



# ***Z čoho sa skladá svet?***

## ***Od atómov ku kvarkom***

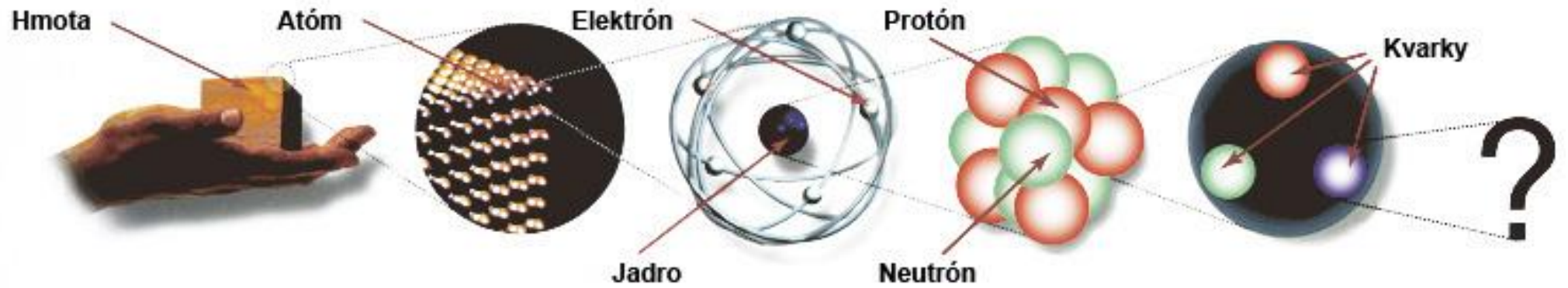
***Adela Kravčáková,***

*Katedra jadrovej a subjadrovej fyziky,*

*Ústav fyzikálnych vied,*

*Prírodovedecká fakulta UPJŠ v Košiciach*

**70 rokov CERN - Inšpirácia pre budúcnosť**  
Košice, 19.6.2024



## *Fyzika elementárnych častíc*

- základné stavebné bloky hmoty
- sily, ktoré medzi nimi pôsobia
- čo dnes vieme – štandardný model
- ako študujeme mikrosvet

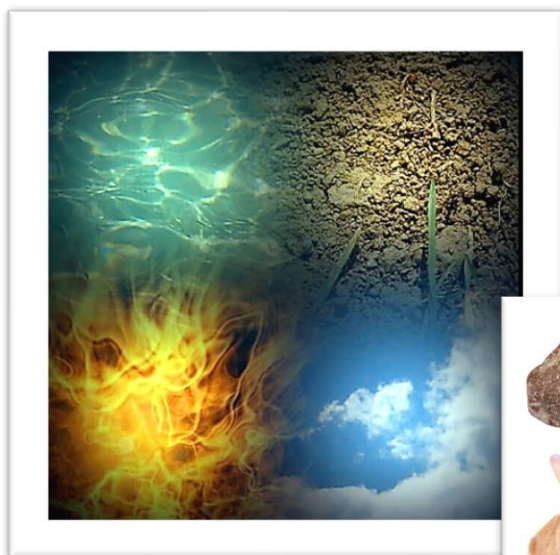


***Z čoho sa skladajú veci?***

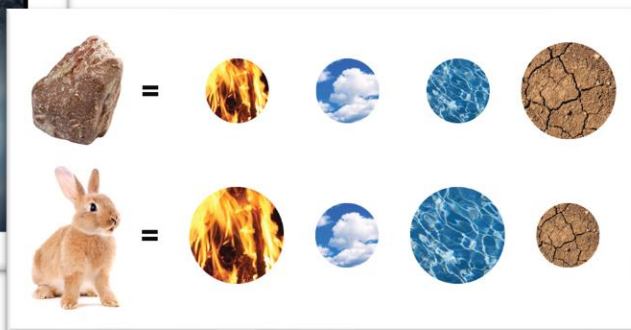
# Základné stavebné bloky hmoty

- jednoduché
- nedeliteľné
- „elementárna“ častica - nemá žiadnu vnútornú štruktúru, t.j. neskladá sa z ešte menších zložiek

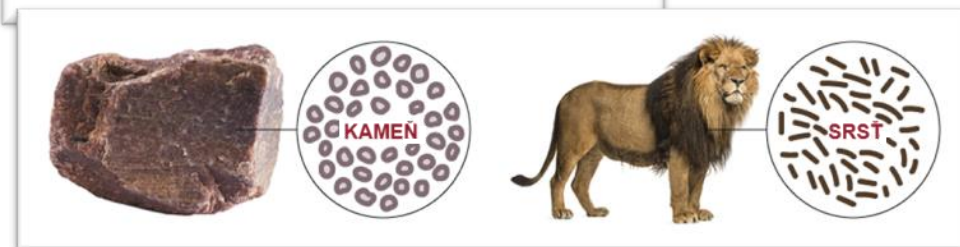
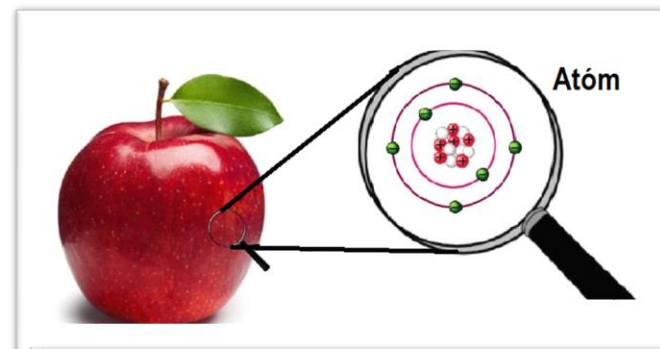
Staroveké Grécko – štyri živly:



voda  
zem  
oheň  
vzduch

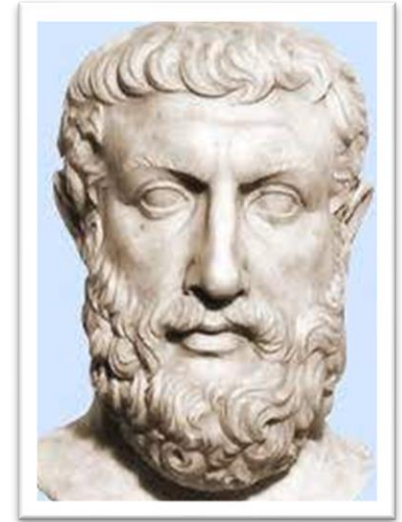


Démokritos – atómy:



Staroveký grécky filozof Démokritos (V. storočie pred n. l.) navrhol myšlienku atómov

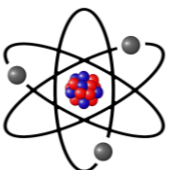
„Koľkokrát sa dá jablko rozkrojiť na polovicu“?



nakoniec dospejeme ku kúsku, ktorý už nie je deliteľný - tento imaginárny kúsok nazval „**atóm** - **nedeliteľný**“.



$$\left( \frac{1}{2} \right)^{30} = 0.93 \cdot 10^{-10}$$



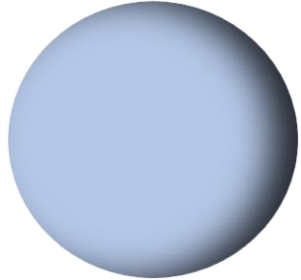
veľkosť jablka  $\sim 0,1 \text{ m}$ , veľkosť atómu  $\sim 0,0000000001 \text{ m} = 10^{-10} \text{ m}$

Počet prekrojení na polovicu potrebný na zredukovanie jablka na veľkosť atómu je 30.

