

# Radiační biofyzika

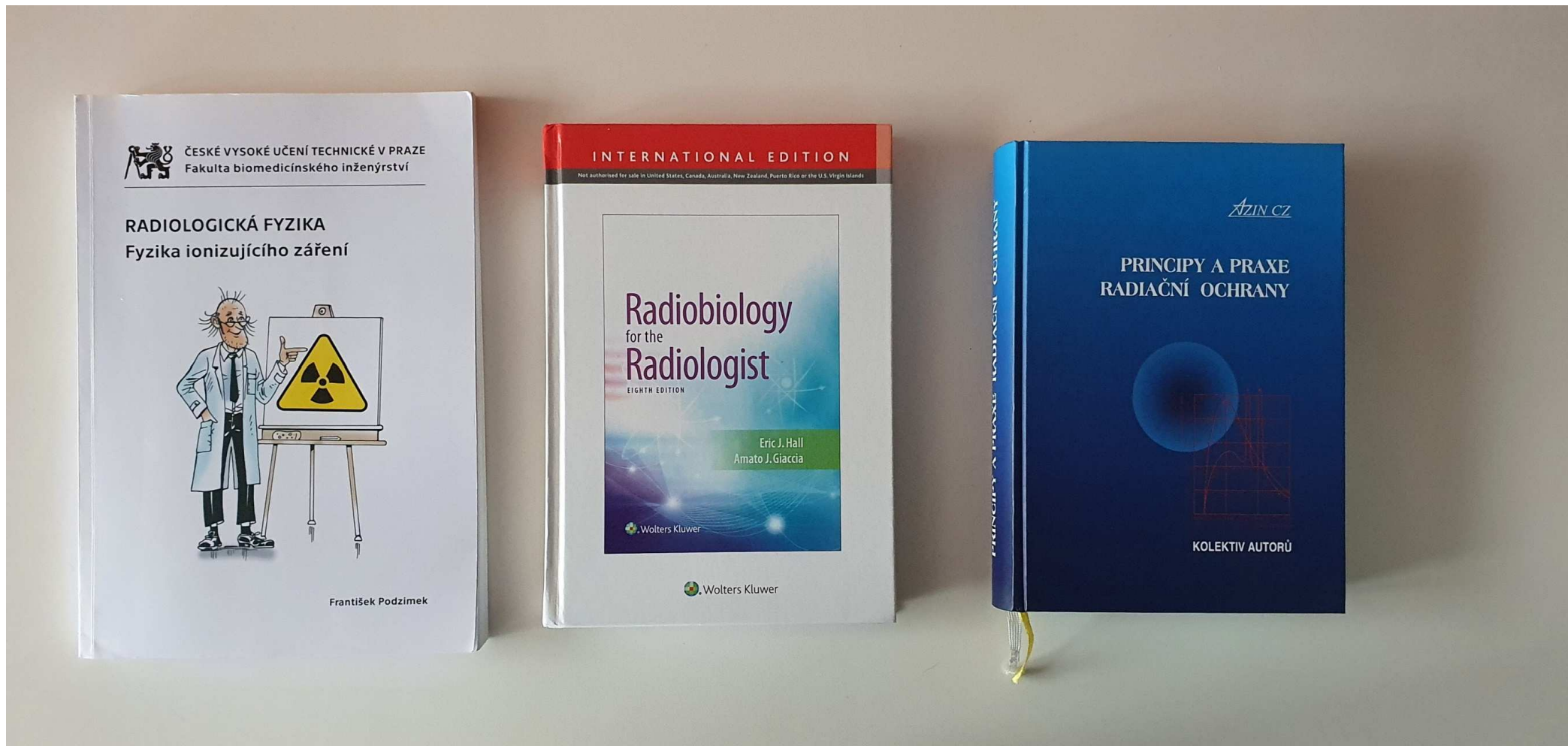
Přednáška 4 2021

**Nestabilita atomového jádra,  
radioaktivní přeměny**

Martin Falk



# Studijní literatura



# Elementární částice v polovině 20. století

- Elementární = **dále nedělitelný** → lepší asi termín „subatomární“ částice
  - Elektron ( $e^-$ )
  - Proton ( $p^+$ )
  - Neutron ( $n^0$ )

částice	elektrický náboj	hmotnost	hmotnost oproti elektronu
proton	+ e	1,007 277 · u	1 835
neutron	0	1,008 665 · u	1 838
elektron	- e	0,000 548 · u	1

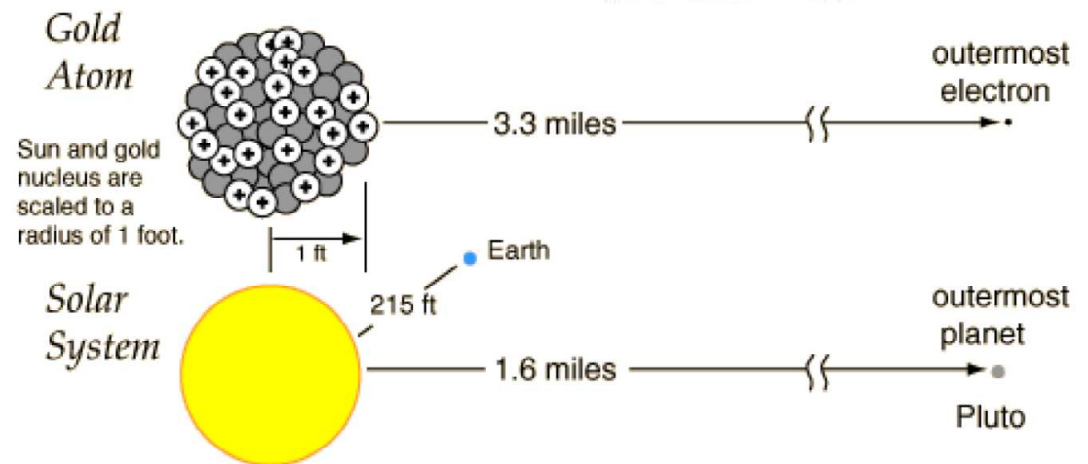
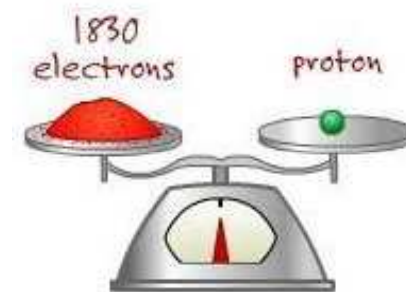
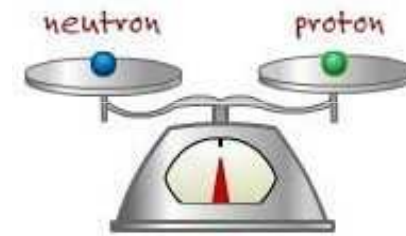
e - elementární náboj 0,000 000 000 000 000 000 160 2 C ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C)

u - atomová hmotnostní jednotka

u = 0,000 000 000 000 000 000 000 000 001 67 kg ( $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg)

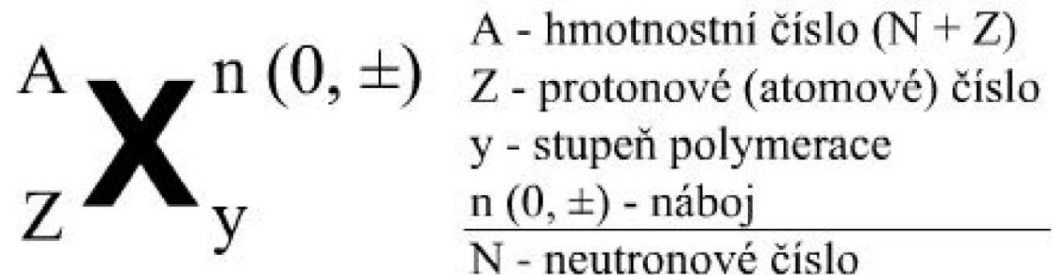
# • Jádro 99.9% hmotnosti atomu

- Kdyby jádro atomu bylo velké jako zrnko máku a položili jste ho doprostřed fotbalového hřiště, elektrony by ho sledovaly z tribun.



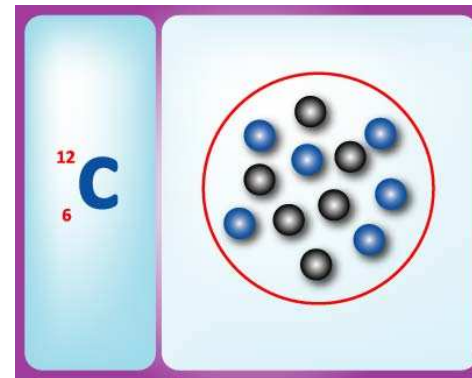
# ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

- $p^+ + n^0$ ,
- Sídlo téměř veškeré hmoty (nukleony  $>2000x$  větší hmotnost než  $e^-$ )
- silné jaderné interakce  $\ggg$  elektrostatické interakce
- Počet  $p^+$ : **PROTONOVÉ (ATOMOVÉ) ČÍSLO, Z** – definuje prvek (pozice v periodické t.)
- Počet nukleonů  $p^+ + n^0$ : **NUKLEONOVÉ (HMOTNOSTNÍ) číslo, A**
- Počet  $n^0$ : **NEUTRONOVÉ číslo, N**

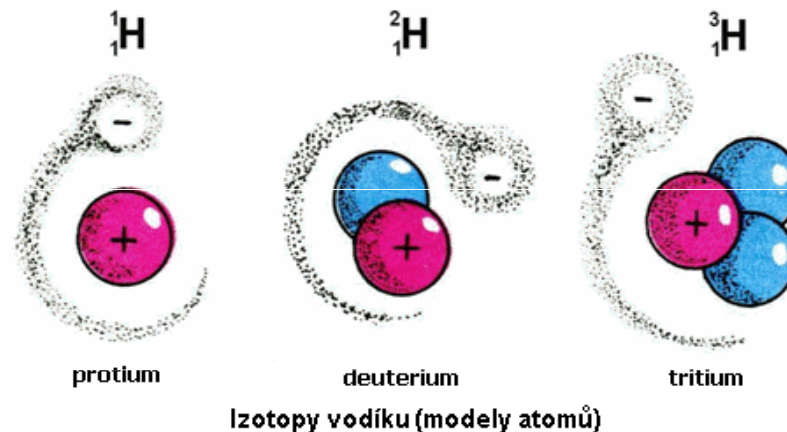


# ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

**Nuklid** – je chemická látka složená z atomů se stejným protonovým i nukleonovým číslem (např. nuklid uhlíku  $^{12}_6\text{C}$  obsahuje pouze atomy, které mají v jádře 6 protonů a 6 neutronů)  
Dnes známo **>2000 nuklidů**, z nichž **pouze 266 je stabilních**



**Izotopy** – jsou atomy téhož prvku, které mají stejný počet protonů, ale liši se počtem neutronů v jádře atomu. Proto mají stejné protonové číslo, ale různé nukleonové číslo.



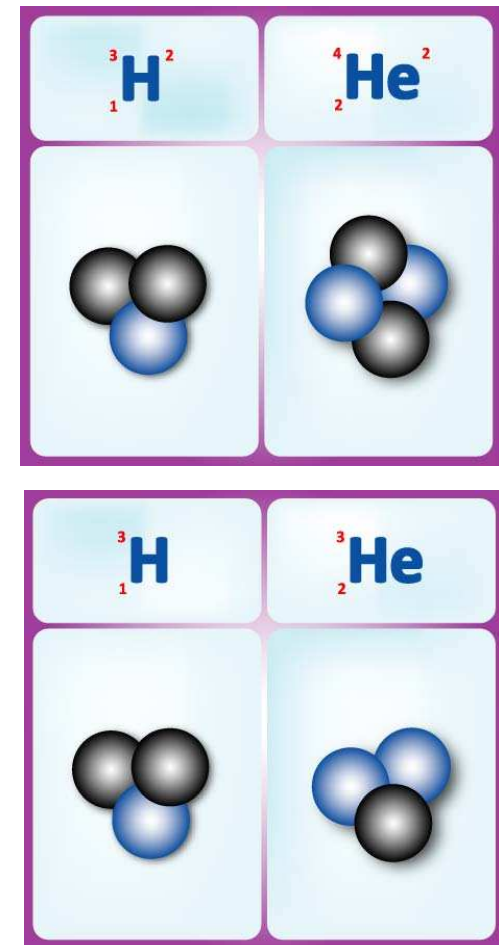
# ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

**IZOTONY:** mají **shodné neutronové číslo** a liší se nukleonovým (a také protonovým) číslem

- Pojem *izotony* se používá hlavně k vyjádření vztahu mezi dvěma jádry.
- Jedná se o **dva různé prvky**.

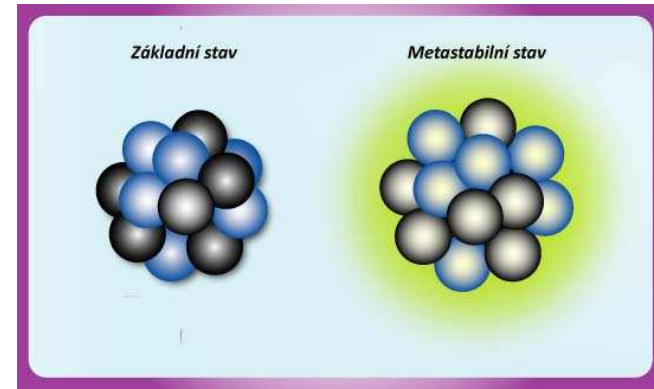


**IZOBARY:** mají **stejný počet nukleonů**, ale liší se protonovým číslem (=dva různé prvky) a neutronovým číslem.



# ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

**IZOMERY:** označení pro jádra, která mohou existovat ve vybuzeném (excitovaném, metastabilním) stavu déle než 100 ms. Toto označení má smysl jen ve vztahu k danému **nuklidu** s jádrem v **základním stavu**



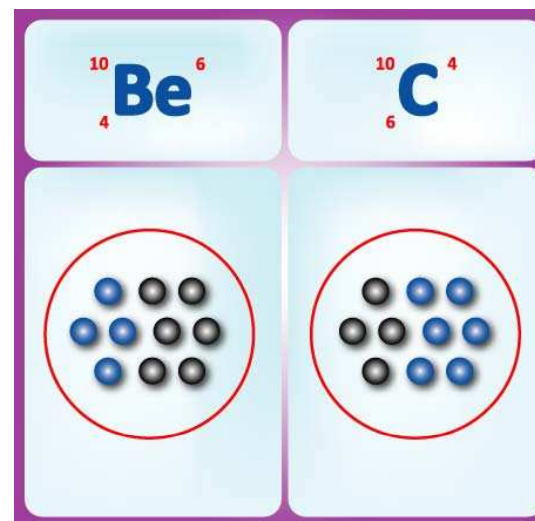
- Označení **izomer** bylo zvoleno jako analogie k pojmu izomer v chemii, se kterým se ale nesmí zaměňovat. V obou případech je izomer složen ze stejných počtů jednotlivých částic, ale liší se svou strukturou a chováním v reakcích.
- Doba života excitovaných jaderných hladin je většinou velmi krátká ( $\gg 10^{-15}$ - $10^{-6}$  s), existují však situace, kdy doba života excitované hladiny je řádově sekundy, minuty a dokonce i několik hodin, dní i roků! - takové hladiny se nazývají **metastabilní** a mluvíme o **izomerním** stavu jádra. Takový jaderný izomer se často považuje se samostatný nuklid
- a označuje se horním indexem "m" u nukleonového čísla např.  $^{99m}\text{Tc}$ .



# ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

**ZRCADLOVÁ JÁDRA:** je označení jádra, které se používá pouze ve vztahu k jinému jádru. Zrcadlové jádro k jádru určitého nuklidu  ${}^A_Z X^Z$  je jádro nuklidu  ${}^A_Z X^N$  a naopak, tzn. jádra jsou zrcadlová navzájem.

- Např.:  ${}^{10}_4 B^6$   ${}^{10}_6 C^4$

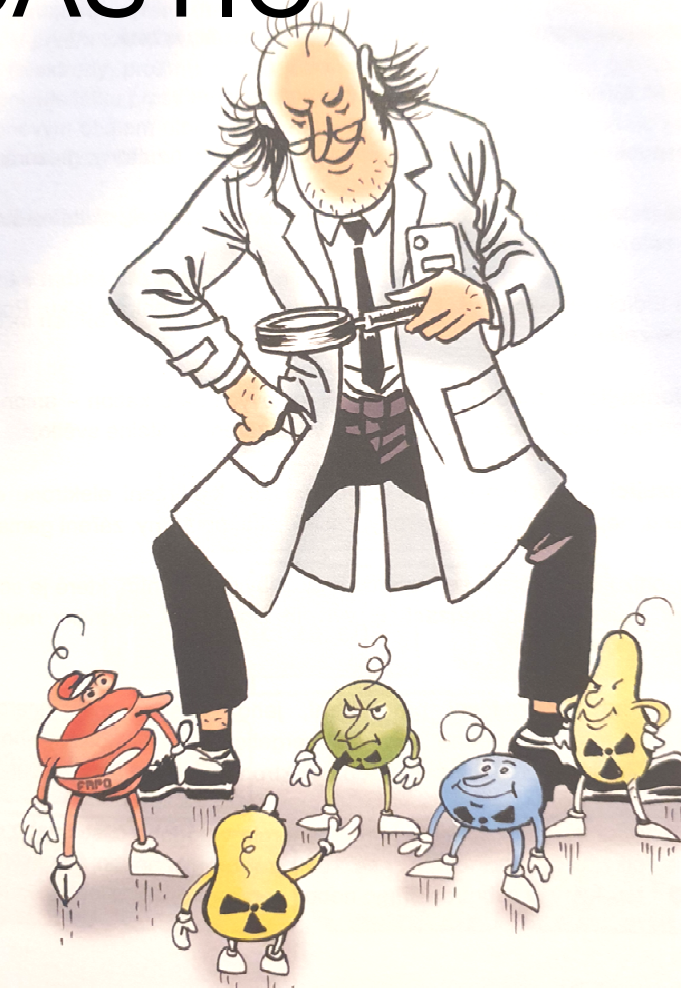


Další definice:

[http://artemis.osu.cz/mmphys/jm/jm\\_2\\_1\\_4.htm](http://artemis.osu.cz/mmphys/jm/jm_2_1_4.htm)

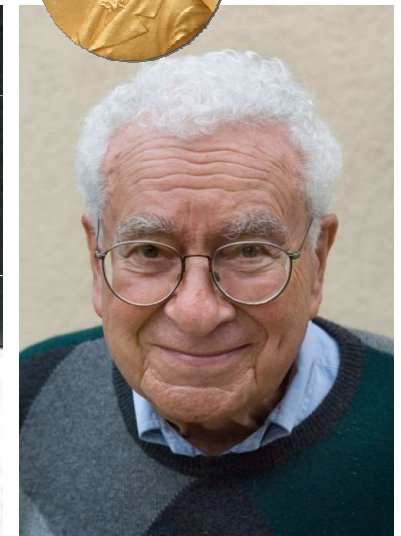
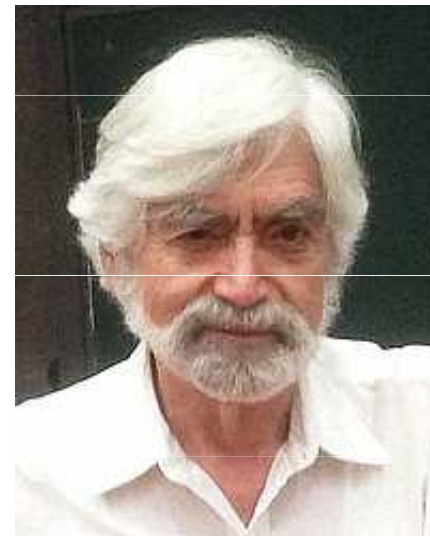
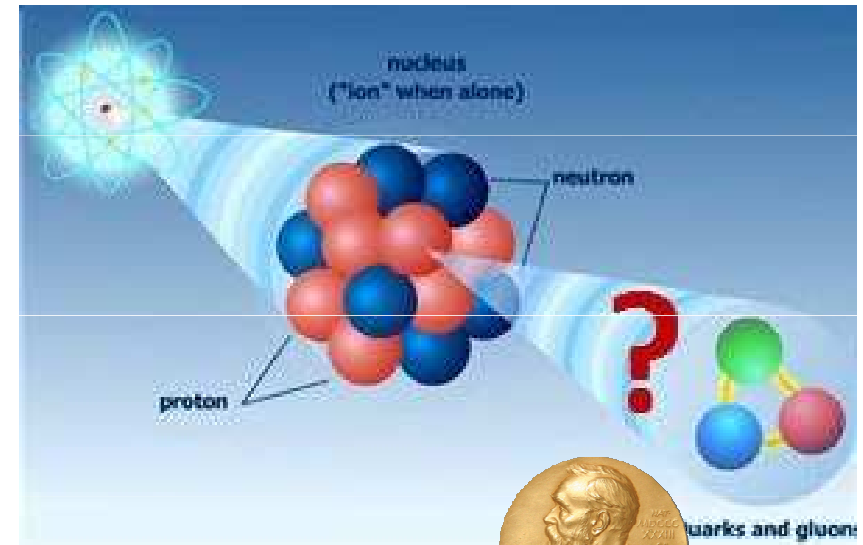
# ZOO ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC

- Situace s „elementárními částicemi“ se komplikuje s rozvojem **zkoumání kosmického záření** → objeveny částice, které se při běžných energiích nevyskytují
  - **Pozitron** ( $e^+$ , antičástice k elektronu)
  - **Mezon  $\pi$**
  - **Mion** (dříve zvaný mezon  $\mu$ )
- 50. léta – uvedeny do provozu **velké urychlovače**
- → objev mnoha dalších částic → příliš mnoho částic na to, aby byly skutečně elementární
- **Dnes známo asi 100 částic a přibližně stejně (100) antičástic**  
(vs. TISÍCE ČÁSTIC??)



