

Radiační biofyzika

Přednáška 4 2022

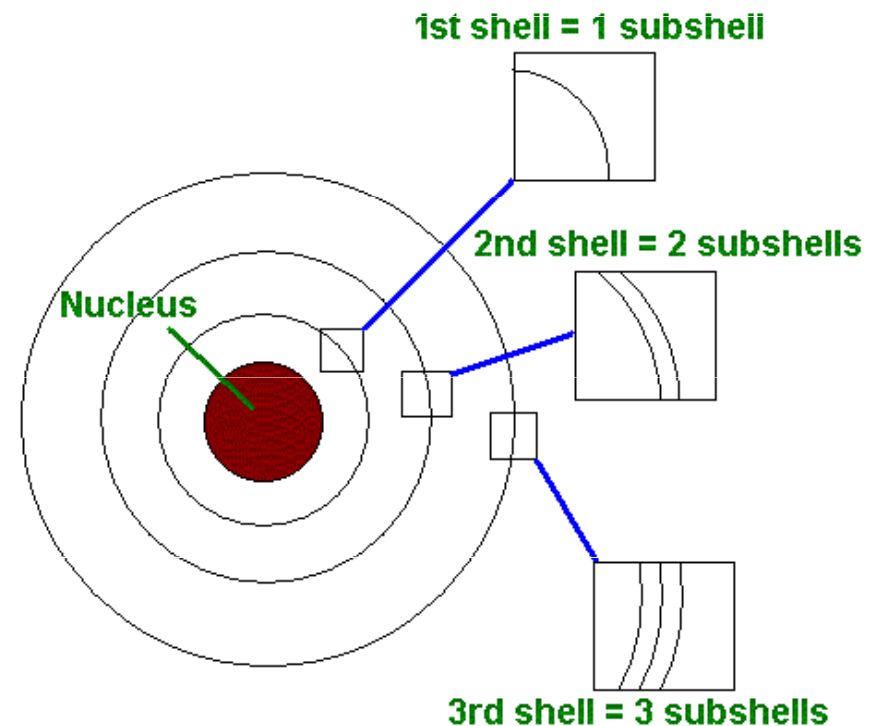
Částice & atomová jádra

Martin Falk



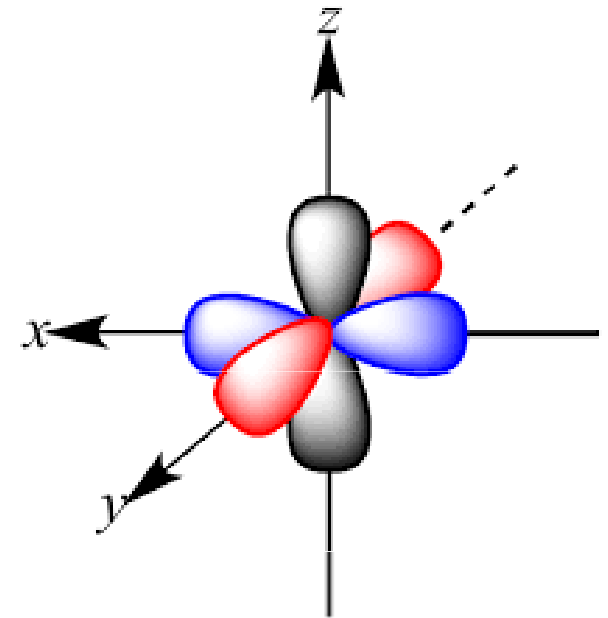
Kvantově mechanický model atomu

- Bohrov model atomu byl použitelný jen na atom vodíku, nevysvětloval existenci energetických podslupek ve spektrech
- spektra složitějších atomů jsou jím nevysvětlitelná →
- vznik kvantového modelu atomu
- stav částice není popsán její polohou a hybností, ale vlnovou funkcí, která udává stav částice v jakémkoli čase



Kvantově mechanický model atomu

- vznikl na základě Lui de Broglieho (francouzský fyzik) teorie částicových vln
- ... a následné práce Ervina Schrodingera (Rakušan), v níž představil **tzv. Schrodingerovu rovnici**,
- ... podle které elektron (stejně jako všechny ostatní částice) **není popisován jako hmotný bod ale jako vlnová funkce definující pravděpodobnost výskytu elektronu v různých místech prostoru.**
- Oproti energetickým drahám definovali také **tzv. orbitaly** neboli místa s největší pravděpodobností výskytu elektronu



Schrodingerova rovnice

- Vlnová funkce Ψ : určuje pravděpodobnost výskytu elektronu v atomovém obalu => vymezuje existenční oblast elektronu v atomu.
- Tato oblast nejpravděpodobnějšího výskytu se nazývá **atomový orbital (AO)**.
- Vlnová funkce každého AO je funkcí 3 prostorových souřadnic. Počátek systému souřadnic je vždy umístěn do jádra.

The Equations That Changed The World - 06

Schrödinger Equation

Fundamental Equation of Quantum Mechanics



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

Diagram explaining the components of the Schrödinger Equation:

- i : Square root of minus one
- \hbar : Planck's constant
- $\frac{\partial}{\partial t}$: rate of change, With respect to time
- ψ : Quantum Wave Function
- \hat{H} : Hamiltonian operator

Schrödinger Equation is a partial differential equation that describes how the Quantum state of a Quantum system changes with time. The **Austrian Physicist Erwin Schrödinger** formulated it in **1925** & published in **1926**.

Různé přístupy k témuž...

- **Erwin Schrödinger** – vlnová kvantová mechanika
- **Werner Heisenberg** – maticová kvantová mechanika
- Vše vycházelo (u obou teorií), avšak otázka, která hypotéza je tedy správně, která je lepší?



Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (12. srpna 1887 Vídeň – 4. ledna 1961 Vídeň)



WERNER HEISENBERG (1901-1976) German theoretical physicist



Paul Adrien Maurice Dirac

- 1928 – dokázal, že Schrödingerova i Heisenbergova teorie jsou zcela správné
- Řešení rozporu spočívá v samotném faktu měření: Měření polohy a následně rychlosti elektronu není totéž, jako měření rychlosti a poté polohy. Prvním měřením je totiž elektron ovlivněn
- $VX \neq XV$; v mikrosvětě tedy neplatí $3*5 = 5*3$
- Toto je základní **DOGMA MIKROSVĚTA** ($AB \neq BA$).
- Lze z něj odvodit všechny ostatní podivnosti zmíněné dříve, např. že jednou se objekty chovají jako částice, jindy jako vlny někdy diskrétní

Shrnutí

Schrödingerova rovnice (n, l, m) + spin (s)

Kvantové číslo	Symbol	Hodnoty	Vyjadřuje
<small>Principal q.n.</small> Hlavní	n	1, 2, 3, ..., 7	Velikost orbitalu
<small>Azimuthal, orbital q.n.</small> Vedlejší	l	<i>s p d f g h</i> 0, 1, 2, ..., n-1	Prostorový tvar orbitalu
<small>Magnetic q.n.</small> Magnetické	m	-1, ..., 0, ..., +1	Orientaci orbitalu v prostoru
<small>Quantum spin</small> Spinové	s	$+1/2, -1/2$	Chování elektronu v orbitalu

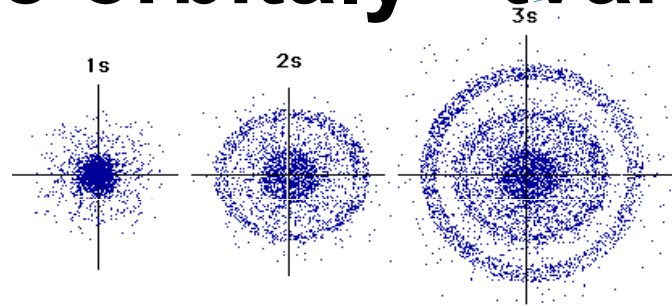
slupky

podslupky

Každému hlavnímu kvantovému **číslu** n odpovídá $2n^2$ různých stavů, ve kterých se elektrony mohou nacházet

Atomové orbitály - tvar

Orbitály s:



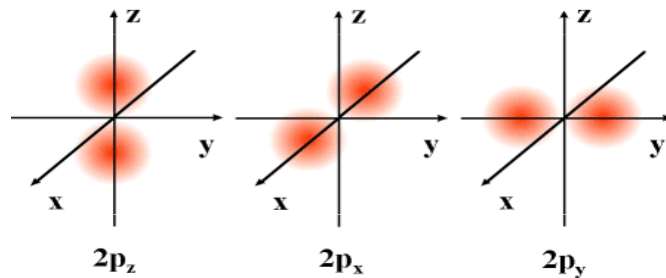
Pro $n = 1$

$\rightarrow l = 0, \dots, n-1$ (zde tedy pouze 0)

$\rightarrow m = l-1, \dots, 0, \dots, l+1$ (zde tedy pouze jedno magnetické číslo 0)

Pro $n = 2$, orbitály s, p; $n = 3$, orbitály s, p, d

Orbitály p:

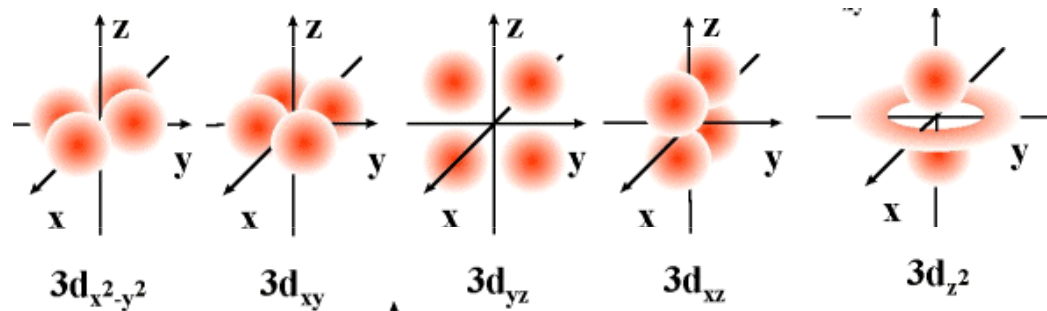


$n = 2$

$\rightarrow l = 0, \dots, n-1 \rightarrow 0, 1$

$\rightarrow m$ pro $p = -1, 0, +1$ (zde tedy 3 magnetická čísla \rightarrow x-y, x,z, y,z prostorové orientace orbitalů)

Orbitály d:



Od d jsou tvary orbitalů složité a jejich přesný tvar závisí na kombinaci všech kvantových čísel

Atomové orbitaly

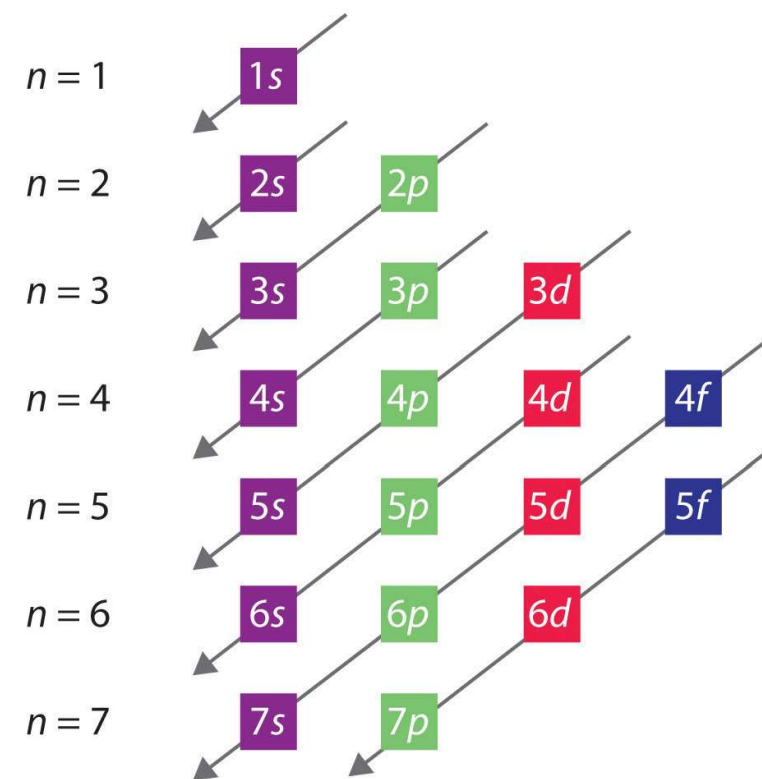
- obsazování - příklad

Kvantová čísla			Symbol AO	Obsazení e-	Symbol zaplněných AO	Vrstva
n	l	m _l				
1	0	0	1s	2	1s ²	K
2	0	0	2s	2	2s ²	
2	1	-1	2p	6	2p ⁶	L
2	1	0				
2	1	1				
3	0	0	3s	2	3s ²	M
3	1	-1	3p	6	3p ⁶	
3	1	0	3p			
3	1	1	3p			
3	2	-2	3d	10	3d ¹⁰	
3	2	-1	3d			
3	2	0	3d			
3	2	1	3d			
3	2	2	3d			
...						



Princip minima energie dané elektronové konfigurace

• $1s$ $2s$ $2p$ $3s$ $3p$ $4s$ $3d$ $4p$ $5s$ $4d$ $5p$ $6s$ $4f$ $5d$ $6p$ $7s$ $5f$ $6d$ $7p$...



Princip minima energie lze formulovat takto:

DŘÍVE SE ZAPLŇUJÍ ORBITALY S NIŽŠÍ ENERGIÍ, NEŽ ORBITALY S VYŠŠÍ ENERGIÍ. ENERGIE ORBITALU SE PŘITOM ZVYŠUJE S ROSTOUCÍM HLAVNÍM KVANTOVÝM ČÍSLEM n A VEDLEJŠÍM KVANTOVÝM ČÍSLEM l . JE-LI SOUČET $n+l$ STEJNÝ PRO DVA RŮZNÉ ORBITALY, ZAPLNÍ SE DŘÍVE ORBITAL S MENŠÍM HLAVNÍM KVANTOVÝM ČÍSLEM n .

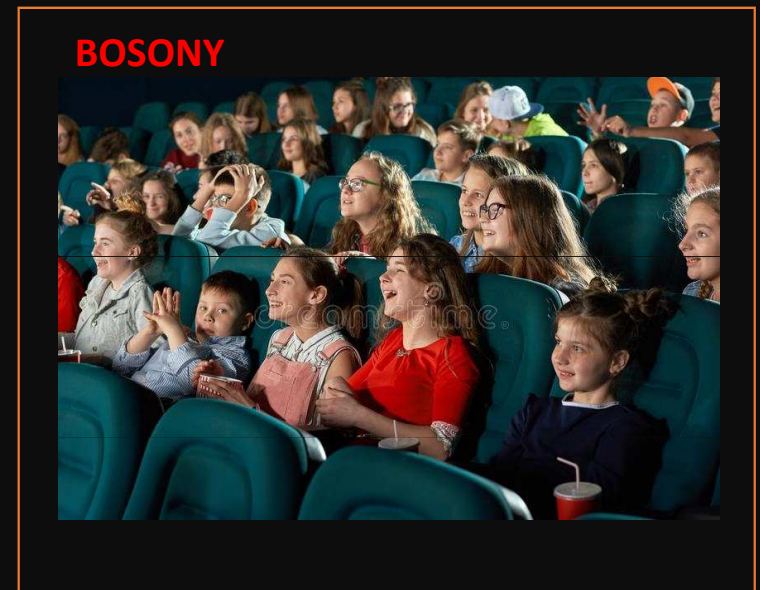
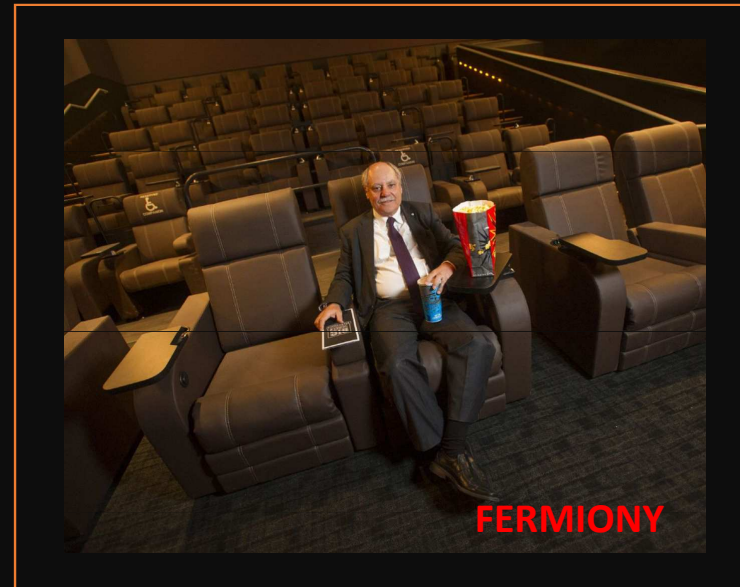
Princip nerozlišitelnosti částic a Pauliho (vylučovací) princip

- Částice téhož druhu jsou nerozlišitelné.
- V daném systému nemohou existovat současně dvě částice v témže kvantovém stavu, tj. se stejnými hodnotami všech kvantových čísel

V závislosti na platnosti (resp. neplatnosti) Pauliho principu rozdělujeme částice na dva druhy:

1. fermiony - částice hmoty (elektron, proton, neutron, ...).
Poločíselný spin, platí pro ně Pauliho vylučovací princip

2. bosony - částice silových interakcí (foton, mezon, ...)
zprostředkující silové interakce mezi částicemi látky; celočíselný spin, neplatí pro ně Pauliho vylučovací