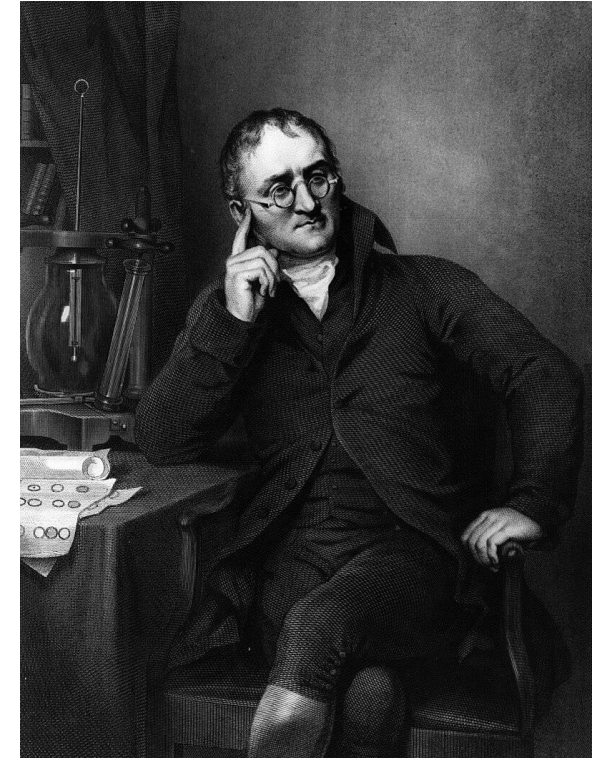
# Základné stavebné bloky hmoty

Všetka hmota sa skladá z molekúl a molekuly z ďalej nedeliteľných **atómov**.

Všetky atómy daného prvku sú identické.



***Dalton, 1803***



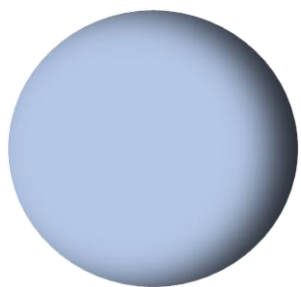
**John Dalton**  
1766 - 1844

obr.: wiki

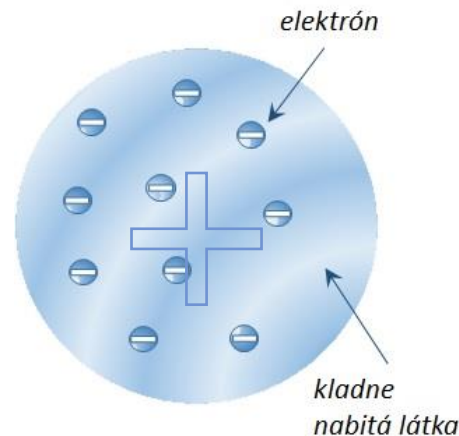
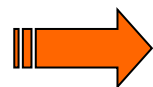
# Základné stavebné bloky hmoty

Prvá pozorovaná elementárna častica – **elektrón**.

*Má atóm vnútornú štruktúru?*



**Dalton, 1803**



**Thomson, 1897**

**pudingový model atómu**  
kladný „puding“ so zápornými  
hrozienkami - elektrónmi

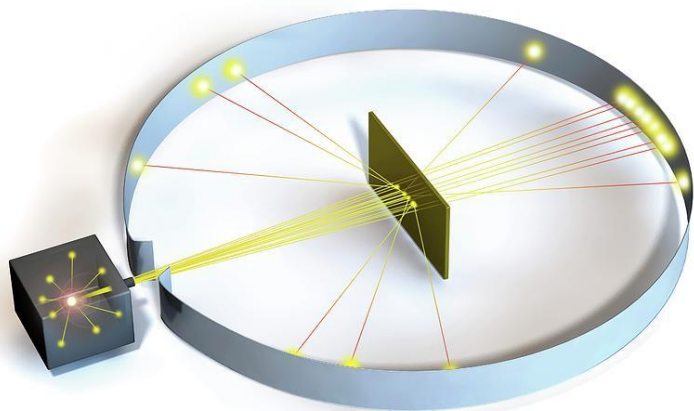


**Joseph John Thomson**  
1856 - 1940

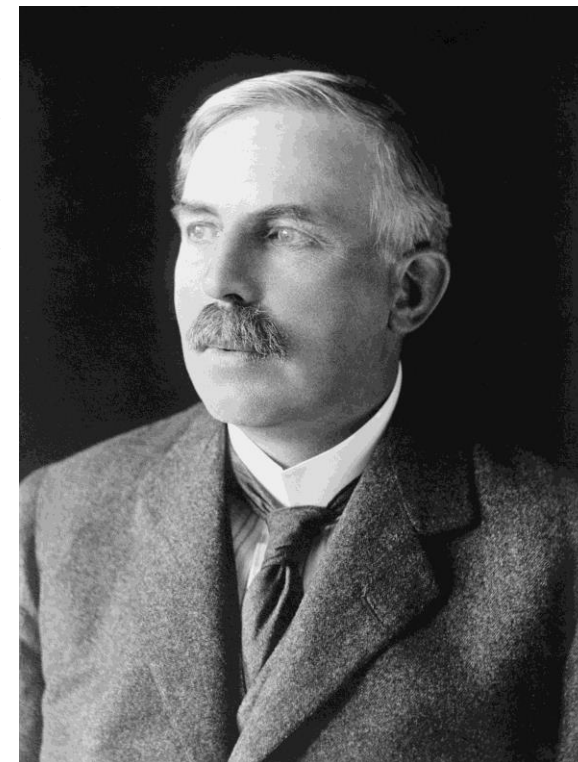
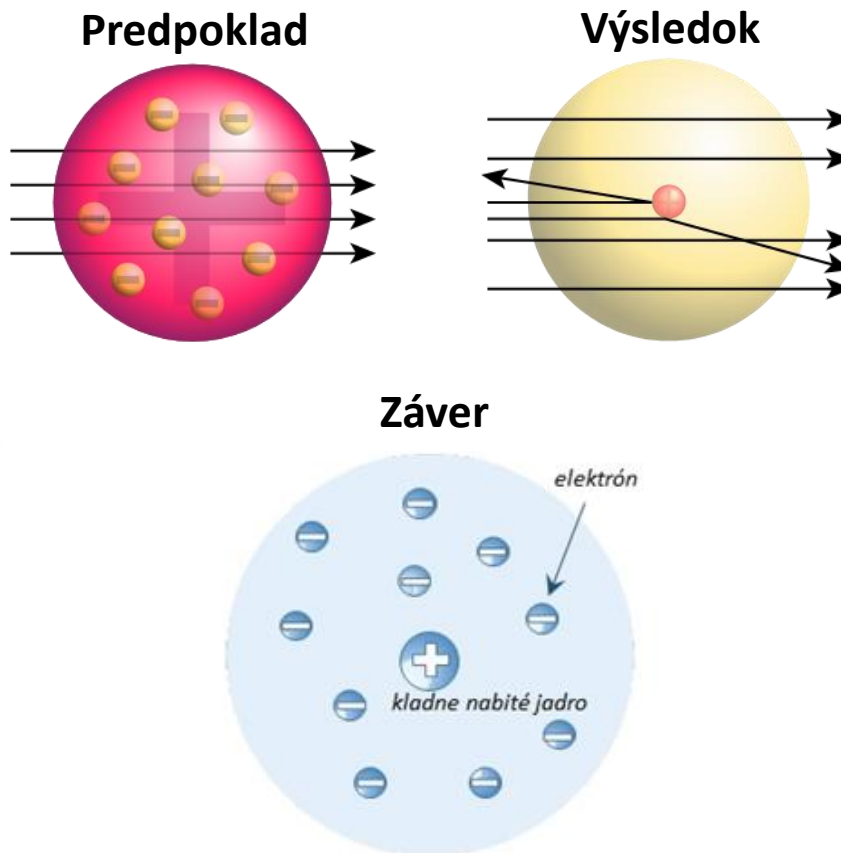
obr.: wiki

