

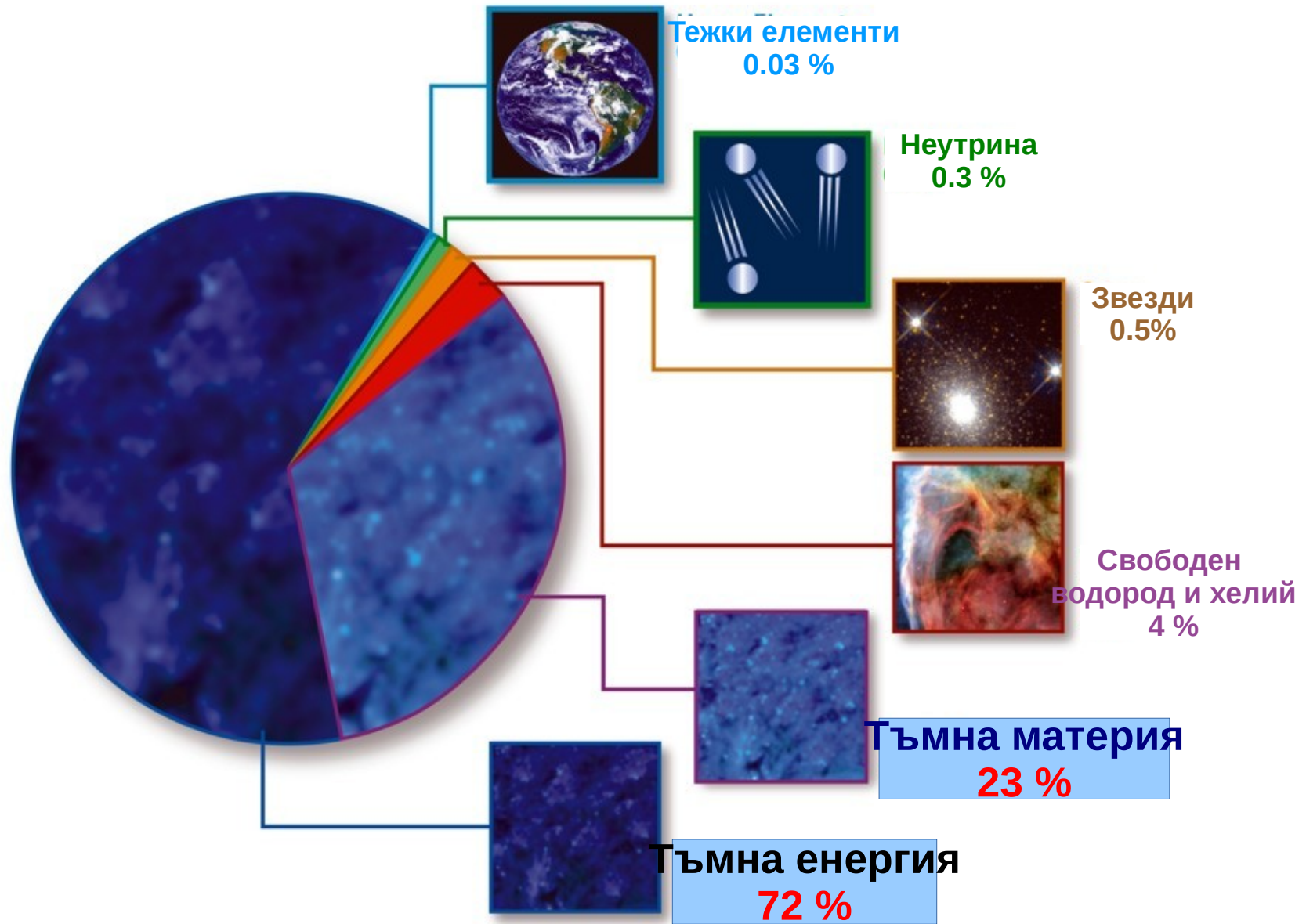
**Въведение във физиката на**  
**елементарните частици,**  
**въведение в ускорителите и**  
**тяхното бъдеще**  
**I-ва част**

**Румяна Хаджийска**  
**ИЯИЯЕ, Българска Академия на Науките**  
**CMS Experiment, CERN**  
*[roumyana.mileva.hadjiiska@SPAMNOTcern.ch](mailto:roumyana.mileva.hadjiiska@SPAMNOTcern.ch)*

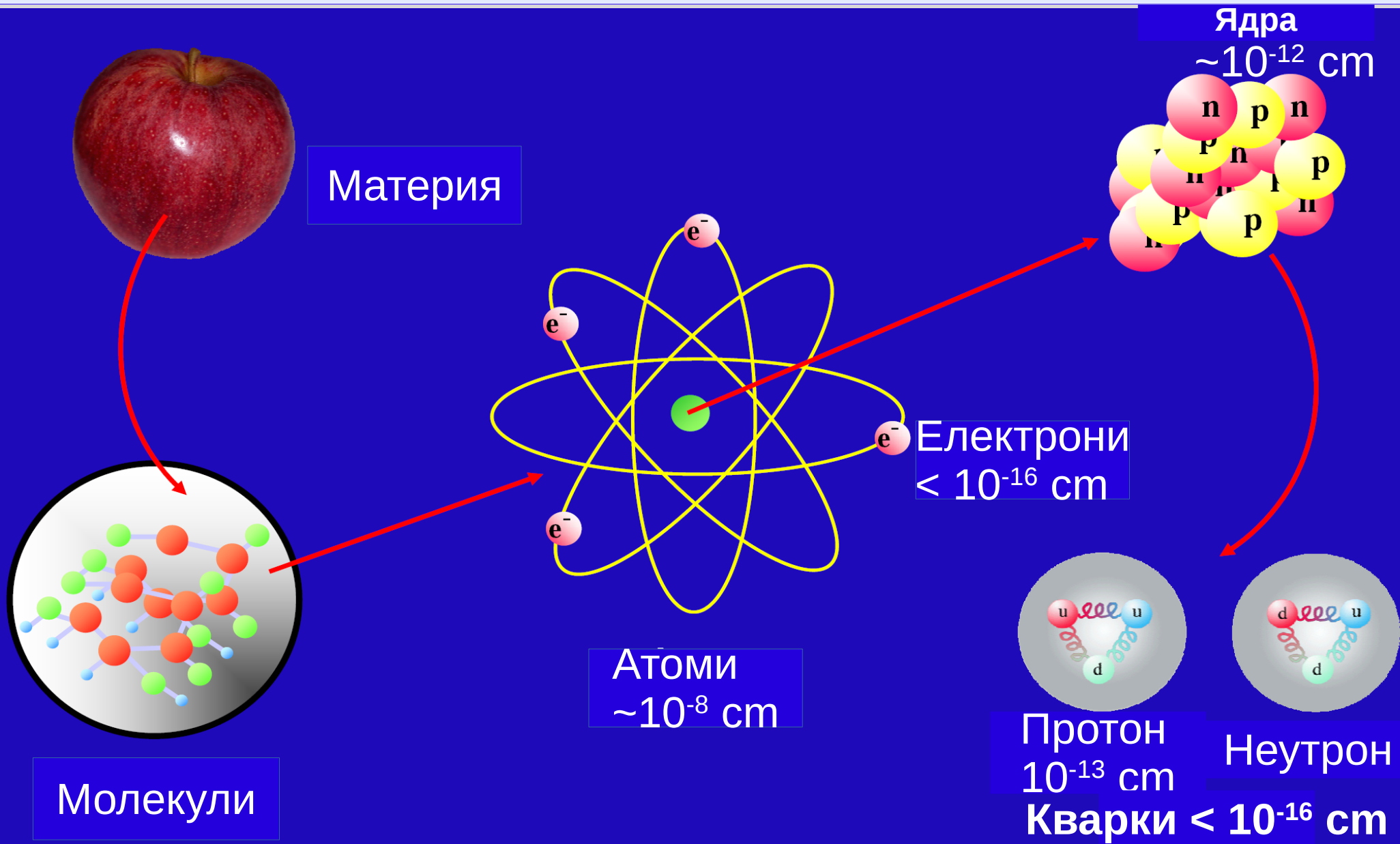
# От какво е направен светът и какво задържа фундаменталните му съставни заедно?