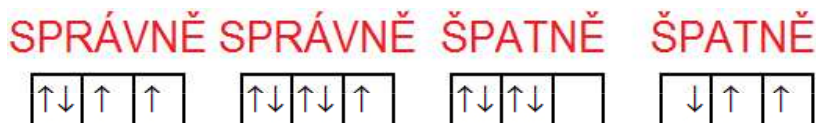
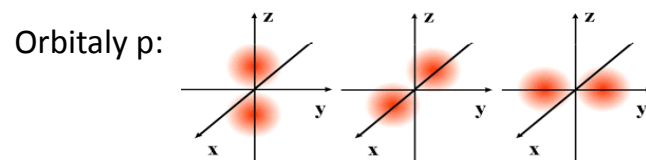
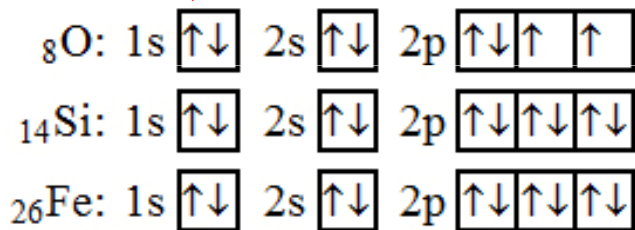
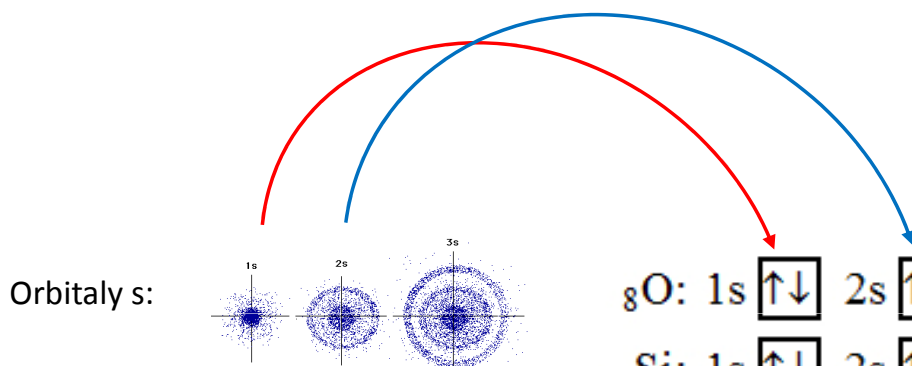


Hundovo pravidlo zaplňování orbitalů

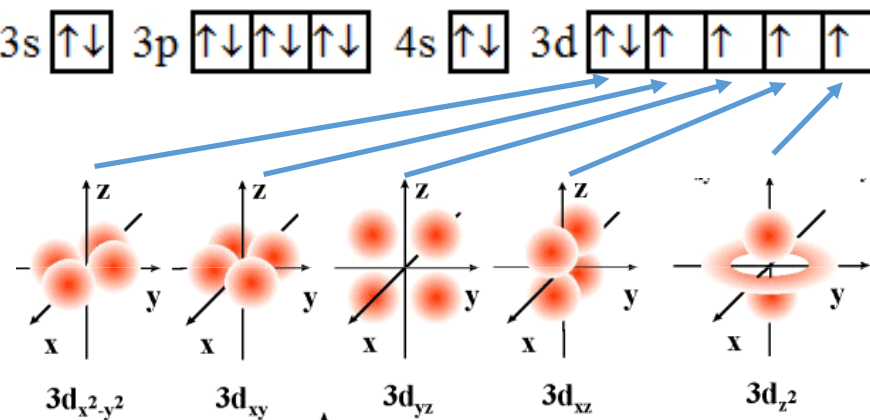
Friedrich Hermann Hund (1896 - 1997), německý fyzik

V degenerovaných orbitalech vznikají elektronové páry až poté, co byl zaplněn každý orbital jedním elektronem. Všechny nespárované elektrony přitom mají stejný spin. V takovém případě má systém nejnižší energii, a proto je nejstabilnější.

Degenerované orbitály jsou orbitály se stejným n a l a liší se pouze m



Orbitály d:

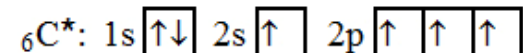
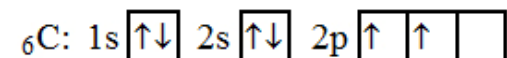


MODERN QUANTUM NUMBERS NOTATION

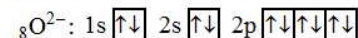
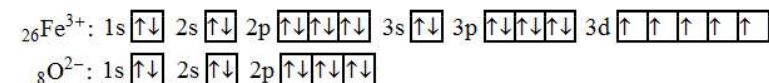
principal quantum number	period notation	orbital quantum number	orbital notation	magnetic quantum number	spin	maximal number of electrons in	
						shell	period
n	symbol	$l = 0 \dots n-1$	symbol	m_l	m_s	shell	period
1	K	0	1s	0	+, -	2	2
2	L	0	2s	0	+, -	2	8
		1	2p	-1,0,+1	+, -	6	
3	M	0	3s	0	+, -	2	18
		1	3p	-1,0,+1	+, -	6	
		2	3d	-2,-1,0,+1,+2,	+, -	10	
4	N	0	4s	0	+, -	2	32
		1	4p	-1,0,+1	+, -	6	
		2	4d	-2,-1,0,+1,+2,	+, -	10	
		3	4f	-3,-2,-1,0,+1,+2,+3	+, -	14	
5	O	0	5s	0	+, -	2	50
		1	5p	-1,0,+1	+, -	6	
		2	5d	-2,-1,0,+1,+2,	+, -	10	
		3	5f	-3,-2,-1,0,+1,+2,+3	+, -	14	
		4	5g	-4,-3,-2,-1,0,+1,+2,+3+4	+, -	18	

© Aco Z. Muradjan

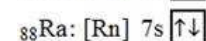
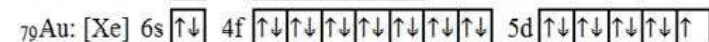
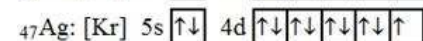
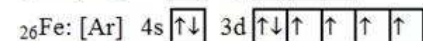
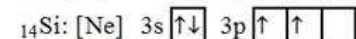
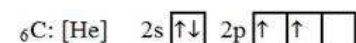
Excitované stavy



Kationty a anionty



Zkrácený zápis s využitím konfigurací inertních plynů



Důsledky Pauliho principu

- → může existovat **jen určitý počet druhů atomů** s přesným rozložením elektronů ve svých obalech.
- → **Vysvětluje zákonitosti periodické soustavy prvků** a tím i celého bohatství chemických sloučenin i biologických systémů.
- → jeho platnost **umožňuje existenci celého našeho světa** (např. **fotony**, pro které Pauliho princip neplatí, mohou být všechny v témže kvantovém stavu, s touž energií a frekvencí, vytvářet elektromagnetickou vlnu, ale nelze z nich budovat žádné struktury).



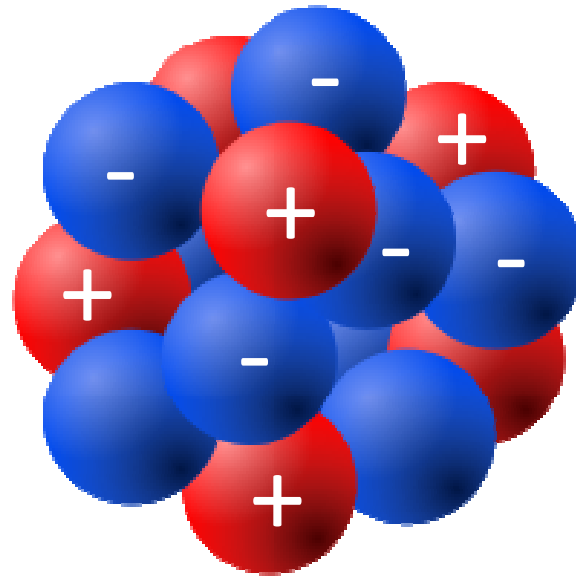
Rutherford – stále nám něco v modelu atomu chybí!

Uvědomoval si problémy se stávajícím modelem atomu složeného pouze z p^+ a e^-

Neseděla hmota atomů a zároveň elektroneutrální charakter atomu

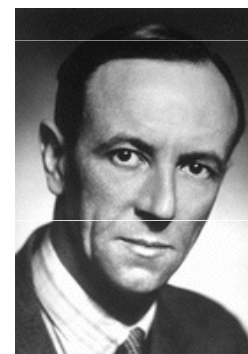
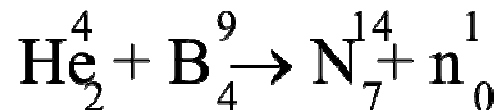
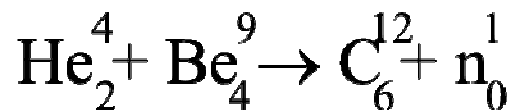
Předpokládalo se, že p^+ jsou v jádře stíněny e^- , ty by ale musely být extrémně vysoce energetické, což nesouhlasilo s pozorováními

Rutherford proto teoreticky předpověděl neutron, aby byly atomy stabilní



Objev neutronu

- 1932 **James Chadwick** (1935 Nobelova cena za fyziku) – pracoval s Rutherfordem, objev neutronu
- Později vyšlo najevo, že němečtí vědci objevili neutron ve stejnou dobu. Ale objevitel **Hans Falkenhagen** se obával zveřejnění svých výzkumů.
- Když se Chadwick dozvěděl o Falkenhagenovu objevu, nabídl mu, že se o Nobelovu cenu podělí. Falkenhagen ale skromně odmítl.

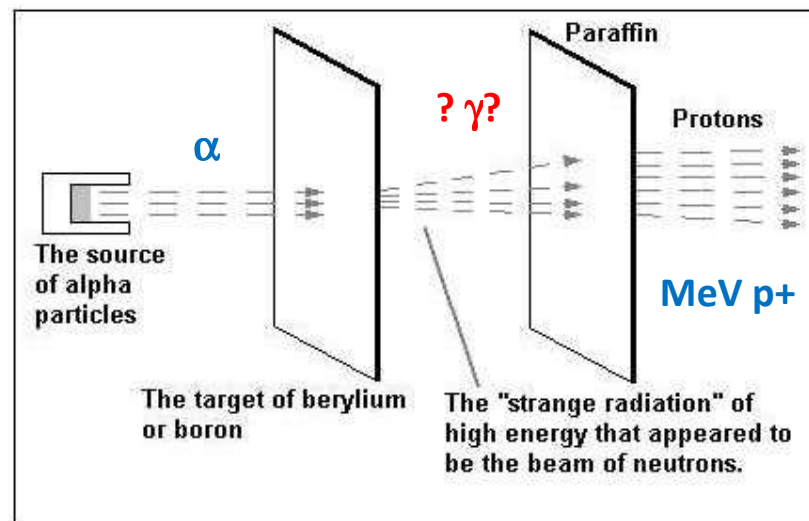
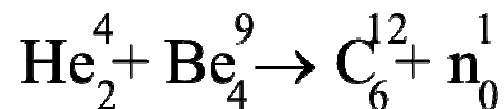
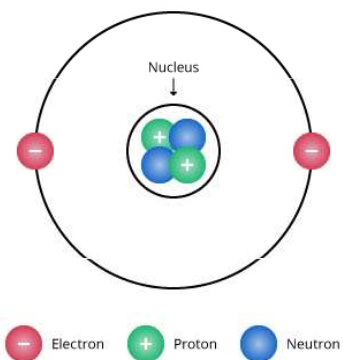


James Chadwick



Hans Falkenhagen

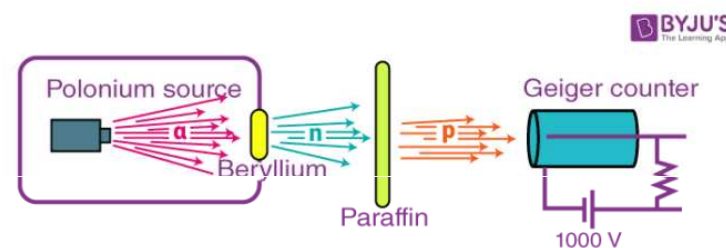
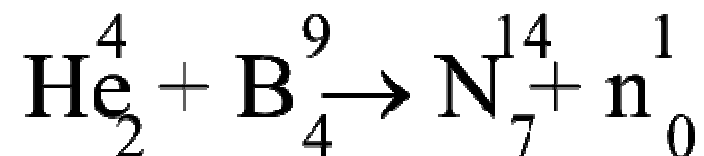
13.05.1895 – 26.06.1971



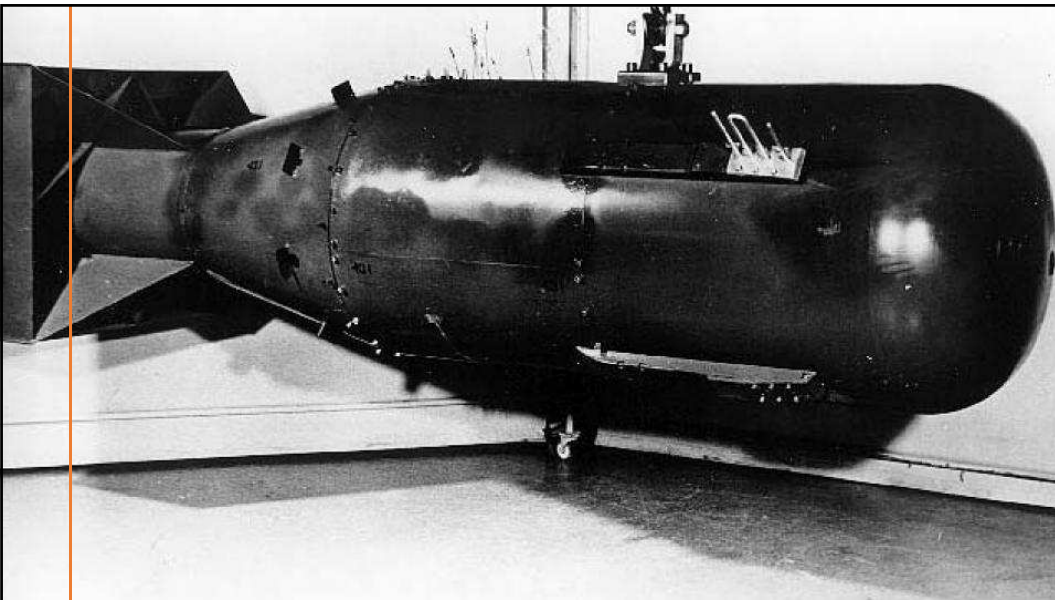
Objev neutronu

- V roce 1930 bombardovali **Walter Bothe** a **H. Becker** beryllium ${}^9_4\text{Be}$ částicemi $\alpha \rightarrow$ pozorovali emisi energetického záření (tzv. beryliové záření), které bylo vysoce pronikavé, přímo neionizovalo a nezhýbalo se v magnetickém poli.
- Zprvu se domnívali, že se jedná o záření γ .
- Později manželé **Irène a Fréderick Joliot Curieovi** zjistili, že toto záření vyráží energetické protony z parafínu.
- Pokud by tedy šlo o záření γ , muselo by mít do té doby nevídané energie \rightarrow spíše nějaké částicové záření

- **Chadwick** pochopil, že probíhají reakce $\rightarrow\rightarrow$ a dokázal, že záření je tvořeno neutrony.
- **Hmotnost neutronu** určil ze znalosti hmotností $^{11}_5\text{B}$ a $^{14}_7\text{N}$ jako přibližně rovnu hmotnosti protonu.
- Zjistil, že záření **proniká až do 10 až 20 cm Pb**
- p^+ o stejné energii se zastaví již v 0,25 cm Pb, protože pronikavost částic o stejné hmotnosti i rychlosti ve stejném materiálu závisí pouze na nábojích těchto částic,
- \rightarrow částice beryliového **záření musí mít velmi malý nebo** nulový náboj ve srovnání s nábojem p^+
- zjistil, že beryliové záření **dokáže z látky vyrážet nejen H^+ (p^+)**, ale i jádra dalších lehkých prvků, jako Li, Be, B atd.



Discovery of neutron



Význam objevu neutronu

- Již kompletní model atomu na dané úrovni rozlišení
- velký krok dopředu v našem chápání struktury atomových jader → objevem neutronu v podstatě **začal jaderný věk**
- Pojem **izotopy** a jejich postupná identifikace. Už dříve byla známa jádra s podobnými vlastnostmi, ale jinou atomovou váhu, což bylo možné nyní vysvětlit.
- Později se ukázalo, že právě neutron je **klíčem ke štěpení atomového jádra uranu a řetězové reakci**

Elementární částice v polovině 20. století

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

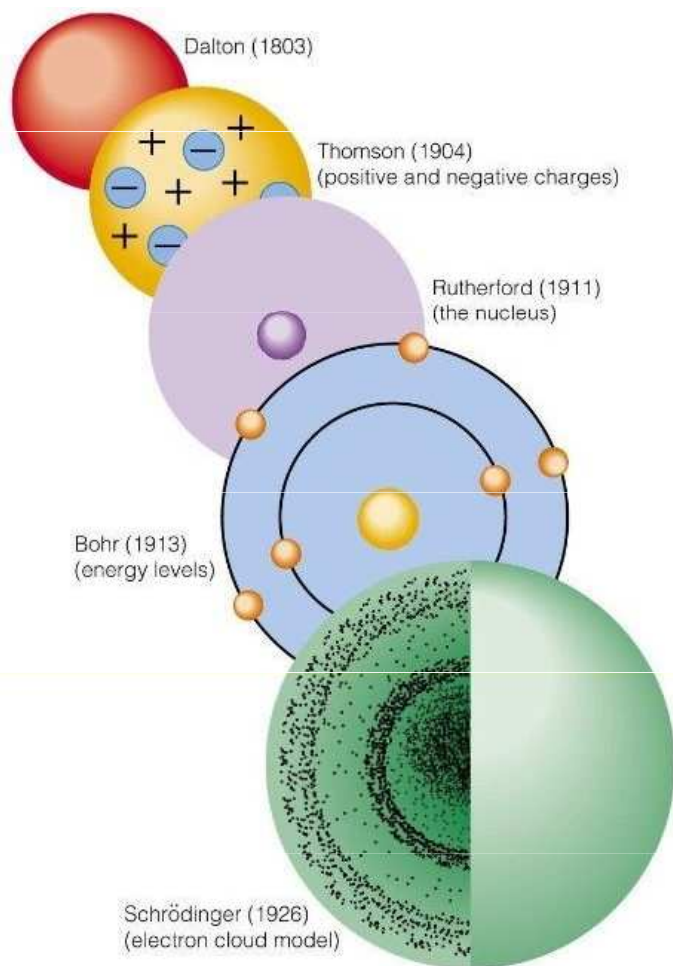
částice	elektrický náboj	hmotnost	hmotnost oproti elektronu
proton	+ e	$1,007\,277 \cdot u$	1 835
neutron	0	$1,008\,665 \cdot u$	1 838
elektron	- e	$0,000\,548 \cdot u$	1

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

u - atomová hmotnostní jednotka

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

MODELY - přehled



Dalton, 1808

First to describe atoms in a modern, scientific sense

- Doesn't explain electricity + Idea of "atoms"



Thomson, 1897

Thomson's Plum Pudding Model

- Doesn't explain why some of Rutherford's α -particles bounced back

+ Protons & electrons

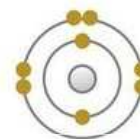


Rutherford, 1911

Rutherford shot α -particles through gold foil; some bounced back!