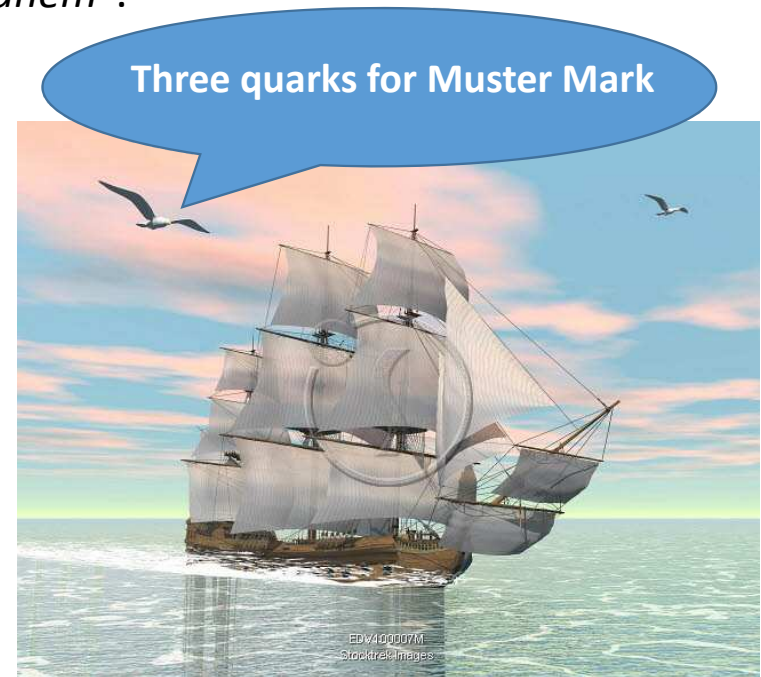
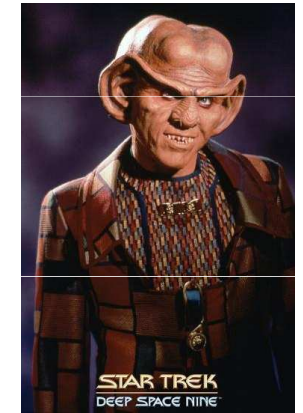
# KVARKY

- Příliš mnoho „elementárních“ částic → patrně mají vnitřní strukturu → ještě menší částice? → **KVARKY**
- Model, kde se nukleony skládají z ještě menších částic hmoty navrhli nezávisle George **Zweig** a Murray **Gell-Mann** (1964) – **Nc1964**
- **Gell-Mann pro tyto částice použil název KVARK,** George **Zweig** název **aces**
- **Nejprve šlo jen o matematický model.** Experimentální podpora : 1967. Poslední z předpovězených kvarků byl experimentálně potvrzen v roce 1994.

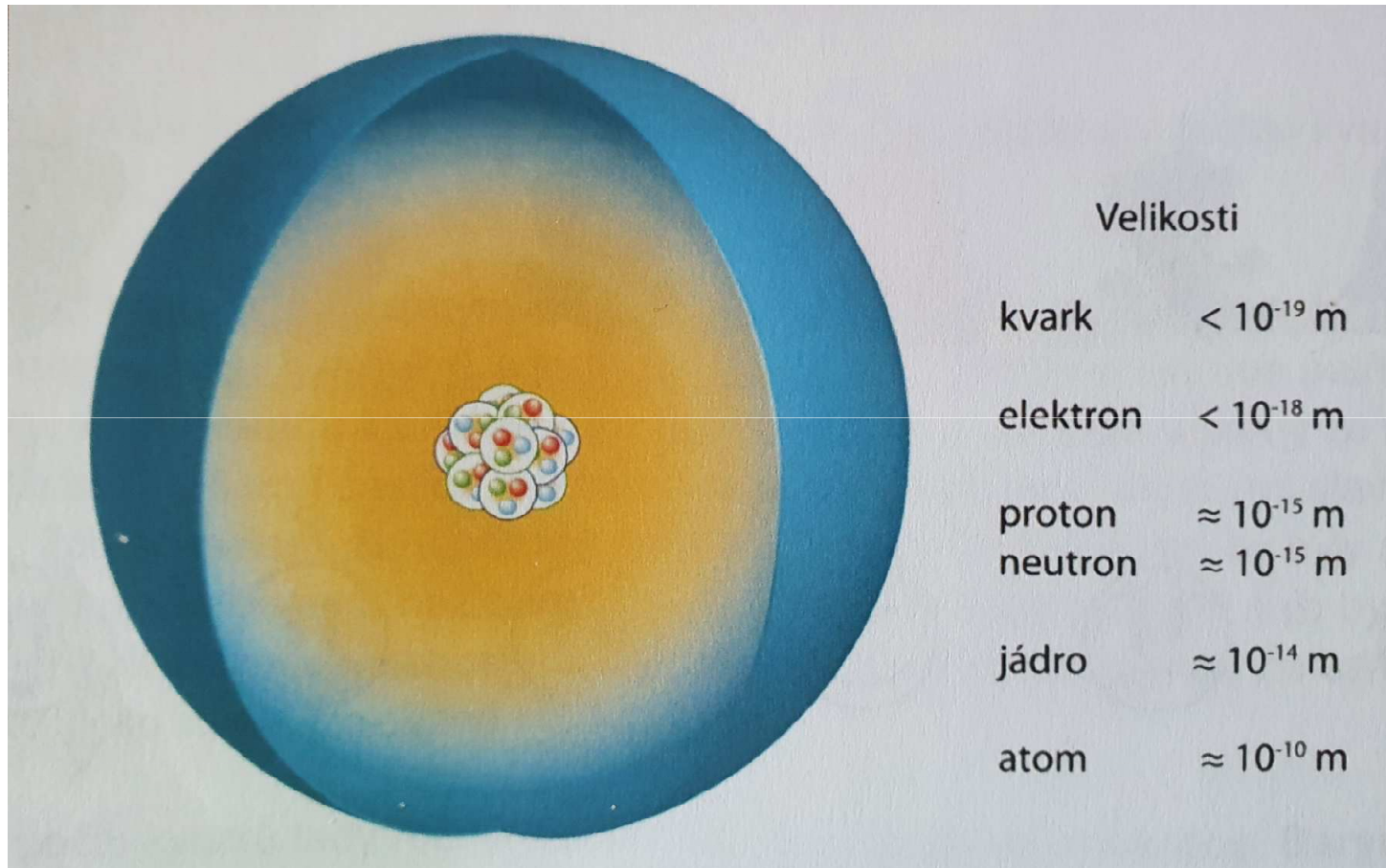


# Původ slova KVARK; původně s výslovností [kvórk]

- \*Původ slova KVARK: Slovo kvark našel Gell-Mann v románu Jamese Joyce "*Finnegan's Wake*".
- V českém překladu „Finneganova pohřební hostina“ nebo „Finneganovo probuzení“ (slovo wake může mít dva významy); nebo též „*Plačky nad Finneganem*“.
- Název balady Joyce zvolil jako ironický symbol věčného koloběhu života, který je v knize naznačen i jinak (například faktem, že kniha začíná i končí uprostřed věty).
- Hlavnímu hrdinovi se zdá sen, ve kterém racci letící za plující lodí křičí: „**Three quarks for Muster Mark**“ („Tři kvarky pro doktora Marka“). V celém románu se toto podivné slovo již znovu nikde neobjeví.
- Od této doby se do částicové fyzika vnáší řada dalších pojmů nematematického charakteru, jejichž původní význam nemá s vlastnostmi částic nic společného



# Jádro atomu & standardní částicový model



# KVARKY

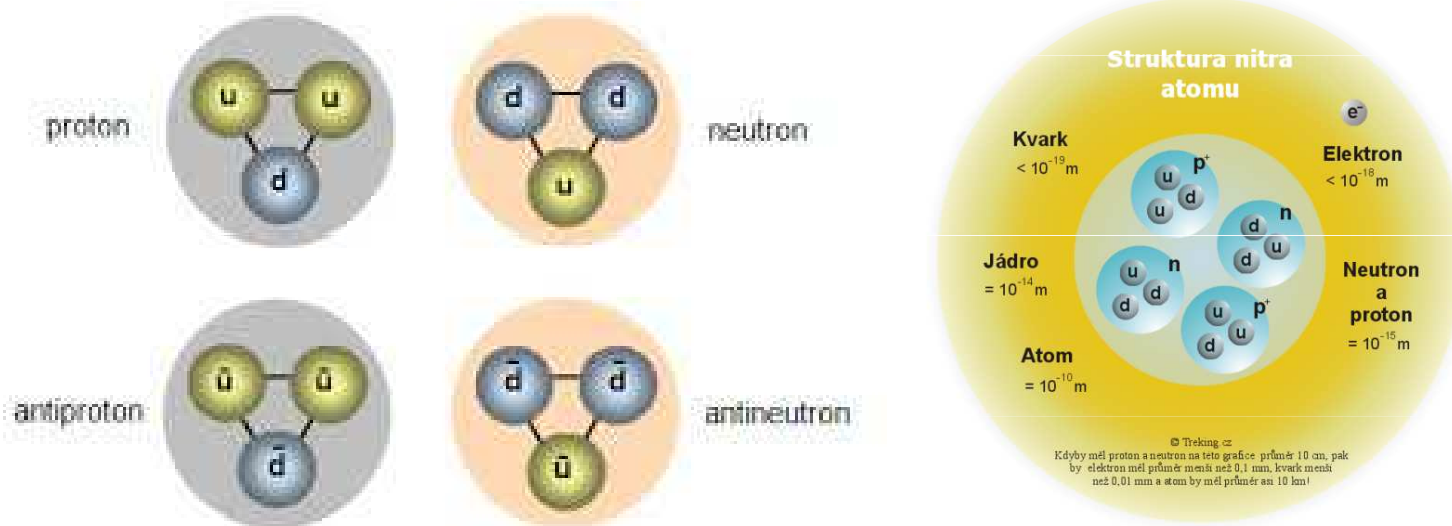
- Podle kvantové charakteristiky nazvané "vůně" (flavour) existuje šest kvarků  
***u, d, s, c, b, a t.***



# KVARKY

- Veškerou pozorovatelnou hmotu ve vesmíru můžeme postavit
- ze dvou leptonů (elektronu ( $e^-$ ) a elektronového neutrina ( $\nu_e$ ))
- a ze dvou kvarků (**up (u)**, **down (d)**).
- **Fundamentální částice první generace**

(běžné atomy, běžné energie): kvarky  $u$  a  $d$  + leptony  $e^-$ ,  $\nu_e$ ,





Up



Down

# KVARK Y I. generace



Veškerá pozorovatelná hmota ve vesmíru

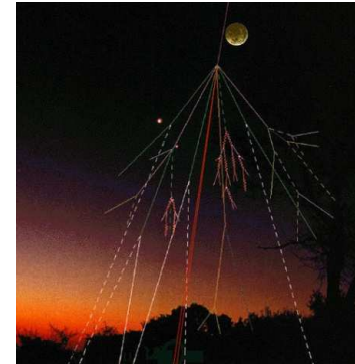


Strangeness



Charm

## II. generace



Jen vysoce energetické procesy, např. srážky kosmického záření s částicemi ve vrchních vrstvách atmosféry

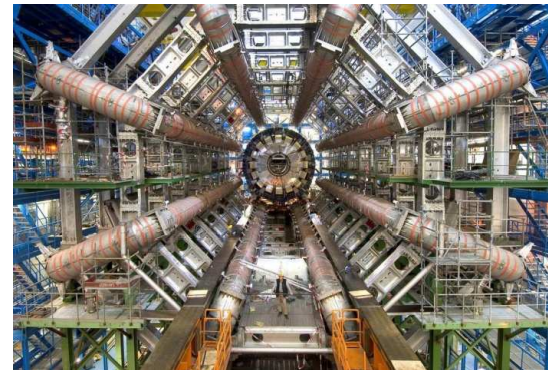


Beauty (bottom)



Truth (*in vino veritas*) (Top)

## III. generace



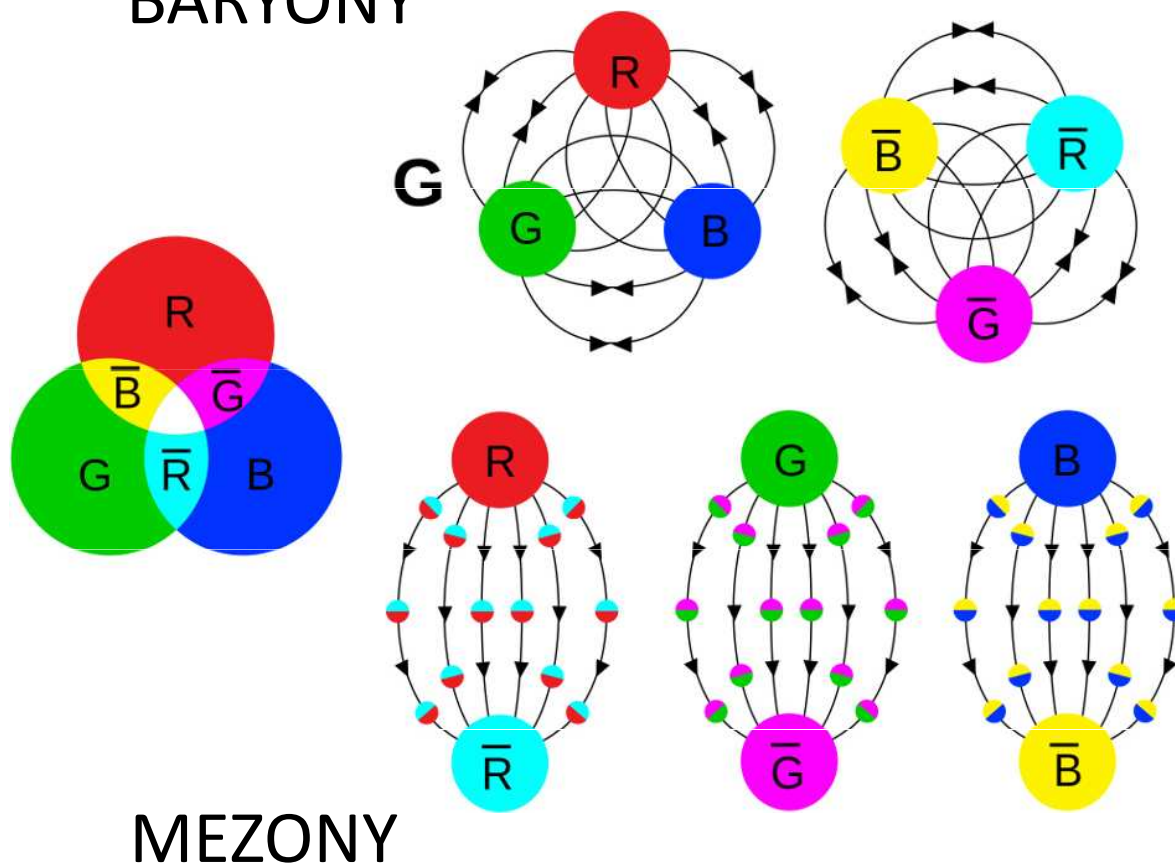
V současnosti již jen umělý vznik na velkých urychlovačích



# KVARKY

- Kvarky jsou fermiony s  $\frac{1}{2}$  spinem a platí pro ně tedy Pauliho vylučovací princip. Přesto existují částice složené ze stejných kvarků (např. částice  $\Delta^{++} = uuu$ )
- Každý kvark určité "vůně" se tak musí vyskytovat v různých kvantových stavech  
→ ve **třech "barvách"**, což je další kvantová charakteristika (vnitřní stupeň volnosti), a to **červené**, **zelené** a **modré**