# Základné stavebné bloky hmoty

experiment



- projektil -  *$\alpha$  častice*
- terčik – *zlatá fólia*
- detektor – *fotocitlivá vrstva*



**Rutherford, 1911**

planetárny model atómu

uprostred malé, husté, kladné jadro  
s oblakom obiehajúcich ho záporných elektrónov

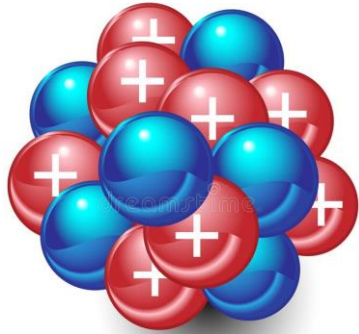
**Ernest Rutherford**

1871 - 1937

obr.: wiki



# Základné stavebné bloky hmoty



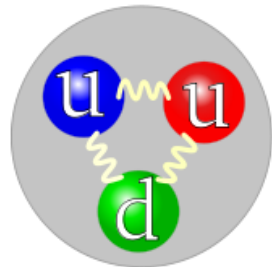
**Jadro atómu:**

**kladné protóny**, 1836-krát hmotnejšie ako elektróny (*Rutherford, 1917*)

**neutrálne neutróny**, podobne hmotné ako protóny (*Chadwick, 1935*)

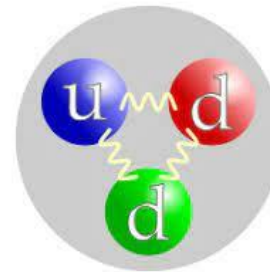
*Dajú sa subatomárne častice ešte deliť?*

- Elektróny už nie
- Protóny a neutróny áno, skladajú sa z **kvarkov**



**Protón**

z dvoch **u** kvarkov  
a jedného **d** kvarku



**Neutrón**

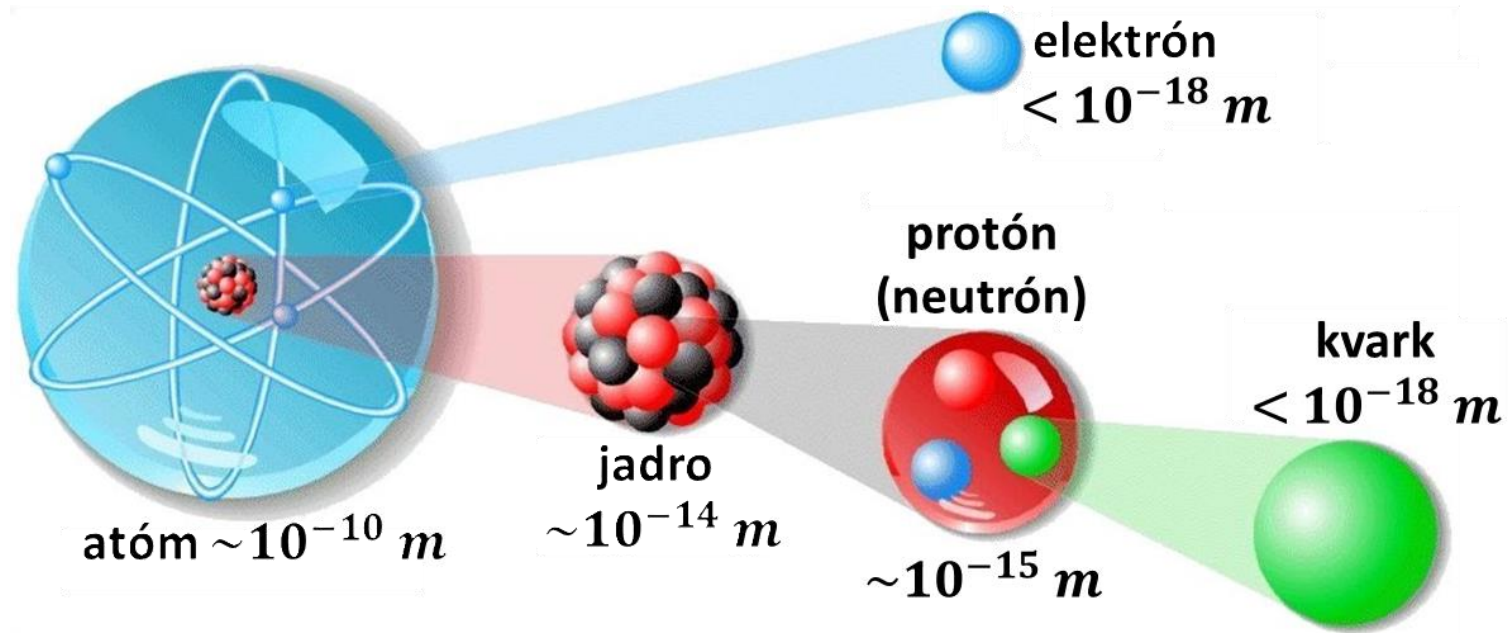
z dvoch **d** kvarkov  
a jedného **u** kvarku

# Základné stavebné bloky hmoty

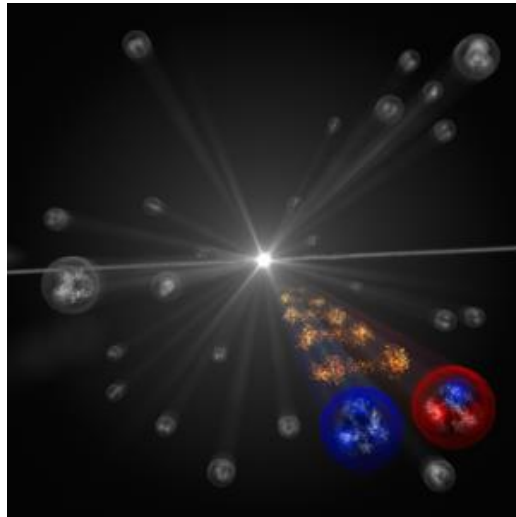
Ak by **protón** mal priemer **1 cm**:

- *kvark a elektrón by bol menší ako hrúbka vlasu*
- *priemer atómu by bol väčší ako dĺžka 30 futbalových ihrísk*

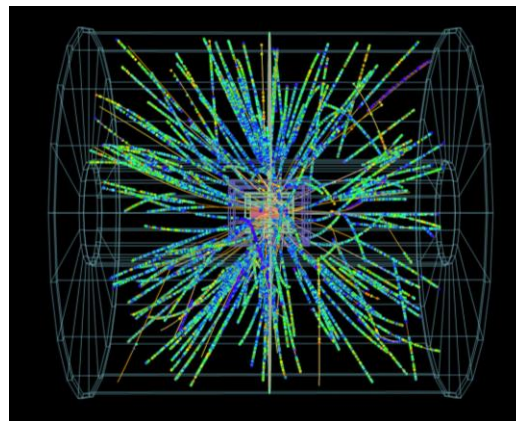
*99,999999999999 % atómu → prázdny priestor*