Под фундаментални обекти ние имаме предвид, че те нямат структура и не са съставени от други по-малки обекти.

# Вселената, както я познаваме



# Светът около нас



quarks

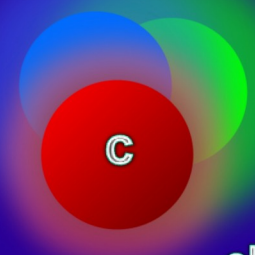
1-st generation

2-nd generation

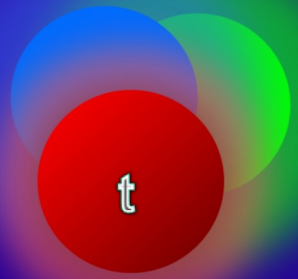
3-rd generation



up



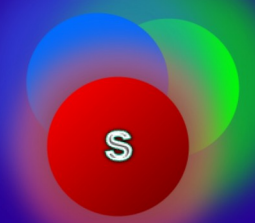
charm



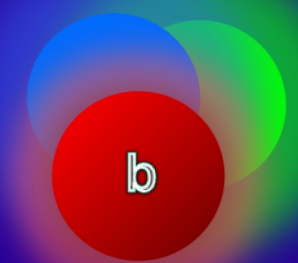
top



down



strange



beauty

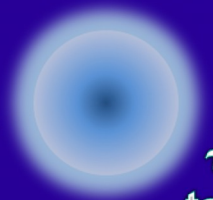
leptons



electron



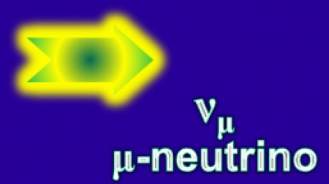
muon



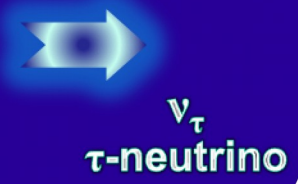
tau



e-neutrino



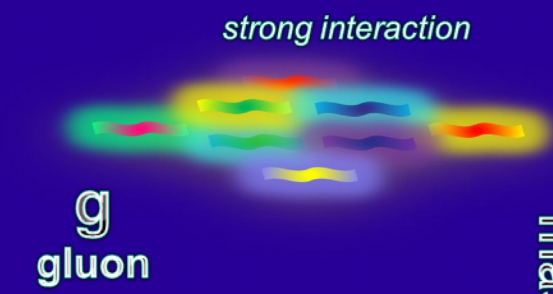
μ-neutrino



τ-neutrino

fermions

force carriers



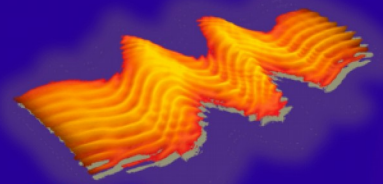
gluon

electromagnetic interaction



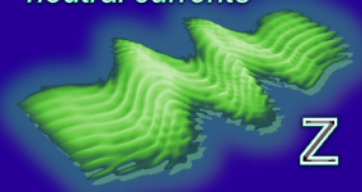
photon

weak interaction  
charged currents



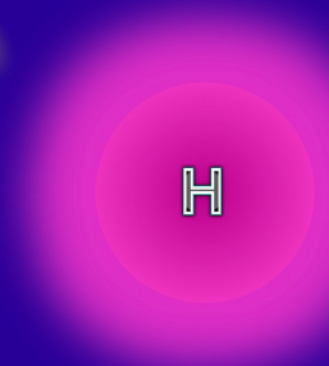
W+W-

weak interaction  
neutral currents



Z

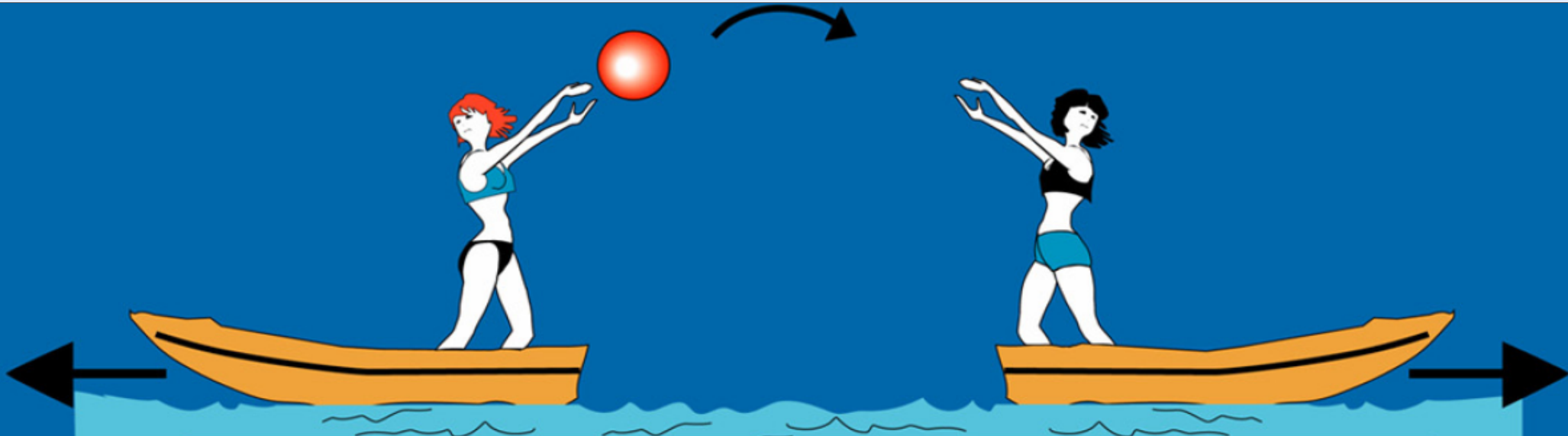
electro-weak  
symmetry breaking  
mass generating



H

bosons

# Взаимодействия



**Електромагнитно:** *Най-изследваното взаимодействие, светлина, електричество, електроника ....., в основата на почти всички технологии.*