## BARYONY



## MEZONY

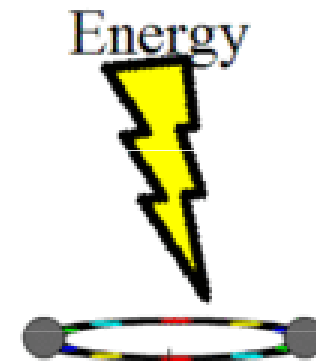
# KVARKY – SILNÁ INTERAKCE



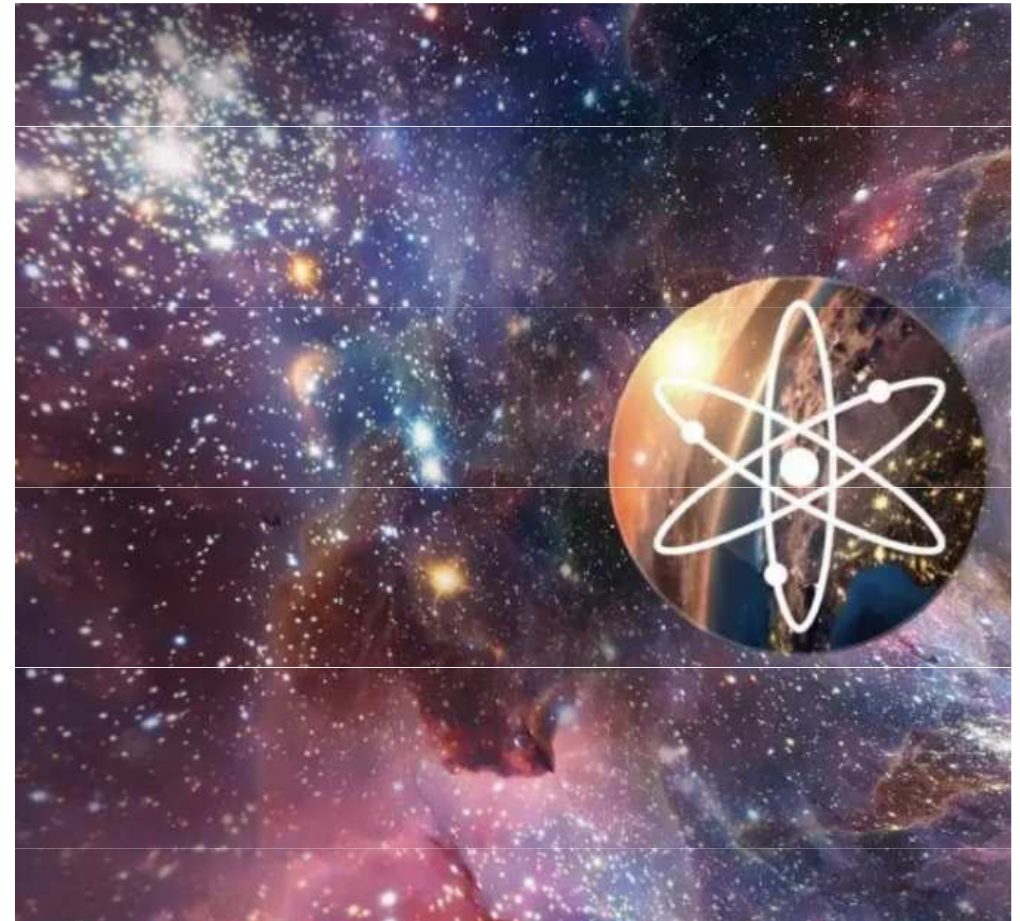
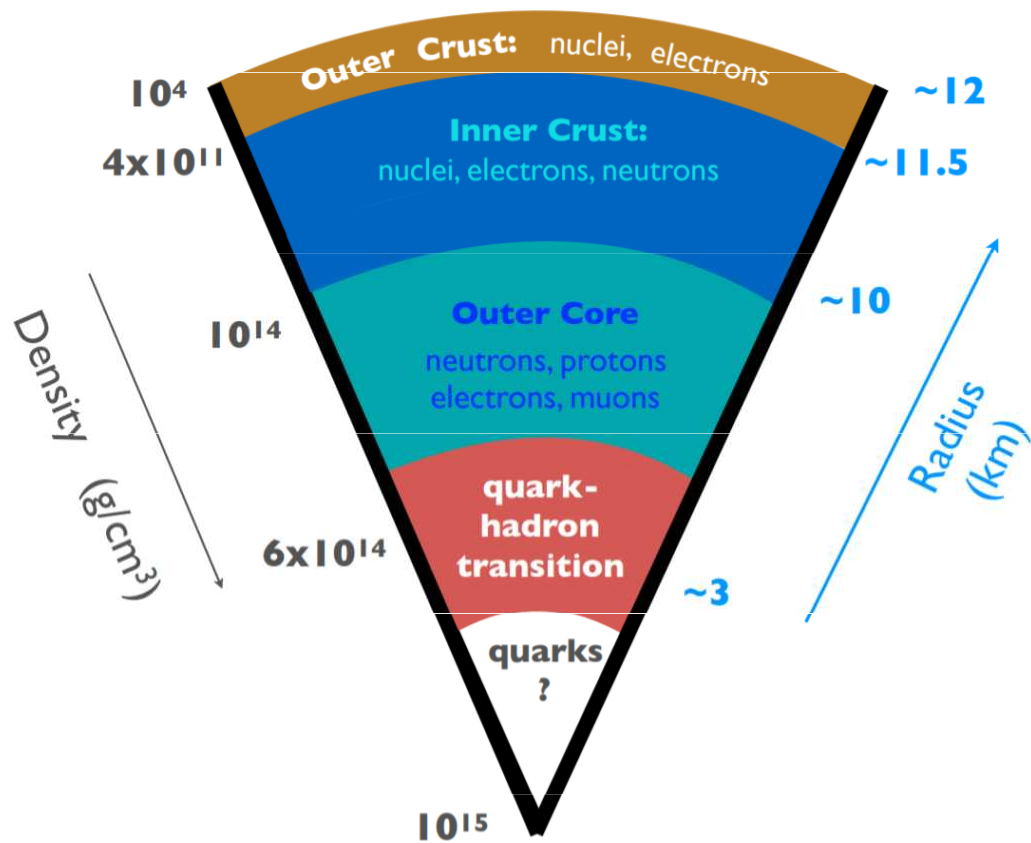
- silná jaderná interakce „cítí“ barvu (obdobně, jako elektromagnetická interakce elektrický náboj)
- Barvu si lze tedy představit jako zvláštní, velmi silný „elektrický náboj“ (barevný náboj). Tento náboj je samotnou podstatou silné interakce, kterou kvarky zprostředkovávají
- Hadron jako celek nesmí barvu vykazovat – musí být „**bezbarvý**“ (připodobněním je částice bez elektrického náboje). U baryonu je toho dosaženo přítomností tří kvarků lišících s odlišnou barvou, u mezonů je barva kvarku kompenzována barvou antikvarku
- Při výměně gluonu mezi dvěma kvarky mění oba kvarky zároveň svou barvu, a to vždy tak, aby hadron zůstal „bezbarvý“
- Gluony jsou proto též nositeli barvy, jsou však – podobně jako foton – nehmotné a nemají elektrický náboj

# KVARKY – SILNÁ INTERAKCE

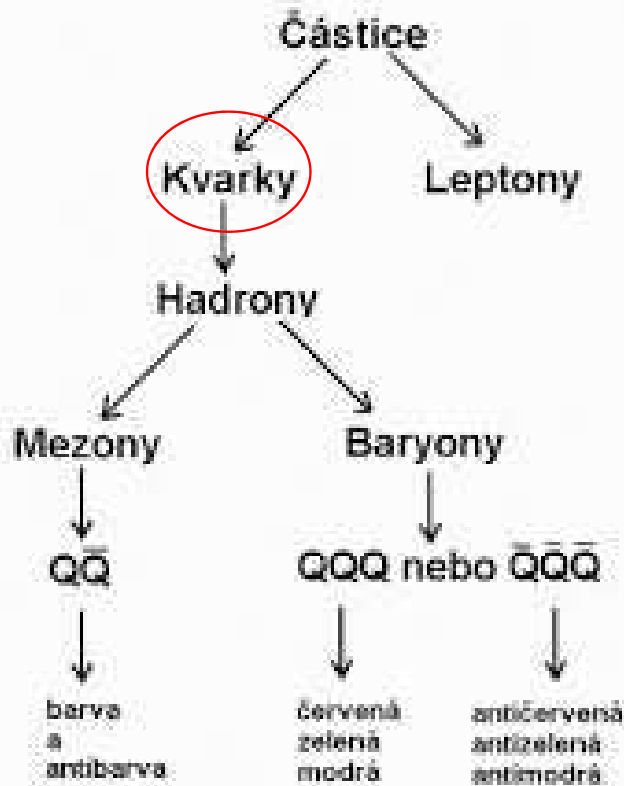
- Díky silné interakci drží kvarky za normálních podmínek uvnitř hadronů
- **Nemohou se vyskytovat samostatně** (existují pouze ve vázaných stavech – hadronech) – mluvíme o „**uvěznění kvarků**“.
- Je to důsledkem extrémně krátkého dosahu SJI. SJI se navíc chová oproti jiným interakcím „dost podivně“ → **se vzdáleností roste**. Po dosažení určité vzdálenosti mezi kvarky je do systému dodáno již tolik energie, že může dojít ke vzniku nových kvarků a jejich reorganizaci, nikoliv však separaci jednotlivých kvarků
- Nové kvarky či antikvarky se okamžitě spojí s antikvarkem, respektive kvarkem - výsledkem budou dva hadrony, namísto původního jednoho (analogií může být rozdělování magnetu s cílem ulomit jeden jeho pól)



[https://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_confinement](https://en.wikipedia.org/wiki/Color_confinement)  
Elongating gluon tube



# KVARKY



Q - kvark  $\bar{Q}$  - antikvark

## Kvarky mají některé podivné vlastnosti:

- fermiony se spinem  $\frac{1}{2}$
- jejich elektrický náboj představuje buď  $\frac{1}{3}$  nebo  $\frac{2}{3}$  jednotkového náboje.
  - Kvarky "u", "c" a "t" mají náboj  $Q(u, \dots) = \frac{2}{3}$
  - kvarky "d", "s" a "b" mají náboj  $Q(d, s, \dots) = -\frac{1}{3}$
- Kvarky mají baryonové číslo  $B = \frac{1}{3}$
- Antivarky
- Antikvarky "u", "c" a "t" mají náboj  $-\frac{2}{3}$  a antikvarky "d", "s" a "b" mají náboj  $\frac{1}{3}$ .
- baryonové číslo  $B = -\frac{1}{3}$

# POZNÁMKY

- Názvy jako vůně a chuť nemají nic společného s jejich původním významem – používají se k popisu vlastností, které v klasické fyzice nemají analogii a jejichž popis je značně složitý.
- Jejich zavedení vyplynulo z nutnosti vysvětlit vlastnosti, chování, a systematiku hadronů.
- Pro kvark b se spíše užívá bottom a pro kvark t termín top (namísto „beauty“ a „truth“)



## Částice hmoty

Fermiony (spin 1/2)

	Kvarky		Leptony	
První rodina	d	u	e <sup>-</sup>	ν <sub>e</sub>
Druhá rodina	s	c	μ	ν <sub>μ</sub>
Třetí rodina	b	t	τ	ν <sub>τ</sub>

## Částice interakcí

Bosony (celočíselný spin)

Silná interakce:



Elektromagnetická interakce:



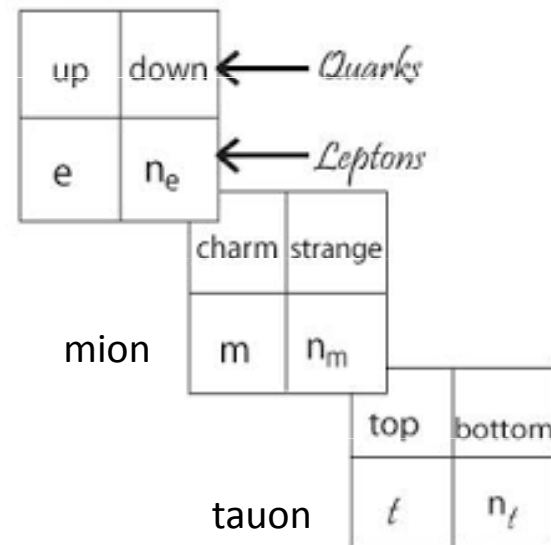
Slabá interakce:



Higgsovo pole:



Tyto částice se rozdělují do 3 rodin:



Podle současných poznatků:

- 12 druhů základních částic:
  - 6 kvarků
  - 6 leptonů
- Tyto částice se rozdělují do 3 rodin:
- do každé z nich patří 2 druhy kvarků a 2 leptony
- První rodina = kvarky "u" a "d", elektron (e<sup>-</sup>) a elektronové neutrino (ν<sub>e</sub>) – vytváří veškerou hmotu vesmíru, neboť dokáží "konstruovat" protony a neutrony, základní stavební kameny atomových jader všech chemických prvků.
- Další dvě rodiny představují nestabilní částice s krátkým časem rozpadu.

# KVARKY A HADRONY

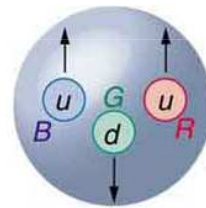
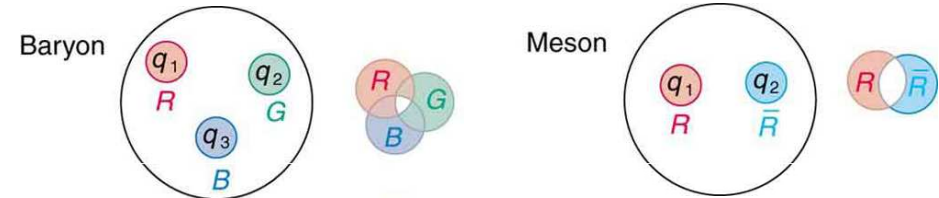
- **Baryon:** 3 kvarky  $p = (uud)$ ,  $n = (udd)$ ,  $\Lambda^0 = (uds)$

- **Antibaryon:** 3 antikvarky

- **Mezon:** 1 kvark + 1 antikvark  $\pi^+ = (ud)$ ,  $K^- = (su)$

- Baryonová, nábojová a další kvantová čísla kvarků a antikvarků se sčítají a dávají dohromady pozorované vlastnosti hadronu

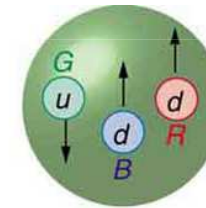
- Např. Z protonu (kvarky uud) =  $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + (-\frac{1}{3}) = 1$



Proton

$$\text{Spin} \quad \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

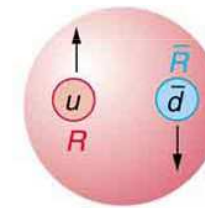
$$\text{Charge} \quad +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$



Neutron

$$\text{Spin} \quad -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$$

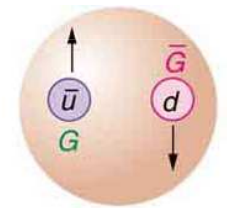
$$\text{Charge} \quad +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$



$\pi^+$

$$\text{Spin} \quad +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$$

$$\text{Charge} \quad +\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$$



$\pi^-$

$$\text{Spin} \quad +\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$$

$$\text{Charge} \quad -\frac{2}{3} - \frac{1}{3} = -1$$

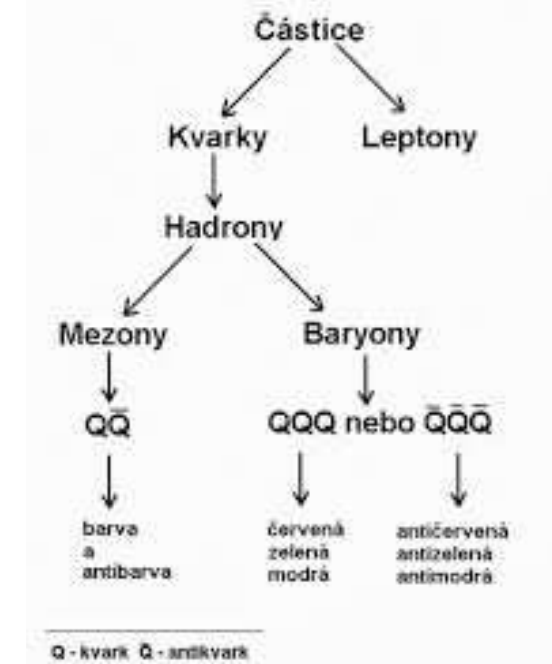


- **Mezon F** má nulovou podivnost, protože se skládá z podivného kvarku a antikvarku, tzn.  $1 + (-1) = 0$  (mluvíme o „skrytém půvabu“)



# SYSTEMATIKA ČÁSTIC

- Částice se dělí na dvě základní skupiny
- **LEPTONY** (řecky leptos = lehký)
- a **HADRONY** (řecky hadros = velký, silný)
- Dělicím kritériem je typ interakce, které mezi částicemi mohou působit
- Leptony → slabá interakce
- Hadrony → silná interakce
- Pokud mají částice elektrický náboj → též elektromagnetické interakce



# SPIN

- Spin je vnitřní vlastnost elementárních částic
- Spin nás informuje o tom, jak vypadá částice z různých směrů. Pro připodobnění ke klasické fyzice si jej můžeme představit jako rotaci kuličky kolem své osy. Podle pravidel kvantové fyziky ovšem částice dobře definovanou osu otáčení nemají.



180° = spin 2



360° = spin 1

- Částice s nulovým spinem se nám jeví ze všech stran stejná
- Částice se **spinem 1** se při otáčení jeví různě, a aby znova dosáhla počátečního vzhledu, musí se kolem osy otočit o **360°**
- Částice **se spinem 2** dosáhne původního vzhledu již po otočení o **180°**
- Spin částic si také můžeme představit na příkladu hracích karet. Spin hodnoty 1 můžeme připodobnit esu, které vypadá stejně až po otočení o 360°. Spin 2 pak jako královnu, která má dvě hlavy, tudíž se nám jeví stejně již po otočení o 180° (viz obrázek).
- Čím je tedy hodnota spinu vyšší, tím menší zlomek plného obratu je potřebný k počátečnímu vzhledu částice.
- Toto platí pro částice s celočíselným spinem – bosony. Částice se spinem ½ je ovšem třeba otočit kolem osy dvakrát, aby nabyly původního vzhledu.

# Klasifikace subnukleárních částic

## Podle spinu:

*fermiony* pololočíslné spinové kvantové číslo

Př. leptony (elektron, neutrino ...), kvarky (up, down, charm...), baryony (proton, neutron)  
Pauliho princip (tvorí hmotu)

*bosony* celočíselné spinové kvantové číslo (foton, gluon...) (zprostředkovávají interakce)

## Podle klidové hmotnosti:

*leptony* (z řeckého „lehký“),  $m \sim 0 - 130 \text{ MeV}/c^2$

Př. neutrino  $\nu$  ( $0 \text{ MeV}/c^2$ ), elektron ( $0,5 \text{ MeV}/c^2$ ), mion ( $106 \text{ MeV}/c^2$ )

poločíslné spinové číslo  $1/2$

*mesony* (z řeckého „střední“),  $m \sim 130 - 900 \text{ MeV}/c^2$

Př. pion, kaon

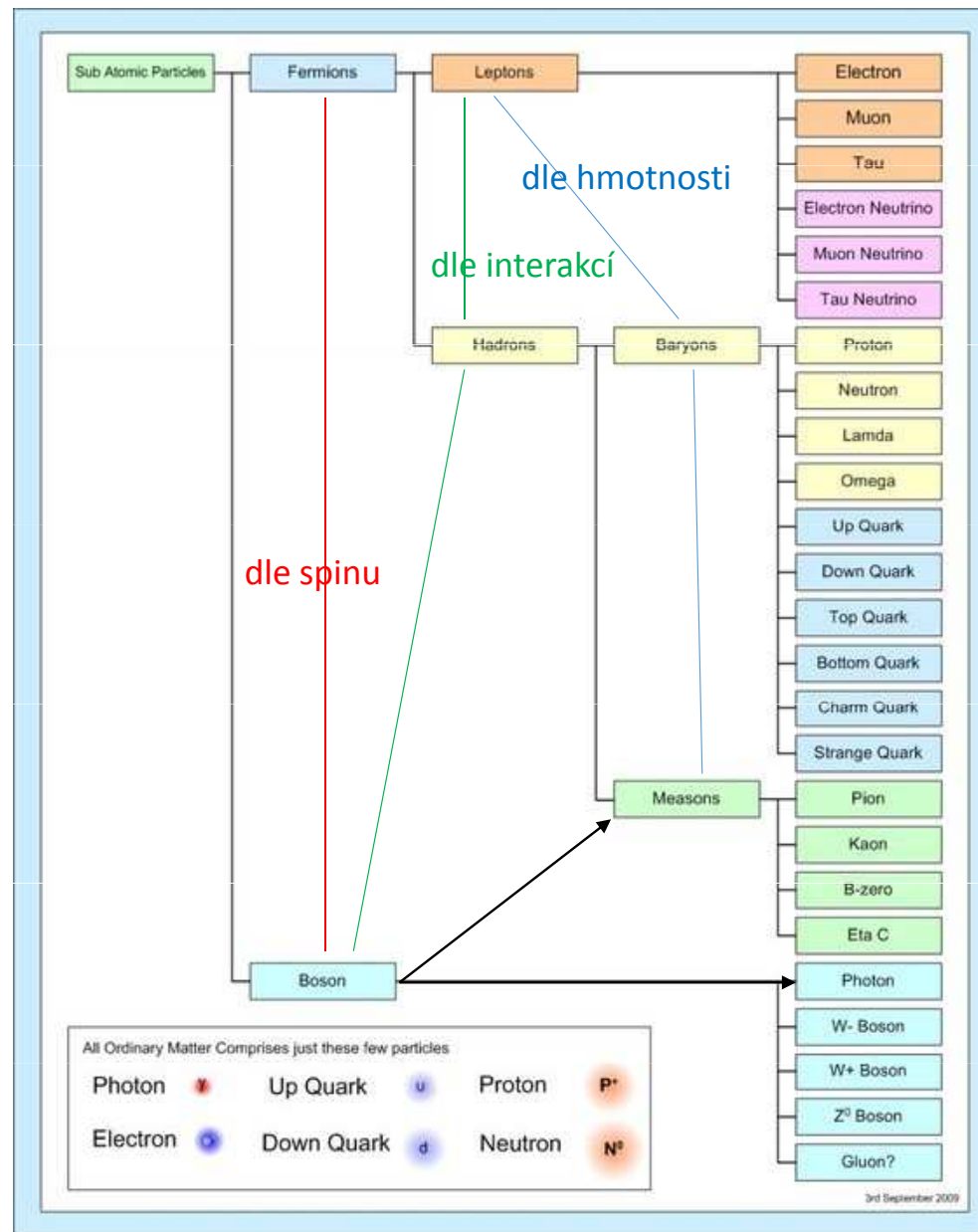
celočíselné spinové číslo 0 nebo 1

*baryony* (z řeckého „těžký“),  $m \sim 900 \text{ MeV}/c^2$

Př. proton  $p$  ( $938 \text{ MeV}/c^2$ ), neutron  $n$  ( $940$ ), poločíslné spinové číslo