- Why don't the electrons lose energy and crash into the nucleus?

+ the Nucleus



Bohr, 1913

Basis for our modern atomic model

- Doesn't explain quantum mechanics

+ Electron Shells



Schrödinger, 1926

Quantum mechanics

- Why are some atoms of the same element heavier?

+ Subshells + 'Shells' are actually 'orbitals'



Chadwick, 1932

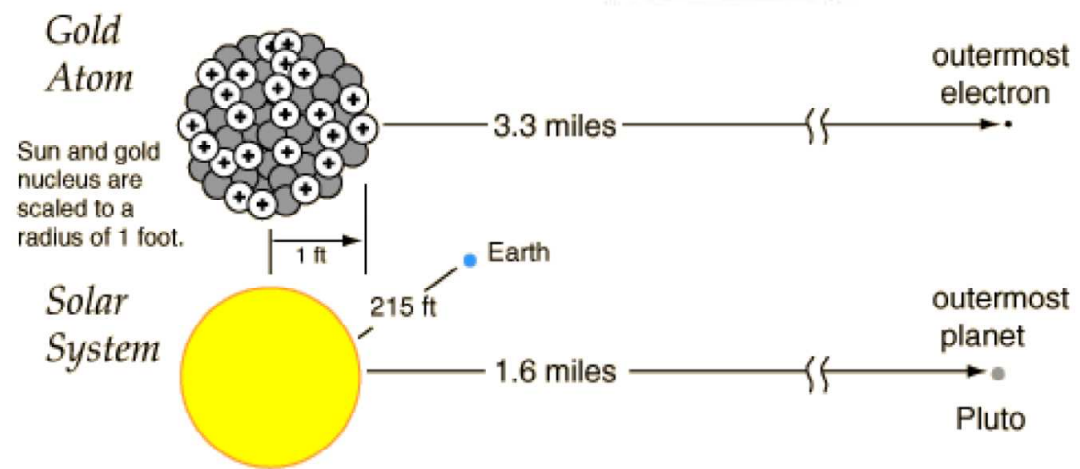
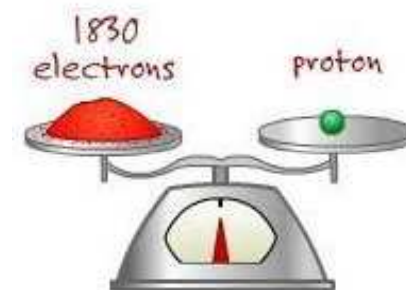
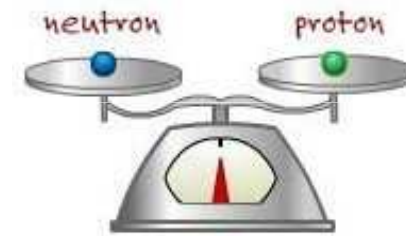
+ Neutrons!

VCEasy
VISUAL
CHEMISTRY
1.1.2a

atomic theory - historical development of the model of atomic theory with contributions from Dalton to Chadwick

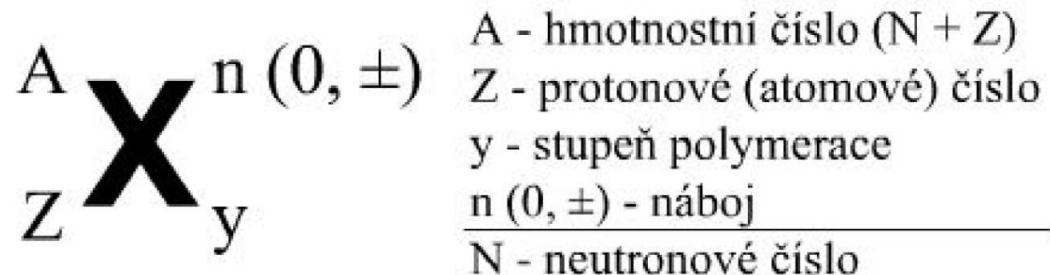
• Jádro 99.9% hmotnosti atomu

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



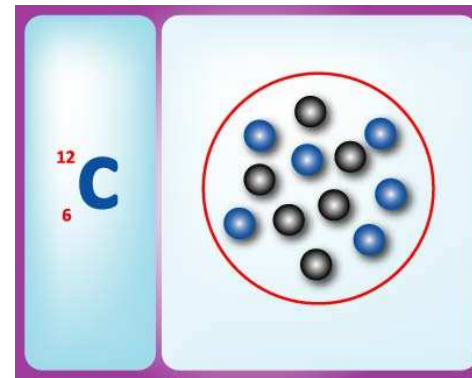
ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

- $p^+ + n^0$,
- Sídlo téměř veškeré hmoty (nukleony $>2000x$ větší hmotnost než e^-)
- silné jaderné interakce \gg 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**

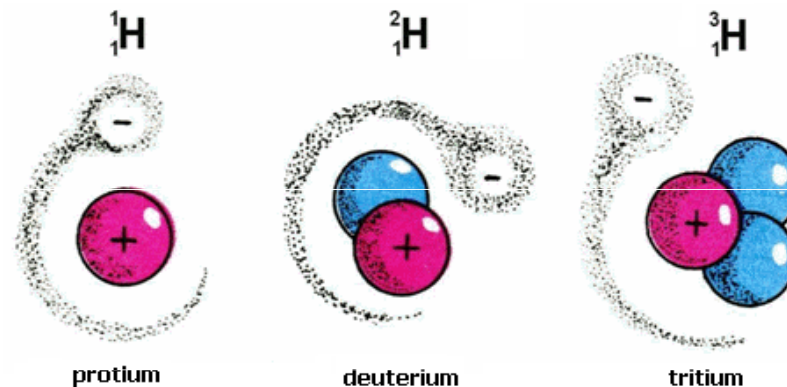


ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

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.



Izotopy vodíku (modely atomů)

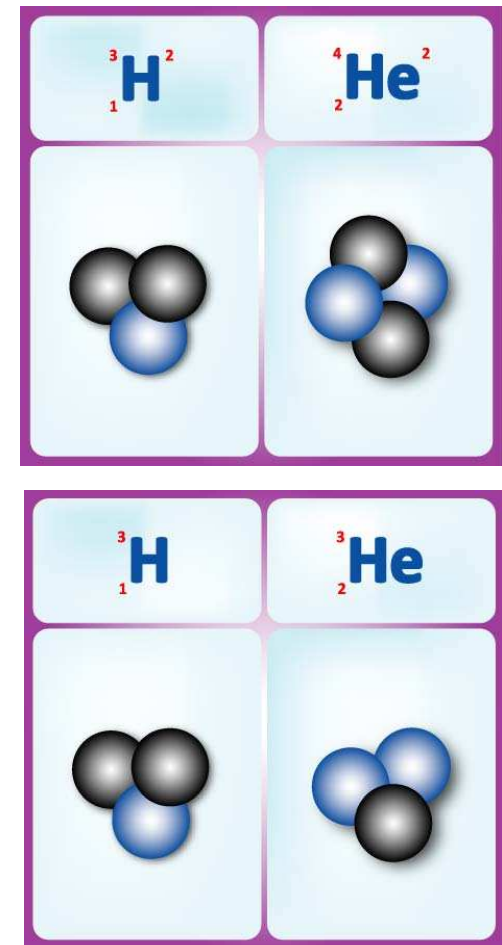
ATOMOVÉ JÁDRO – základní pojmy

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**.

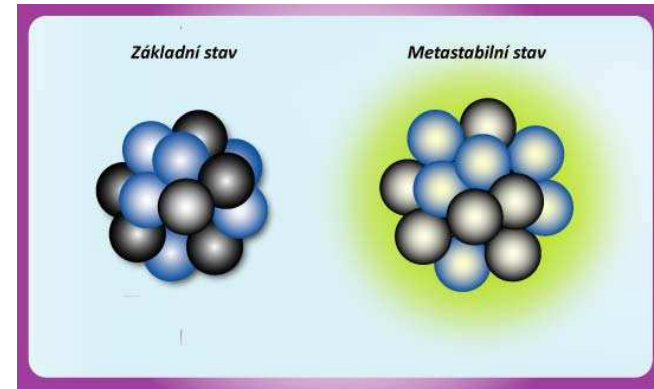


IZOBARY: mají **stejný počet nukleonů**, ale liší se protonovým číslem (=dva různé prvky) a neutronovým číslem.



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**

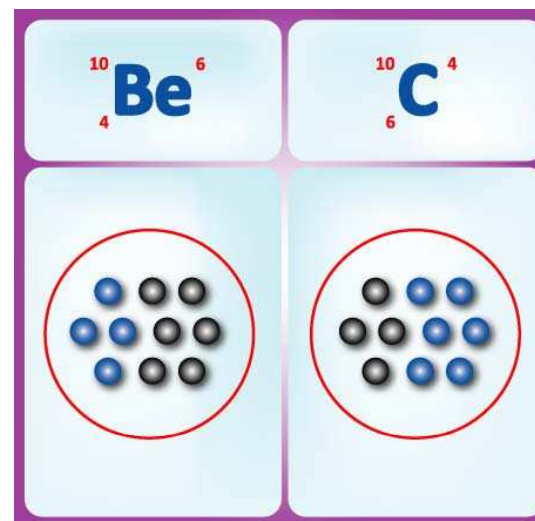


- Označení **izomer** bylo zvoleno jako analogie k pojmu izomer v chemii, se kterým se ale nesmí zaměňovat. V obou případech je izomer složen ze stejných počtů jednotlivých částic, ale liší se svou strukturou a chováním v reakcích.
- Doba života excitovaných jaderných hladin je většinou velmi krátká ($\gg 10^{-15}$ - 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}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.: ${}^{10}_4 B^6$ ${}^{10}_6 C^4$

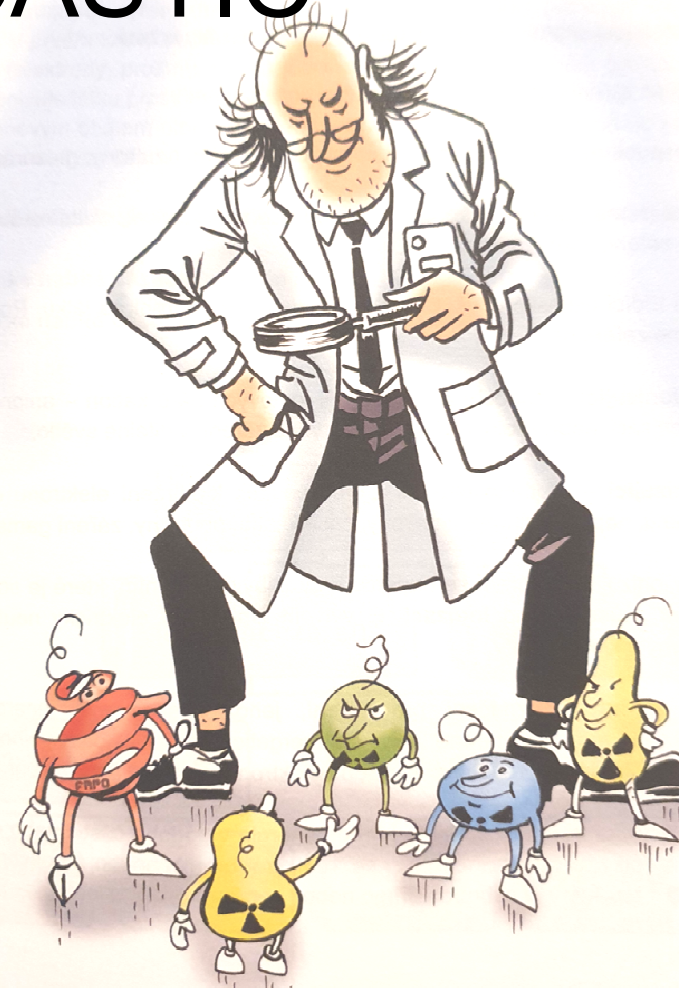


Další definice:

http://artemis.osu.cz/mmphys/jm/jm_2_1_4.htm

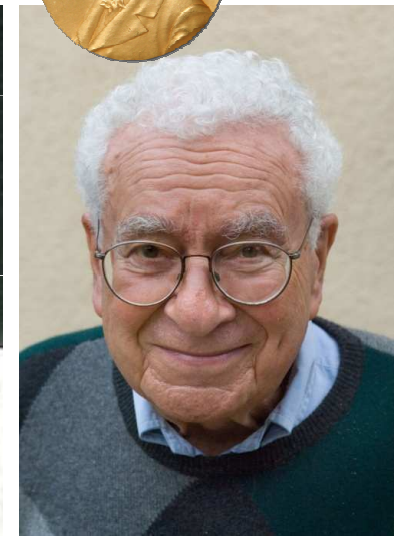
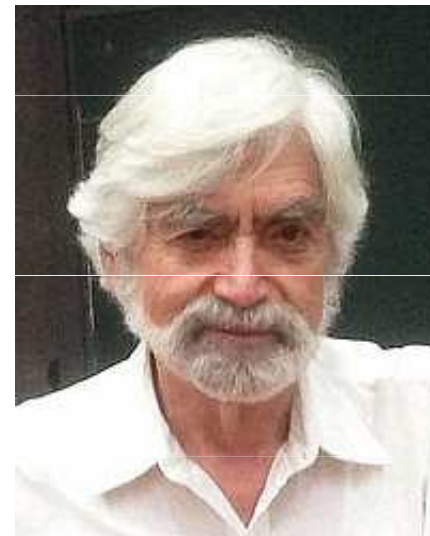
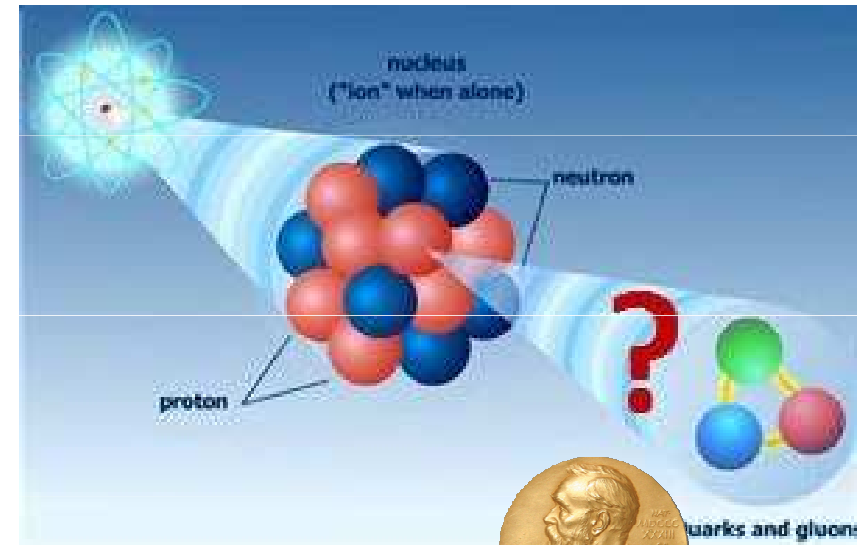
ZOO ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC

- 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 π**
 - **Mion** (dříve zvaný mezon μ)
- 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??)