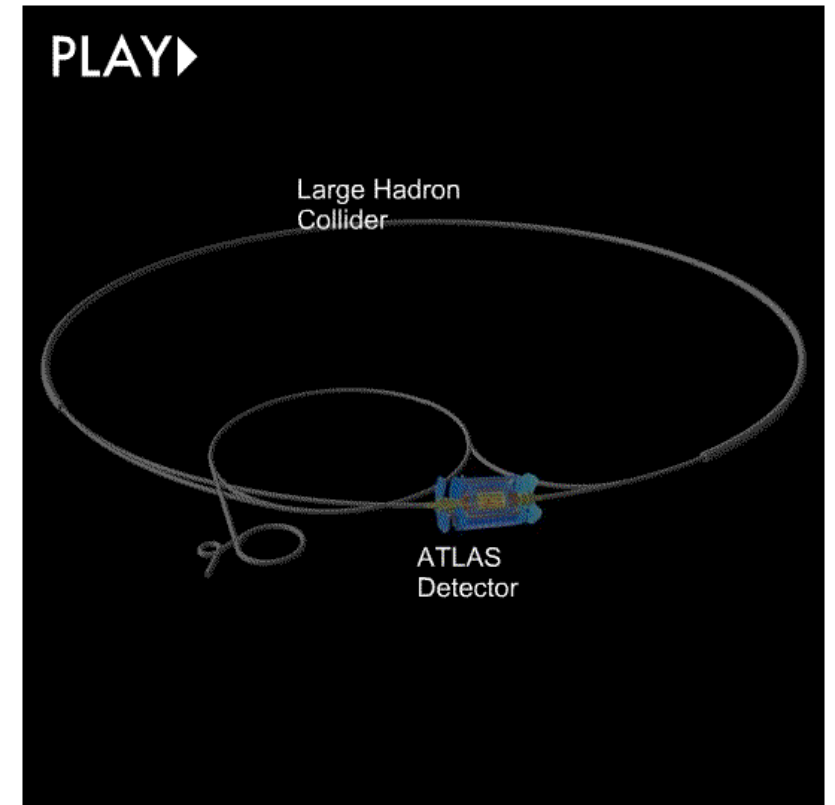
# Ako študujeme mikrosvet?



Vytvárame zväzky častíc  
a zrážame ich  
(**urýchľovače**)



Pozeráme sa,  
čo nám v zrážke  
vzniklo (**detektory**)

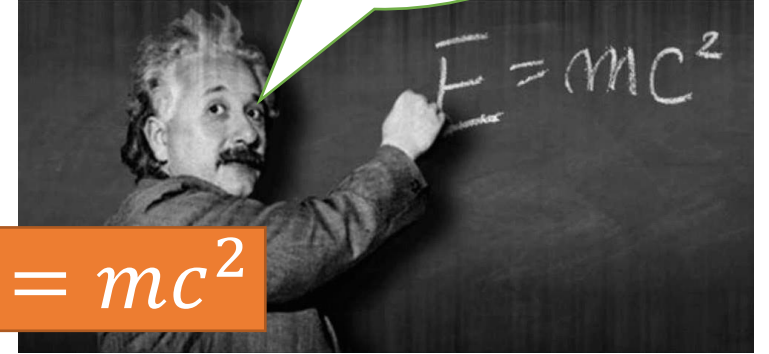


# Fyzikálna idea?

## Vytváranie hmoty zväčšovaním energie

V urýchľovačoch dodávame časticiam, ktoré urýchľujeme, energiu.

V detektoroch pozorujeme vytvorenú hmotu.



$$E = mc^2$$

Zrážaním ľahších častíc s dostatočnou **energiou** môžeme vytvoriť nové častice, ktoré sú **ťažšie** ako tie pôvodné!

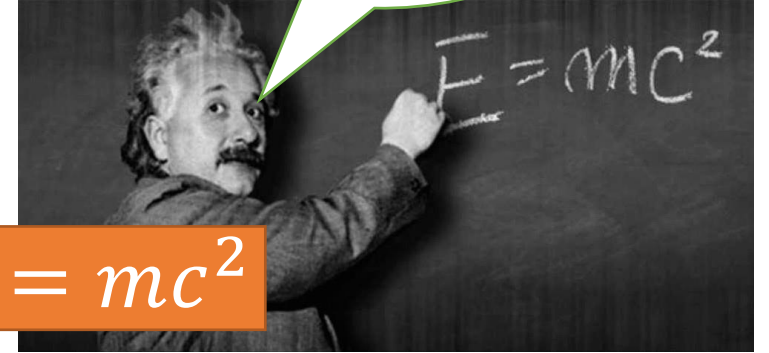
# Fyzikálna idea?

## Vytváranie hmoty zväčšovaním energie

V urýchľovačoch dodávame časticiam, ktoré urýchľujeme, energiu.

V detektoroch pozorujeme vytvorenú hmotu.

Hmota je iba  
forma  
energie



$$E = mc^2$$

## Umožnenie pohľadu do vnútornej štruktúry častíc

Zvýšenie energie zníži vlnovú dĺžku

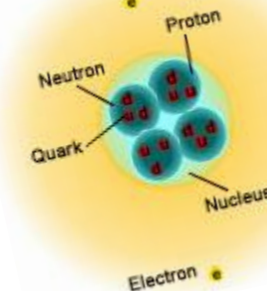
$$\lambda = \frac{hc}{E}$$



**Viditeľné svetlo**  
 $\lambda = 400 \rightarrow 700 \text{ nm}$



**X-lúče**  
 $\lambda = 0.01 \rightarrow 10 \text{ nm}$



**Urýchľovače častíc**  
 $\lambda < 0.01 \text{ nm}$

# Časticové ZOO

V polovici 20. storočia bolo takto objavených **niekoľko stoviek** „elementárnych“ častíc.

Všetky nové častice sa **veľmi rýchlo rozpadajú**.

Mená častíc:  $K, \pi, \Lambda, \Sigma, \eta, \Omega$  ...

**Riešenie:**

**Na elementárnej úrovni to musí byť oveľa jednoduchšie.**

**Tieto častice sa z niečoho skladajú a až toto niečo je skutočne elementárne.**



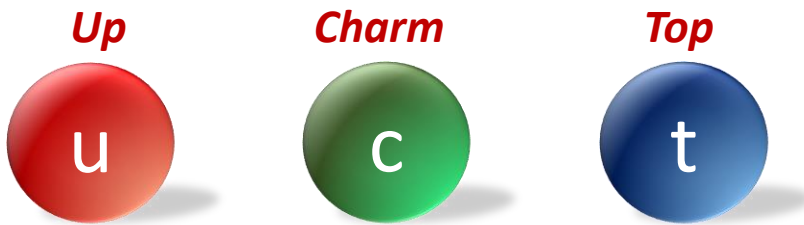
# ***ŠTANDARDNÝ MODEL***

Teória elementárnych častíc

Súčasná formulácia dokončená v 70. rokoch 20. storočia,  
po experimentálnom potvrdení existencie kvarkov.