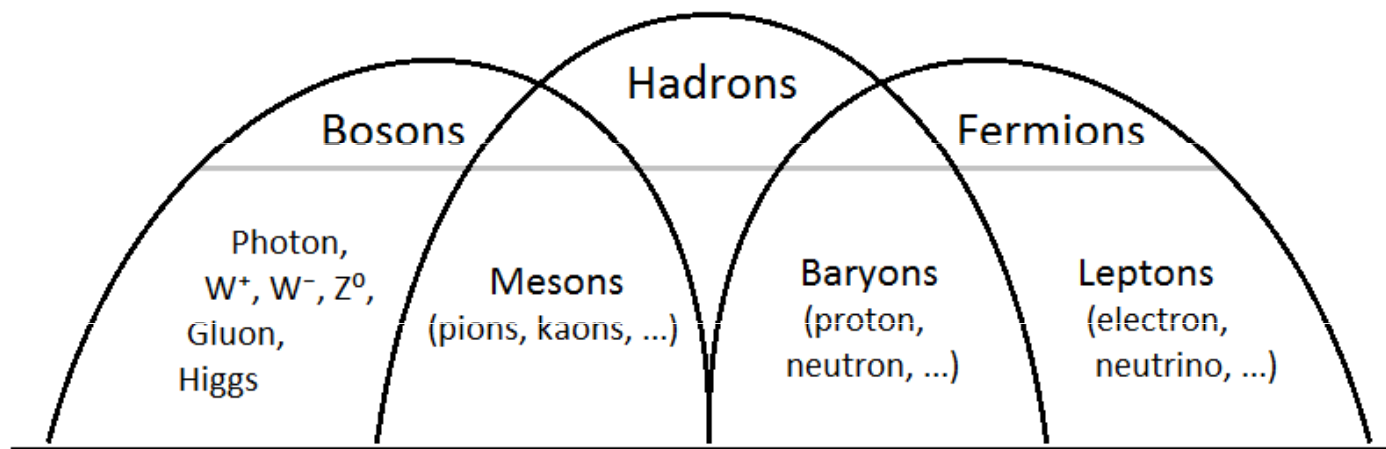
účastní se tzv.  
*silné interakce,*  
*tzv. hadrony*

# Systematika elementárních částic



# Systematika elementárních částic

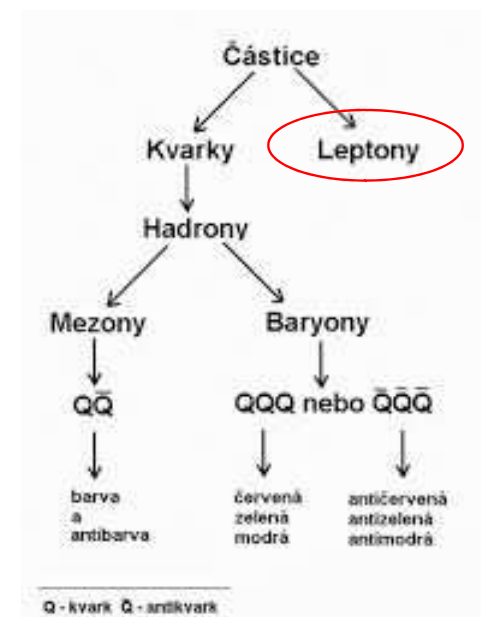
## -další kritéria



**LEPTONY**

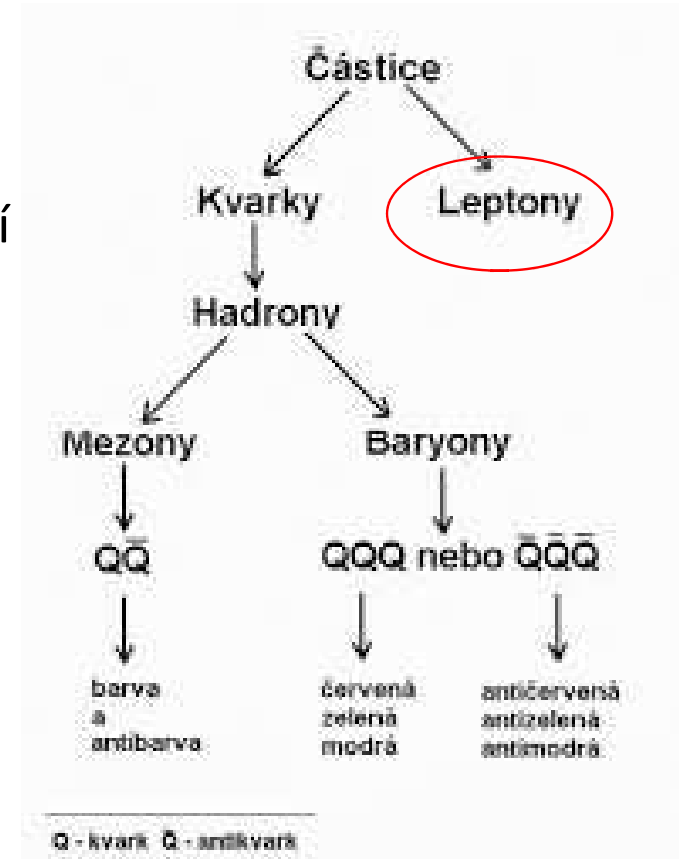
# LEPTONY

- Leptos = lehký;  $m_e = 9,1 \times 10^{-31}$  kg
- Smysl tohoto názvu je ale již jen historický, nejtěžší částice z této skupiny, **tauon**, má téměř dvojnásobně větší hmotnost než proton
- Spin  $\frac{1}{2}$  → fermiony (Pauliho vylučovací princip)
- Náboj buďto 0 nebo elementární záporný náboj ( $1,6021 \cdot 10^{-19}$  C, odpovídá nábojovému číslu  $Z = -1$ )
- leptony, tvoří je šestice částic a šestice antičástic
- Patří mezi ně **elektrony** (*elektron, mion a tauon*) a jejich **neutrina** (*elektronové, mionové a tauonové*).
- **Antičástice** k leptonům (antileptony) jsou kladné částice – **pozitron ( $e^+$ )**, **mion  $m^+$** , **tauon  $t^+$**  a odpovídající antineutrina se od neutrin liší tzv. točivostí (tj. orientací spinového momentu hybnosti)



# LEPTONY

- Elektrony v atomovém obalu **nevykazují** při současných experimentech **vnitřní strukturu** (přesto je elektron součástí širší skupiny částic, kterým říkáme leptony, viz dříve).
- Všechny leptony mají i v nejvytříbenějších experimentech **bodovou strukturu až do  $10^{-18}$  m** (tzn. nemají vnitřní strukturu). Zdá se tedy, že jde opravdu o elementární, dále nedělitelné tzv. **FUNDAMENTÁLNÍ částice** (?? viz dále).
- $e^-$  → interagují **elektromagnetickou interakcí (mají náboj)** i **slabou interakcí**
- **neutrina** → interagují **jen slabou interakcí** (proto je pro ně látka velmi průhledná, např. sluneční neutrina projdou bez problémů celou zeměkoulí)

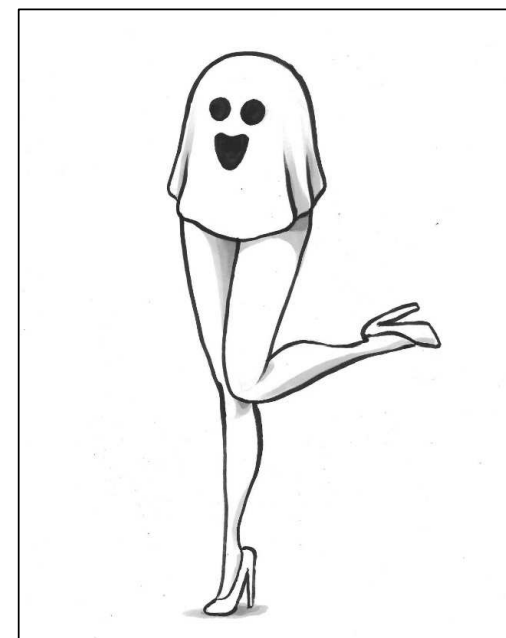
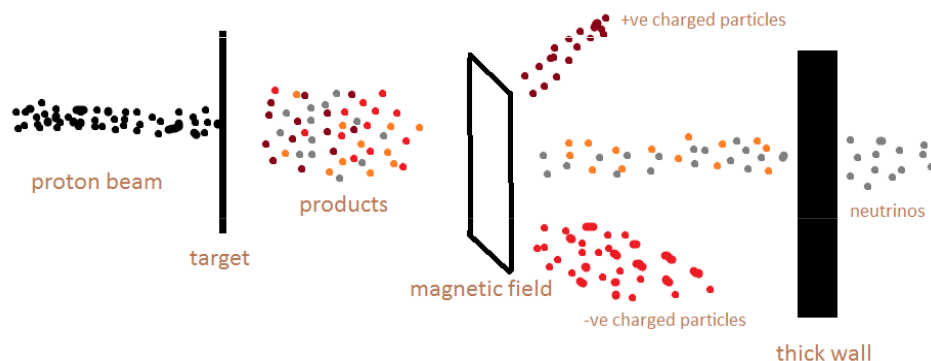




# LEPTONY – NEUTRINA

- Neutrino mají **velmi malou hmotnost a šíří se téměř rychlostí světla**. Neutrino se proto chovají jako **duchové** – umí procházet zdí a přeměňovat se jedno v druhé.

- **bodová struktura**
- **Spin  $\frac{1}{2}$**
- **El. náboj 0**



65 miliard neutrino plochou nehtu ( $\sim 1 \text{ cm}^2$ ) každou sekundu (hlavně ze Slunce)  
Za celý život lidským tělem projde  $10^{23}$  neutrino - jen jedno jediné je ale zachyceno

V běžné jaderné elektrárně vzniká každou sekundu přes 50 000 neutrino



**FACT:** about 65 million neutrinos pass through your thumbnail every second.

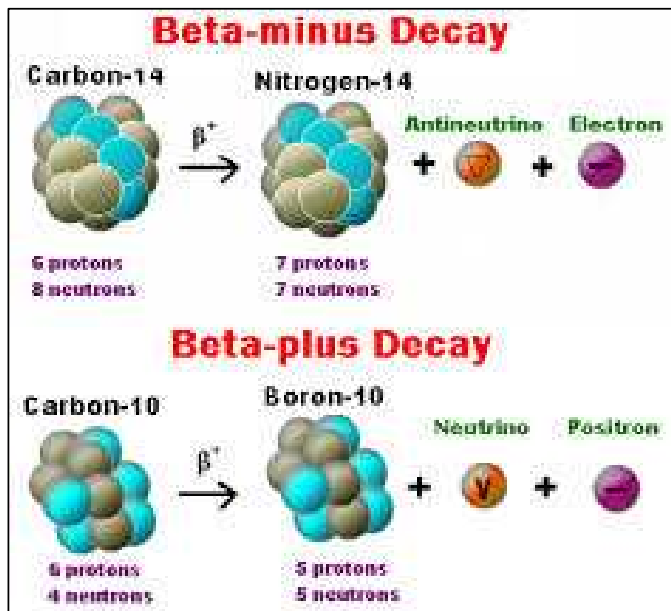
Source: ScienceDaily.com  
LBNL.com



# LEPTONY – NEUTRINA

Spolu s fotony nejhojnější částice ve vesmíru

- Neutrina jsou **věrní souputníci elektronů**.
- Pokud při slabé interakci vznikne lepton, musí se také objevit příslušná antičástice, tedy antilepton
- → **Zákon zachování leptonového čísla**: celkové leptonové číslo (L) před a po interakci musí být stejné



- **Leptonové číslo L** – popisuje interakce leptonů:
  - Leptony +1
  - Antileptony -1
  - Ostatní částice 0
- Při vzniku pozitronu (antičástice k elektronu) vznikne ještě **elektronové neutrino**, naopak při vzniku elektronu (například při beta rozpadu) se objeví **elektronové antineutrino**.
- **U ostatních elektronů je tomu obdobně**. S těžkým elektronem (mionem) vzniká mionové antineutrino a s tauonem se vynoří tauonové antineutrino.

OBJEV NEUTRIN: ZÁHADA - spektra vyzařovaných beta-částic jsou **spojitá** s určitou **maximální energií**.  
Vysvětlení: Energie rozpadu se rozdělí náhodně mezi **elektron a antineutrino** nebo mezi **pozitron a neutrino**.

# zdroje neutrin

velký třesk

SN1987

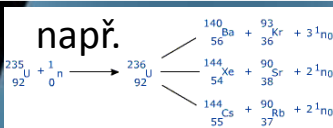
20 v's

Slunce

atmosferická neutrina

lidské tělo

jaderné reaktory



pozemská radioaktivita

urychlovače

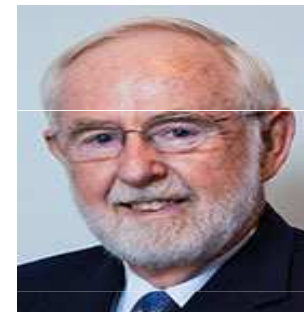
$E_\nu$  0.3 – 30 GeV



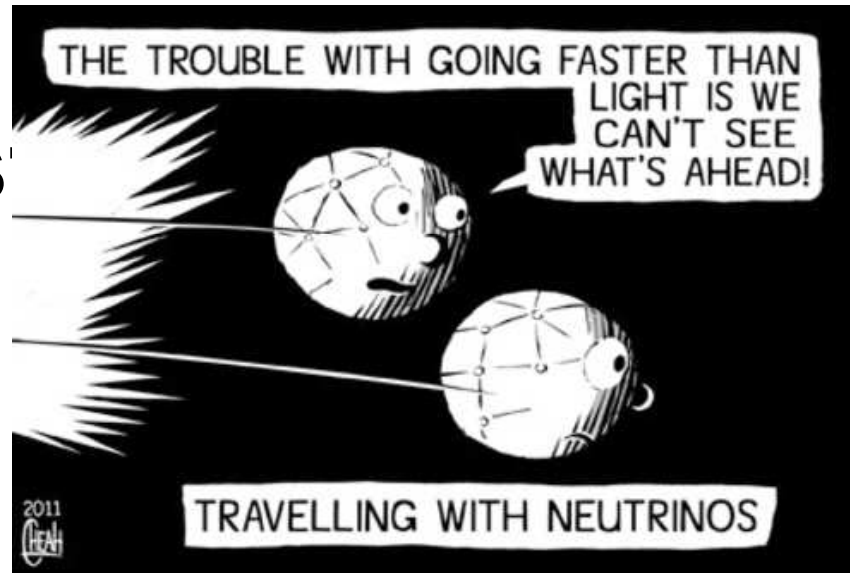
1.4.2015

# OSCILACE NEUTRIN

- **Oscilace elektronových, mionových a tauonových neutrin (změna vůně)** – dochází k samovolné přeměně mezi jednotlivými typy; pravděpodobnost, že při experimentu zachytíme neutrino v některé z jeho podob, se plynule mění.
- Nobelova cena za fyziku 2015
- *“for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”*
- Takaaki Kajita  
Super-Kamiokande Collaboration  
University of Tokyo, Kashiwa, Japan
- Arthur B. McDonald  
Sudbury Neutrino Observatory Collaboration  
Queen’s University, Kingston, Canada



# Zajímavosť



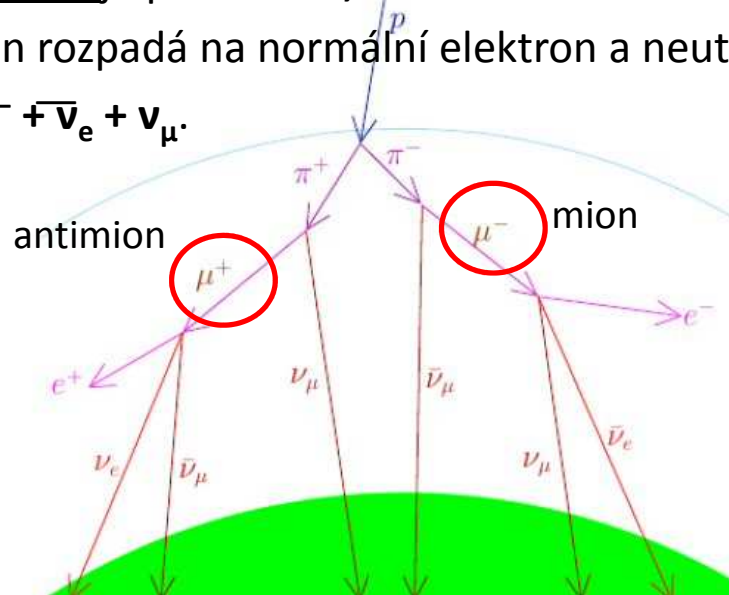
- V roce 2011 se zdálo, že neutrína létají z komplexu CERN do Gran Sasso nadsvětelnou rychlostí – na vině byl povytažený konektor optického vlákna (u experimentu Opera), které zajišťovalo komunikaci mezi podzemní a nadzemní částí laboratoře.

# LEPTONY – ELEKTRONY

- Elektron je první objevenou elementární částicí. Nalezl ho anglický fyzik John **Joseph Thomson** (1856–1940) v roce 1897 v katodovém záření.
- Elektron hraje nesmírně důležitou roli v atomární látce. Rozdílné chování různých atomů je způsobeno rozdílnou konfigurací elektronových obalů → **kdyby e- nebyly fermiony (Pauliho vylučovací princip), nemohly by existovat různé atomy.**
- Makroskopický pohyb elektronů vnímáme jako elektrický proud.
- Pohyb elektronů a jejich vlastnosti jsou základem veškerých elektronických (využívají náboj) a spintronických (využívají spin) zařízení.
- Existenci antičástice k elektronu (**pozitronu**) teoreticky předpověděl **Paul Dirac** (1902–1984) v roce 1928.
- Pozitron byl objeven v roce 1932 **Carlem Andersonem** (1905–1991) v kosmickém záření.

# LEPTONY – MIONY, TAUONY

- **Mion, těžký  $e^-$ ,** se chová velmi podobně jako elektron. Má hmotnost  $207 m_e$ .
- Doba života je přibližně **2,2 ms**. Potom se těžký elektron rozpadá na normální elektron a neutrino:  
 $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ .



- Miony s relativistickými rychlostmi vznikají interakcí kosmického záření s horními vrstvami atmosféry.
- Vzhledem ke své krátké době života by neměl mion nikdy dopadnout na zemský povrch.
- Avšak díky dilataci času žije mion z hlediska pozorovatele na Zemi „déle“ a má dosti času, aby dopadl na povrch Země. Z hlediska mionu se Země „přibližuje“ relativistickou rychlostí a díky kontrakci vzdálenosti letí mion k povrchu Země jen zlomek skutečné vzdálenosti. Vidíme, že z hlediska obou souřadnicových soustav je výsledek stejný, mion dopadne na povrch Země.
- U hladiny moře je možné detekovat přibližně **1 mion dopadající na  $\text{cm}^2$  za minutu**. Tyto miony pocházejí ze sekundárních spršek kosmického záření.

- **TAUON (Lepton  $\tau$ ):** velmi těžký „elektron“, nestabilní částice s dobou života 0,3 ps. Rozpadá se na své lehčí dvojníky ( $e^-$  nebo mion) a neutrino.