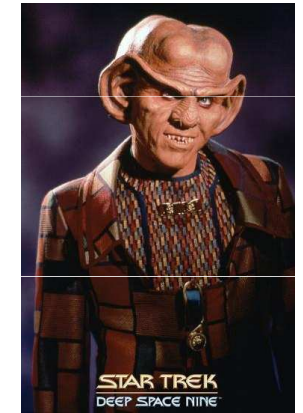
KVARKY

- 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]

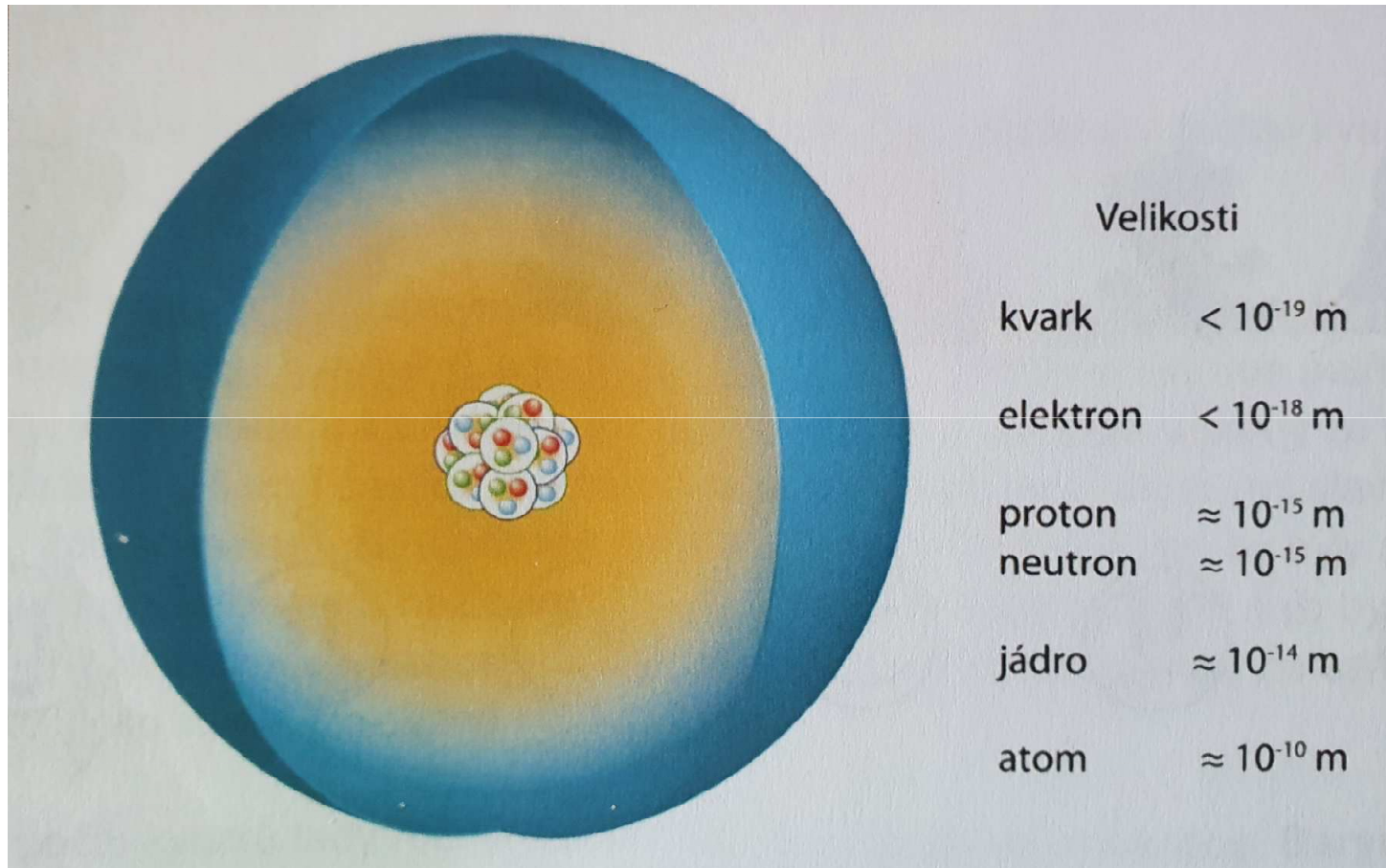
- *Původ slova KVARK: Slovo kvark našel Gell-Mann v románu Jamese Joyce "*Finnegan's Wake*".
- V českém překladu „Finneganova pohřební hostina“ nebo „Finneganovo probuzení“ (slovo wake může mít dva významy); nebo též „*Plačky nad Finneganem*“.
- Název balady Joyce zvolil jako ironický symbol věčného 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 fyziky vnáší řada dalších pojmů nematematického charakteru, jejichž původní význam nemá s vlastnostmi částic nic společného



Three quarks for Muster Mark



Jádro atomu & standardní částicový model



KVARKY

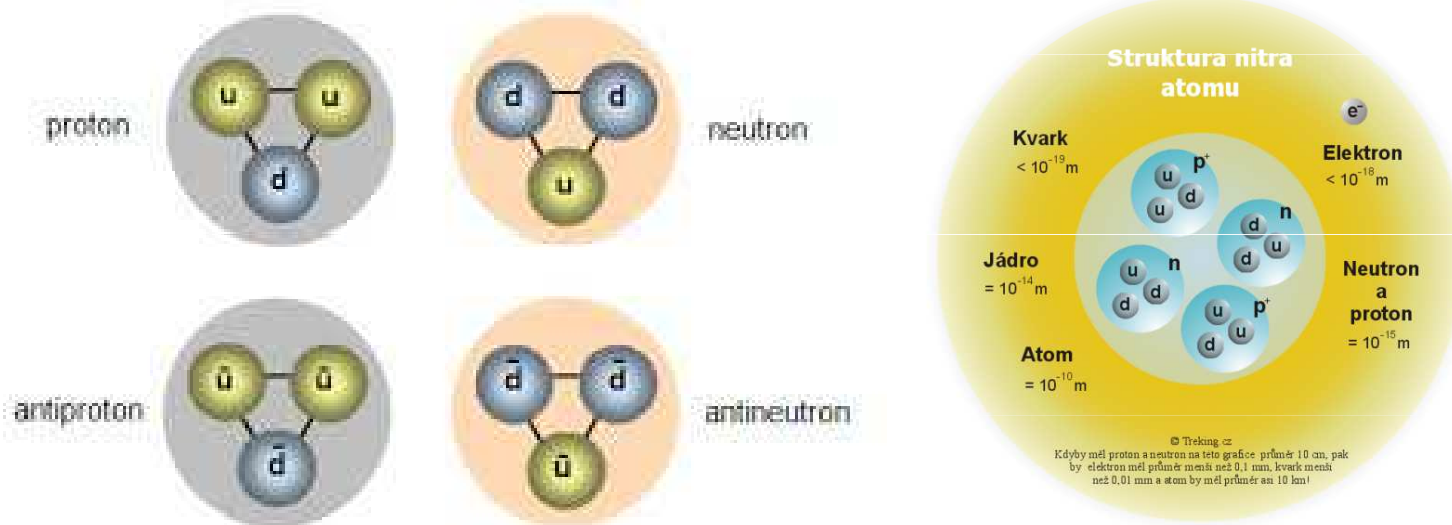
- Podle kvantové charakteristiky nazvané "vůně" (flavour) existuje šest kvarků
u, d, s, c, b, a t.



KVARKY

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

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





Up



Down

KVARK Y I. generace



Veškerá pozorovatelná hmota ve vesmíru

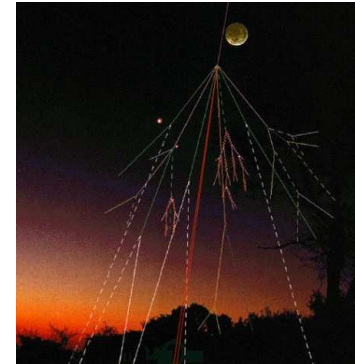


Strangeness



Charm

II. generace



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

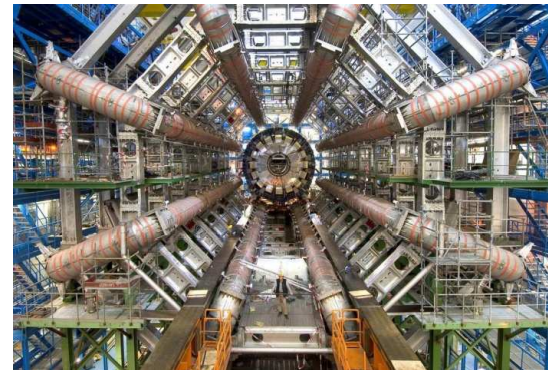


Beauty (bottom)



Truth (*in vino veritas*) (Top)

III. generace

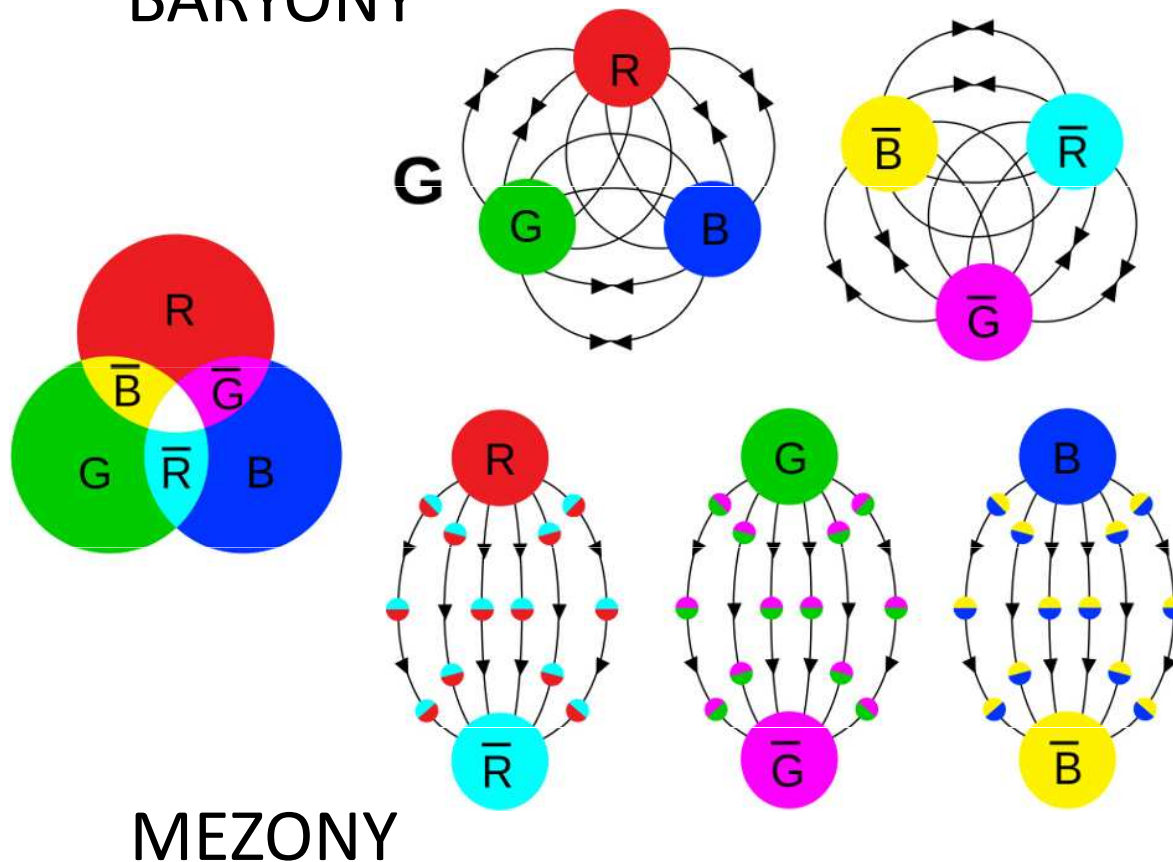


V současnosti již jen umělý vznik na velkých urychlovačích

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

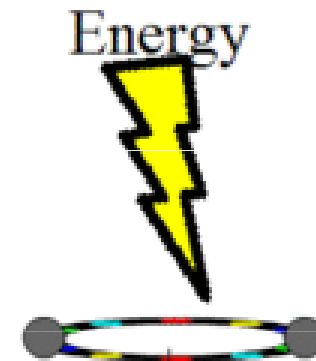
KVARKY – SILNÁ INTERAK



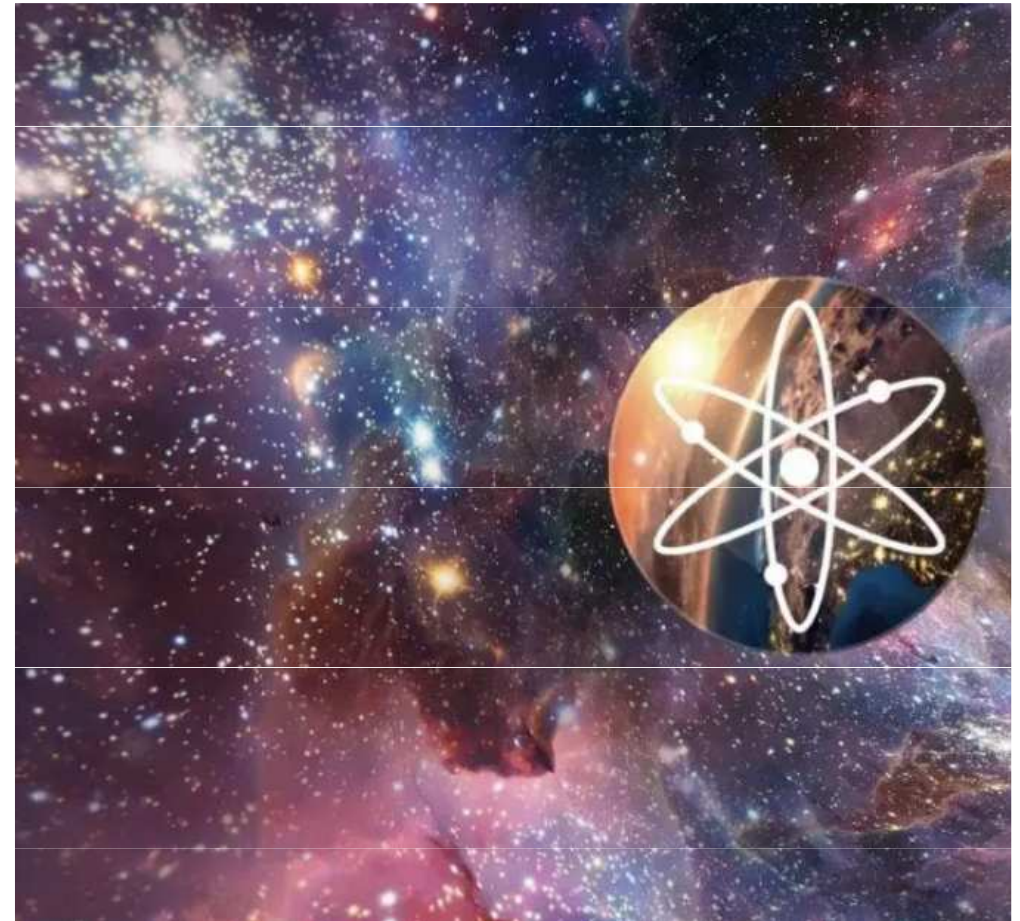
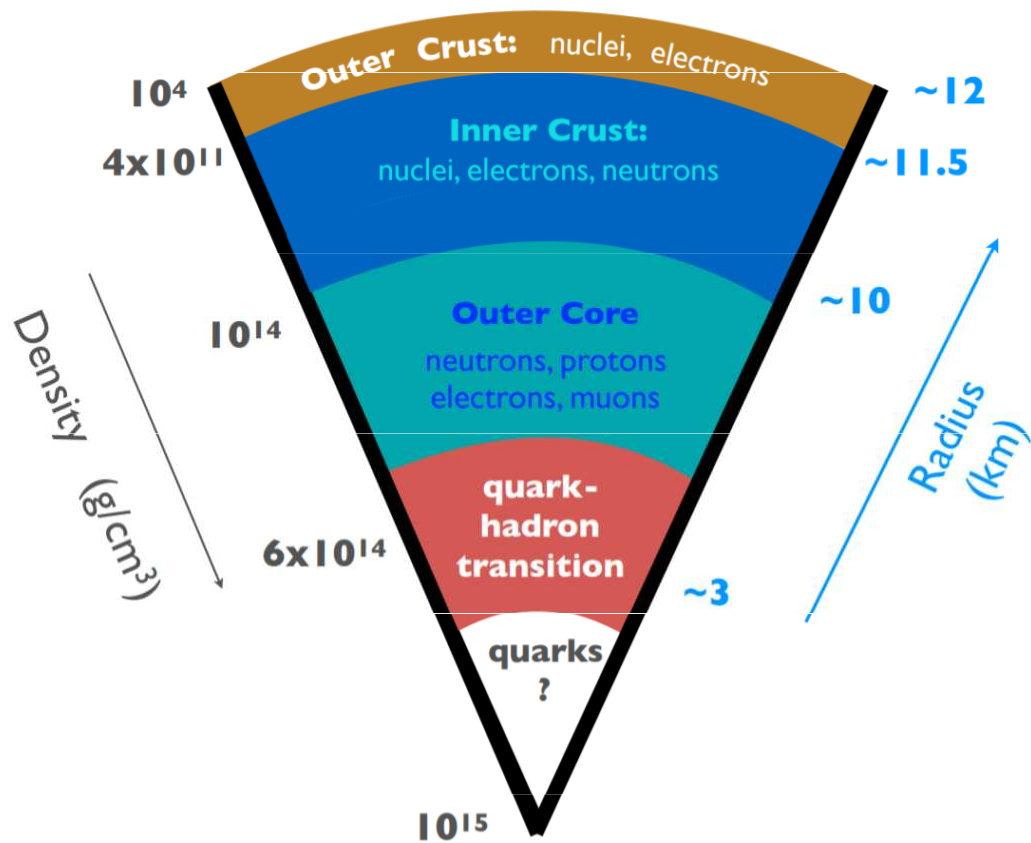
- silná jaderná interakce „cítí“ barvu (obdobně, jako elektromagnetická interakce elektrický náboj)
- Barvu si lze tedy představit jako zvláštní, velmi silný „elektrický náboj“ (barevný náboj). Tento náboj je samotnou podstatou silné interakce, kterou kvarky zprostředkovávají
- Hadron jako celek nesmí 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