# Štandardný model - častice hmoty

## Kvarky



$$Q(u) = Q(c) = Q(t) = \left(\frac{2}{3}\right)$$



$$Q(d) = Q(s) = Q(b) = \left(-\frac{1}{3}\right)$$

- zlomkový elektrický náboj
- farebný náboj
- najťažší – t-kvark
- samostatne sú nepozorovateľné

Z kvarkov sú zložené hadróny:

- baryóny – 3 kvarky
- mezóny – kvark+antikvark



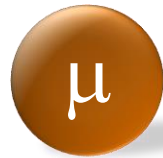
# Štandardný model - častice hmoty

## Leptóny

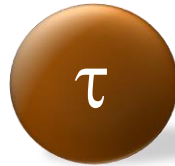
*Elektrón*



*Mión*



*Tau*

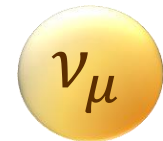


$$Q(e) = Q(\mu) = Q(\tau) = 1$$

*Elektrónové  
neutríno*



*Miónové  
neutríno*



*Tau  
neutríno*

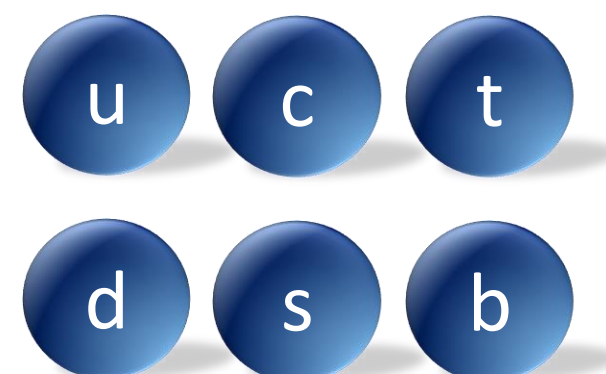
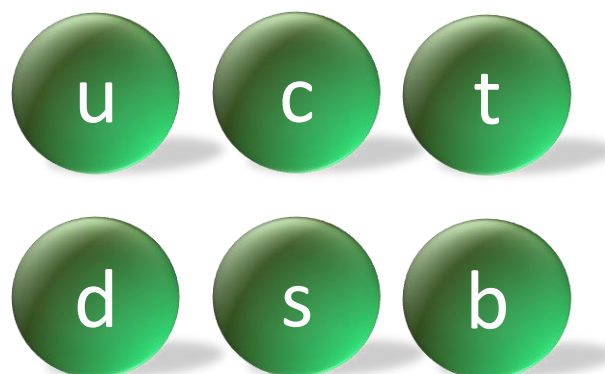
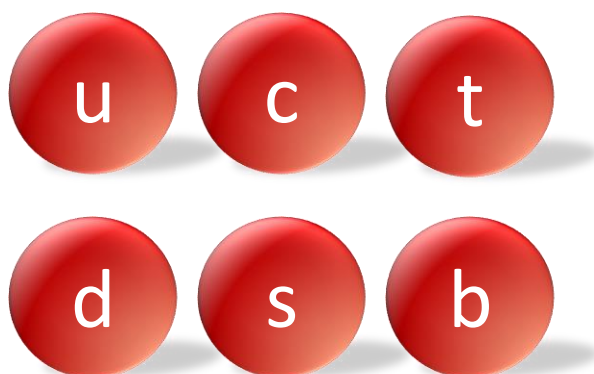


$$Q(\nu_e) = Q(\nu_\mu) = Q(\nu_\tau) = 0$$

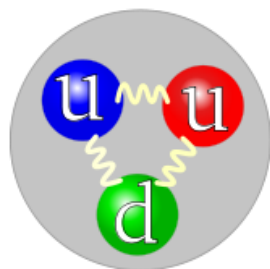
- elektrón, mión, tau – majú elektrický náboj
- 3 neutrína - elektricky neutrálne

# Štandardný model - častice hmoty

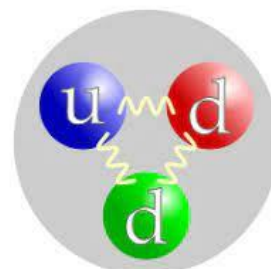
**Kvarky** existujú v troch rôznych farbách: červená, zelená, modrá



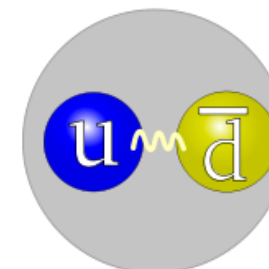
Zložené častice sú biele



Protón



Neutrón

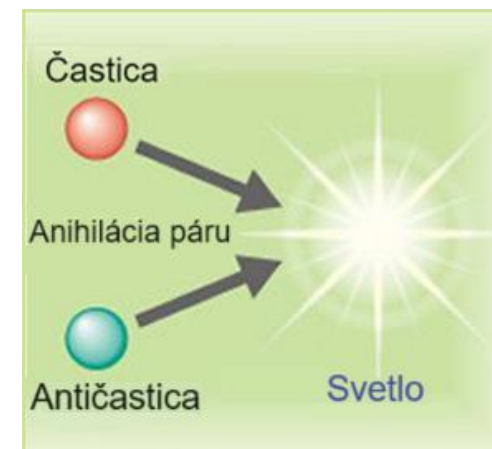
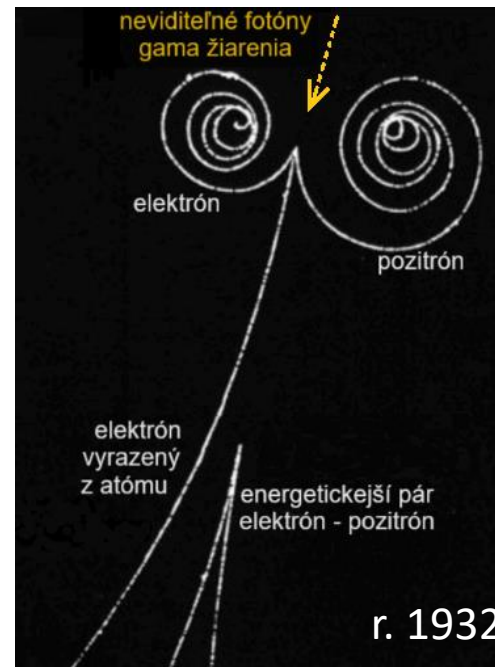
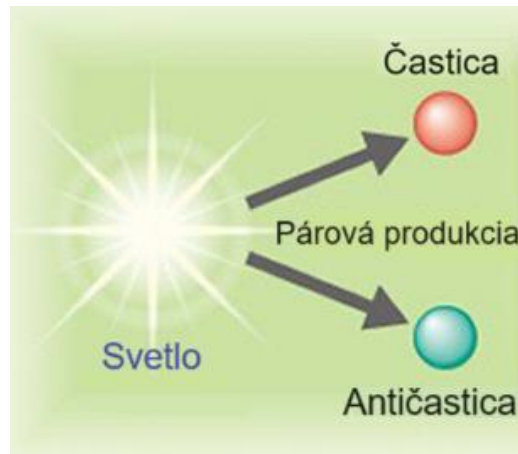
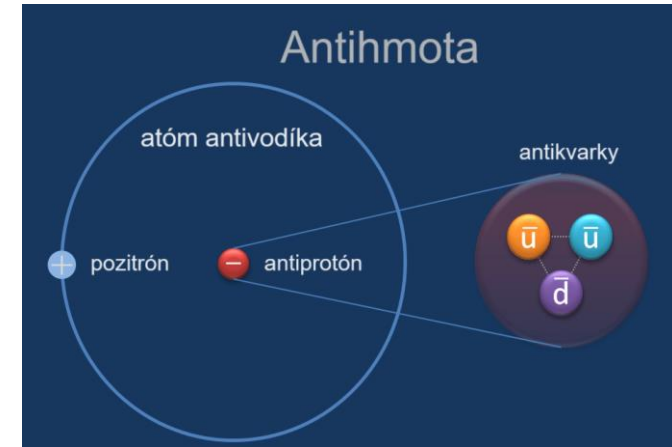
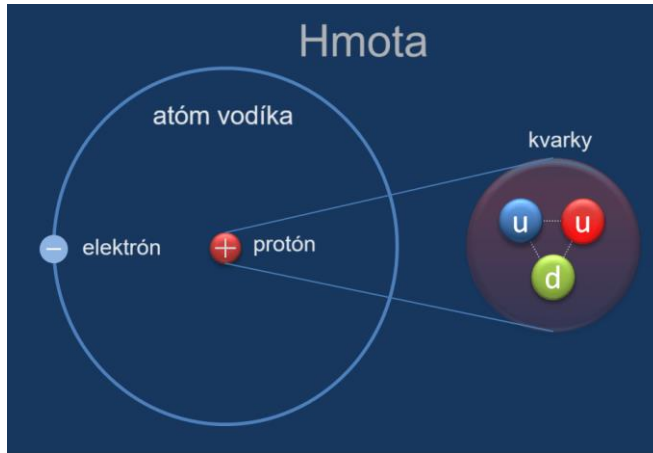