# LEPTONY

Těžké  
elektrony

Na rozdíl od  $e^-$   
jsou těžší a  
nestálé

W = slabá

E = elektromagnetická

S = silná

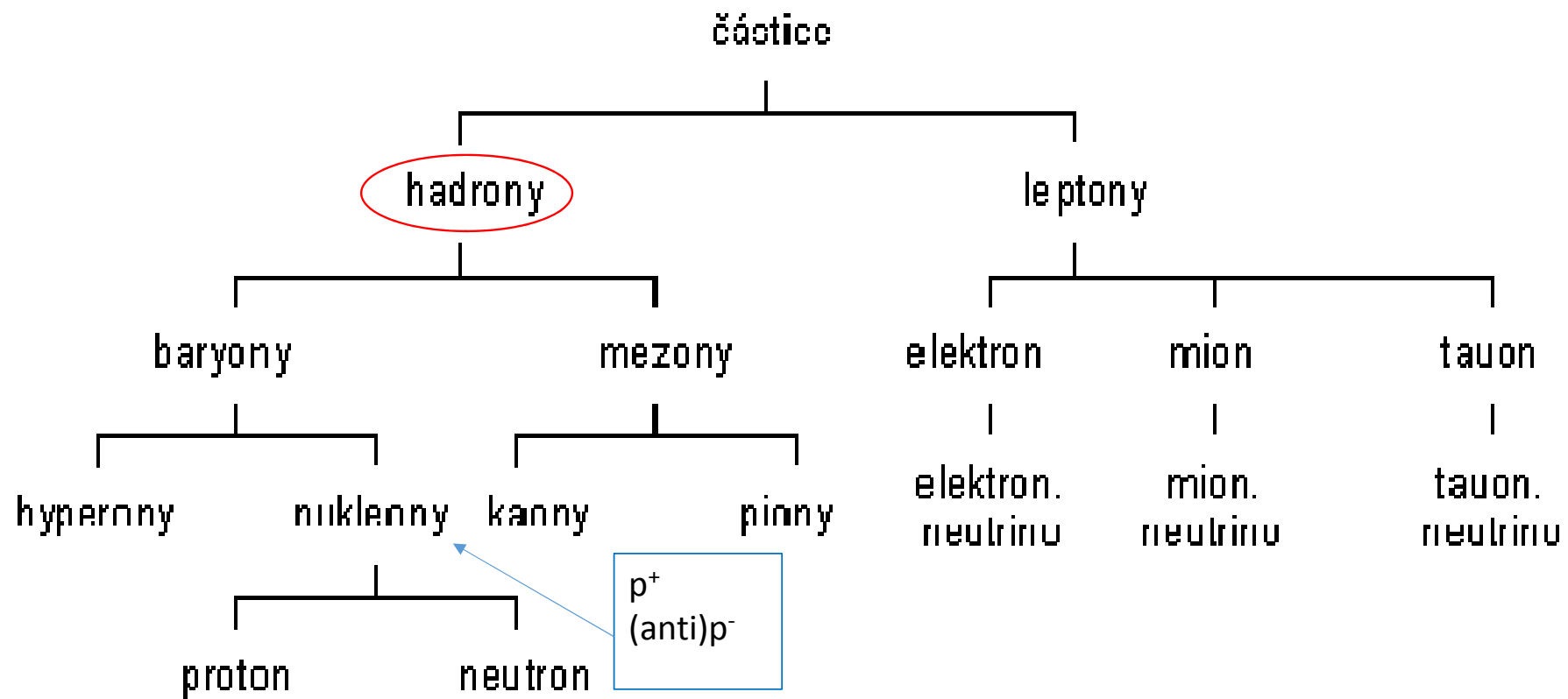
$m_e = 9,1 \times 10^{-31}$  kg

$e = 1,6 \times 10^{-19}$  C

jméno částice	hmotnost ( $m_e$ )	spin (h)	náboj (e)	poločas rozpadu	působící síly	rok objevu	objevitel
elektron ( $e^-$ )	1	1/2	-1	stabilní	W, E	1897	Thomson
mion ( $\mu^-$ )	207	1/2	-1	2 $\mu$ s	W, E	1937	Anderson
tauon ( $\tau^-$ )	3484	1/2	-1	0,3 ps	W, E	1975	Perl
elektronové neutrino ( $\nu_e$ )	mix minimální	1/2	0	oscilace	W	1956	Reines, Cowan
mionové neutrino ( $\nu_\mu$ )	mix minimální	1/2	0	oscilace	W	1962	Lederman, Schwartz, Steinberger
tauonové neutrino ( $\nu_\tau$ )	mix Poměrně hmotnější	1/2	0	oscilace	W	1999	kolaborace DONUT



**HADRONY**



# HADRONY (složené částice)

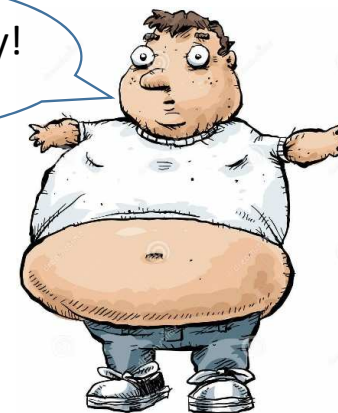
- řec. *hadros* = silný, bujarý →
- podléhají **silné interakci**
- Dnes již **nejsou považovány za (fundamentální) elementární částice**, nicméně jejich komponenty se vyskytují pouze vázané v hadronech (nikdy ne volně)
- **S výjimkou protonu a antiprotonu jsou nestabilní** ( $10^{-28} - 10^{-8}$  s) → rozpad na lehčí hadrony, případně až leptony.
- Výjimkou je rozpad  $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + n_e$ , s **poločasem 930 s** (~10-15 min), nestabilita  $n^0$  se týká jen neutronů volných (nikoliv vázaných v atomovém jádru).
- Je jich relativně velké množství (jeden z důvodů, proč se uvažovalo o jejich další vnitřní struktuře)
- **MEZONY** – řec. *mezos* = středně těžké částice, i.e., **mezi (těžkým)  $p^+$  a (lehkým)  $e^-$**
- spin nejčastěji 0, vzácněji celočíselný (→ bosony)
- **BARYONY** – řec. *barys* = těžké částice, mají hmotnost  $\geq p^+$
- spin poločíselný  $\frac{1}{2}$  nebo  $\frac{3}{2}$



# Baryony

- řec. *barys* = těžký → těžké subatomární složené částice
- Nejlehčí a nejznámější baryon je **proton** ( $m_u = 1.0072765$  u)
- O málo těžší je **neutron** ( $m_u = 1,0086650$  u)
- **NUKLEONY**:  $p^+$  a  $n^0$  – jsou z nich složená všechna atomová jádra (výjimkou je  ${}^1_1\text{H}$ )
- **HYPERONY**: těžší baryony než nukleony, obsahují alespoň jeden s-kvark (podivný)
- Pro popis interakcí zavedeno **baryonové číslo B** (obdoba leptonovému číslu).
- **Platí zákon zachování B** na obou stranách reakce
  - Baryony = +1
  - Antibaryony = -1
  - Ostatní částice (mezony, leptony) = 0
- **Baryon** je částice složená **ze 3 kvarků** ( $p^+$ : kvarky *uud* a  $n^0$ : *udd*)
- **Antibaryon** je složen **ze 3 antikvarků**.
- Doba životnosti většiny baryonů je velmi krátká a závisí především na kvarkovém složení a způsobu přeměny kvarků.

Škvarky! Škvarky!  
Škvarky!



# BARYONY

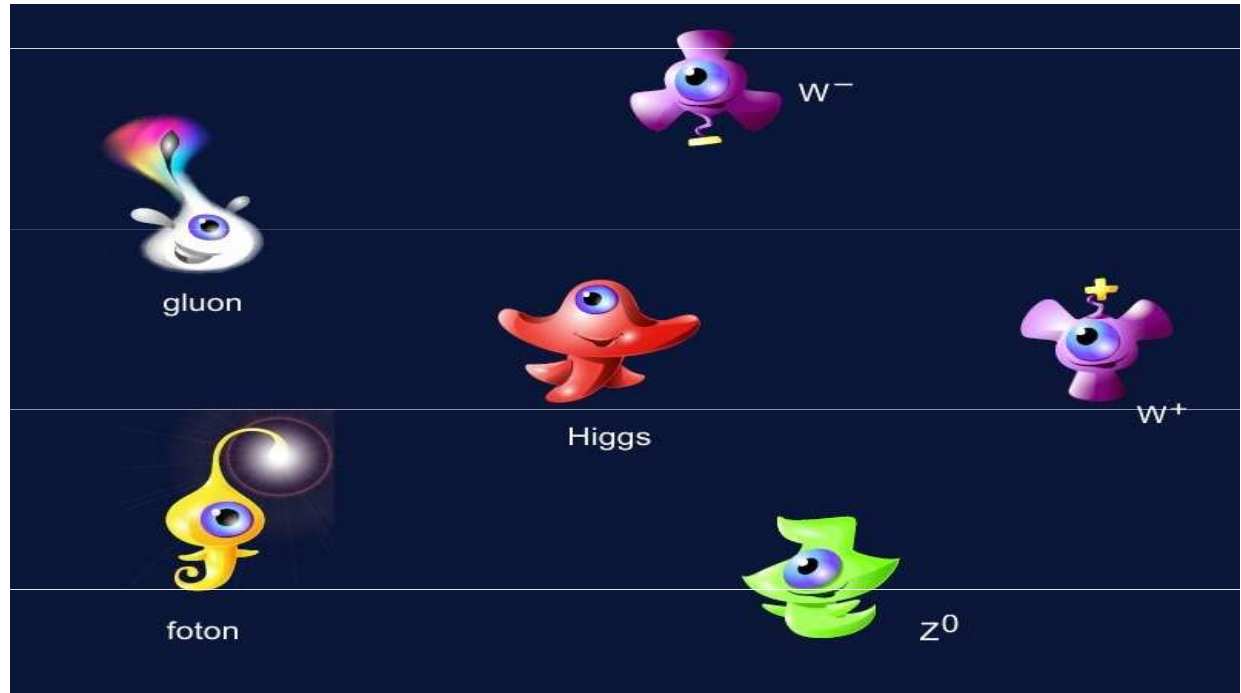
Baryony qqq	kvarky	elektrický náboj	hmotnost (GeV/c <sup>2</sup> )	spin
$p$ proton	u u d	+ 1	0.938	1/2
$\bar{p}$ antiproton	$\bar{u} \bar{u} \bar{d}$	- 1	0.938	1/2
$n$ neutron	u d d	0	0.940	1/2
$\Lambda^0$ lambda	u d s	0	1.116	1/2
$\Omega^-$ omega	s s s	- 1	1.672	3/2
$\Sigma_c$ sigma-c	u u c	+ 2	2.455	1/2
⋮ a mnoho dalších				

**Baryony** jsou složeny ze **tří kvarků**, které lze kombinovat – viz obr. baryonový oktet:

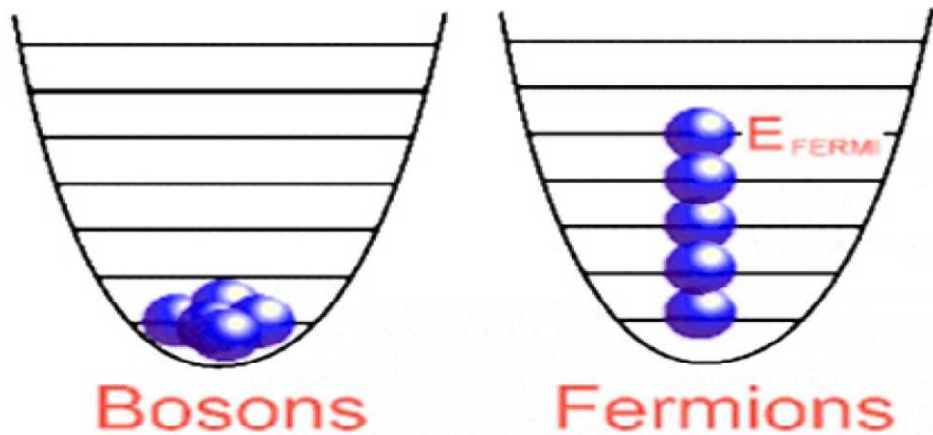
- velikost **izospinu**: od -1 do 1 (není to spin jednotlivých baryonů – ten může být pouze poločíselný a to **1/2, 3/2,...**)
- **Náboj**: dosahuje hodnot **-1, 0, 1**;
- **Podivnost**: dosahuje hodnot **0, -1, -2**

# BOSONY („částice interakcí“)

- Existenci bosonů předpověděli ve svých pracích fyzici Steven Weinberg, Sheldon Glashow a Abdus Salam.
- Klidová hmotnost:
- **Nulová:** foton, gluon
- **Nenulová:** intermediální bosony (slabé interakce)  $W^+$ ,  $W^-$  (~90x více než  $p^+$ ) či  $Z^0$
- Jmenují se podle indického fyzika [Šatendranátha Boseho](#) (proto bývají někdy označovány jako **Boseho částice**).
- Zajímavým zástupcem bosonů je [Higgsův boson](#), jenž byl v CERNu objeven teprve v roce 2012 (nyní jsou tedy již prokázány všechny částice ze standardního modelu elementárních částic).



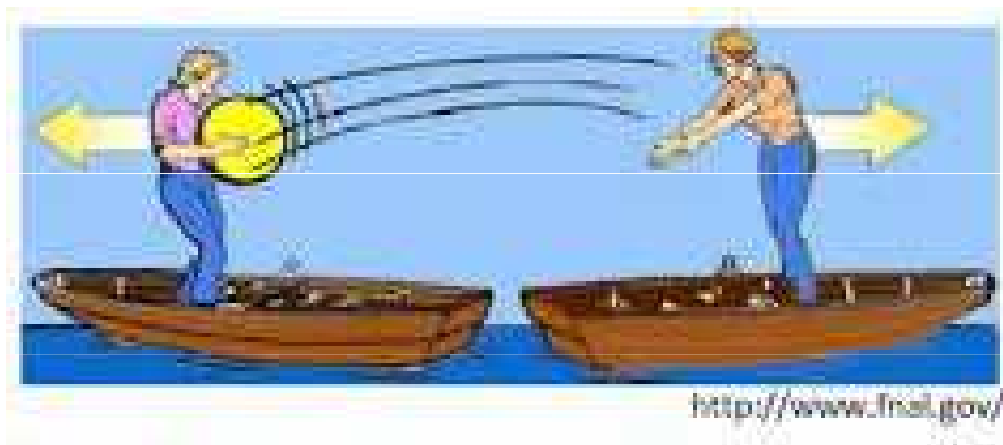
# BOSONY („částice interakcí“)



- Všechny bosony mají **celočíselný spin** a jsou pravým opakem fermionů, nespolečenských částic řídících se Pauliho vylučovacím principem (tzn. velice **rády obsazují společný kvantový stav**)

# KVARKY - SILNÁ JADERNÁ INTERAKCE (SJI)

- současná fyzika (kvantová teorie pole) vysvětluje obecně interakci dvou částic jako proces, který je zprostředkován **výměnou jiné (virtuální) částice**.
- ...mezi interagujícími částicemi vzniká silové pole, jehož kvantem je právě vyměňovaná částice. Tato částice existuje jen velmi krátce, po emisi jednou interagující částicí je okamžitě absorbována částicí druhou, a nelze ji proto jakožto částici zaznamenat (→ VIRTUÁLNÍ ČÁSTICE)

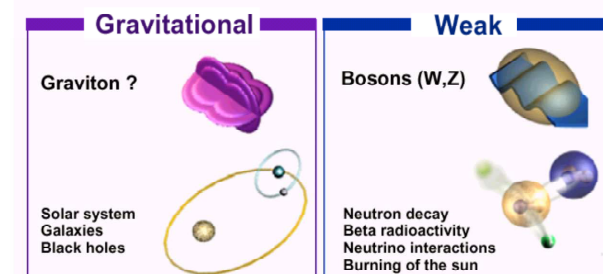
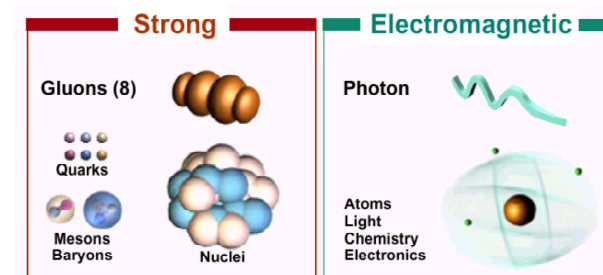




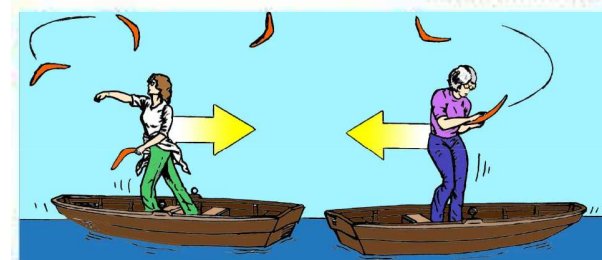
- **Gravitační síla ?** (zatím není známa polní částice)
- **Elektromagnetická síla:** protony a elektrony (elektricky nabité částice), udržuje e- v elektronovém obalu
- **Silná jaderná síla:** drží protony a neutrony v jádře (částice s barevným nábojem) a tvoří tak atomové jádro (elektrárny, a-bomby)
- **Slabá jaderná síla:** „cítí“ ji všechny částice atomu (jediná síla, kterou cítí neutrino), ale u většiny atomů ji nepozorujeme, může ale za  $\beta$ -rozpad

jméno částice	značení částice	hmotnost (GeV)	spin (h)	el. náboj (e)	interakce	rok objevu	objevitel
foton	$\gamma$	0	1	0	E	(1923)	(A. Compton)
W, Z	$W^\pm, Z^0$	80 až 91	1	0	W	1983	C. Rubia, V. Meer
gluony	g	0	1	0	S	1979	kolaborace PLUTO

## The Four Fundamental Forces

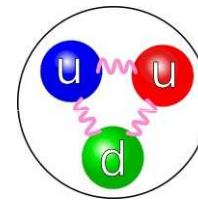


<http://www.fml.gov/>

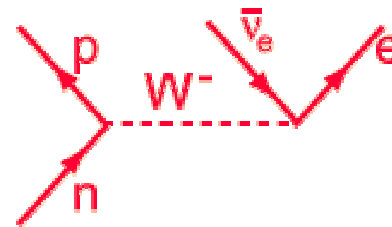


<https://makemphy.wordpress.com/>

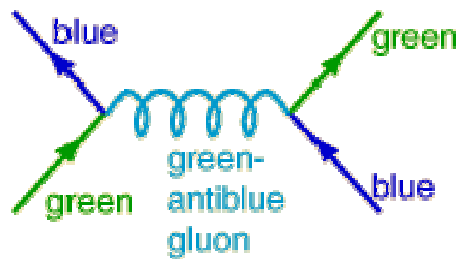
# Základní síly



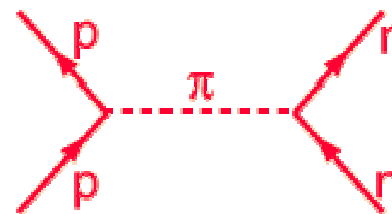
Electromagnetic



Weak

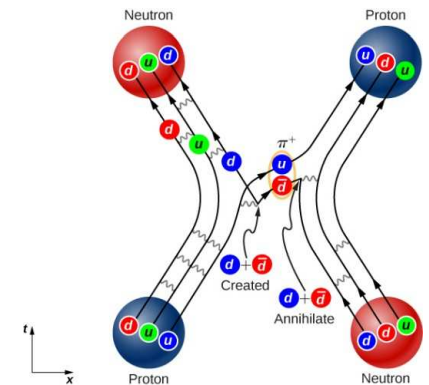
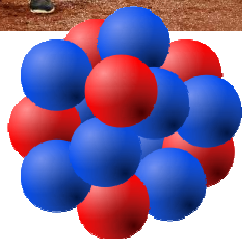


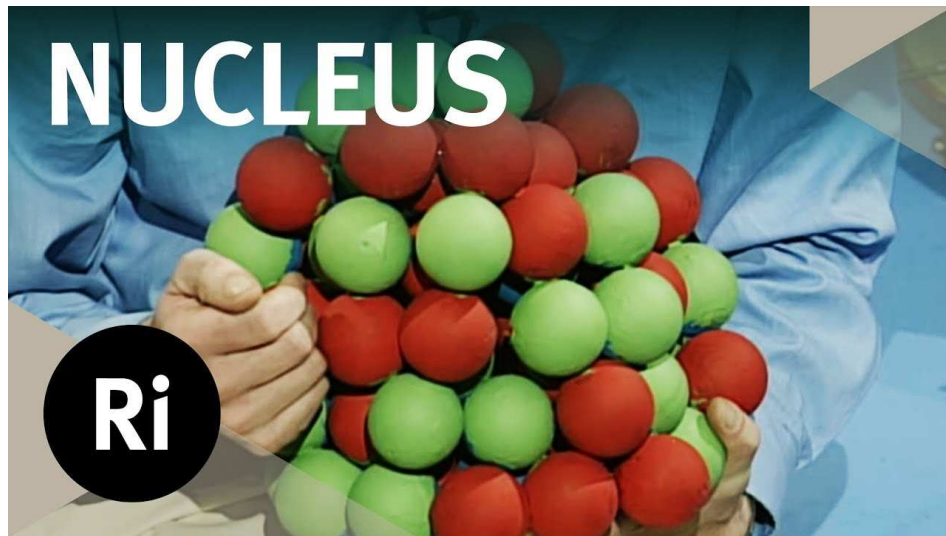
between quarks



between nucleons

Strong Interaction





## Silná j. interakce

- Původní představa silných interakcí v jádře:  
**neustálá výměna virtuálních pionů** (kladný, záporný nebo neutrální) **mezi nukleony**; velmi krátká doba interakce, řádově  $10^{-23}$  s.