**Силно :** *Взаимодействия на протоните и неутроните в ядрото, взаимодействия на кварките и глюоните;*

**Слабо:** *Енергия на слънцето, радиоактивно разпадане;*

**Гравитационно:** *Задържа ни на Земята, Слънчева система,...*

**Взаимодействащи си частици + преносители на взаимодействие**

**Стандартен модел на елементарните частици**

**СМ не включва гравитация!**

# Взаимодействия

## Силни

- глюон,  $M_g = 0$
- Относителна сила - 1

## Електромагнитни:

- фотон,  $M_\gamma = 0$
- Относителна сила –  $10^{-2}$

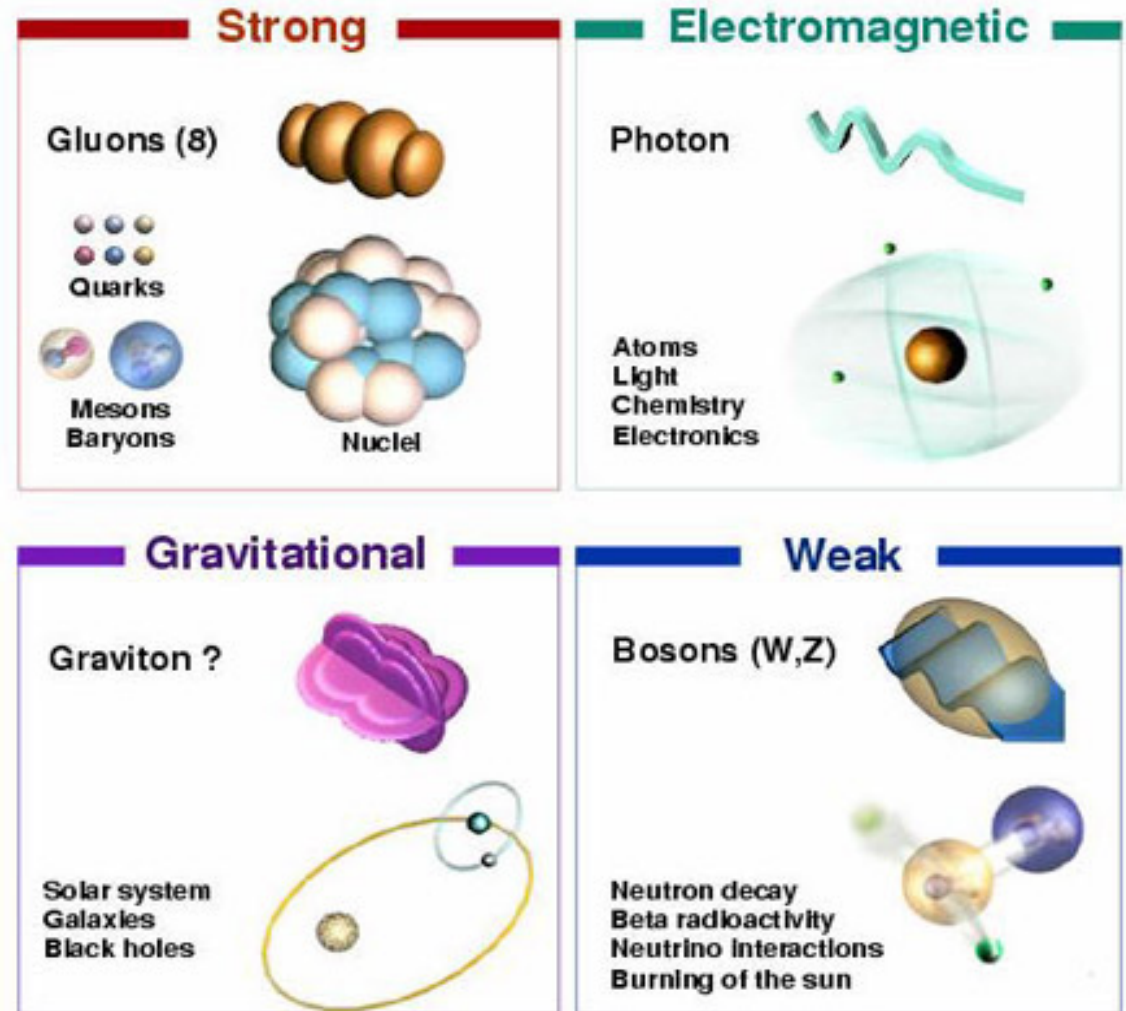
## Слаби

- W,Z бозони
- $M_W = 80.43 \text{ GeV}$ ,
- $M_Z = 91.19 \text{ GeV}$
- Относителна сила –  $10^{-7}$

## Гравитационно

- *гравитон ?*,  $M=0$ , *спин 2*
- *Относителна сила –  $10^{-38}$*

Всички преносители са бозони – **спин 1**



*The particle drawings are simple artistic representations*

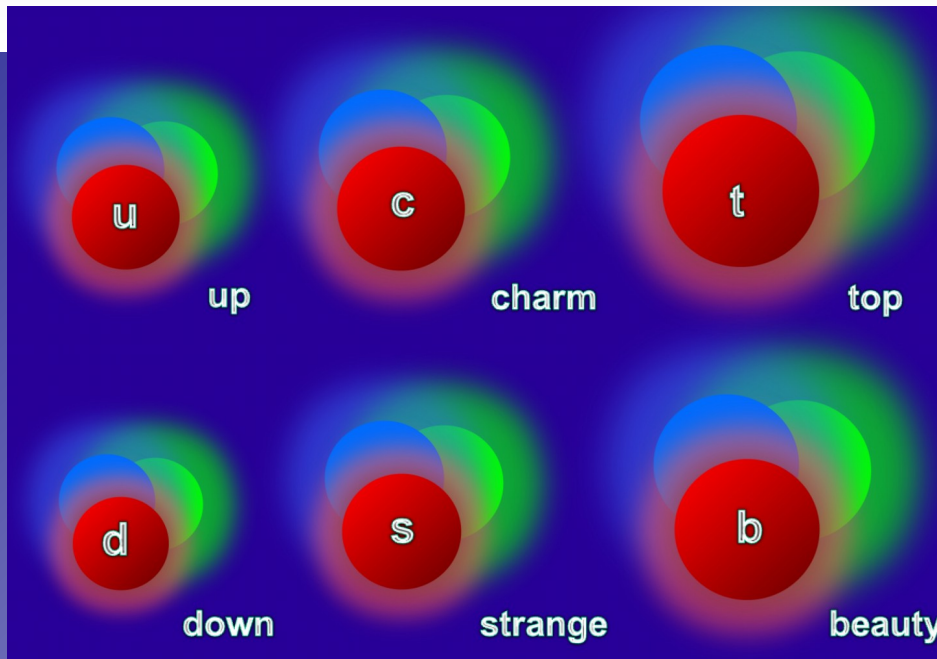
# Кварков строеж на адроните



Murray Gell-Mann

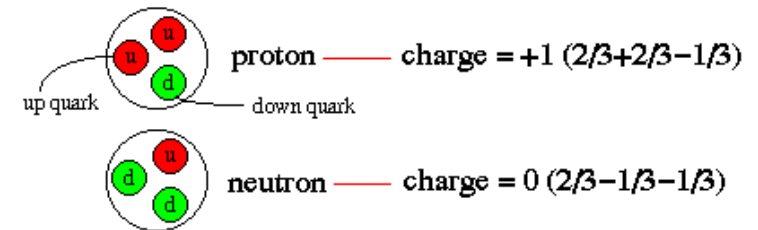
В средата на миналия век, учените откриват стотици нови частици. Мъри Гел-Ман (**Murray Gell-Mann**) и Джордж Цвайг (**George Zweig**) изграждат теорията за кварковия строеж на адроните, като предполагат, че всички тези частици могат да бъдат обяснени като комбинация единствено на три фундаментални частици, които те наричат **кварки**. Те постулират дробен електричен заряд на кварките. **Различни комбинации от три кварка изграждат барионите, а комбинациите от два кварка изграждат мезони.**

По-нататъшните експерименти показват, че всъщност адроните се изграждат не от три, а от 6 кварка.

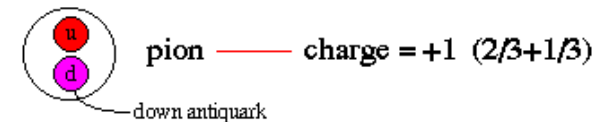


## Atomic Nuclei = Combinations of Quarks

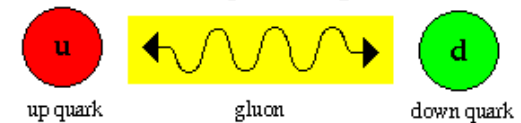
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



What binds quarks together?



the strong force carried by gluons



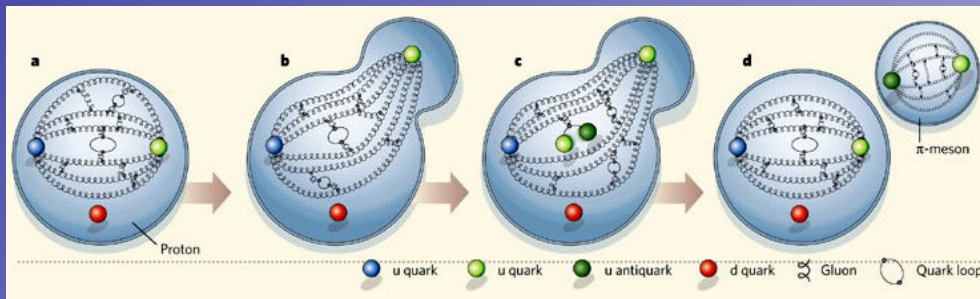
# Кварки, глюони и цветен заряд

Силните взаимодействия задържат кварките заедно в адроните. Преносителите на силните взаимодействия се наричат глюони (от английската дума glue - лепило).