$\pi$  mezón

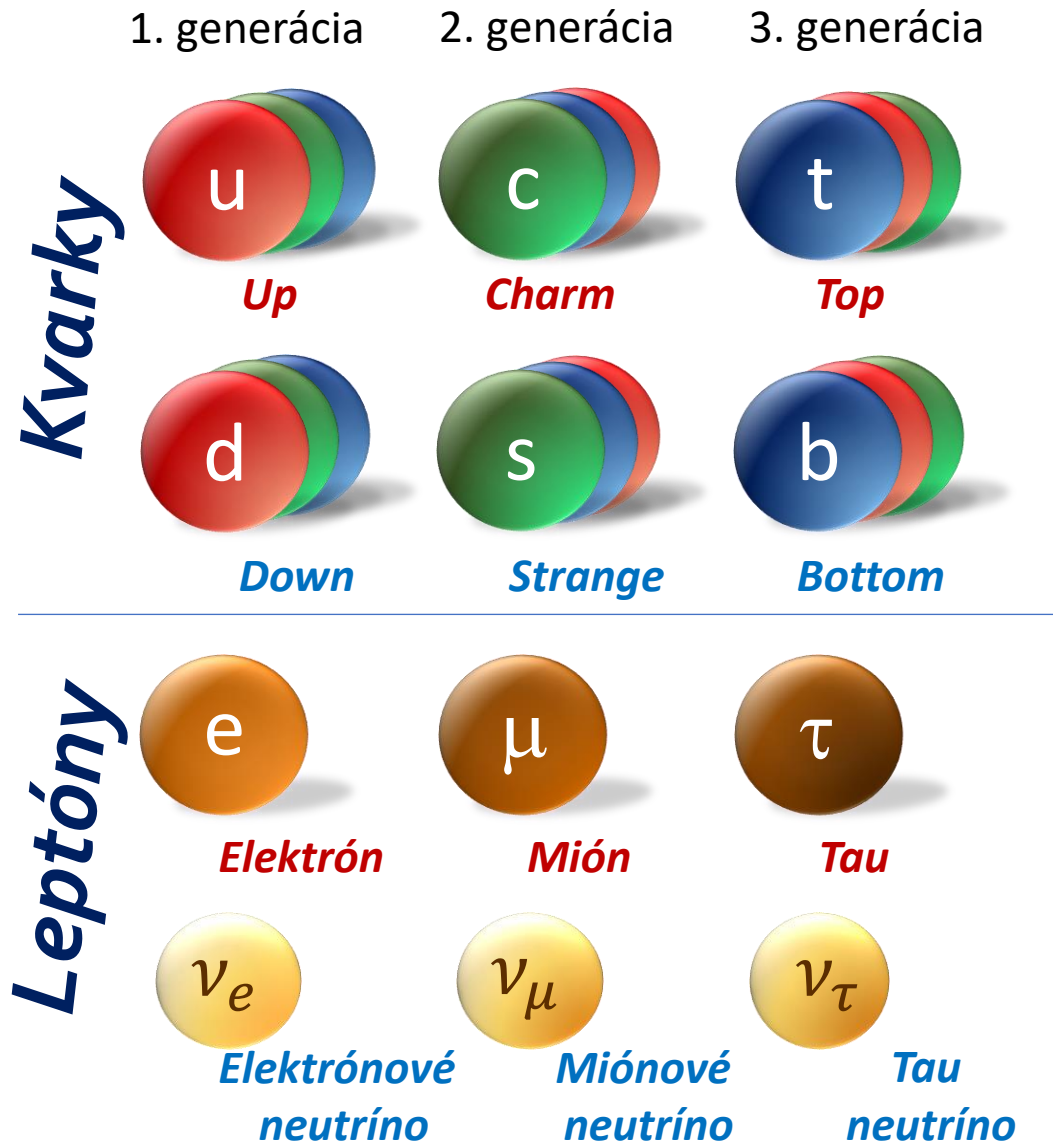
# Štandardný model

## Antihmota

Antičastica je rovnaká ako častica, má však opačný elektrický náboj.



# Štandardný model - častice hmoty



**3 generácie častíc**

– podľa rastúcej hmotnosti

**náš svet – 1. generácia**

+ antičastice

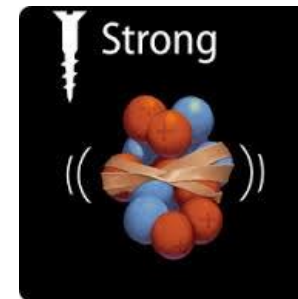
***Ale čo drží svet pohromade?***

# Čo drží svet pohromade?

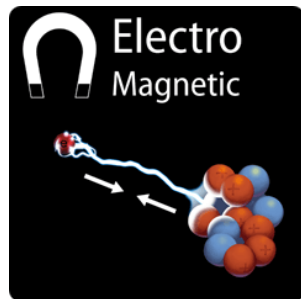
4 základné interakcie:



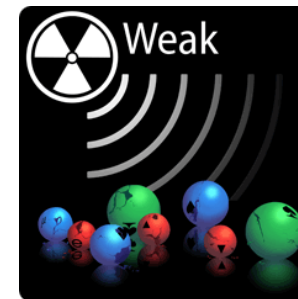
gravitačná



silná



elektro-  
magnetická



slabá

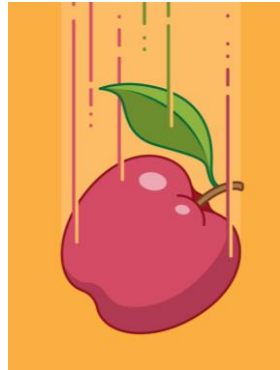
# Ako interagujú častice hmoty?

bez vzájomného dotyku, vzájomnou výmenou častíc iného typu - **nosičov**



Interakcia	Výmenná častica	$m$ [GeV/c <sup>2</sup> ]
Silná	Gluón	0
Elektromagnetická	Fotón	0
Slabá	$W^{\pm}, Z^0$	80,91
Gravitácia	Gravitón	0