- Virtuální piony vznikají výměnou **gluonů mezi kvarky**.
- **Velmi krátký dosah** –  $10^{-15}$  m (**tedy jen v jádře**). Dosah jaderných sil definuje poloměr jádra (proto jsou velká jádra méně stabilní). Poloměr jádra závisí na počtu nukleonů následovně:
  - $r = r_0 A^{1/3}$  ( $r_0 = 1,4 \cdot 10^{-15}$  m)
- **Nábojová nezávislost** – interakce je stejně silná bez ohledu na náboj
- **Nasycenost** – vzhledem ke krátkému dosahu sil interagují jen nejbližší sousedé (viz kapkový model)

# JADERNÁ POTENCIÁLOVÁ JÁMA

- Interakce jádra s dalším nukleonem:
- Pokud je nukleon **daleko od jádra** – nepůsobí žádná síla (nulová potenciální energie)
- Po přiblížení neutronu na  $10^{-15}$  m (do oblasti vlivu jaderných sil) → silná výměnná interakce s některým z nukleonů v jádře →  $n_0$  je vtažen do jádra, stává se jeho součástí a je v něm vázán → přitom se uvolní energie neutronu. Soustava má nyní nižší (zápornou) potenciální energii – neutron se nachází v potenciálové jámě.
- Při přibližování protonu se navíc nejdříve uplatňuje coulombické odpuzování nábojů jádra a  $p+$ . Potenciální energie proto nejprve roste a až po překonání odpudivých sil – potenciálové bariéry – se proton dostává do působnosti silných jaderných sil a je zachycen.

- Pro výšku potenciálové bariéry platí vztah:

$$E_B = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \quad [\text{MeV}, \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}]$$

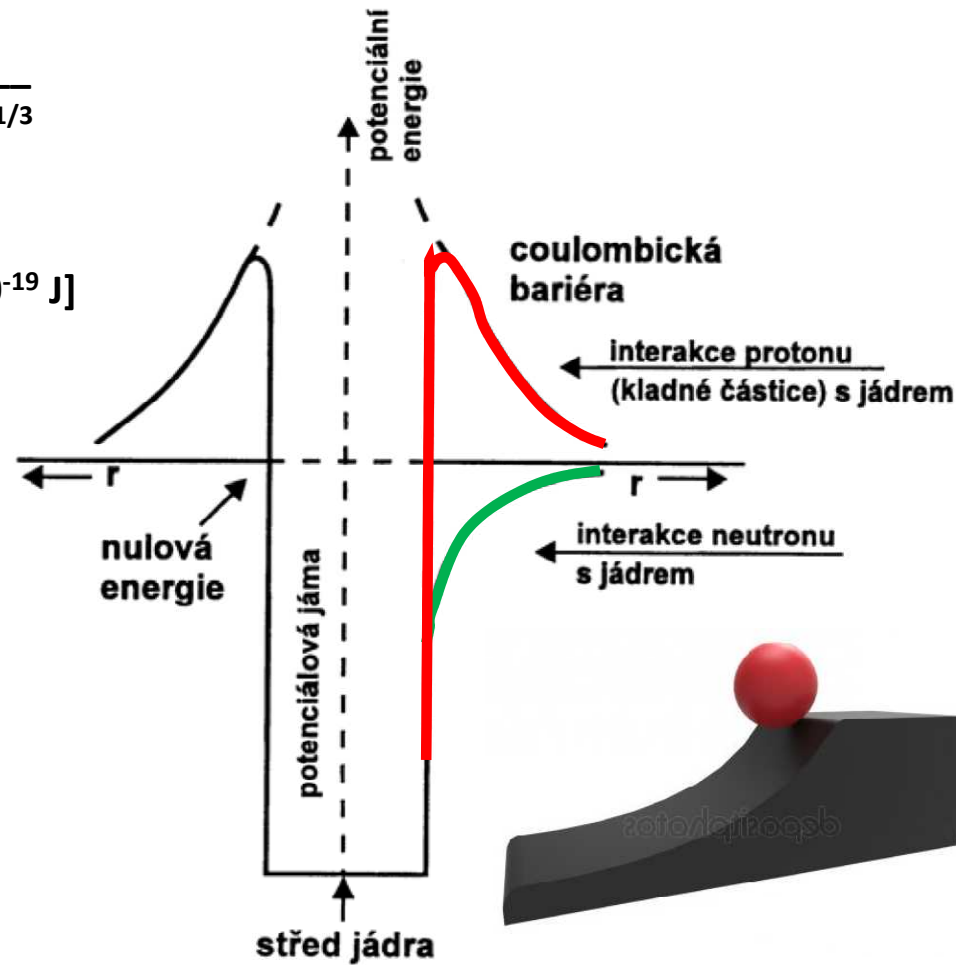
- Kde:  $Z_1$  a  $Z_2$  jsou protonová čísla jádra a kladné částice (zde protonu)

$A_1$  a  $A_2$  jsou nukleonová čísla jádra

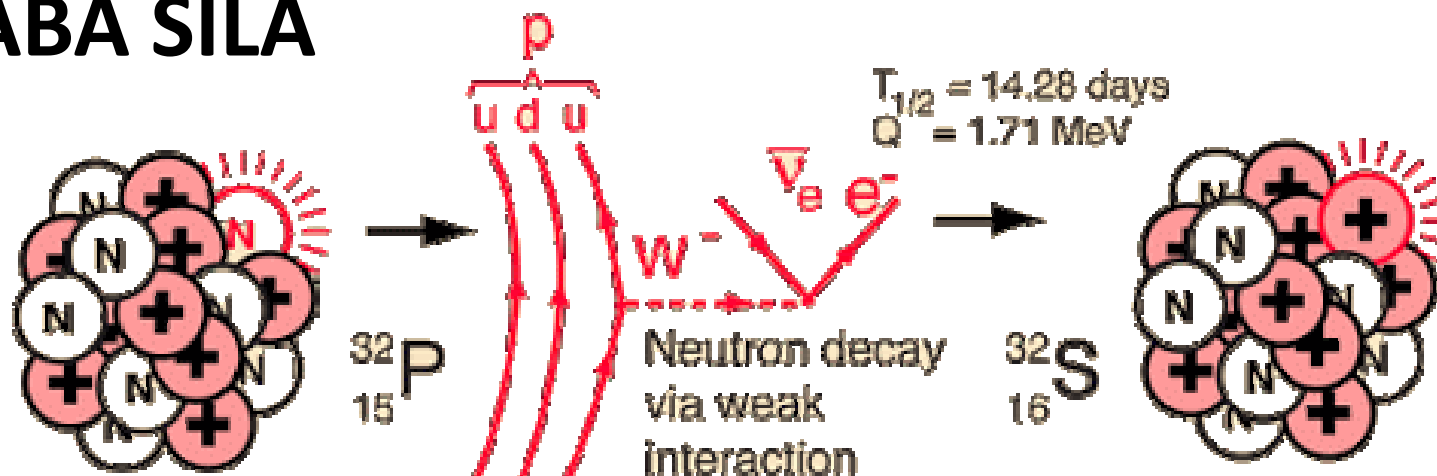
# Průběh interakce mezi jádrem a dalším nukleonem, potenciálová jáma a bariéra

$$E_B = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}$$

[MeV,  
1 eV =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J]



# SLABÁ SÍLA



A neutron in  $^{32}_{15}\text{P}$  decays by  $W^-$  weak interaction.

The weak interaction converts a down quark to an up quark, changing the neutron to a proton.

The decay process moves the phosphorus nucleus up one step in the periodic table to sulfur.

C <sup>6</sup>	N <sup>7</sup>	O <sup>8</sup>	F <sup>9</sup>
Si <sup>14</sup>	P <sup>15</sup> →	S <sup>16</sup>	Cl <sup>17</sup>
Ge <sup>32</sup>	As <sup>33</sup>	Se <sup>34</sup>	Br <sup>35</sup>

- $\beta^+$  rozpad
- Nestabilita volných  $n^0$
- Většina radioaktivity ve štěpném materiálu (jader po štěpení U v reaktorech) → mají nadbytek  $n^0$  →  $\beta^+$  (Černobyl)
- Oscilace neutrin
- Slučování protonů (H) ve slunci → produkce neutrin

- 1) The **W bosons** have a mass of about **100 times that of a proton**, which gives the weak force a **very short range**.  
 ...Creating a **virtual W particle** uses **so much energy** that it can only exist for a **very short time** and it **can't travel far**.
- 2) On the other hand, the **photon** has **zero mass**, which gives you a force with **infinite range**.

## Fundamental Forces

Force	Diagram	Strength	Range (m)	Particle
<i>Strong</i>		1	$10^{-15}$ (diameter of a medium sized nucleus)	gluons, $\pi$ (nucleons)
<i>Electro-magnetic</i>		$\frac{1}{137}$	Infinite	photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>		$10^{-6}$	$10^{-18}$ (0.1% of the diameter of a proton)	Intermediate vector bosons $W^+$ , $W^-$ , $Z_0$ , mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i>		$6 \times 10^{-39}$	Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

Prakticky ale odstínění díky existenci dvou nábojů

The **Larger the Mass of the Gauge Boson, the Shorter the Range of the Force**

# ANTIČÁSTICE



I antičástice patří do běžného světa



# Antičástice

- **Antičástice** jsou rovněž elementární částice, které mají
  - určité fyzikální charakteristiky shodné s příslušnými elementárními částicemi
  - a jiné fyzikální charakteristiky opačného znaménka, resp. směru.
- Antičástice: **mají stejnou** hmotnost, spin, dobu života a velikost elektrického náboje jako částice
- **Liší se** ale **znaménkem** elektrického náboje, leptonového čísla, respektive baryonového čísla, **směrem** vlastního magnetického momentu vzhledem k vlastnímu momentu hybnosti, **popř. jinou vlastností**
- Charakteristickou vlastností antičástic je jejich intenzivní reakce s příslušnou částicí – obě během reakce zanikají a přeměňují se na lehčí částice, případně fotony



# Antičástice

- Pokud jsou všechny fyzikální charakteristiky spadající do druhé z uvedených skupin charakteristik nulové, nelze částici a antičástici odlišit žádnou fyzikální vlastností. Částice je v tomto případě totožná se svou antičásticí, hovoříme též o **skutečně neutrální částici**.
- Stručně se označuje jako **neutrální částice**, v tomto případě je třeba **rozlišovat neutrální částici** a např. elektricky neutrální částici, u které je nulový pouze elektrický náboj.
- Skutečně neutrální částicí je **foton**.
- **Neutron** je pouze elektricky neutrální. Antičástici neutronu **je antineutron** – můžeme ho od neutronu rozlišit např. právě směrem magnetického momentu

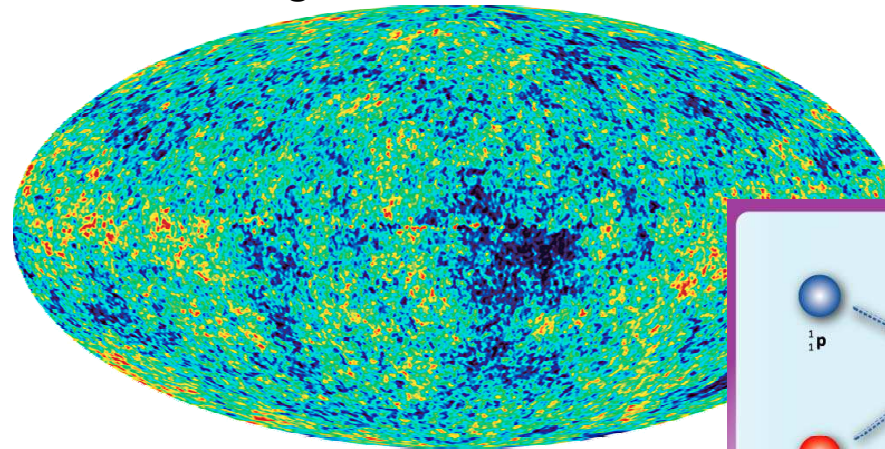
# ANIHILACE

HMOTA + ANTIHMOTA → **anihilace** → přeměna hmoty na fotony a mezony → mezony se rozpadají v konečném důsledku na fotony a neutrina → uvolnění energie:

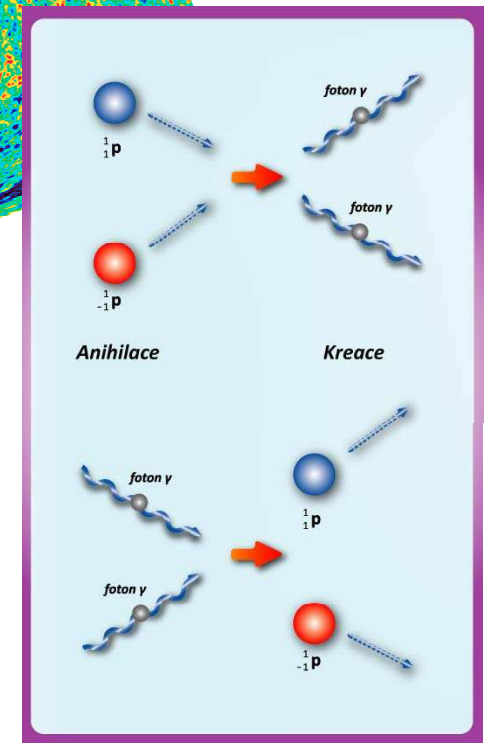
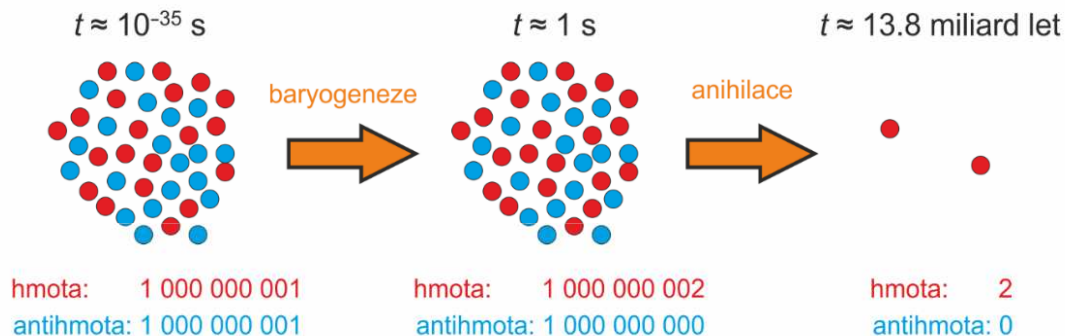
$$E = mc^2$$

přeměna klidové hmotnosti (energie) na energii → **nejkompaktnější zdroj energie**

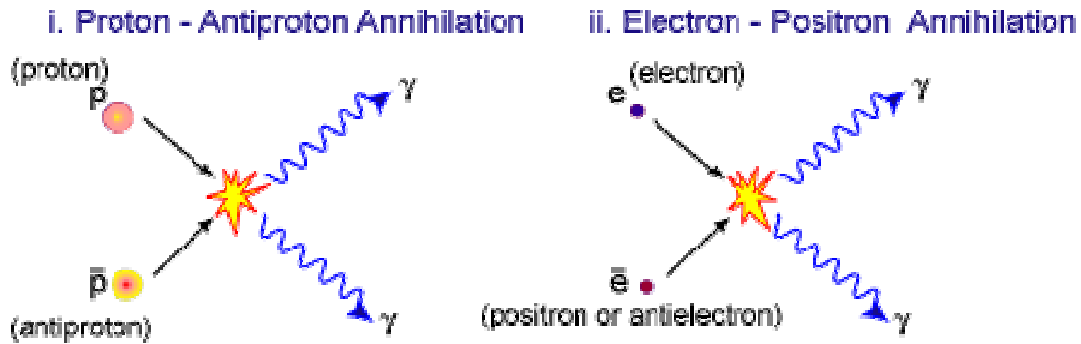
Počátek vesmíru → téměř shodné množství hmoty a antihmoty → obrovská anihilace (vzniká **reliktní záření**) – malý přebytek hmoty zůstává



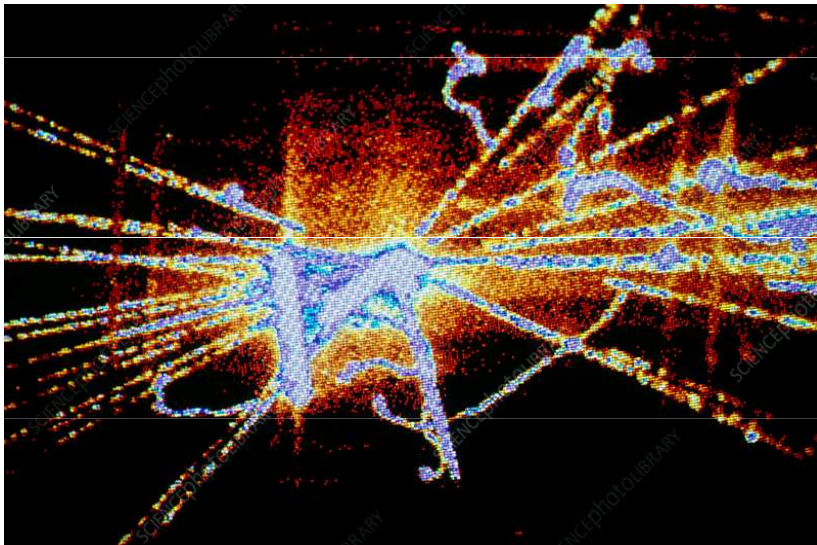
Největší anihilace v našem vesmíru nastala na jeho počátku a jejím pozůstatkem je reliktní záření



# ANIHILACE



In each case the particle and its antiparticle annihilate each other, releasing a pair of high-energy gamma photons



Computer-processed streamer chamber photograph of the tracks of subatomic particles produced in a proton- antiproton collision at a total energy of 900 GeV (CERN). The proton & antiproton have come in from the sides of the picture & annihilated at centre into pure energy; this energy rematerialises in a spray of new particles, mostly pions. Recorded 1985.



