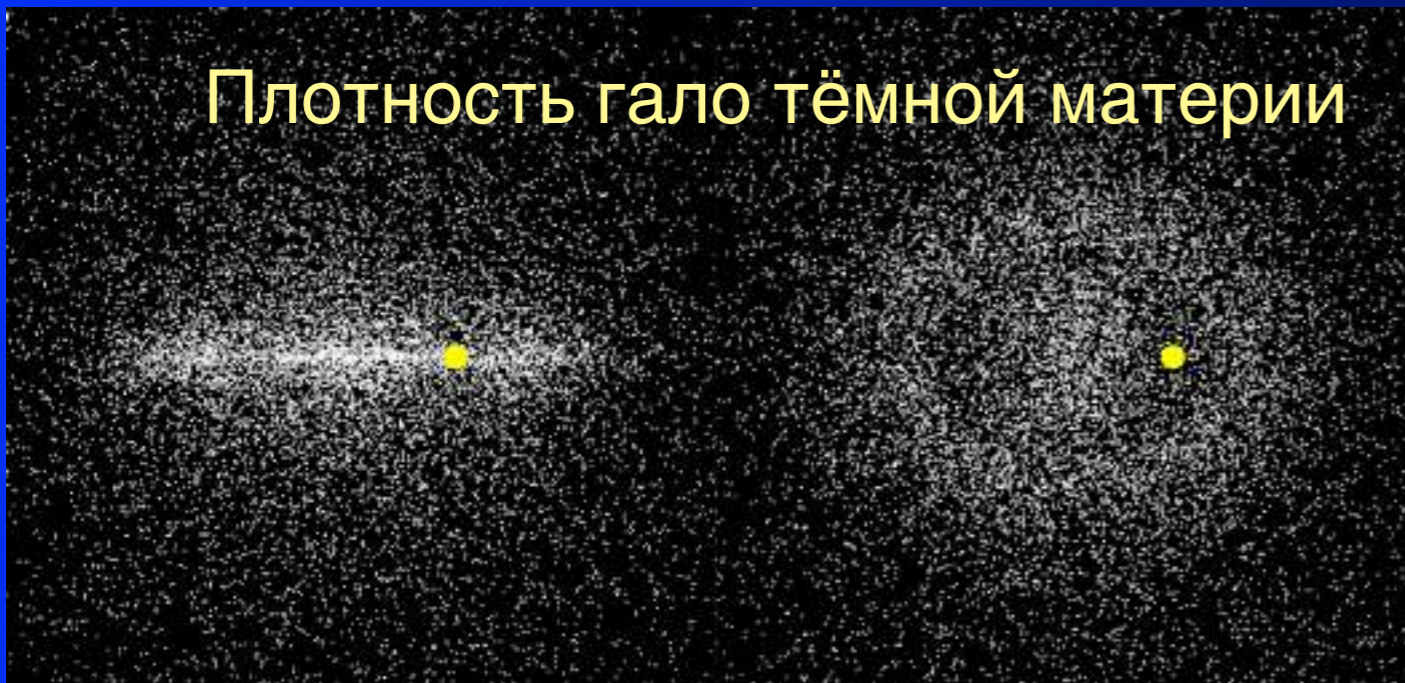


- Скорость вращения Земли вокруг Солнца - 30 км/сек
- Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики - 220 км/сек
- Скорость за счёт притяжения видимой материи - 175 км/сек
- Плотность ТМ в районе Солнца - 0.3 ГэВ/см

Кривая вращения звёзд

Сталкивающиеся спиральные галактики Арп 271

Плотность гало тёмной материи



Вид сбоку

Вид сверху



Загадка № 1:

Почему в природе
понадобились три поколения
элементарных частиц?