# Gravitácia



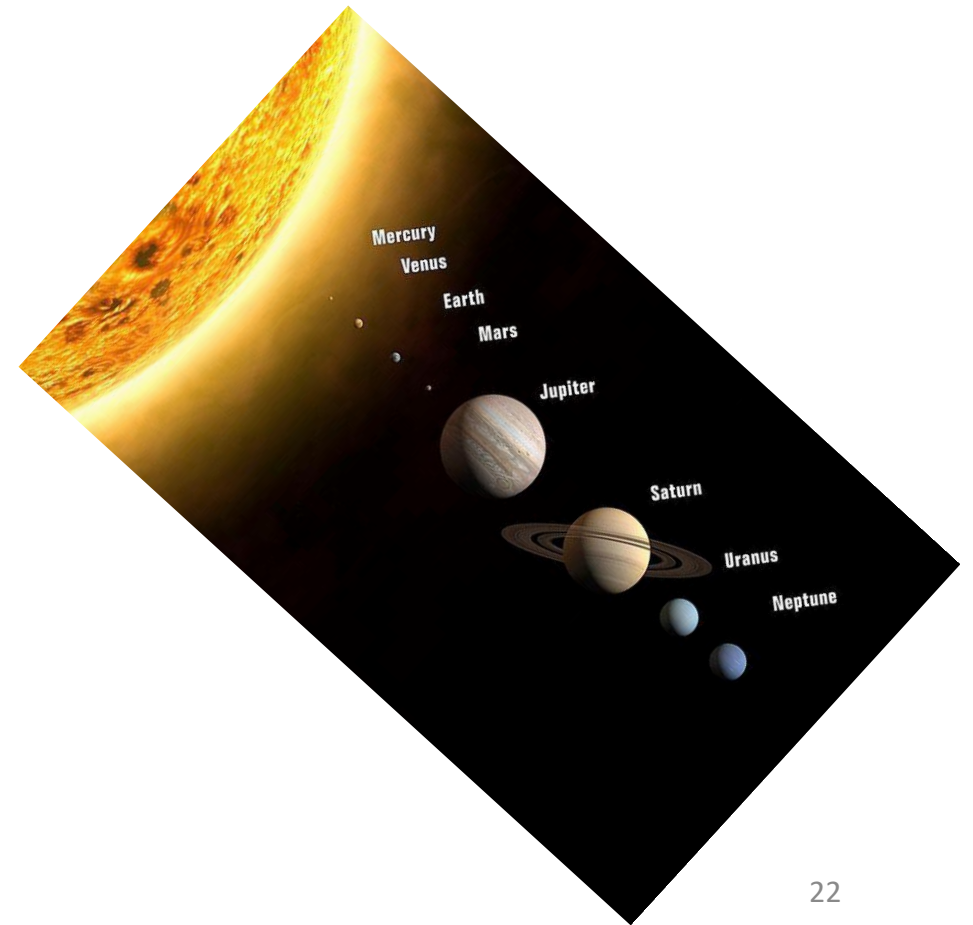
**najslabšia interakcia, prítiažlivá**  
(vo svete elementárnych častíc príliš slabá na exp. skúmanie)

**nosič - gravitón**

**Náboj (zdroj sily): hmotnosť,**  
t.j. všetky hmotné častice dokážu  
interagovať gravitačne

**Dosah:**  $\infty$

**Viazané stavy:**  
planéty, Slniečna sústava, Galaxie,...



# Elektromagnetická interakcia



**silná, príťažlivá aj odpudivá  
drží pohromade atóm**

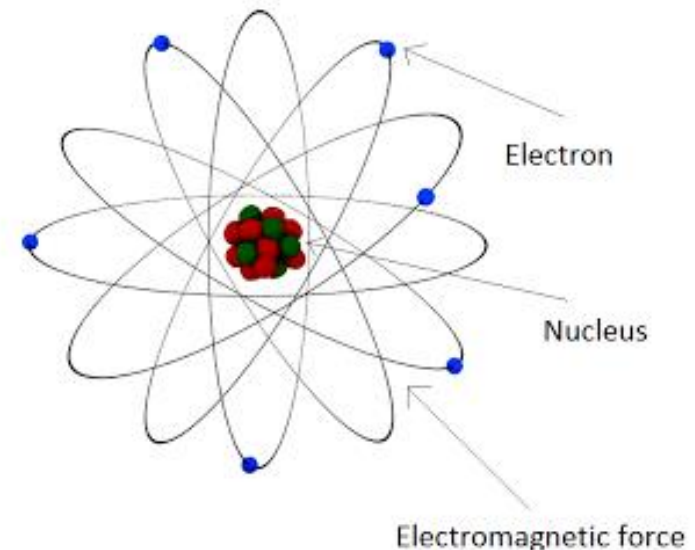
**nosič - fotón**

*rádiové vlny, mikrovlny, svetlo, rtg lúče,...*

**Náboj (zdroj sily): elektrický - kladný a  
záporný;** všetky elektricky nabité častice  
dokážu interagovať elektromagneticky

**Dosah:**  $\infty$

**Viazané stavy:** atómy, molekuly, my 😊,...



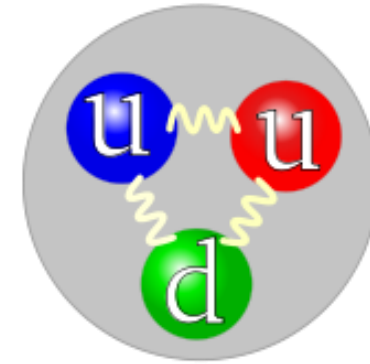


# Silná interakcia



veľmi silná

nosič - gluón



má tiež farebný náboj - farba a antifarba

**Náboj (zdroj sily): farebný: 3 farby a 3 antifarby; všetky farebne nabité častice dokážu interagovať silno**

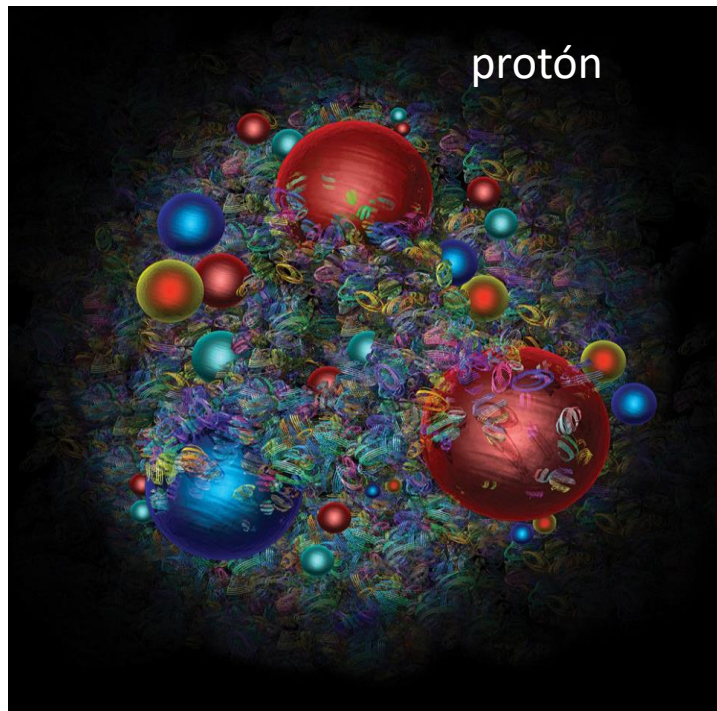
**Dosah:  $\sim 10^{-15}$  m, krátky dosah – jadro atómu**

**Viazané stavy: hadróny, atómové jadrá, ...**

# Silná interakcia

**gluón** má tiež farebný náboj – na rozdiel od fotónov, gluóny medzi sebou interagujú

**Silná interakcia so vzdialenosťou rastie** (ako sila pri roztáhovaní pružiny), kvarky a gluóny sú v hadrónoch uväznené



Nemôžeme vidieť  
osamotený kvark!