(veškerá hmota-klidová energie na kinetickou energii)

- **Anihilace (anti)p a (anti)n<sup>0</sup> → rozpad na mezony**

- mezony → miony + neutrina

- miony → e<sup>-</sup> + neutrina

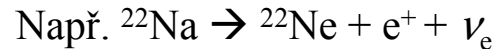
- e<sup>-</sup> reagují s e<sup>+</sup> → fotony γ + neutrina

(ta mají malinkatou hmotnost)

# ZDROJE ANTIHMOTY

## Přírodní zdroje :

- 1) **Rozpad beta plus** – zdroj pozitronů



- 2) **Kosmické záření** – srážka částic (jader) s vysokou energií → zdroj široké palety antičástic – hlavně antiprotony, vznik těžších antijader nepravděpodobný



Existence antihelia by byla důkazem antihvězd

## Umělé zdroje :

- 1) **Urychlovače** – podobně jako u kosmického záření – velmi vysoké energie, produkce v páru, urychlení na rychlosti  $v \approx c$

### Jak antihmotu skladovat?

Uchovávání antičástic pomocí magnetického pole v podobě nabitých částic - plazmy → magnetické prstence, magnetické pasti – dnes až několik měsíců



Část zařízení LEAR pro produkci pomalých antiprotonů (protonový urychlovač v CERNu)



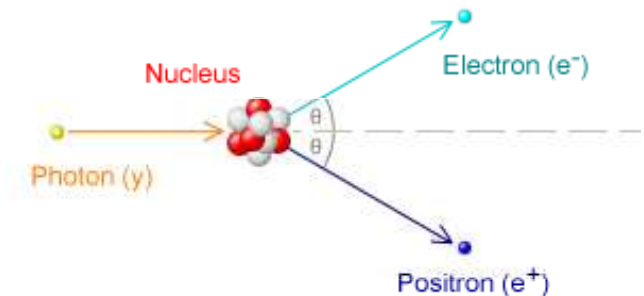
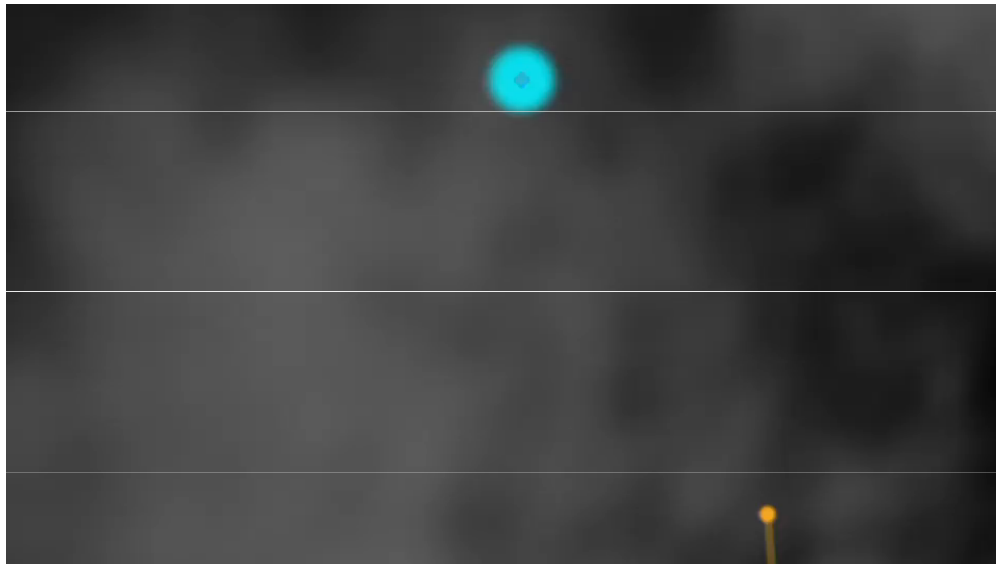
akumulační prstenec ISR v CERNu (Ženeva)

# BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

- **Blesk = přírodní urychlovač** – e- jsou urychleny mezi vysokým napětím v mracích
- **NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope Catches Thunderstorms Hurling Antimatter into Space** (Released on January 10, 2011)

[Článek + různá videa dostupná na:](#)

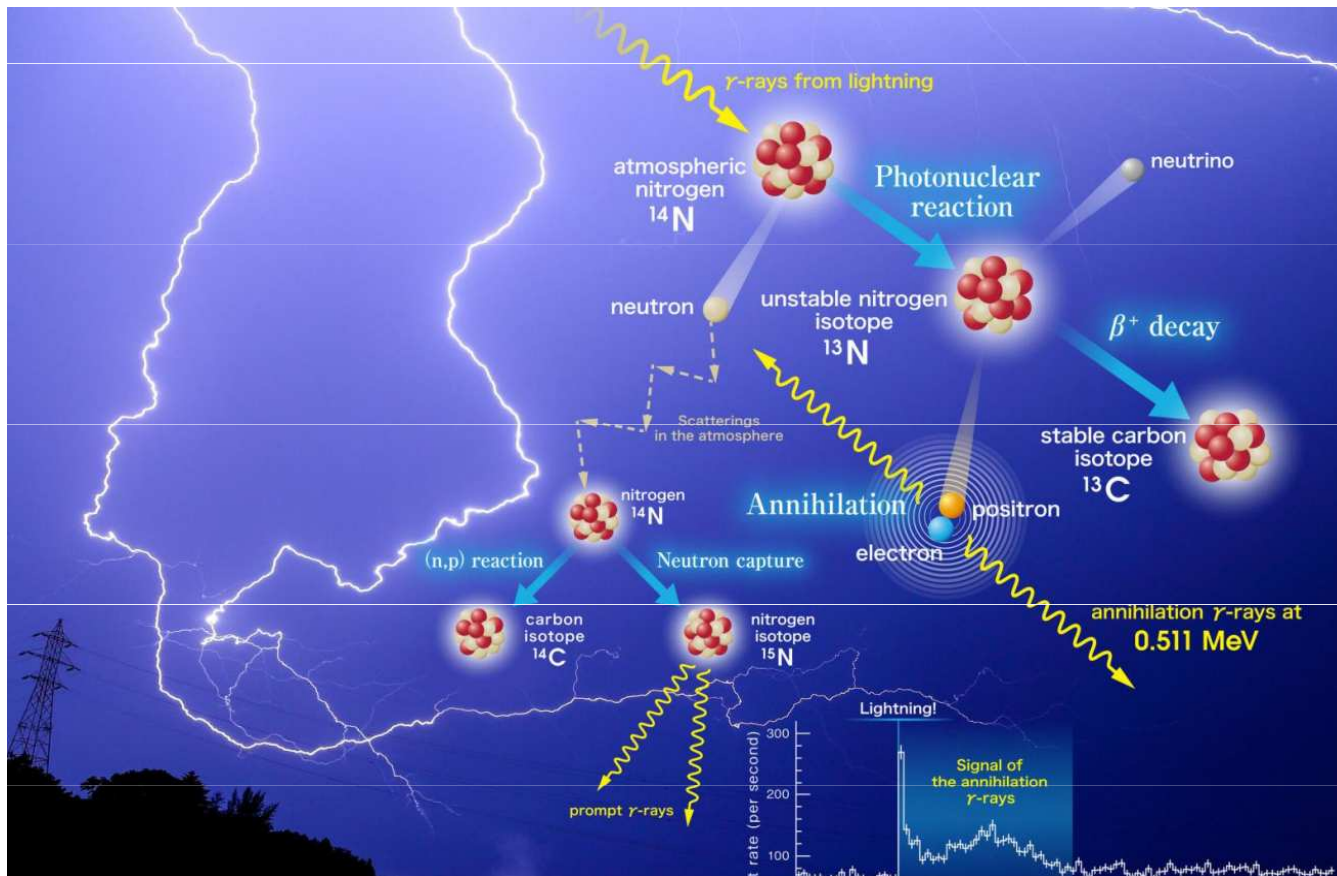
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html)



Scientists using NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope have detected beams of antimatter (positrons) produced above thunderstorms on Earth, a phenomenon never seen before.

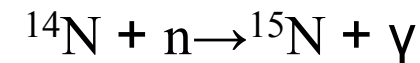
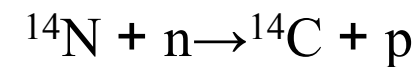
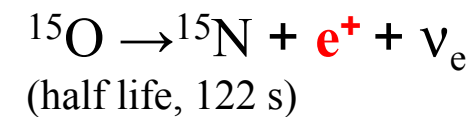
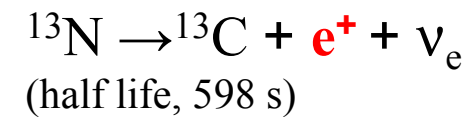
# BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

Teruaki Enoto et al., *Nature*, November 2017 | voL 551 (originální článek: <https://www.nature.com/articles/nature24630.pdf>)

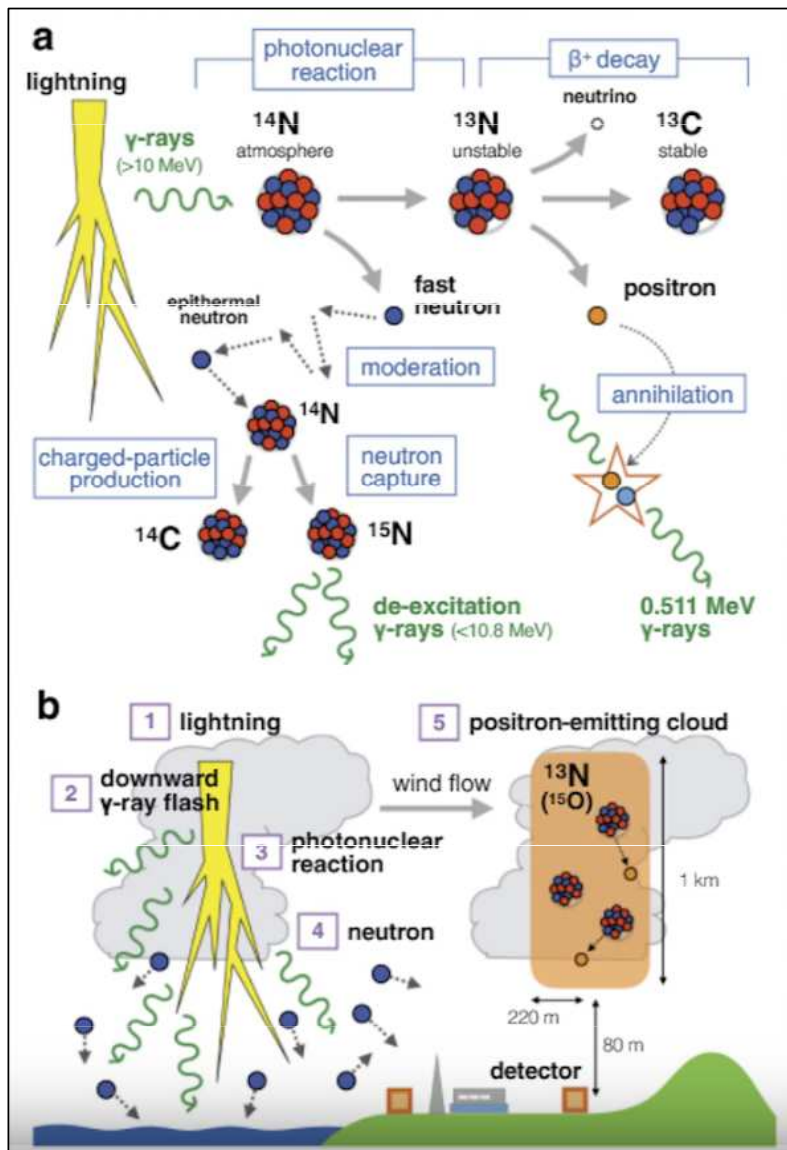


[https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research/research\\_results/2017/171123\\_1.html](https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research/research_results/2017/171123_1.html)

$^{13}\text{N}$  and  $^{15}\text{O}$ , decay gradually into stable  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  nuclei via  $\beta^+$  decays:



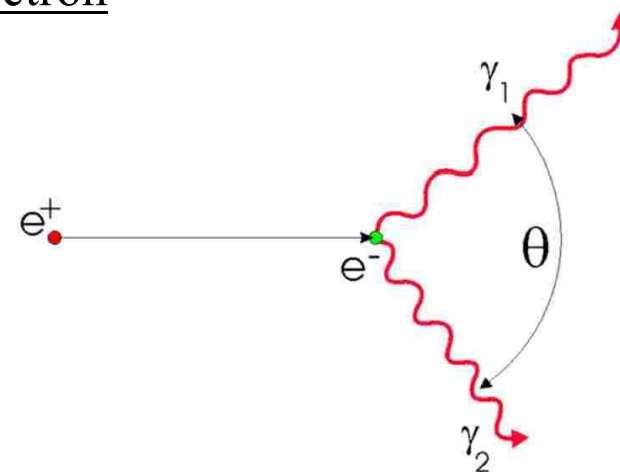
producing quasi-stable  $^{14}\text{C}$  nuclei (with a half life of 5,730 years) without emitting any strong  $\gamma$ -rays



# BLESKY JAKO ZDROJ $e^+$

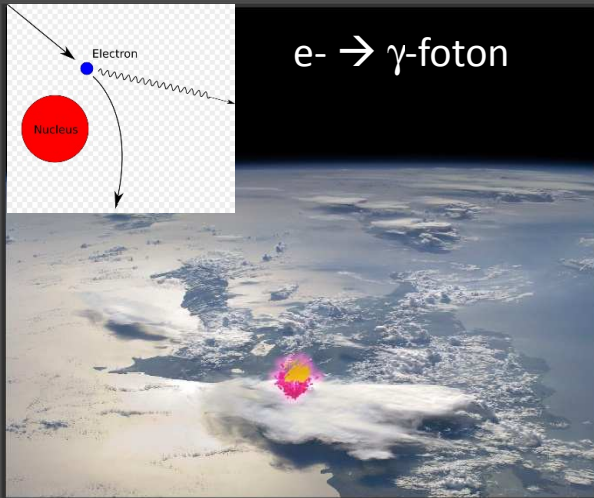
Teruaki Enoto et al., *Nature*, November 2017 | voL 551  
 (originální článek: <https://www.nature.com/articles/nature24630.pdf>)

- region, or ‘cloud’, filled with these isotopes emits positrons for more than 10 min
- A **positron** emitted from  $^{13}\text{N}$  or  $^{15}\text{O}$  travels a few metres in the atmosphere, **annihilates** quickly in meeting an ambient electron
- ...and radiates **two 0.511-MeV photons**, the atmospheric mean free path of which is about 89 m

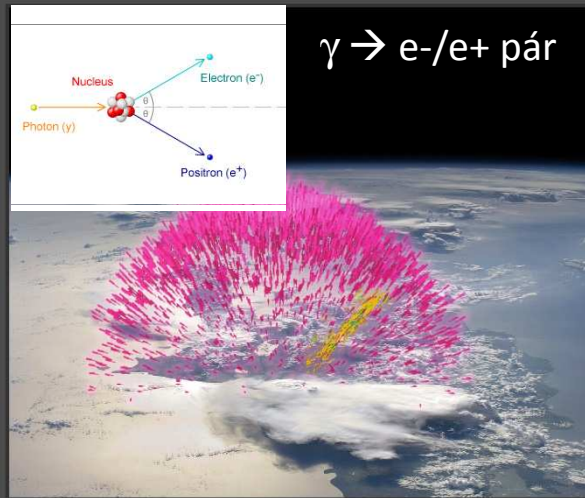




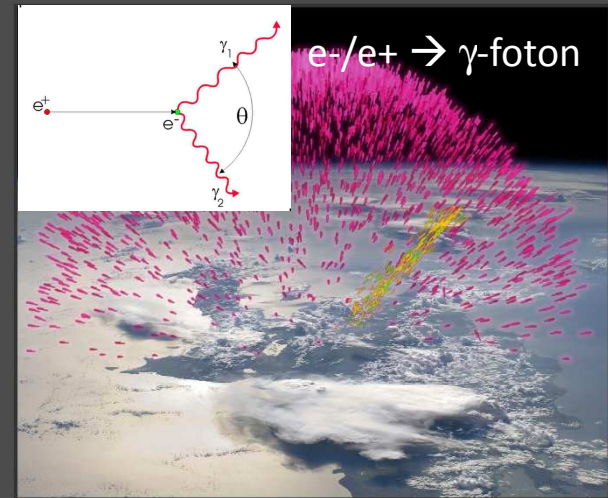
# How thunderstorms launch particle beams into space



$e^- \rightarrow \gamma\text{-foton}$



$\gamma \rightarrow e^-/e^+\text{ pár}$



$e^-/e^+ \rightarrow \gamma\text{-foton}$

1. Electric fields near the top of the storm create an upward-moving avalanche of **electrons**. When their paths are deflected by molecules in the air, these electrons emit **gamma rays**, the highest-energy form of light.

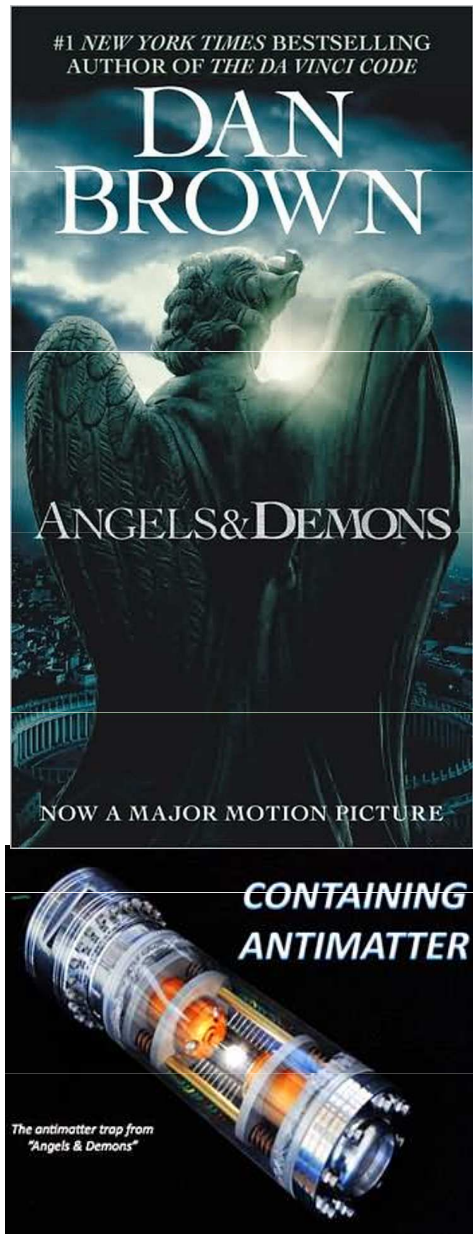
These images are based on a TGF simulation by Joseph Dwyer at the Florida Institute of Technology. This frame tracks the gamma rays and particles from a 0.2-millisecond-old TGF that began at an altitude of 9.3 miles (15 km).

2. When gamma-ray energy collides with electrons, they accelerate to near the speed of light. Some gamma rays pass near the nuclei of atoms. When this happens, the gamma ray transforms into an electron and its antiparticle, a **positron**.

These high-energy electrons and positrons escape into space by spiraling along Earth's magnetic field. In this frame, the TGF is 1.4 milliseconds old.

3. Here the TGF is 1.98 milliseconds old, and its electron/positron beam is reaching altitudes where it may intercept spacecraft, such as NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope.

Fermi's Gamma-ray Burst Monitor detected a signal characteristic of positron annihilation. When a positron collided with an electron on the spacecraft, the two particles transformed into gamma rays.