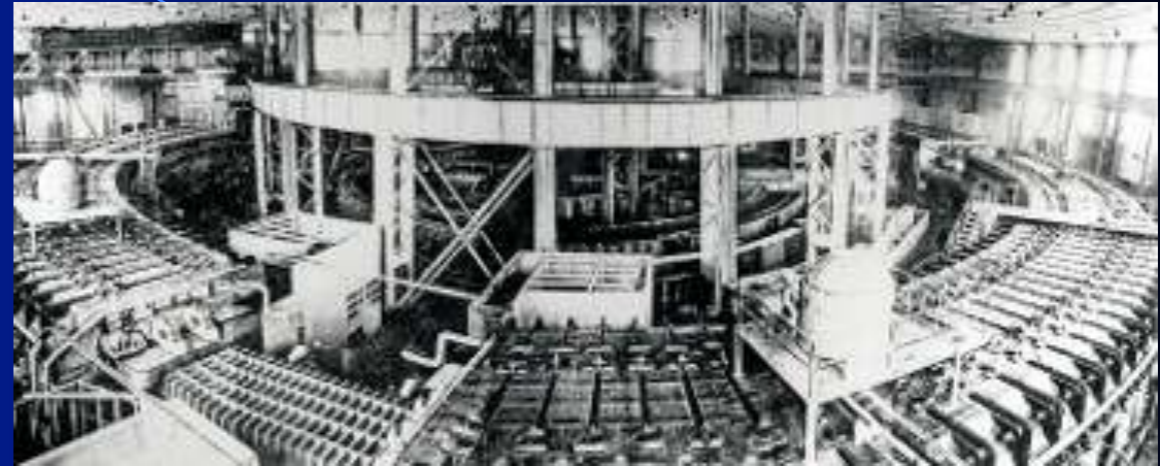
Загадка № 2:

Что такое тёмная
материя и из чего она
состоит?