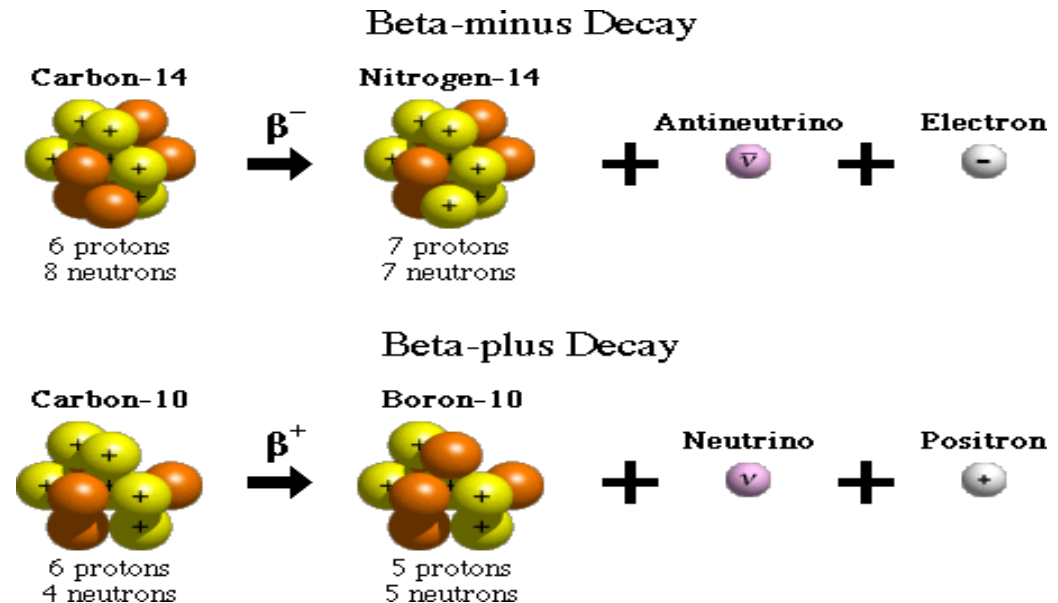
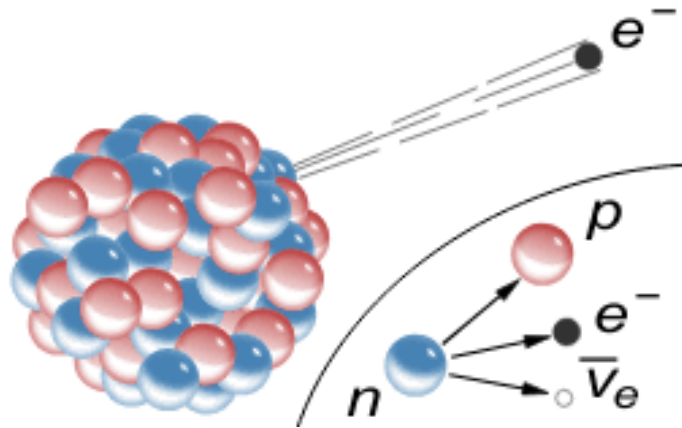
obr.: D.Domingues, CERN

# Slabá interakcia

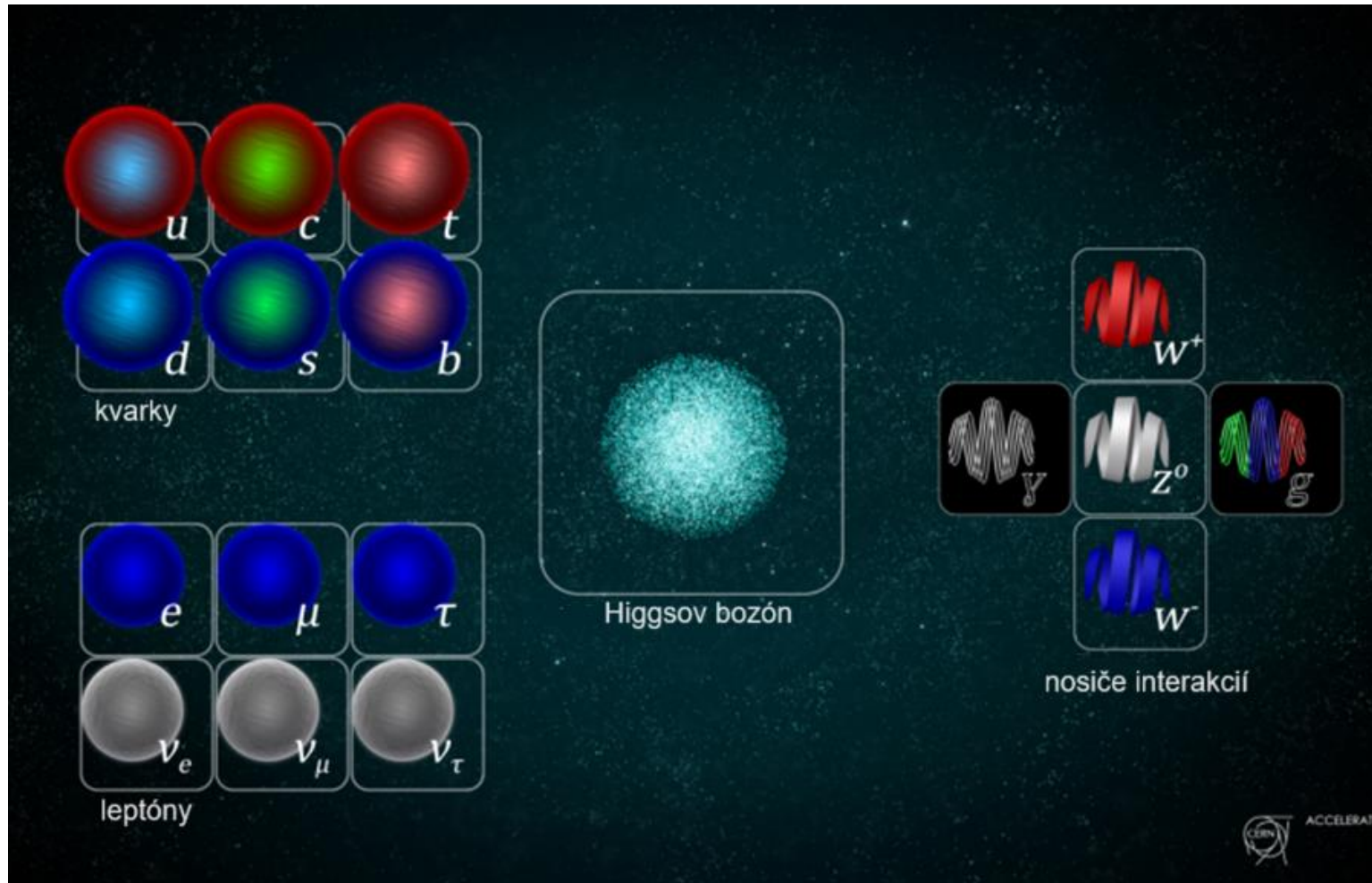
nosiče -  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  (ťažké bozóny)

- je zodpovedná za rozpady
- mení typ kvarkov a leptónov

Hmota okolo nás sa skladá z najľahších kvarkov a leptónov, ktoré sa ďalej nerozpadajú



# Štandardný model elementárnych častíc



## Otvorené otázky:

- Prečo práve 3 **generácie** elementárnych častíc?
- Sú kvarky a leptóny **elementárne** častice?
- Ako získa častica **hmotnosť**?  
 $m_{\gamma,g}=0$ ,  $m_t = 340.000 m_e!$   
**Higsov bozón**?

## Objav Higsovho bozónu

4. júl 2012

experimenty ATLAS a CMS  
na LHC oznámili, že pozorovali  
"Higgs-like" bozón  
s hmotnosťou okolo 125 GeV.



*Ďakujem za pozornosť !*