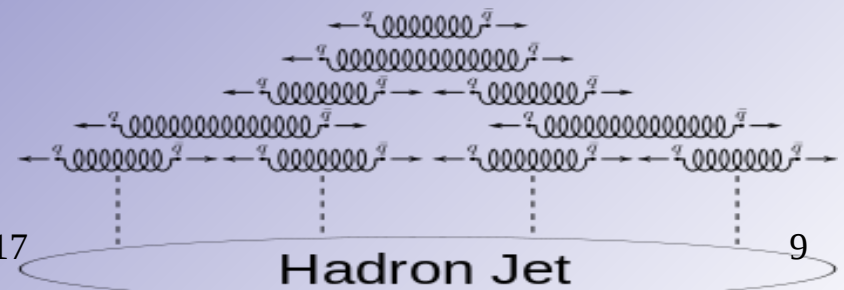
Кварките и глюоните имат цветни заряди. **Композитните частици, изградени от кварки са цветово неутрални.** Цветните заряди и взаимодействия се държат различно от електромагнитните. Кварките не могат да съществуват индивидуално. При опит да раздалечим два кварка, силната на цветното взаимодействие нараства и задържа кварките в така наречения кварков затвор.

## Партони -- кварки + глюони

*При достатъчно висок импулс един отделен кварк може да се отдели от протона, при това силата на привличане нараства с разстоянието и глюонното поле ражда допълнителни кварк-антикваркови двойки – ражда се пион или различни видове адрони /пиони, каони и др./*



Новите адрони, родени при този процес (адронизация) се групират по направление на импулса на високо енергетичните кварки – образуват се „адронни струи“ които се регистрират в детектора

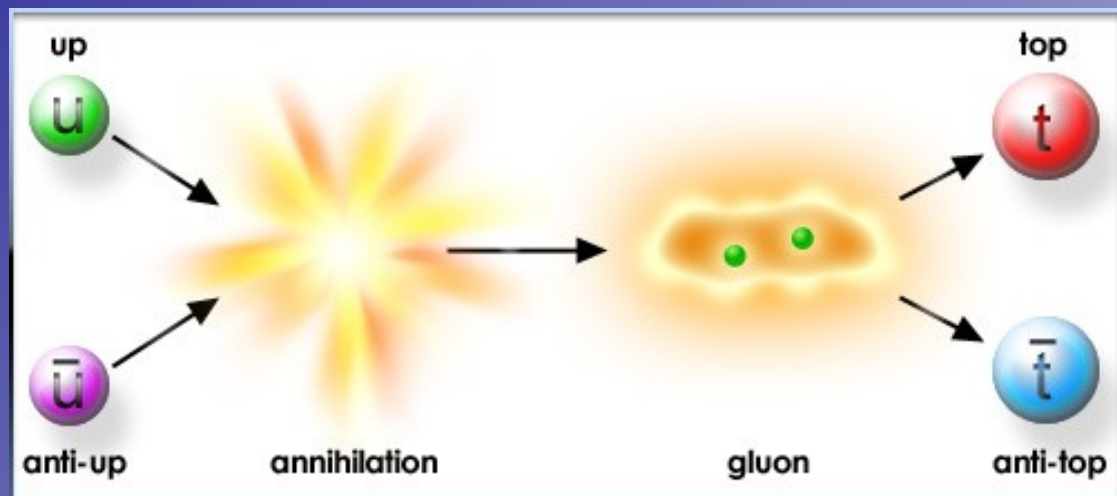


**Всичко във Вселената от галактиките до планините и молекулите е изградено от кварки и лептони.**

## **Но дали това е всичко?**

Кварките и лептоните са различни. Освен това за всеки тип частица съществува и античастица. Античастиците имат същите свойства като съответните частици, но имат противоположни заряди.

Когато взаимодействат частица и античастица те анихилират.



<http://www.particleadventure.org/antipreface.html>

5.Септември.2017

Bulgarian HSSIP 2017



10

# Симетрията като обединяващ принцип



Еми Ньотер (Emmy Noether)

**Връзка между глобалните симетрии и законите за запазване**

**Хомогенност на пространството**

Транслация във пространството ( $x \rightarrow x + \Delta x$ ) → **Закон за запазване на импулса;**

Общата инерция на една изолирана система е константа, или  $dp/dt=0$

**Еднородност на времето**

Транслация във времето ( $t \rightarrow t + \Delta t$ ) → **Закон за запазване на енергията;**

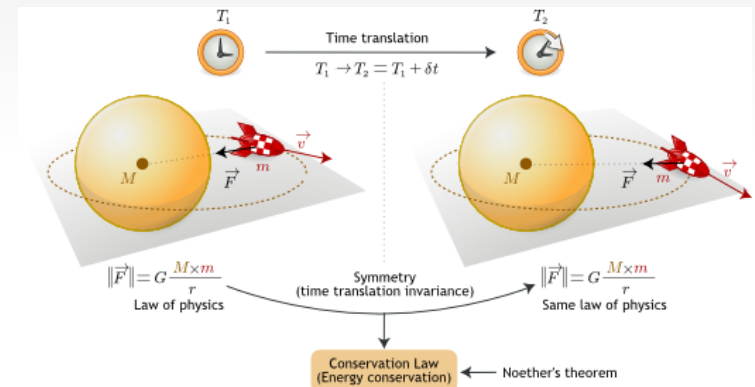
Енергията на една изолирана система е константа, или  $dE/dt=0$



**Изотропност на пространството**

Ротация във пространството → **Закон за запазване на ъгловия момент.**

Общият ъглов момент на една изолирана система е константа, или  $dL/dt=0$ , където  $L = \sum L_i$ , а  $L_i = r_i \times p_i$



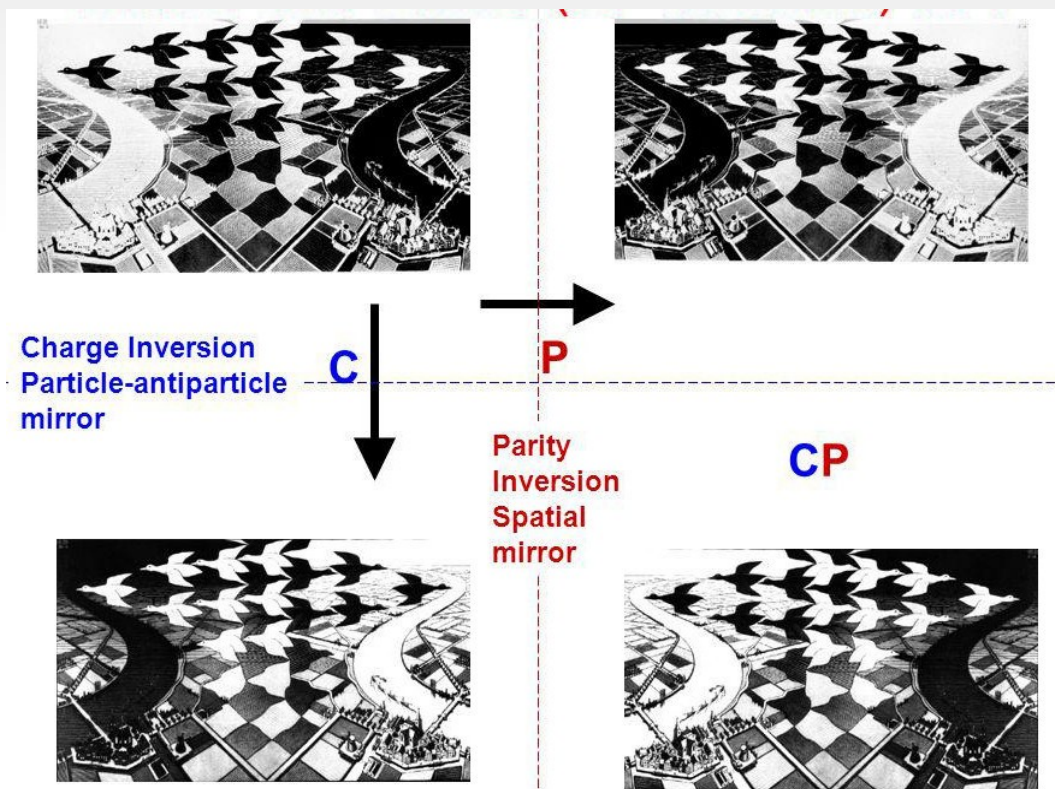
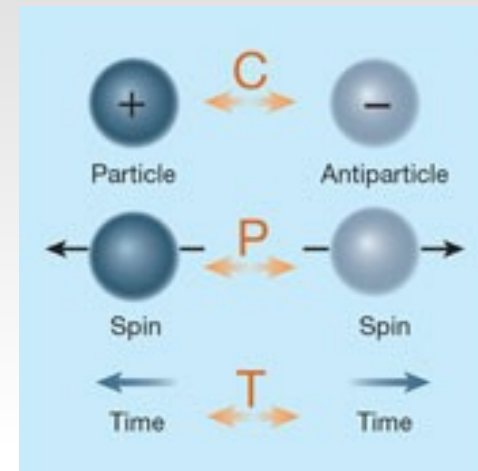
# Симетрията като обединяващ принцип