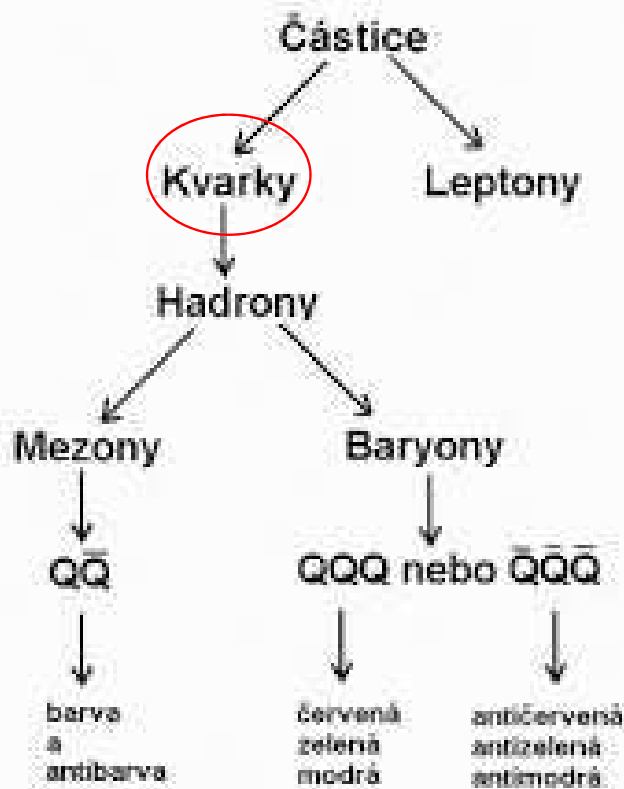
- Díky silné interakci drží kvarky za normálních podmínek uvnitř hadronů
- **Nemohou se vyskytovat samostatně** (existují pouze ve vázaných stavech – hadronech) – mluvíme o „**uvěznění kvarků**“.
- Je to důsledkem extrémně krátkého dosahu SJI. SJI se navíc chová oproti jiným interakcím „dost podivně“ → **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
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 ⁻	ν _e
Druhá rodina	s	c	μ	ν _μ
Třetí rodina	b	t	τ	ν _τ

Částice interakcí

Bosony (celočíselný spin)

Silná interakce:



Elektromagnetická interakce:



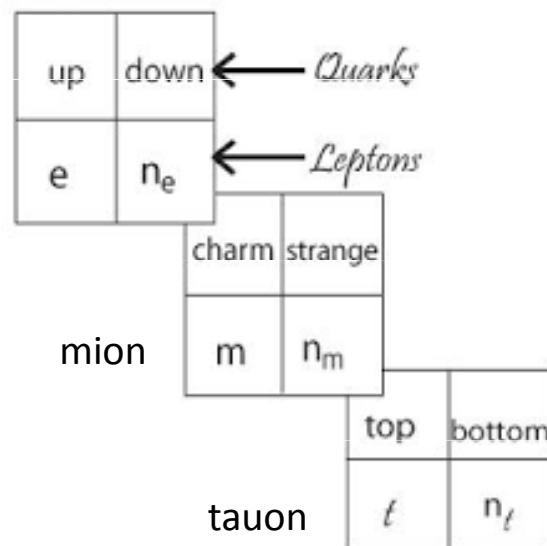
Slabá interakce:



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⁻) a elektronové neutrino (ν_e) – 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

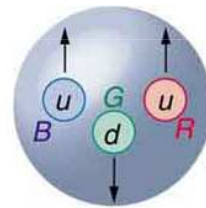
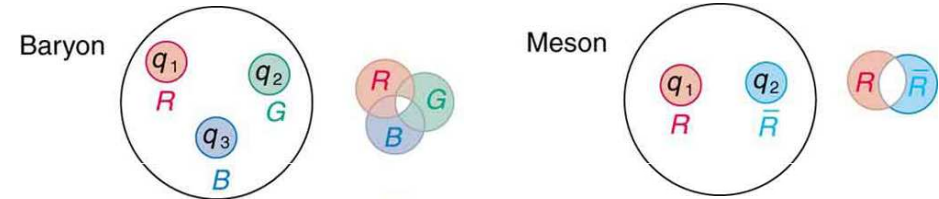
- **Baryon:** 3 kvarky $p = (uud)$, $n = (udd)$, $\Lambda^0 = (uds)$

- **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

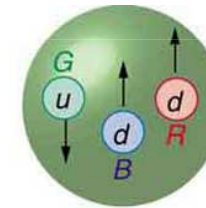
- Např. Z protonu (kvarky uud) = $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} + (-\frac{1}{3}) = 1$



Proton

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

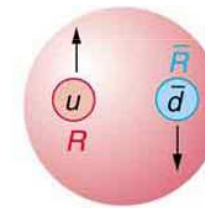
$$\text{Charge} \quad +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$



Neutron

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

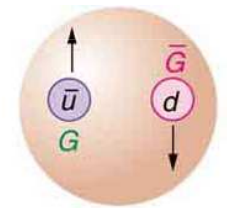
$$\text{Charge} \quad +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$



π^+

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

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



π^-

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

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



- **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

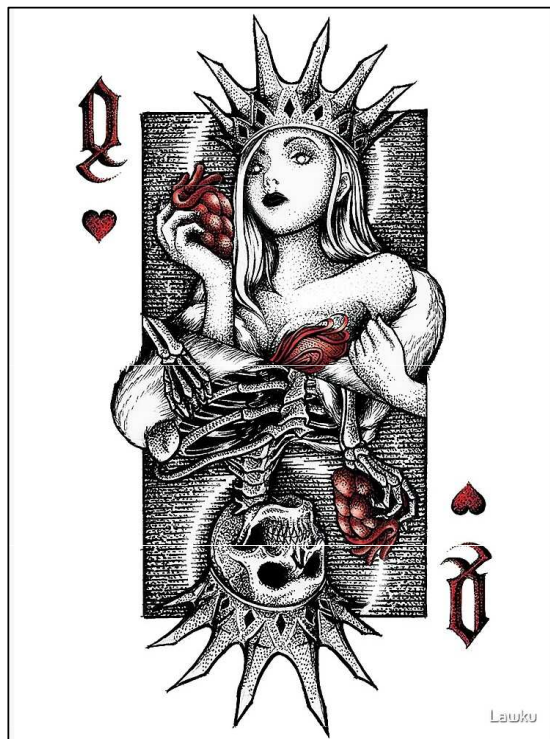


SPIN

- 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 (tvoří 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 ν ($0 \text{ MeV}/c^2$), elektron ($0,5 \text{ MeV}/c^2$), mion ($106 \text{ MeV}/c^2$)

poločíselné spinové číslo $1/2$

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

Př. pion, kaon

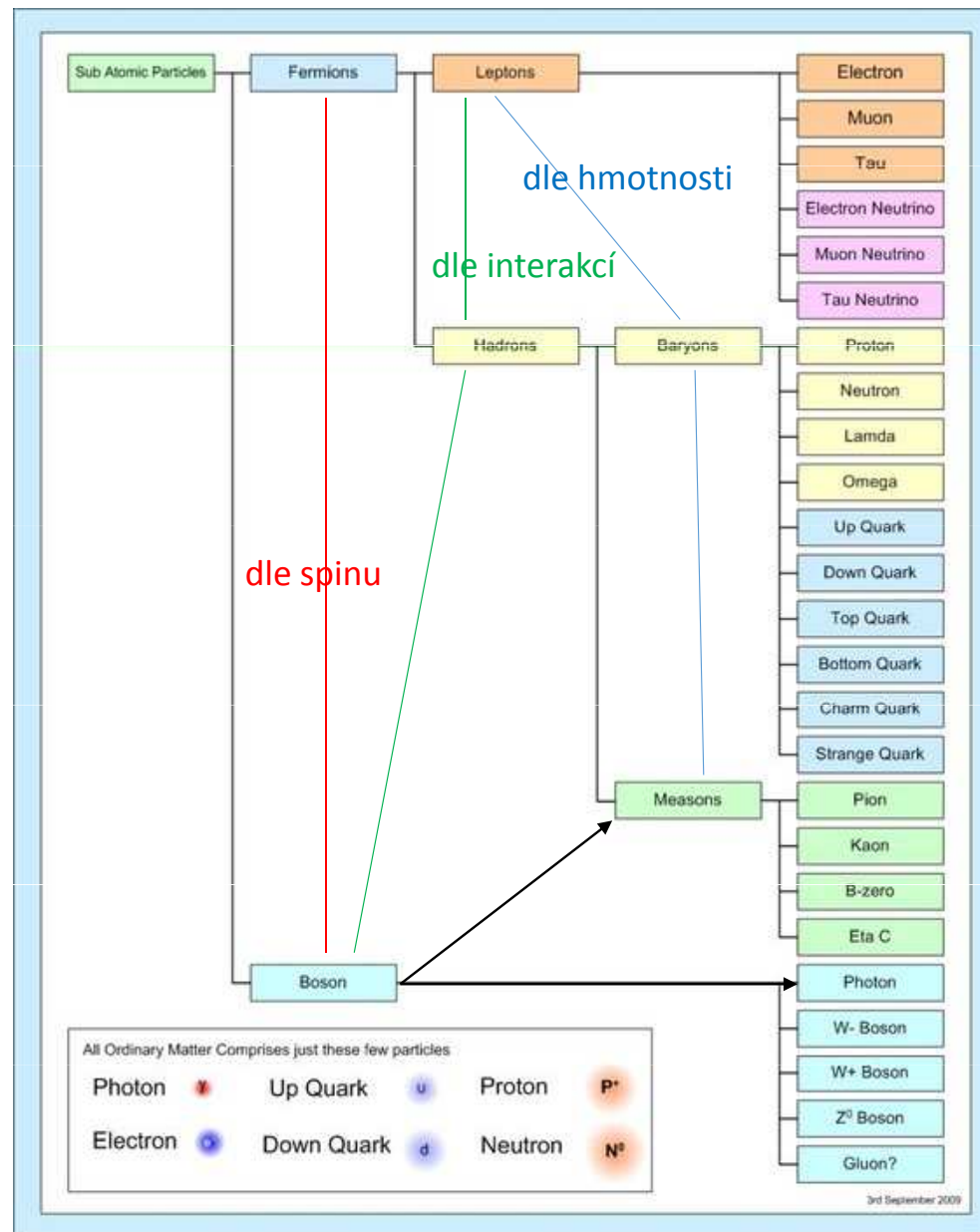
celočíselné spinové číslo 0 nebo 1

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

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

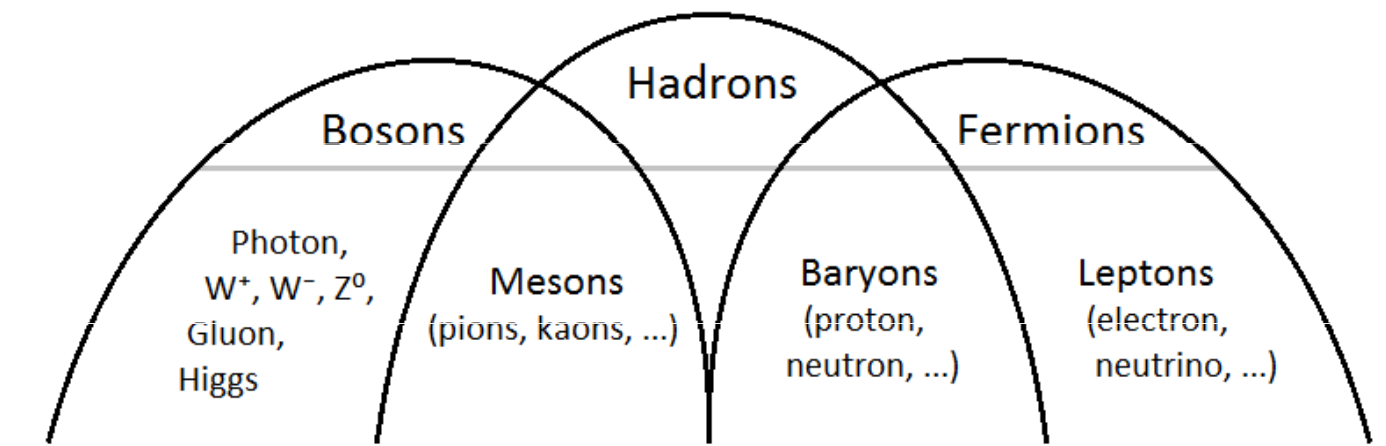
účastní se tzv.
silné interakce,
tzv. hadrony

Systematika elementárních částic



Systematika elementárních částic

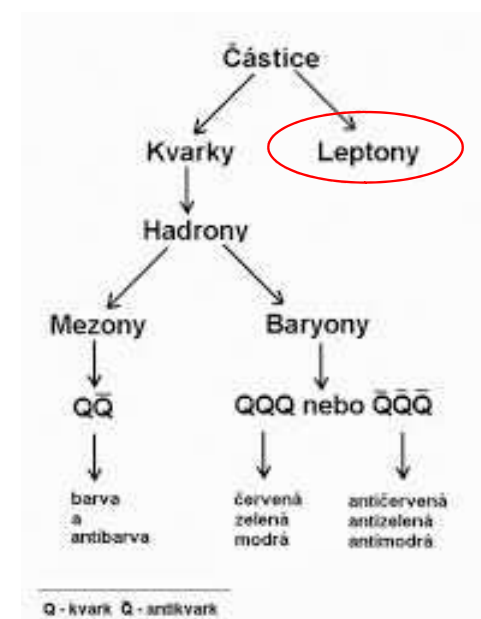
-další kritéria



LEPTONY

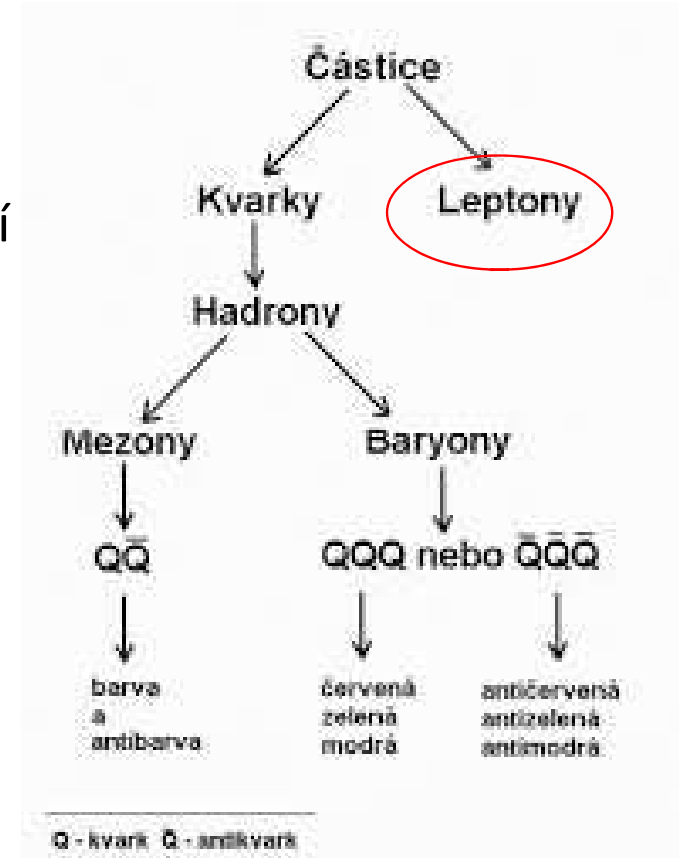
LEPTONY

- 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

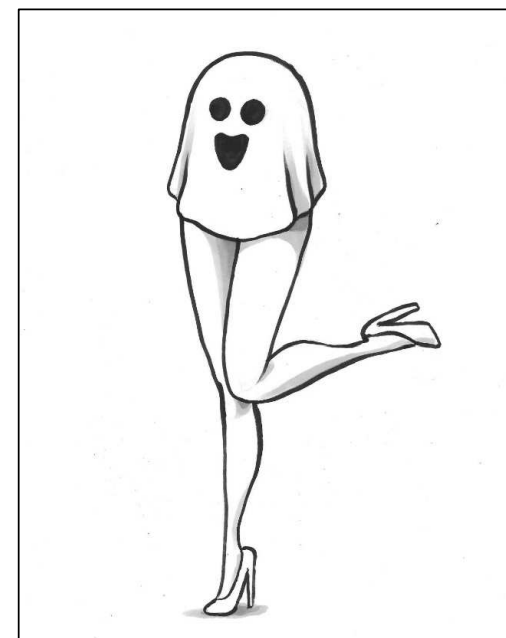
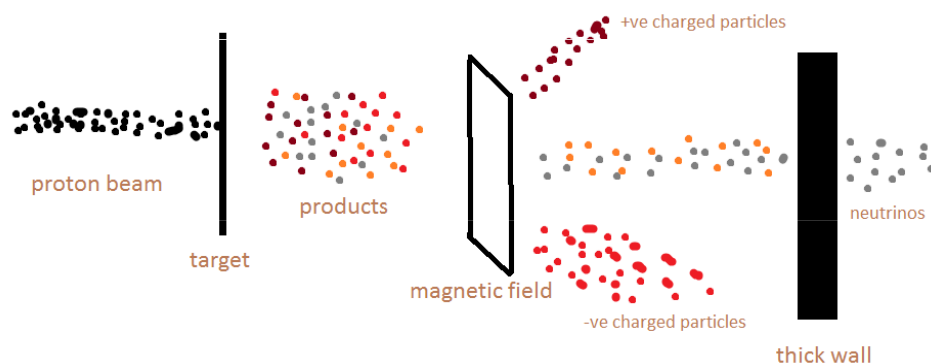
- Elektrony v atomovém obalu **nevykazují** při současných experimentech **vnitřní strukturu** (přesto je elektron součástí širší skupiny částic, kterým říkáme leptony, viz dříve).
- Všechny leptony mají i v nejvytříbenějších experimentech **bodovou strukturu až do 10^{-18} m** (tzn. nemají vnitřní strukturu). 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 neutrin plochou nehtu ($\sim 1 \text{ cm}^2$) každou sekundu (hlavně ze Slunce)
Za celý život lidským tělem projde 10^{23} neutrin - jen jedno jediné je ale zachyceno