# Antihmotová bomba

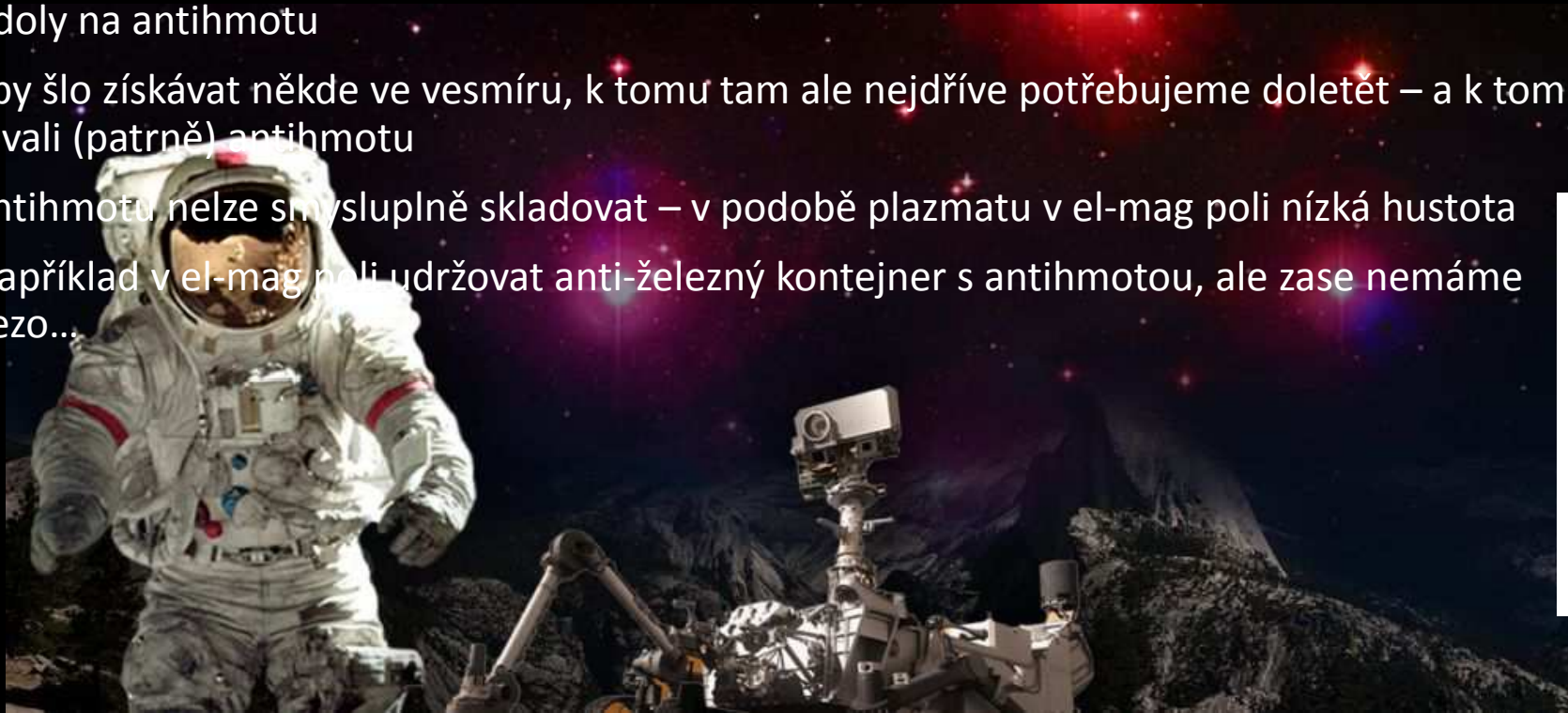
- Primární výhoda antihmotové zbraně → mnohem vyšší účinnost než vodíková (fúzní) bomba (ta úč. pouze asi 7-10%).
- Při chemických reakcích se může z jednoho kilogramu hmoty uvolnit max.  $10^7$  J,
- při štěpných jaderných reakcích maximálně  $8 \times 10^{13}$  J
- a při termonukleární fúzi maximálně  $3 \times 10^{14}$  J
- Naproti tomu při anihilaci dojde k uvolnění veškeré energie z hmoty dle  $E = mc^2$
- – tedy  $9 \times 10^{16}$  J z 1 kg
- Sic je zapotřebí stejné množství antihmoty + hmoty →  $E = 2mc^2$
- ...tzn., pro 1 g antihmoty + 1 g hmoty  
→  $2 * 0.001 \text{ [kg]} * 300\,000\,000^2 \text{ [ms}^{-1}] = 1.8 * 10^{14} \text{ J.}$
- Pokud 1 kt TNT =  $4.184 * 10^{12}$  J, pak 1 g antihmoty + 1g hmoty = 43 kt TNT (ačkoliv ztráty díky produkci neutrin).

# Problémy s antihmotou

Přednáška prof. Vladimír Wagner: Antihmota ve vesmíru, 2016

[https://www.youtube.com/watch?v=oyqus\\_9xPis](https://www.youtube.com/watch?v=oyqus_9xPis)

- Jen malé výtěžky: Za současného stavu > 2 mld let pro výrobu 1 g antihmoty na bombu se stejnou ničivostí jako „typická“ jaderná bomba.
- Ve skutečnosti, kdyby se sebrala veškerá antihmota, která kdy byla v CERNu vyrobena, a nechala by se zanihilovat, získali bychom energii, která by sotva stačila k rozsvícení jediné elektrické žárovky na pár minut.
- Výroba antihmoty extrémně náročná a drahá (63 bilionů ( $10^{12}$ ) USD/gram)
- Nejsou doly na antihmotu
- Možná by šlo získávat někde ve vesmíru, k tomu tam ale nejdříve potřebujeme doletět – a k tomu bychom potřebovali (patrně) antihmotu
- Zatím antihmotu nelze smysluplně skladovat – v podobě plazmatu v el-mag poli nízká hustota
- Šlo by například v el-mag poli udržovat anti-železný kontejner s antihmotou, ale zase nemáme anti-železo...



# Antičástice (předpověděl Paul Dirac, 1928)

K libovolné elementární částici existuje **antičástice**, která je rovněž elementární částicí

**kvarky**

**antikvarky**

**leptony**

**antileptony**

elektron, mion, tauon

pozitron, antimion, antitauon

**hadrony**

**antihadrony**

**baryony**

**mezony**

**antibaryony**

**antimezony**

$qqq$

$q\bar{q}$

$\bar{q}q\bar{q}$

$q\bar{q}$

proton, neutron ...

antiproton, antineutron ...

pí mezony, K mezony ...

pí mezony, K mezony ...

**jádra**

**antijádra**

**atomy**

**antiatomy**

**hmota**

**antihmota**



**hvězdy**

**antihvězdy ???**

**svět**

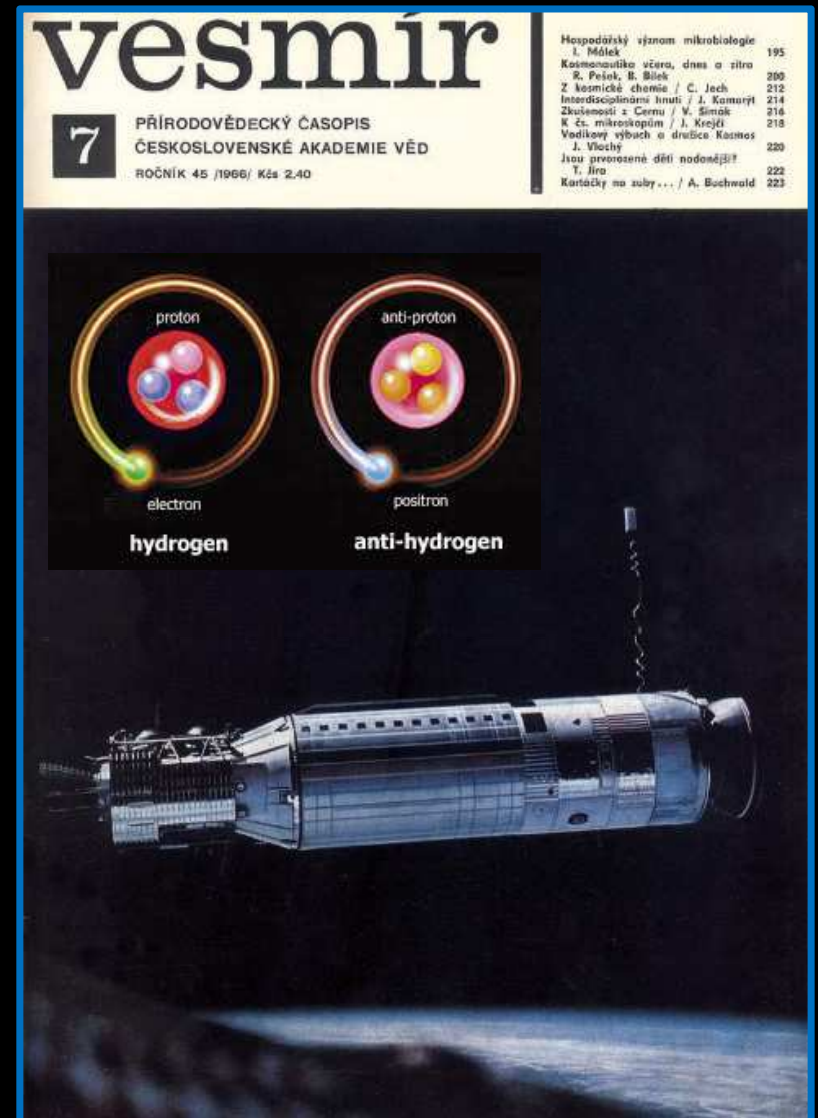
**antisvět ???**

## Antiparticles

Dirac Picture	Feynman Picture
“	“
Antiparticles are the particles that have negative energy.	Antiparticles are the particles with positive energy that move backwards in time.
	

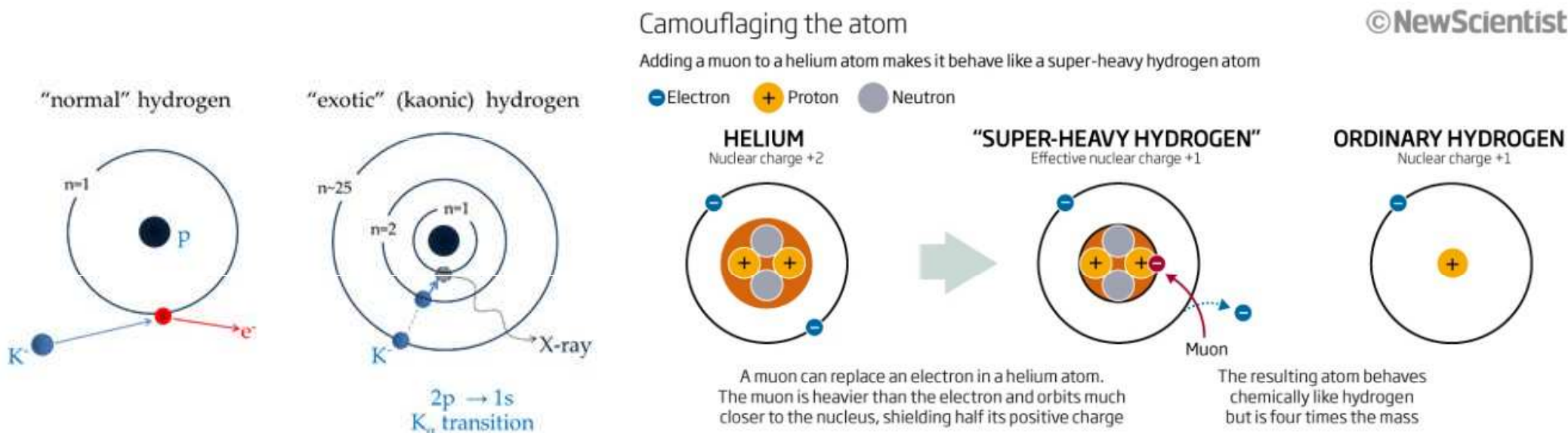
# ANTIATOMY (ANTI-DEUTERON)

- Vznik **anti-deuteronu**. Je to **prvé „anti-jádro“** (tedy jádro atomu antihmoty, složené z **více elementárních částic**, i když zatím jen ze dvou), jehož existence byla fyzikálně prokázána.
- Je složeno z **antiprotonu** a **antineutronu** a představuje **anti-jádro těžkého vodíku**, tedy **anti-deuteria**.
- Tento objev je přímým důkazem možnosti existence antihmoty (z níž jsme dosud znali jen elementární částice) s obdobnými jadernými vaznými silami jako v normálních atomových jádrech.
- Pojem antihmoty složené ze záporně nabitých jader, kolem nichž obíhají kladně nabité pozitrony, se tak dostává z oblasti spekulativní do oblasti reálných fyzikálních výzkumů.
- M. Černocho (Vesmír, 45, 222, 1966/7)

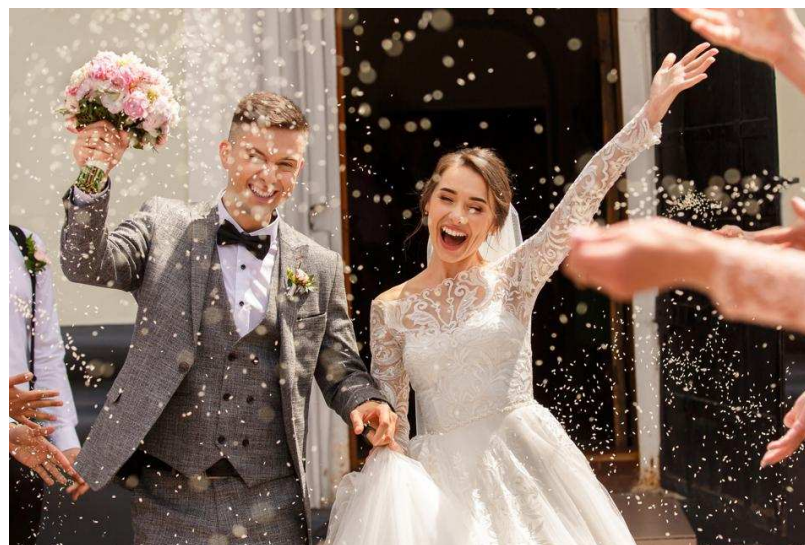
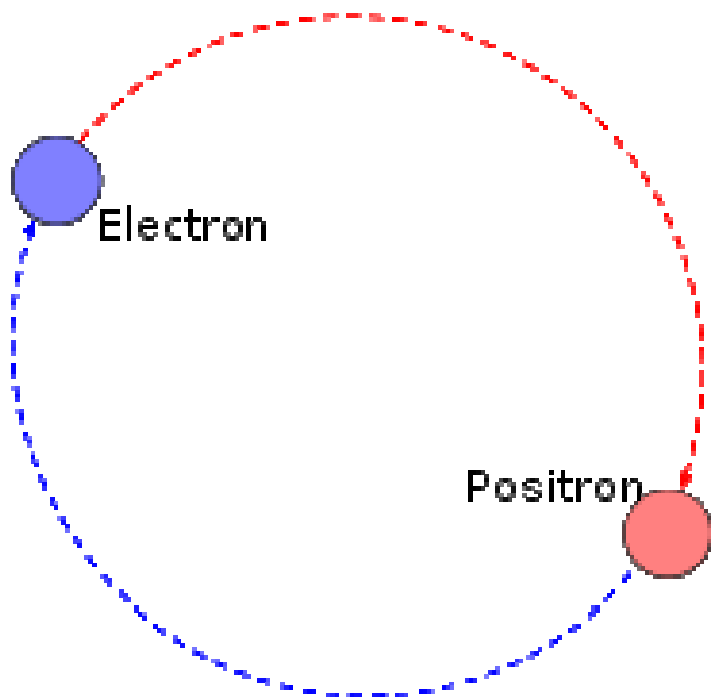


# EXOTICKÉ ATOMY a ANTIATOMY

- Některé nestálé částice mohou v atomech nahrazovat elektrony respektive nukleony
- Náhrada  $e^-$  → např. **záporným mionem** nebo **záporným mezonem K** nebo **antiprotonem**
- Náhrada  $n^0$  → např. **hyperonem  $\Lambda$**
- Takovéto atomy se nazývají jako „**EXOTICKÉ ATOMY**“ a vznikají při průchodu nestálých částic hmotou. Exotické atomy jsou však vzhledem ke krátké životnosti částic nestálé



# Koexistence hmoty a antihmoty - Positronium (Ps):



Positronium (Ps): Hmota a antihmota může tvořit i **metastabilní** útvar

# PARTICLE „ZOO“ – STANDARDNÍ MODEL



TO MUCH TO BE

FUNDAMENTAL

PARTICLES ??



# Standardního model elementárních částic

- Objev poslední částice standardního modelu – **Higgsovy částice** – byl ohlášen dne 4. července 2012, takže jsou všechny částice standardního modelu známy.
- **Ze dvou důvodů ale nejde o finální řešení.**
- Prvním důvodem je, že standardní model neobsahuje gravitační interakci, která je popsána obecnou relativitou, zatímco ostatní interakce popisuje kvantová teorie za pomoci polních částic.
- Druhým důvodem je, že standardní model je založen na větším množství základních konstant. Ideální model by měl obsahovat jedinou konstantu, ze které by vyplynuly veškeré hmotnosti, náboje a další vlastnosti všech elementárních částic. K takovému ideálu ale ještě lidstvo čeká daleká cesta. Přesto je standardní model nejúspěšnějším modelem elementárních částic a interakcí a veškeré experimenty prováděné na největších urychlovačích světa jsou s tímto modelem v souladu.

**Standardní model** je až překvapivě úspěšný při popisu jevů mikrosvěta. Je ovšem **zjevně neúplný** a jistě nepředstavuje konečnou úroveň struktury mikrosvěta a jeho zákonů neboť

- + obsahuje cca **25 volných parametrů** (hmotnosti, náboje a několik dalších)
- + **nesjednocuje** všechny tři síly a
- + **nezahrnuje** gravitaci.

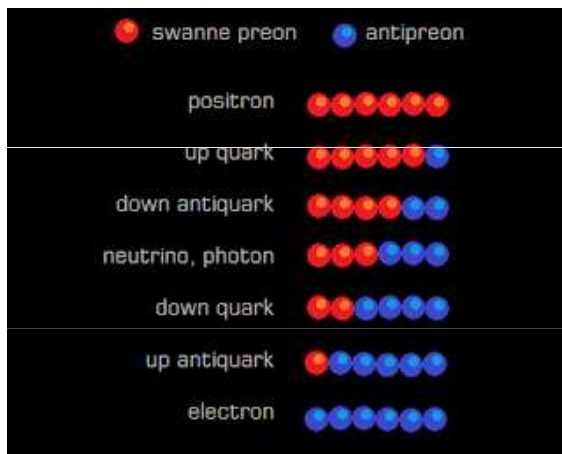
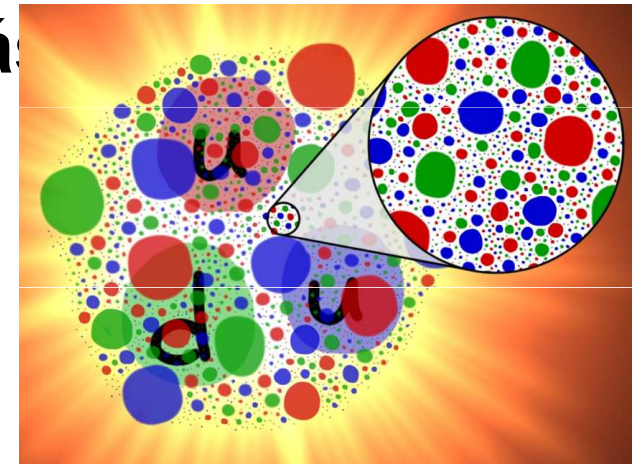
**Je to vada?  
Je naděje je  
z něčeho spočítst?**

## Otevřené problémy:

- proč jsou právě 3 generace
- otázky kolem hmotností neutrin
- proč není ve vesmíru stejně hmoty jako antihmoty
- temná hmota a energie ve vesmíru - až 95% hmoty a energie ve vesmíru je „něco jiného“
- .....

# KVARKY A LEPTONY – Fundamentální částice

- **Kvarky a leptony** se jeví jako **bodové** částice až na měřítko  $10^{-18}$  m.
- Přesto mohou mít kvarky a leptony společnou vnitřní strukturu – **Proč je například velikost elektrického náboje shodná mezi  $p^+$  (složeným z kvarků) a  $e^-$  (leptonem)?**
- hypoteticky se mohou skládat z **preonů** jak předpověděli Jogesh Pati a Abdus Salam (1974).
- Experimentálně však vnitřní struktura leptonů a kvarků dosud objevena nebyla (první náznaky možná ve Fermilabu, 1994).



$aaaaaa = +1e = \text{positron}$   
 $aaaaab = +2e/3 = \text{up quark}$   
 $aaaabb = +e/3 = \text{down antiquark}$   
 $aaabbb = 0e = \text{neutrino and neutral boson}$   
 $aabbbb = -e/3 = \text{down quark}$   
 $abbbbb = -2e/3 = \text{up antiquark}$   
 $bbbbbb = -1e = \text{electron}$

**The Singular Primordial Preon Theory** is the first to propose that everything in the universe, may it be water, humans, nebulae, dinosaurs, light, perhaps even dark matter, is composed of a single preon and of its antipreon.