## Дискретни симетрии

„P“ - пространствена четност, преобразование на координатите, огледално отражение, аксиалните вектори запазват посоката си, докато полярните я променят противоположно

„C“ - зарядова четност, преобразование на зарядите

„T“ – временна четност, обръщане на посоката на времето



Charge Inversion  
Particle-antiparticle  
mirror

C

P

Parity  
Inversion  
Spatial  
mirror

CP

Нарушение на дсиметриите:

Общата CPT симетрията се запазва,

Но слабите взаимодействия нарушават P, а също и комбинираната CP инвариантност

credit: Chris Parkes

<http://slideplayer.com/slide/774084/>

# Стандартен модел на елементарните частици

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_F = & \sum_i \bar{\psi}_i \left( i\gamma^\mu \partial_\mu - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i && \text{Higgs Interactions} \\ & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i && \text{Weak Charged Interactions} \\ & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu && \text{Electromagnetic Interactions} \\ & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (d_V^i - d_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu && \text{Electroweak Neutral Interactions}\end{aligned}$$

<http://pdg.lbl.gov/>

## 2. Отворени въпроси пред Стандартния Модел

Как се определят масите на е.ч.? – Механизъм на Хигс

Защо имаме 3 поколения елементарни частици ?

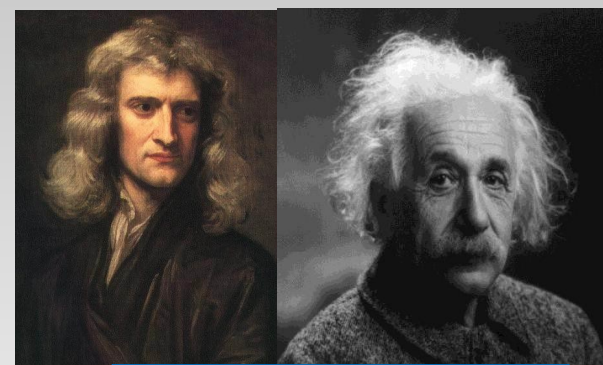
Съотношение материя/антиматерия във Вселената и връзка с CP нарушение в Стандартния Модел?

От какво е съставена “тъмната материя” и “тъмната енергия” във Вселената?

Свойствата на материята в първите мигове на Вселената? (кварк-глюонна плазма?)

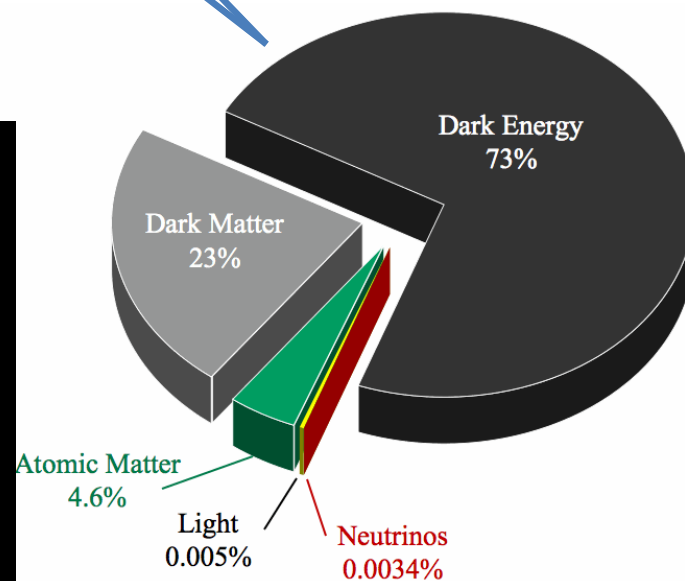
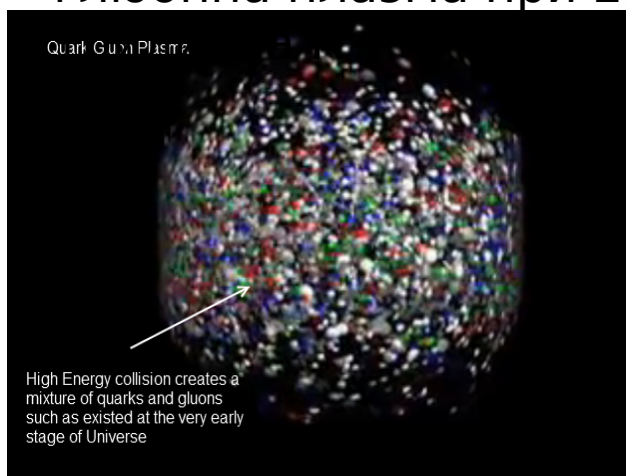
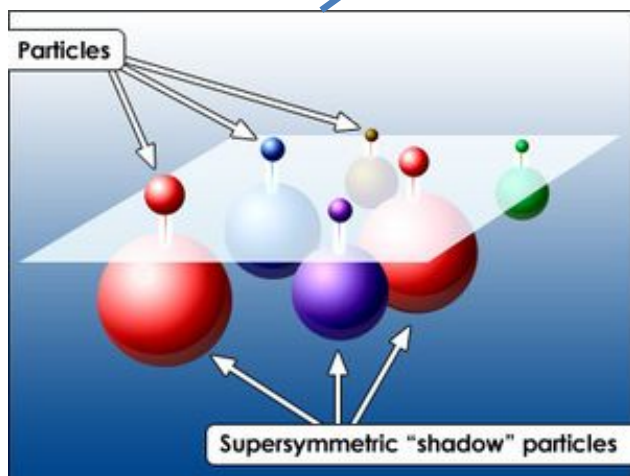
Съществуват ли допълнителните измерения?

Има ли нова симетрия? SUSY?