V běžné jaderné elektrárně vzniká každou sekundu přes 50 000 neutrin



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

Learn Something New Every Day
LSNED.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

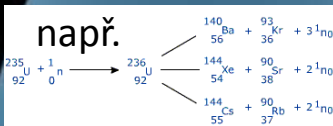
20 v's

Slunce

atmosferická neutrina

lidské tělo

jaderné reaktory



pozemská radioaktivita

urychlovače

E_ν 0.3 – 30 GeV



1.4.2015

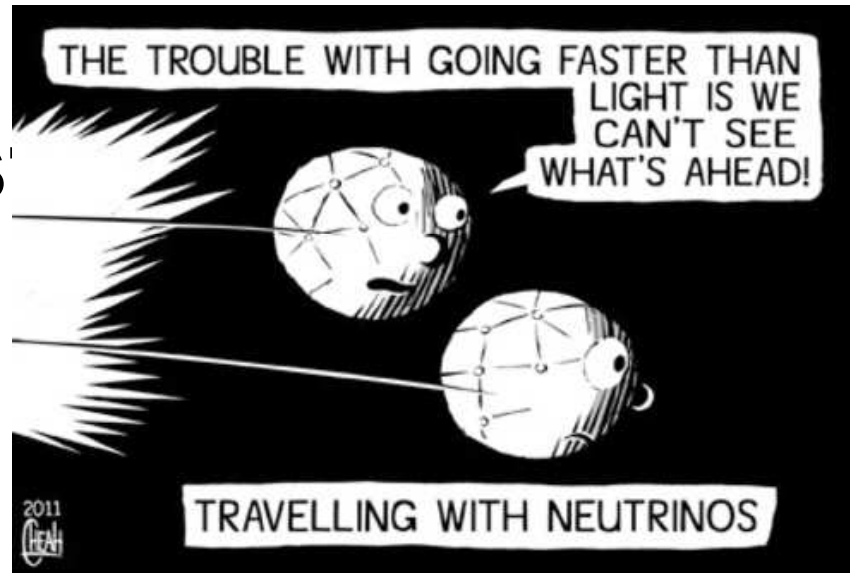
www.nuon.cz

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



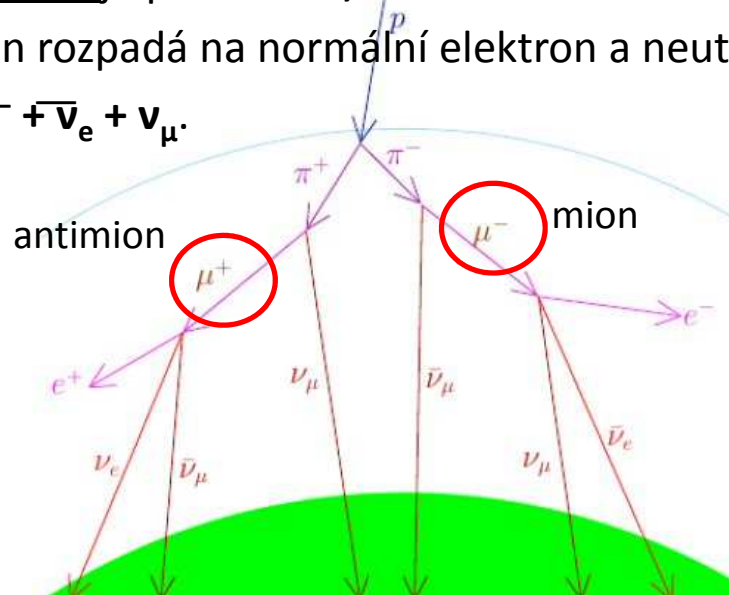
- V roce 2011 se zdálo, že neutrína létají z komplexu CERN do Gran Sasso nadsvětelnou rychlostí – na vině byl povytažený konektor optického vlákna (u experimentu Opera), které zajišťovalo komunikaci mezi podzemní a nadzemní částí laboratoře.

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 cm^2 za minutu**. Tyto miony pocházejí ze sekundárních spršek kosmického záření.

- **TAUON (Lepton τ): 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

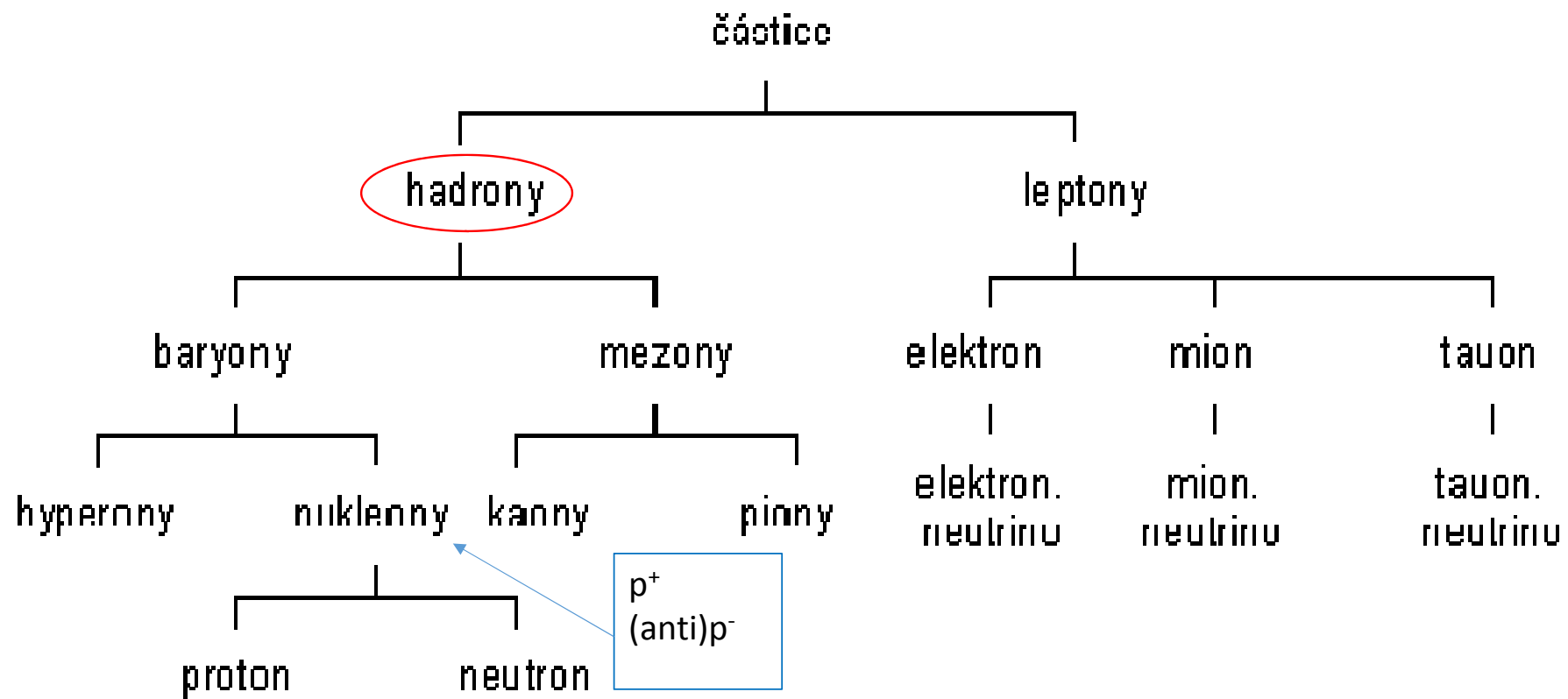
S = silná

$m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ 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 (μ)	207	1/2	-1	2 μ s	W, E	1937	Anderson
tauon (τ)	3484	1/2	-1	0,3 ps	W, E	1975	Perl
elektronové neutрино (ν_e)	mix minimální	1/2	0	oscilace	W	1956	Reines, Cowan
mionové neutрино (ν_μ)	mix minimální	1/2	0	oscilace	W	1962	Lederman, Schwartz, Steinberger
tauonové neutрино (ν_τ)	mix Poměrně hmotnější	1/2	0	oscilace	W	1999	kolaborace DONUT

HADRONY



HADRONY (složené částice)

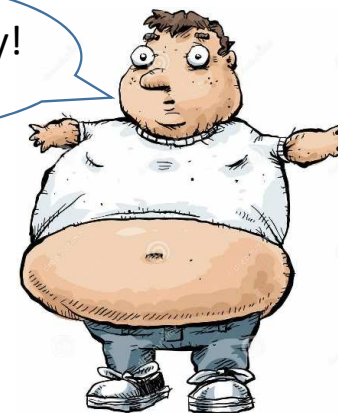
- řec. *hadros* = silný, bujarý →
- podléhají **silné interakci**
- Dnes již **nejsou považovány za (fundamentální) elementární částice**, nicméně jejich komponenty se vyskytují pouze vázané v hadronech (nikdy ne volně)
- **S výjimkou protonu a antiprotonu jsou nestabilní** ($10^{-28} - 10^{-8}$ s) → 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

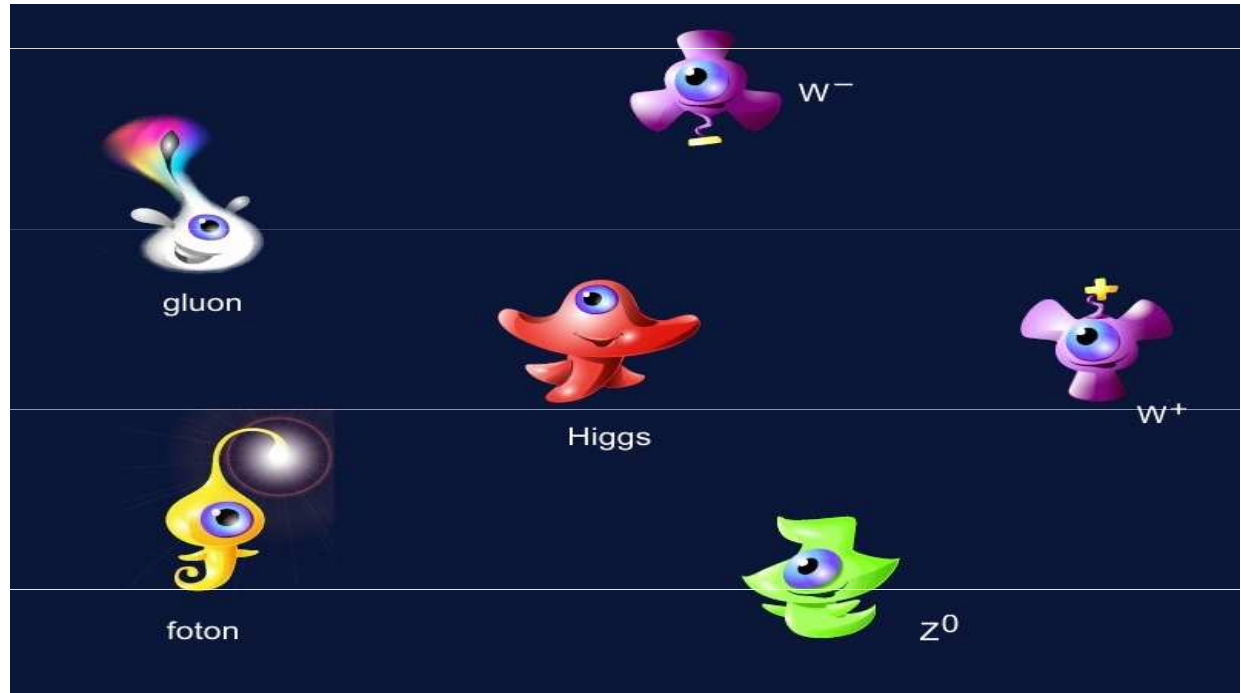
Baryony qqq	kvarky	elektrický náboj	hmotnost (GeV/c ²)	spin
p proton	u u d	+ 1	0.938	1/2
\bar{p} antiproton	$\bar{u} \bar{u} \bar{d}$	- 1	0.938	1/2
n neutron	u d d	0	0.940	1/2
Λ^0 lambda	u d s	0	1.116	1/2
Ω^- omega	s s s	- 1	1.672	3/2
Σ_c sigma-c	u u c	+ 2	2.455	1/2
· a mnoho dalších				

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**

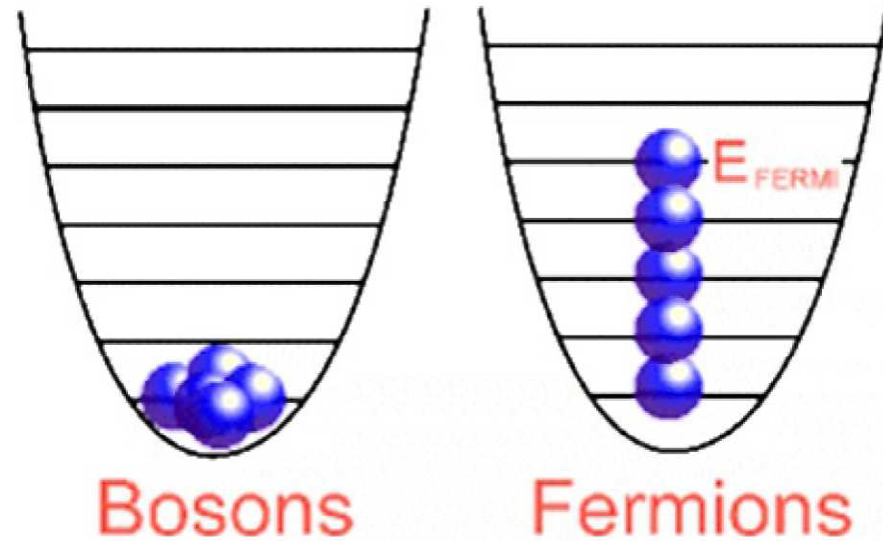
BOSONY („částice interakcí“)

- 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).



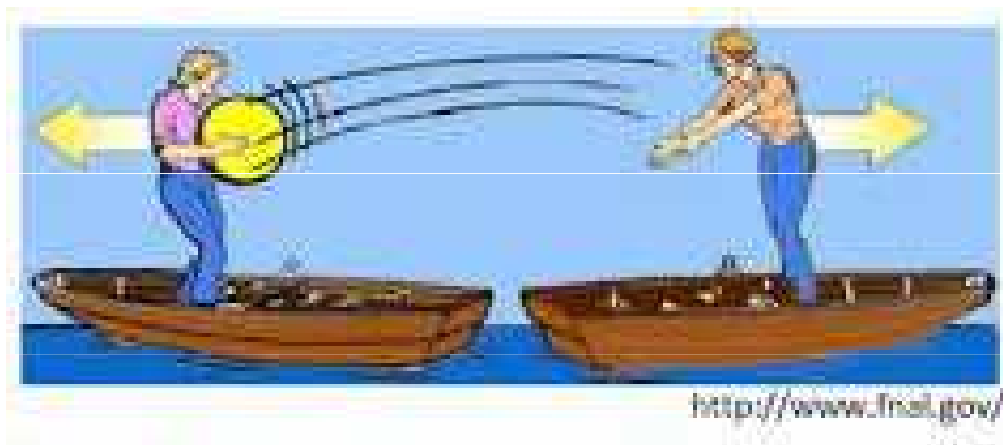
BOSONY („částice interakcí“)

- 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)

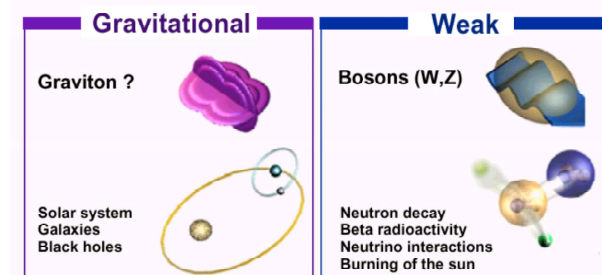
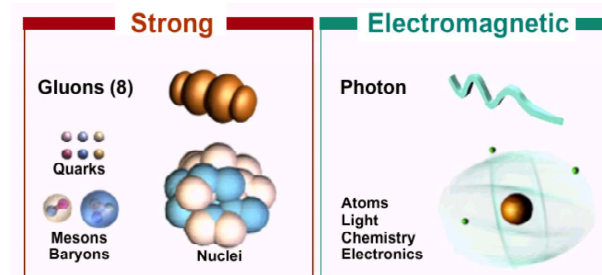
- současná fyzika (kvantová teorie pole) vysvětluje obecně interakci dvou částic jako proces, který je zprostředkován **výměnou jiné (virtuální) částice**.
- ...mezi interagujícími částicemi vzniká silové pole, jehož kvantem je právě vyměňovaná částice. Tato částice existuje jen velmi krátce, po emisi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



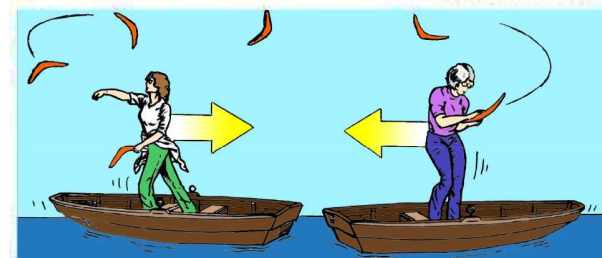
- **Gravitační síla ?** (zatím není známa polní částice)
- **Elektromagnetická síla:** protony a elektrony (elektricky nabité částice), udržuje e- v elektronovém obalu
- **Silná jaderná síla:** drží protony a neutrony v jádře (částice s barevným nábojem) a tvoří tak atomové jádro (elektrárny, a-bomby)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

jméno částice	značení částice	hmotnost (GeV)	spin (h)	el. náboj (e)	interakce	rok objevu	objevitel
foton	γ	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/>