Ускорители протонов



BNL Cosmotron (1952-1966) 3.3 GeV



Синхрофазотрон Дубна ОИЯИ 1957 10 ГэВ

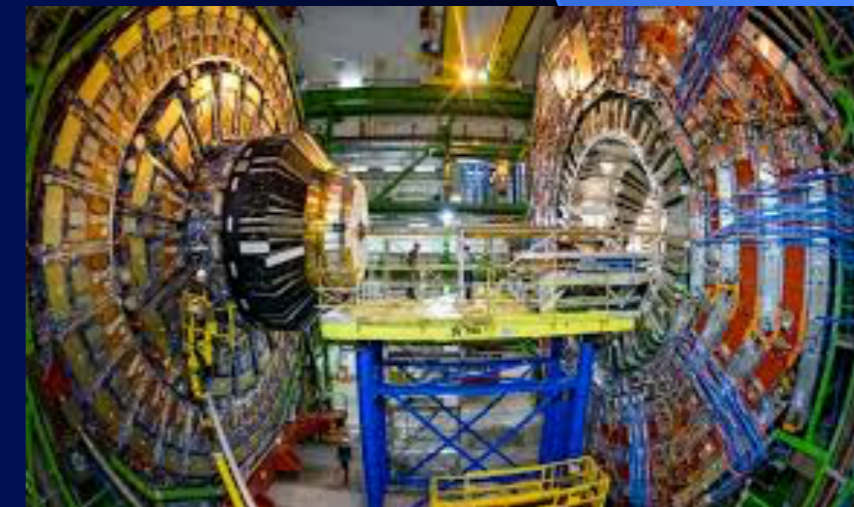
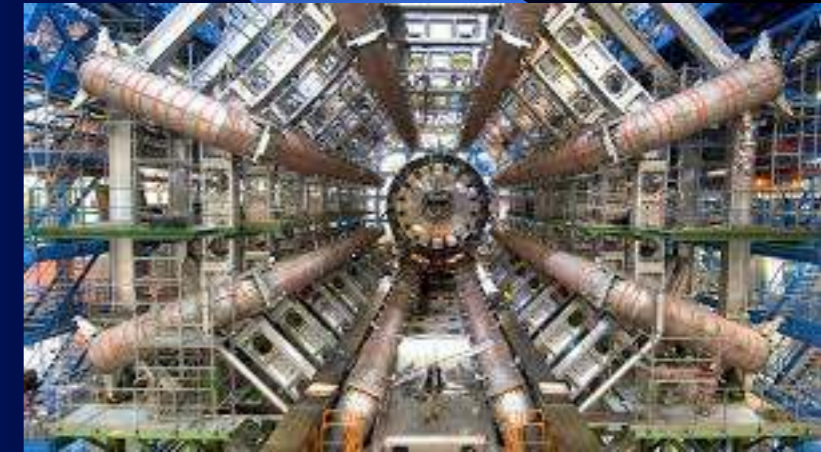
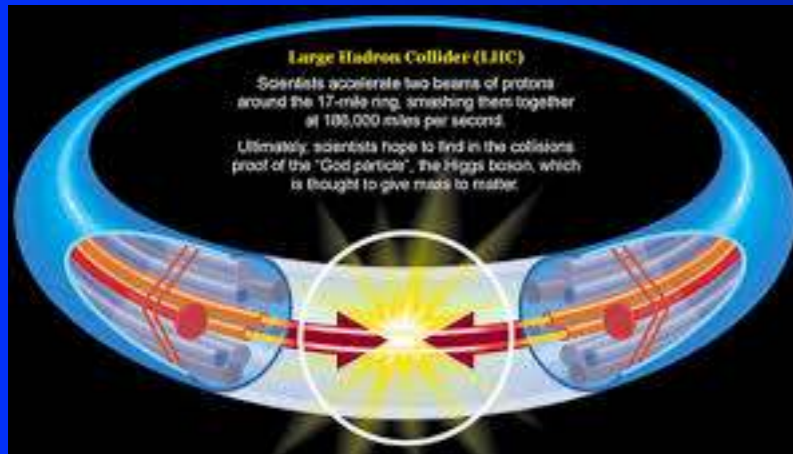
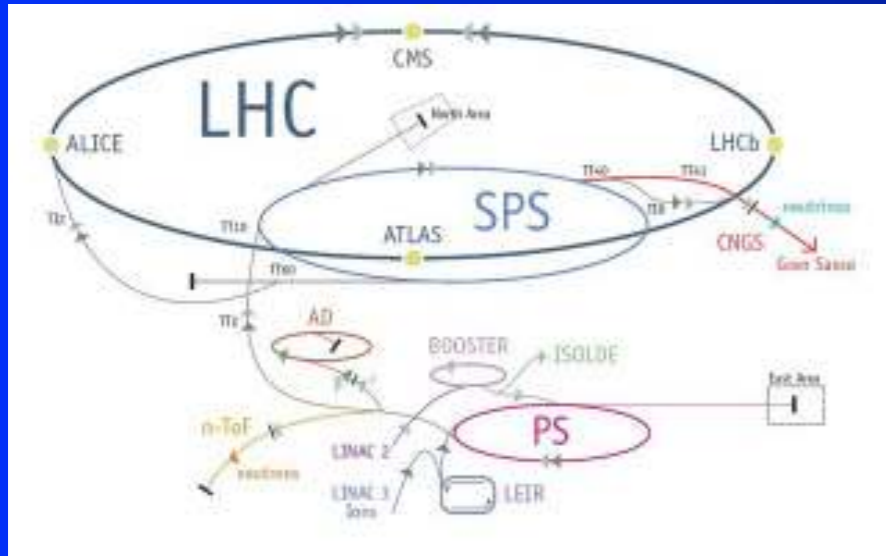


Синхрофазотрон Протвино ИФВЭ 1967 70 ГэВ



Super-proton-synchrotron CERN 1976 450 ГэВ

Большой адронный коллайдер



Большой адронный коллайдер