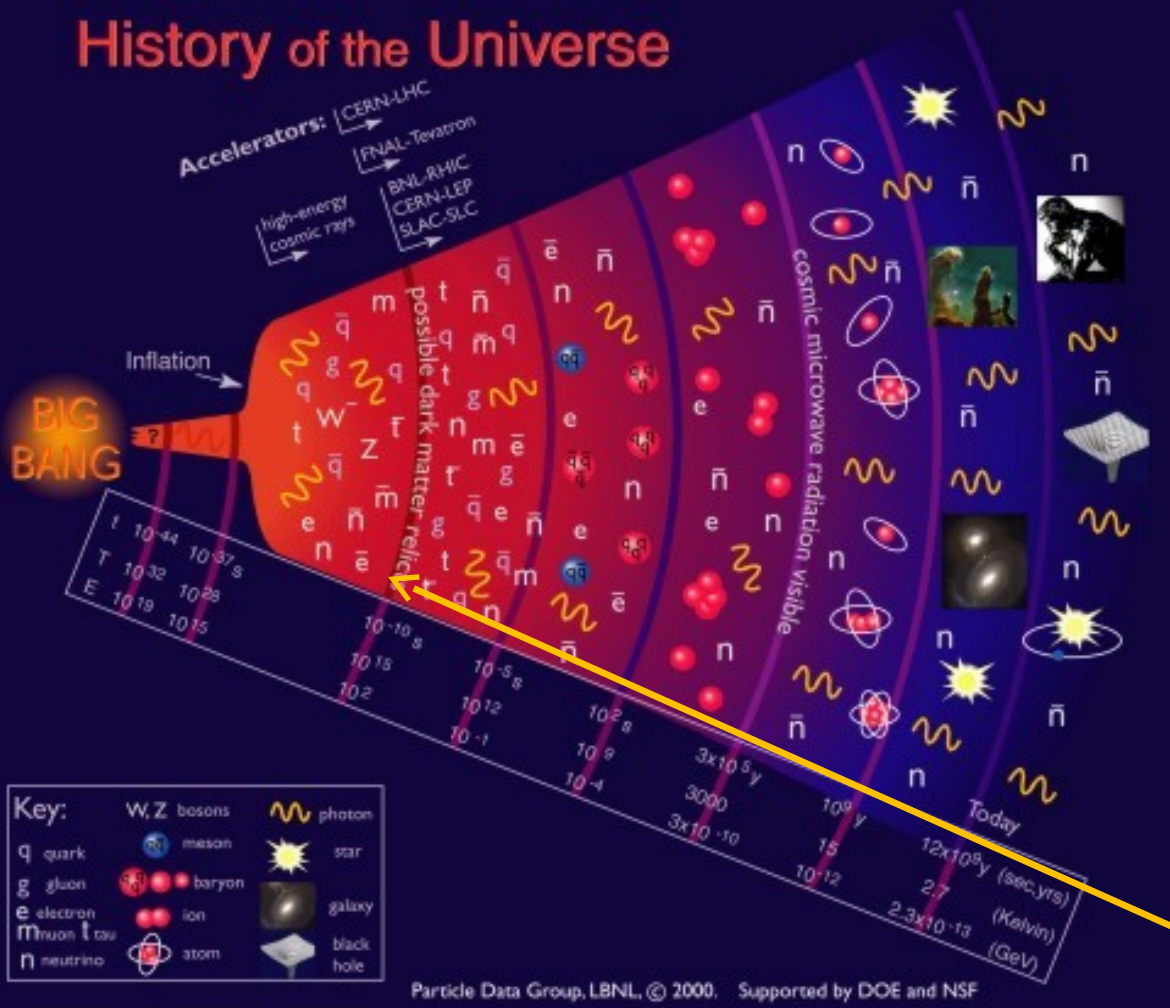


$F = ma$     $E = mc^2$   
Всичко това е правилно.  
Но как един обект става масивен?

### Симулация на кварк глюонна плазма при 2

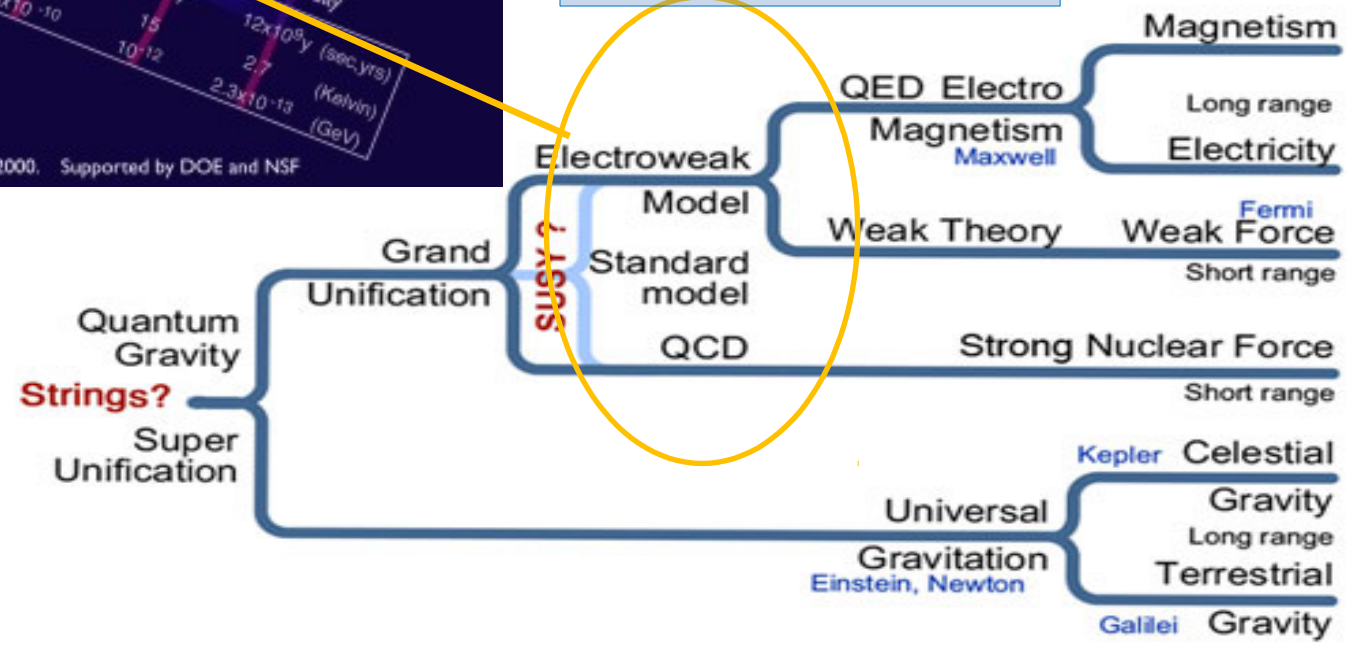


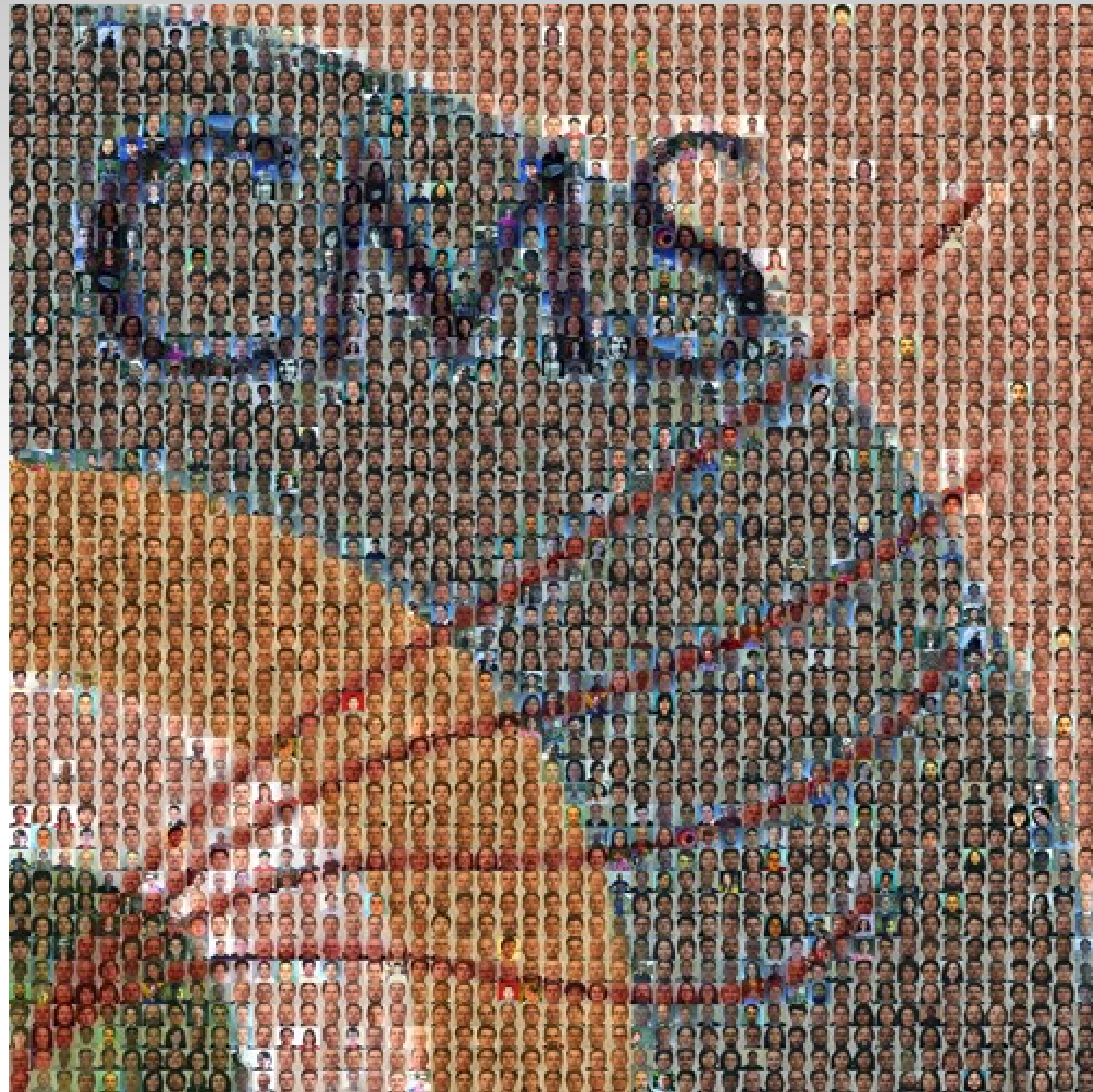
# History of the Universe



*Експериментална проверка на Стандартния Модел и нови елементарни частици в експеримента CMS на LHC*