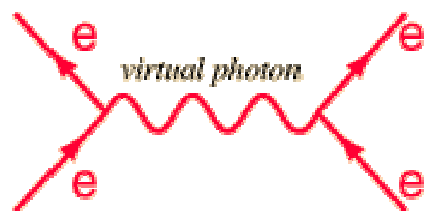
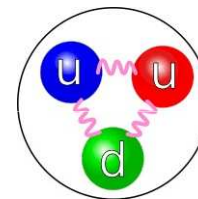


<https://makemphy.wordpress.com/>

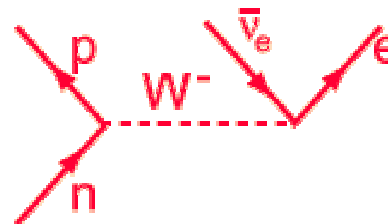


Základní síly

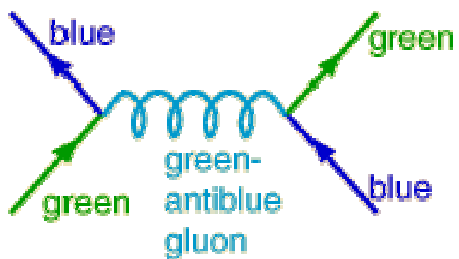
Feynmanovy diagramy



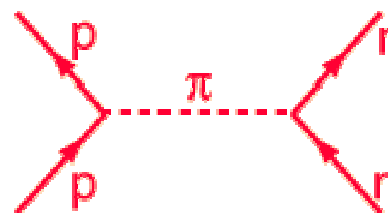
Electromagnetic



Weak

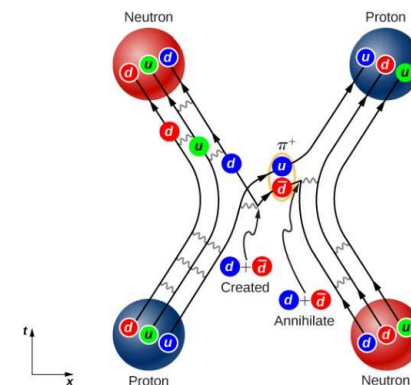
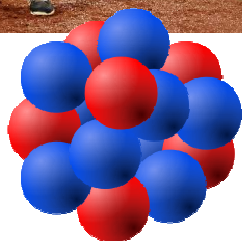


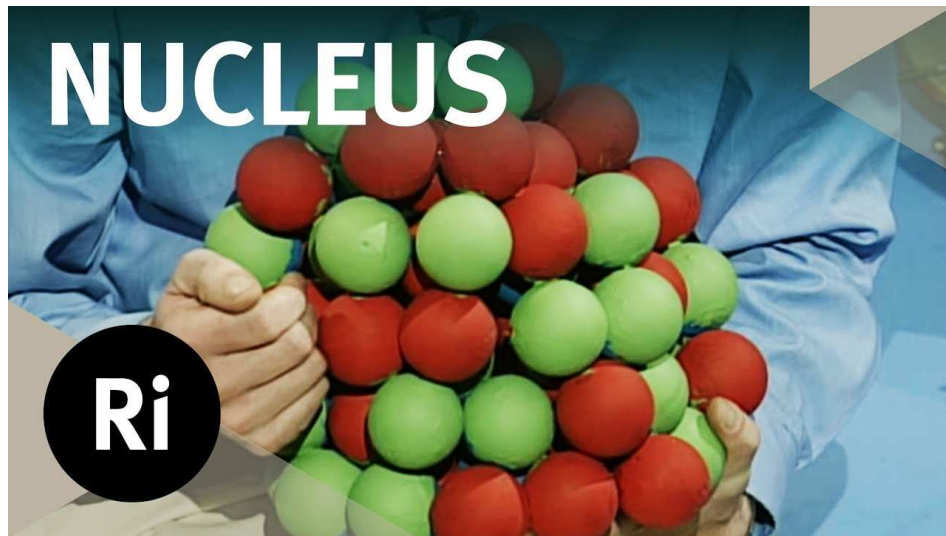
between quarks



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 přiblížování 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:

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

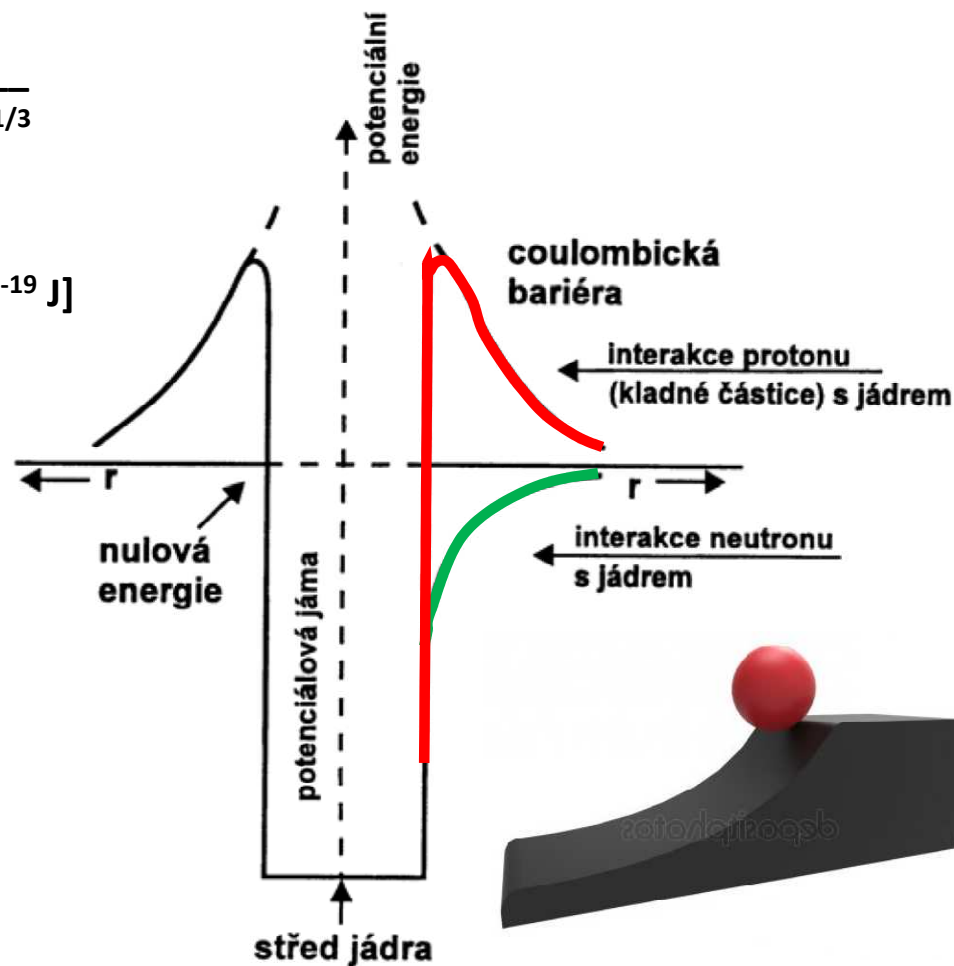
- Kde: Z_1 a Z_2 jsou protonová čísla jádra a kladné částice (zde protonu)

A_1 a A_2 jsou nukleonová čísla jádra

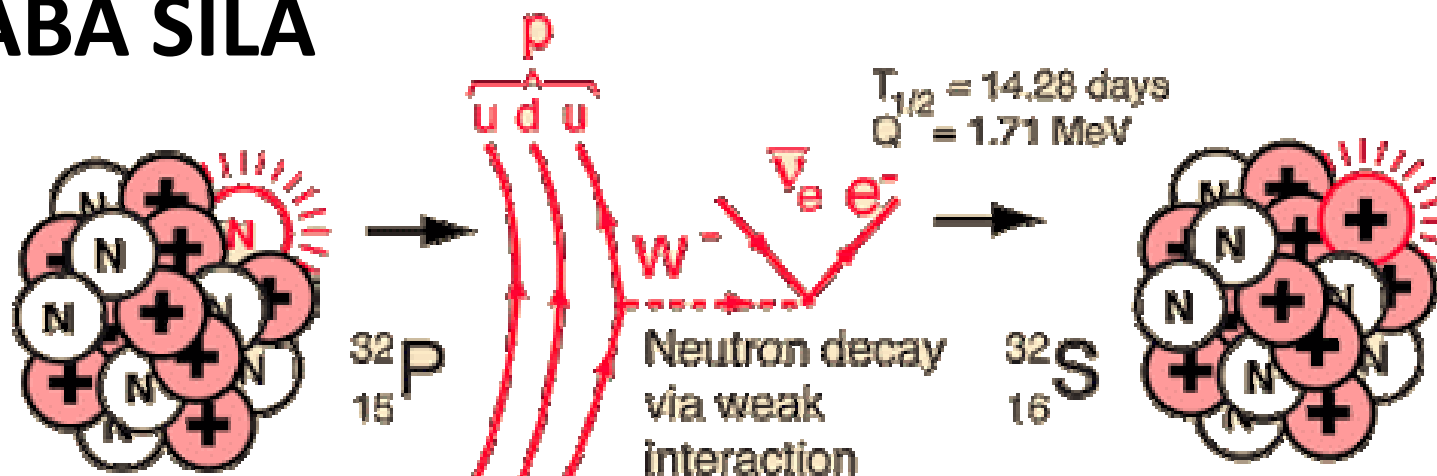
Průběh interakce mezi jádrem a dalším nukleonem, potenciálová jáma a bariéra

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

[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.



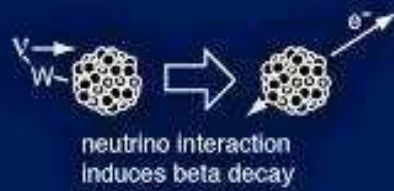

The decay process moves the phosphorus nucleus up one step in the periodic table to sulfur.

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

- β^+ rozpad
- Nestabilita volných n^0
- Většina radioaktivity ve štěpném materiálu (jader po štěpení U v reaktorech) → mají nadbytek n^0 → β^+ (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, π (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>		6×10^{-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**



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

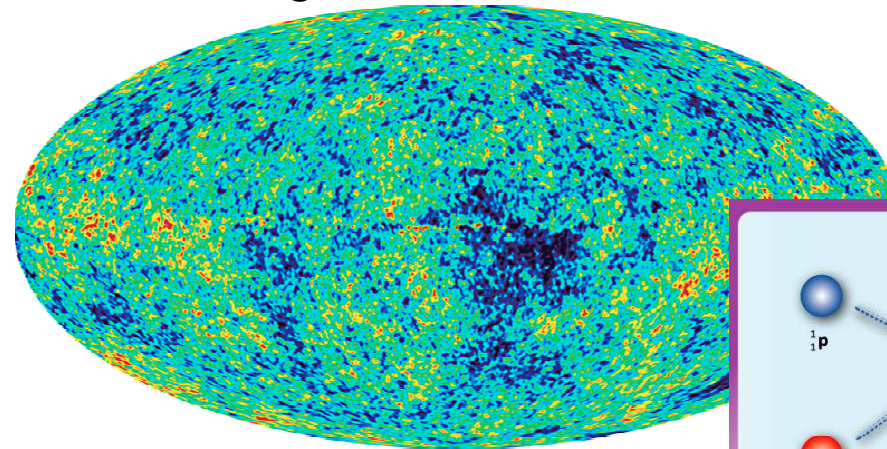
ANIHILACE

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

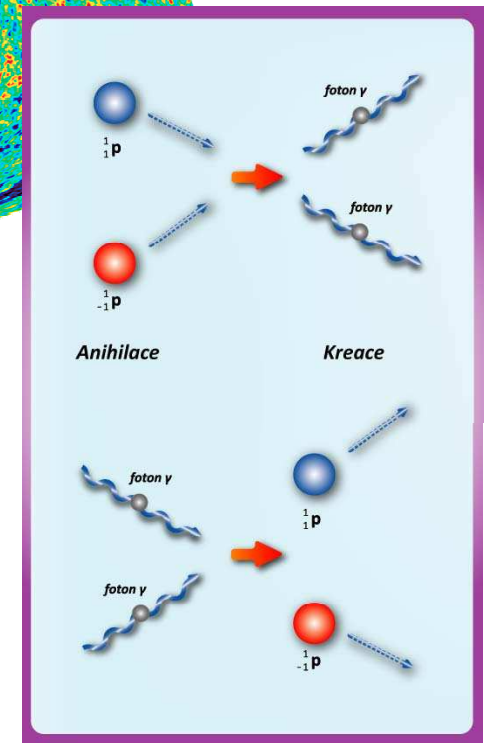
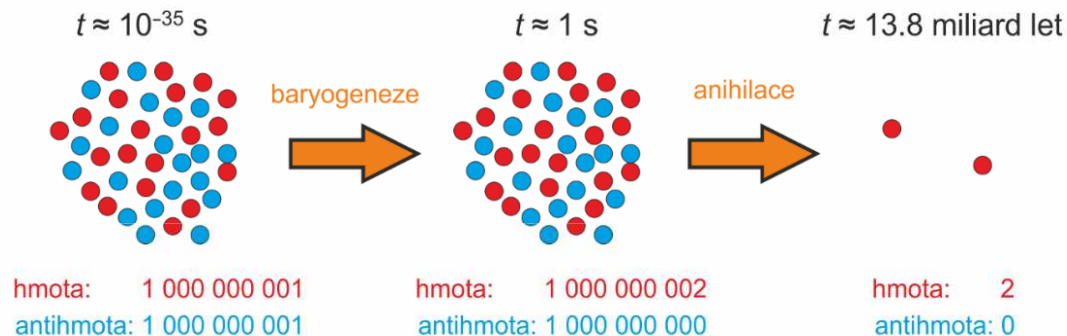
$$E = mc^2$$

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

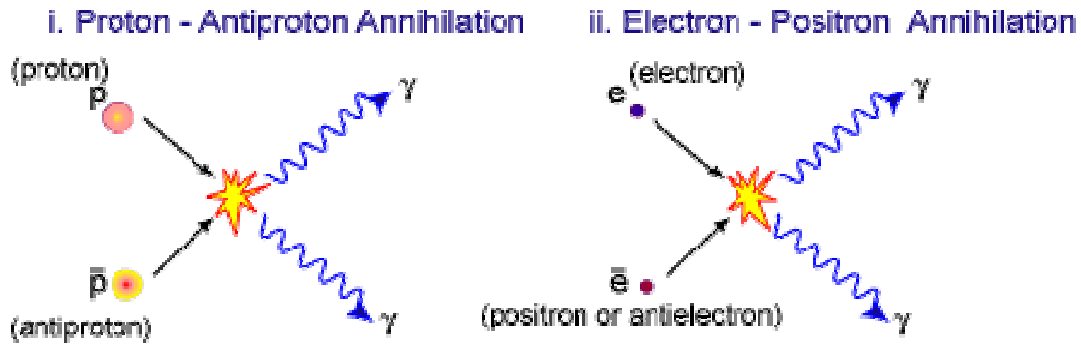
Počátek vesmíru → téměř shodné množství hmoty a antihmoty → obrovská anihilace (vzniká **reliktní záření**) – malý přebytek hmoty zůstává



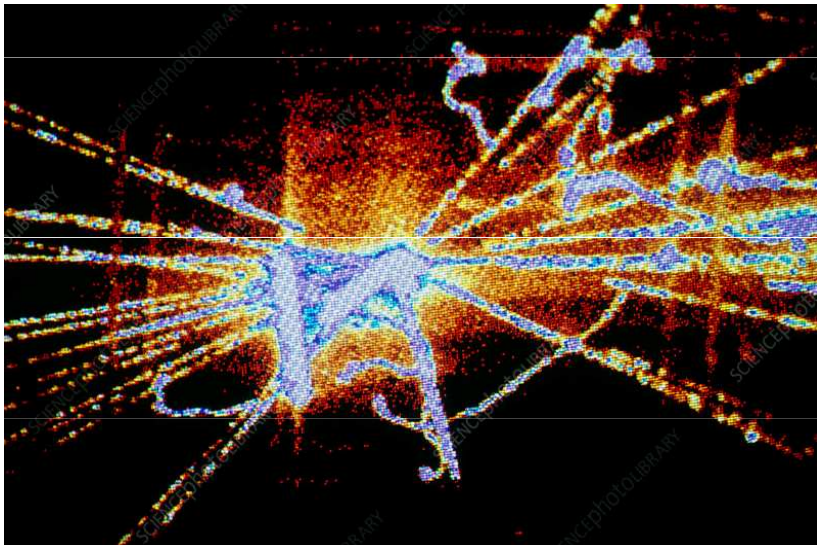
Největší anihilace v našem vesmíru nastala na jeho počátku a jejím pozůstatkem je reliktní záření



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)



rozpad na mezony

- mezony → miony + neutrina

- miony → e^- + neutrina

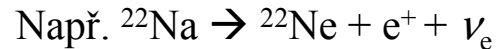
- e^- reagují s e^+ → fotony γ + neutrina

(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 :

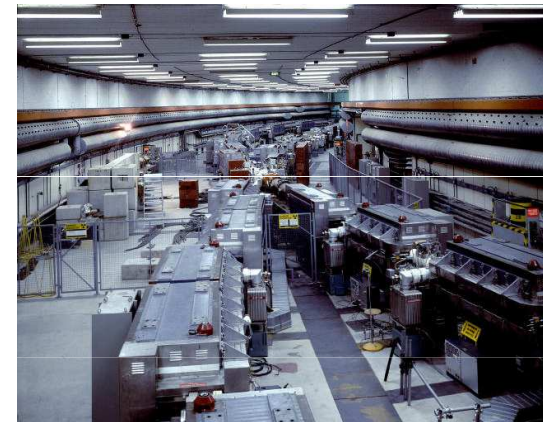
- 1) **Urychlovače** – podobně jako u kosmického
záření – velmi vysoké energie, produkce v
páru, urychlení na rychlosti $v \approx c$