Граница на нашето познание до днес





***Б  
Л  
А  
Г  
О  
Д  
А  
Р  
Я  
!***



# Backup Slides

# Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

## FERMIONS

matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	<1×10 <sup>-8</sup>	0	<b>U</b> up	0.003	2/3
<b>e</b> electron	0.000511	-1	<b>d</b> down	0.006	-1/3
$\nu_\mu$ muon neutrino	<0.0002	0	<b>C</b> charm	1.3	2/3
<b>μ</b> muon	0.106	-1	<b>S</b> strange	0.1	-1/3
$\nu_\tau$ tau neutrino	<0.02	0	<b>t</b> top	175	2/3
<b>τ</b> tau	1.7771	-1	<b>b</b> bottom	4.3	-1/3

**Spin** is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum, where  $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$  GeV s =  $1.05 \times 10^{-34}$  J s.

**Electric charges** are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c<sup>2</sup> (remember  $E = mc^2$ ), where 1 GeV =  $10^9$  eV =  $1.60 \times 10^{-10}$  joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c<sup>2</sup> =  $1.67 \times 10^{-27}$  kg.

## BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

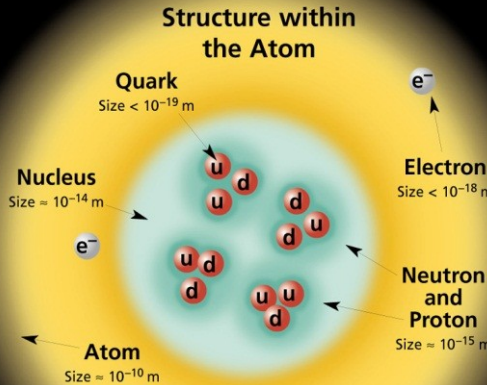
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge	Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0	<b>g</b> gluon	0	0
<b>W<sup>-</sup></b>	80.4	-1			
<b>W<sup>+</sup></b>	80.4	+1			
<b>Z<sup>0</sup></b>	91.187	0			

**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and **W** and **Z** bosons have no strong interactions and hence no color charge.

**Quarks Confined in Mesons and Baryons**  
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons**  $q\bar{q}$  and **baryons**  $qqq$ .

### Quarks Confined in Mesons and Baryons

**Residual Strong Interaction**  
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

Property \ Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong	
				Fundamental	Residual
<b>Acts on:</b>	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
<b>Particles experiencing:</b>	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
<b>Particles mediating:</b>	Graviton (not yet observed)	<b>W<sup>+</sup> W<sup>-</sup> Z<sup>0</sup></b>	$\gamma$	Gluons	Mesons
<b>Strength</b> relative to electromag for two u quarks at:					
for two u quarks at: $10^{-18}$ m	$10^{-41}$	0.8	1	25	Not applicable to quarks
$3 \times 10^{-17}$ m	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60	
for two protons in nucleus	$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	Not applicable to hadrons	20

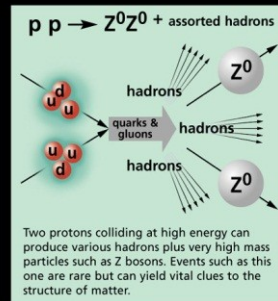
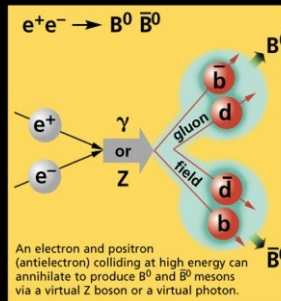
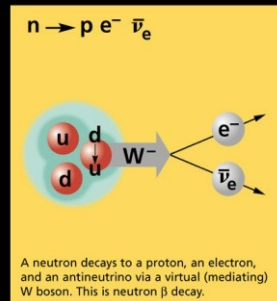
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	<b>u<math>\bar{d}</math></b>	+1	0.140	0
<b>K<sup>-</sup></b>	kaon	<b>s<math>\bar{u}</math></b>	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	<b>u<math>\bar{d}</math></b>	+1	0.770	1
<b>B<sup>0</sup></b>	B-zero	<b>d<math>\bar{b}</math></b>	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	<b>c<math>\bar{c}</math></b>	0	2.980	0

### Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c = c\bar{c}$ , but not  $K^0 = d\bar{s}$ ) are their own antiparticles.

### Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are **not** exact and have **no** meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



### The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy  
U.S. National Science Foundation  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Stanford Linear Accelerator Center  
American Physical Society, Division of Particles and Fields  
**BURLE INDUSTRIES, INC.**

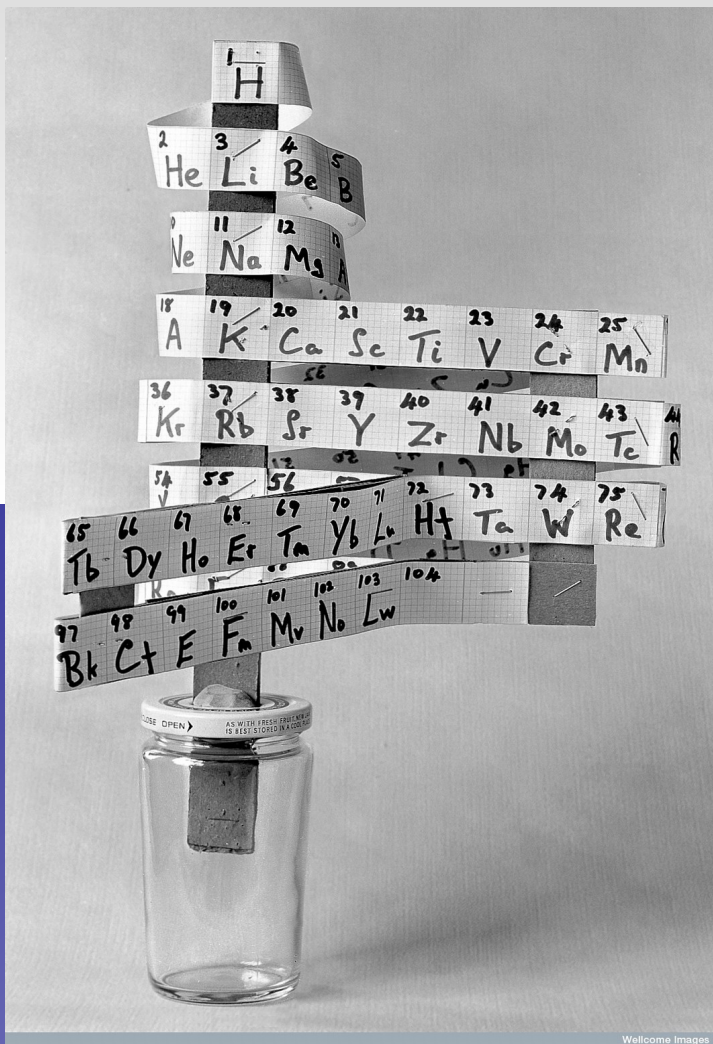
©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

# Химическите елементи са изградени от атоми

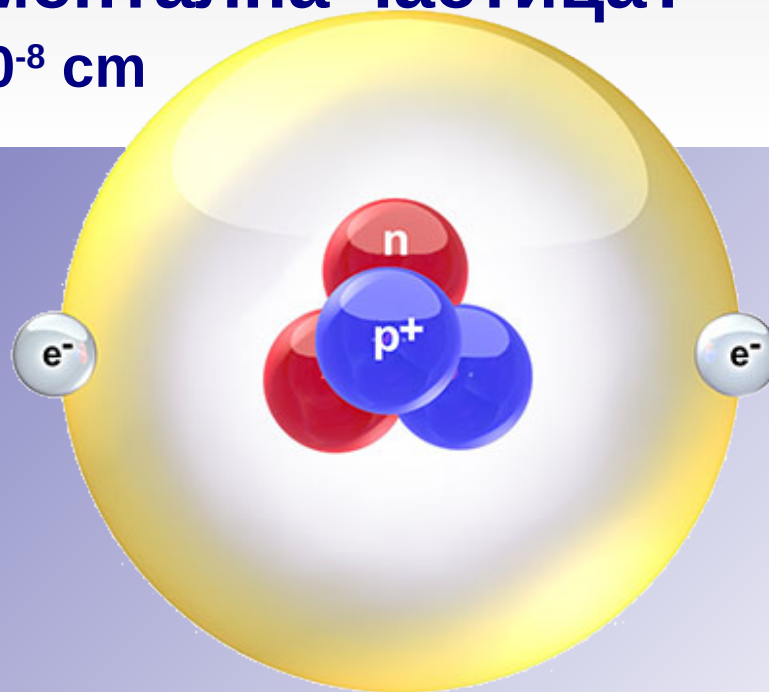
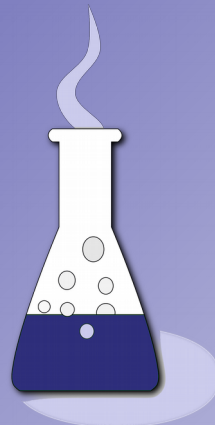
Не съществува друго освен атоми и празно пространство, останалото е мнение.  
(Демокрит ~460 пр.н.е.)

Atomos (Гръцки) - Неделим



## Дали атомът е фундаментална частица?

Атом  $\sim 10^{-8}$  cm



Credit: Wellcome Library, London. Wellcome Images  
From a model prepared at the Royal Institute of Chemistry  
Copyrighted work available under Creative Commons by-nc 2.0 UK

Schematic diagram of a helium-4 atom.  
Creative Commons Attribution image by Bruce Blaus  
from Wikimedia Commons.

Bulgarian HSSIP 2017

# Откриването на електрона

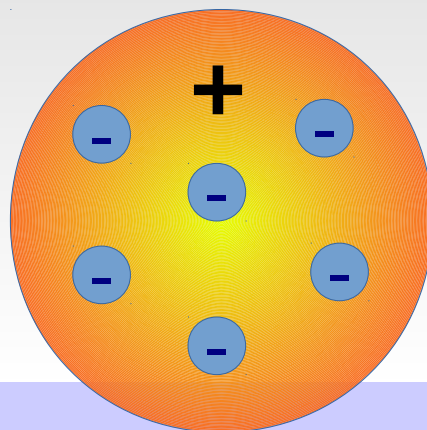
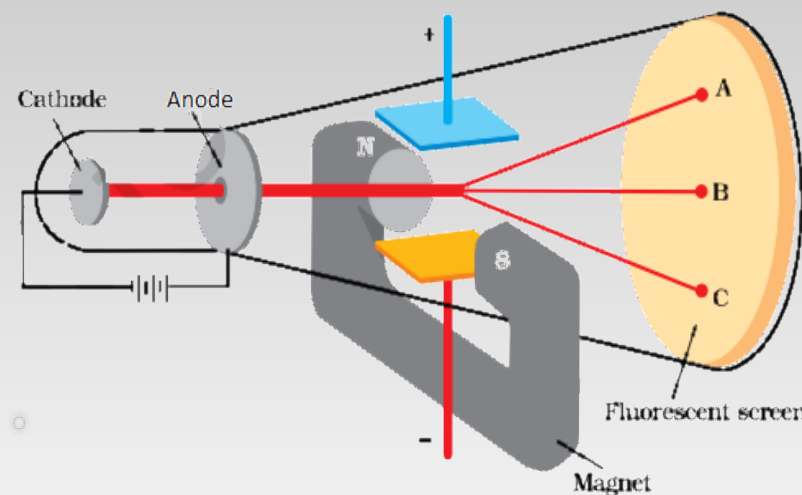
Изучаване на катодните лъчи

Експеримент на Томсън (Thomson) – 1897

отношение:  $e/m - 1.76 \cdot 10^8 \text{ C/g}$

Р. Миликън (Millikan) – 1909

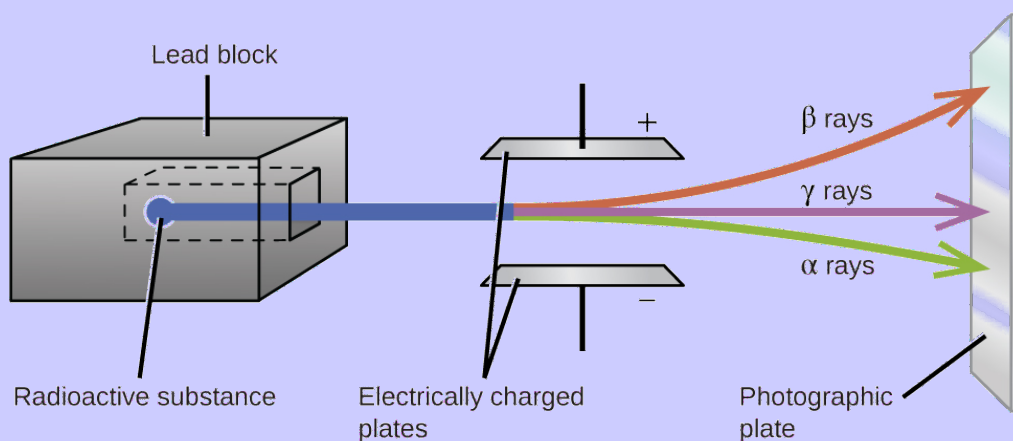
ел. заряд на електрона –  $1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$



Атомен модел на Томсън (The Plum Model)

веществото с положителен заряд запълва равномерно целия атом; а електроните са разпръснати в това вещество като стафиди в пудинг.

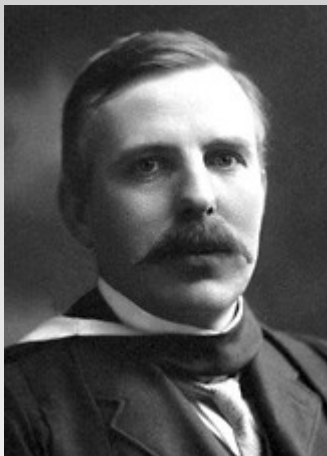
## Откриване на радиоактивността



Анри Бекерел (H. Becquerel), Мария и Пиер Кюри (M. Curie, P. Curie), Ърнест Ръдърфорд (Rutherford) ...

Различните видове радиация се различават по тяхната реакция на приложено електрично поле. Траекториите на  $\alpha$  и  $\beta$  частиците се закривяват в присъствието на електрично поле, но в различни посоки.

$\gamma$  радиацията не се влияе от електричните полета.



## Експеримент на Ръдърфорд

показва, че електрическите заряди в атома не са разпределени равномерно.

Ръдърфорд обстрелва мишена от златно фолио със сноп от алфа частици (положителен електрически заряд).

Голяма част от частиците преминават през мишената, но също така, голяма част от частиците биват разсеяни под различни ъгли, а някои от тях са разсеяни обратно назад.

Ако електрическият заряд в атома беше разпределен хомогенно, това би позволило на алфа частиците да преминат без промяна на тяхната посока.

По тази причина Ръдърфорд предполага, че атомът е съставен основно от празно място, като електроните се намират на кръгови орбити около положително заредено масивно ядро, разположено в центъра на атома.