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)



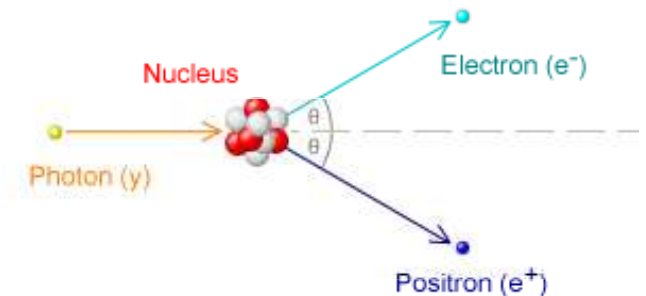
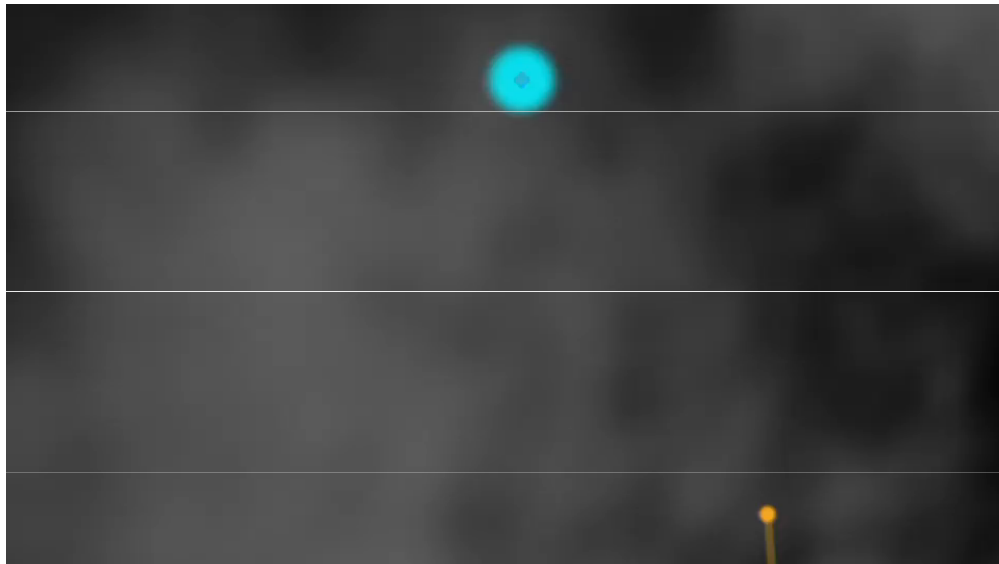
akumulační prstenec ISR v CERNu (Ženeva)

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:](#)

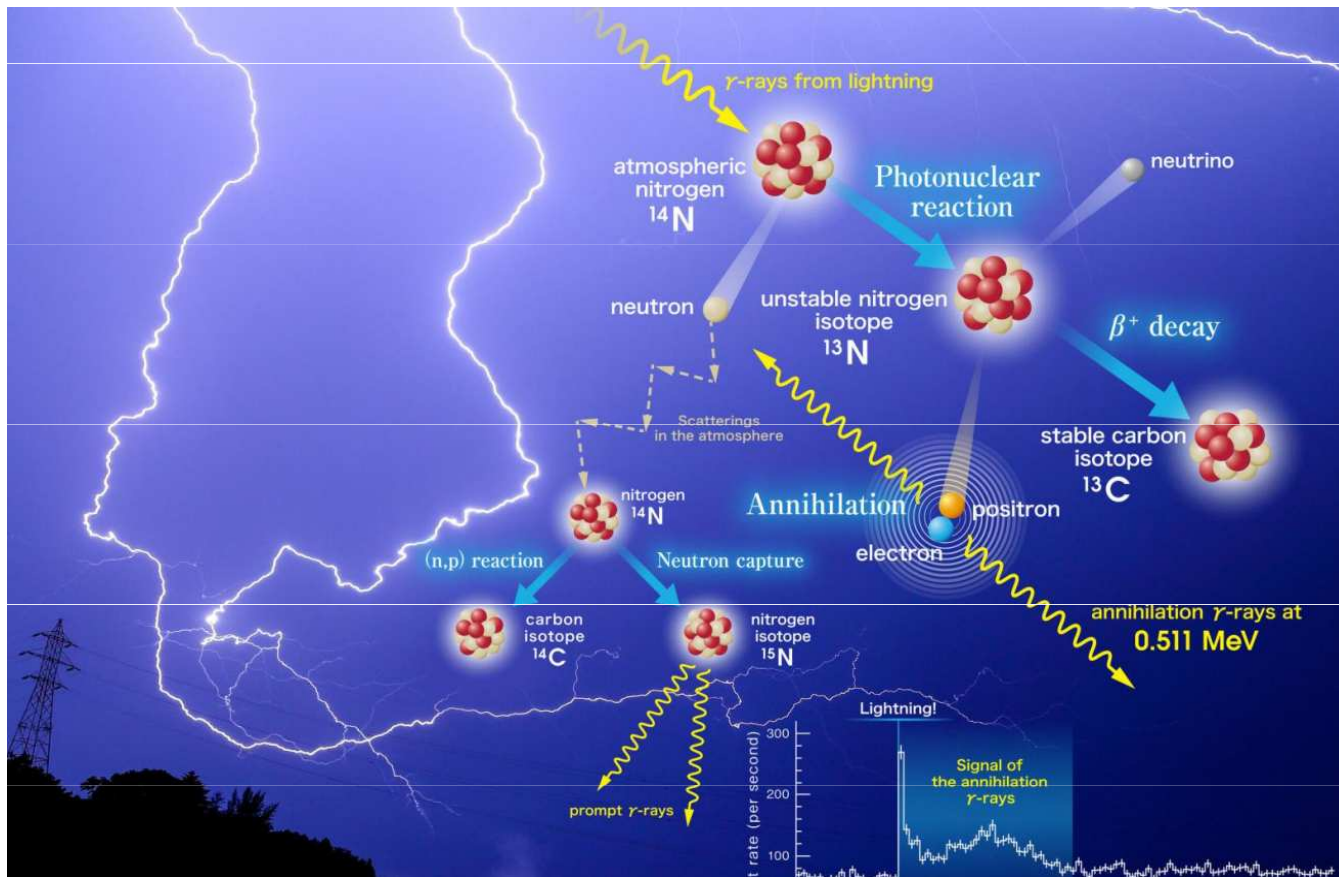
https://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/news/fermi-thunderstorms.html



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.

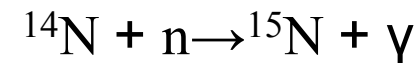
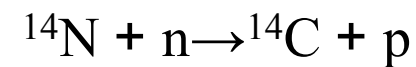
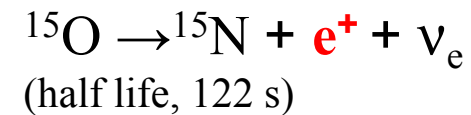
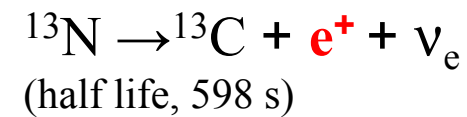
BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

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

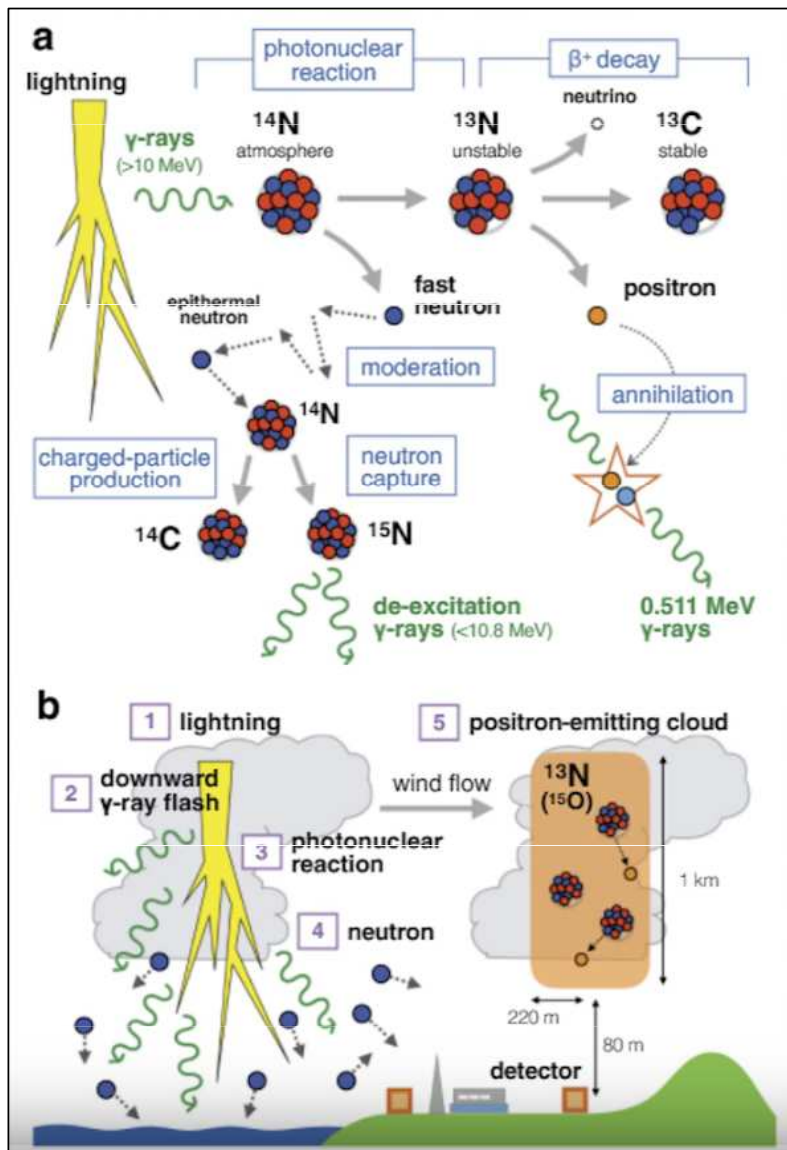


https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research/research_results/2017/171123_1.html

^{13}N and ^{15}O , decay gradually into stable ^{13}C and ^{15}N nuclei via β^+ decays:



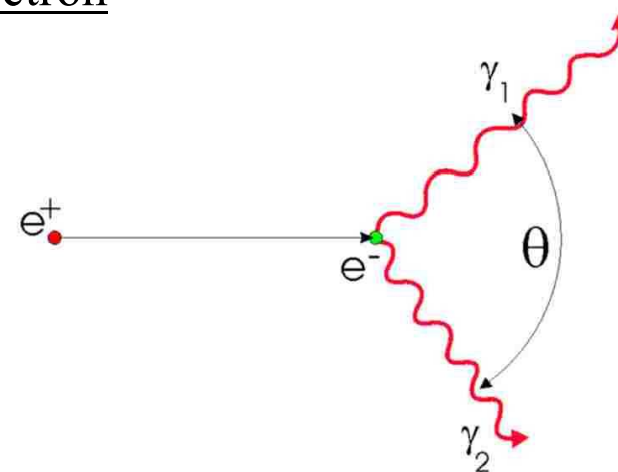
producing quasi-stable ^{14}C nuclei (with a half life of 5,730 years) without emitting any strong γ -rays



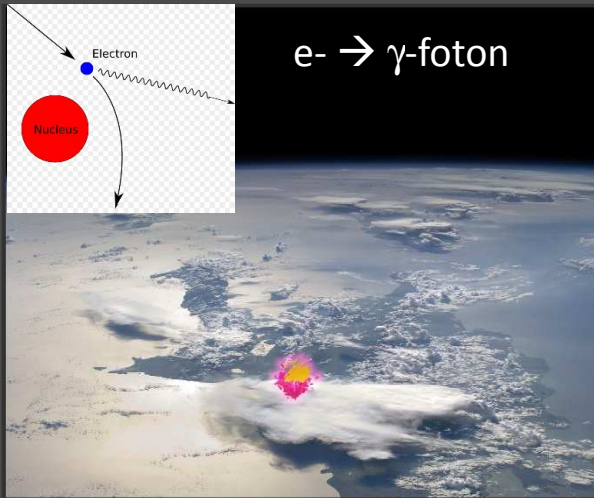
BLESKY JAKO ZDROJ e^+

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

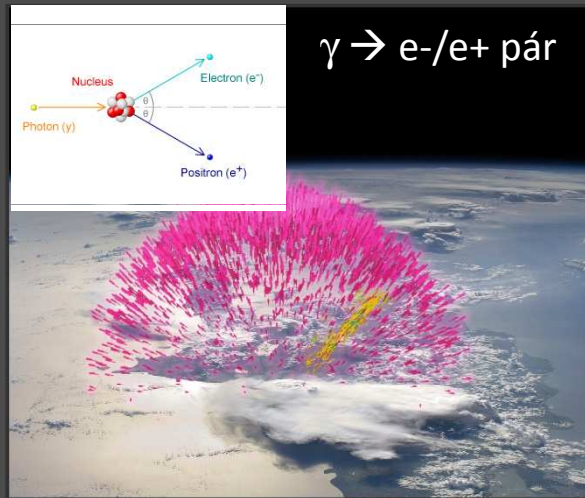
- region, or ‘cloud’, filled with these isotopes emits positrons for more than 10 min
- A **positron** emitted from ^{13}N or ^{15}O travels a few metres in the atmosphere, **annihilates** quickly in meeting an ambient electron
- ...and radiates **two 0.511-MeV photons**, the atmospheric mean free path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



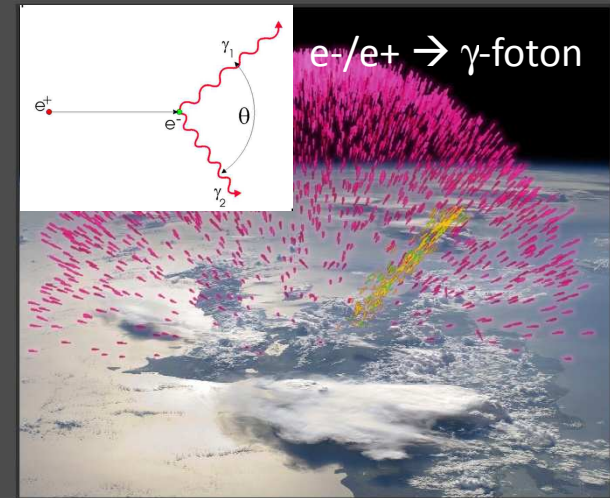
How thunderstorms launch particle beams into space



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



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



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

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.

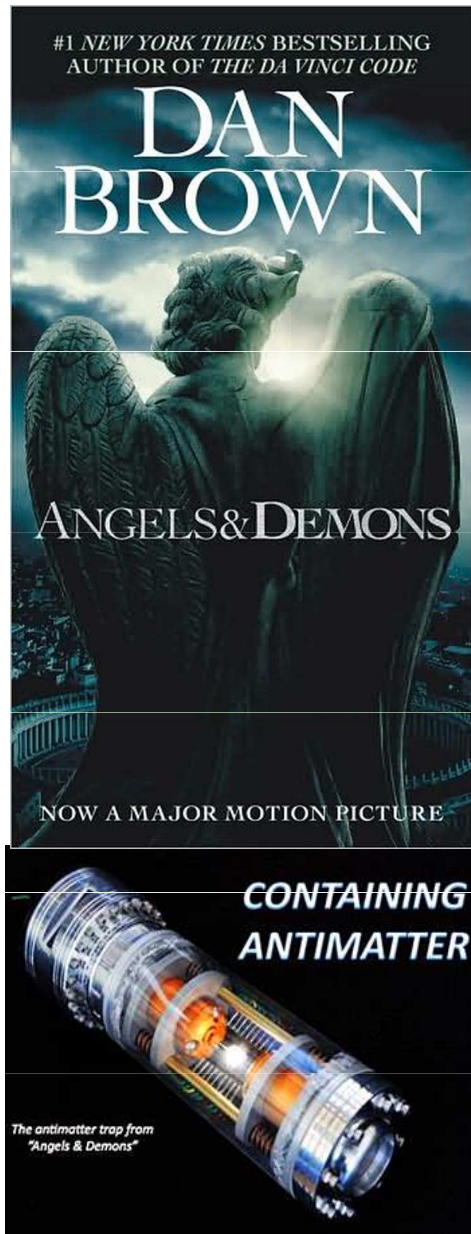
These images are based on a TGF simulation by Joseph Dwyer at the Florida Institute of Technology. This frame tracks the gamma rays and particles from a 0.2-millisecond-old TGF that began at an altitude of 9.3 miles (15 km).

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 8×10^{13} J
- a při termonukleární fúzi maximálně 3×10^{14} J
- Naproti tomu při anihilaci dojde k uvolnění veškeré energie z hmoty dle $E = mc^2$
- – tedy 9×10^{16} J z 1 kg
- Sic je zapotřebí stejné množství antihmoty + hmoty → $E = 2mc^2$
- ...tzn., pro 1 g antihmoty + 1 g hmoty
→ $2 * 0.001 \text{ [kg]} * 300\,000\,000^2 \text{ [ms}^{-1}\text{]} = 1.8 * 10^{14} \text{ J}$.
- Pokud 1 kt TNT = $4.184 * 10^{12}$ J, pak 1 g antihmoty + 1g hmoty = 43 kt TNT (ačkoliv ztráty díky produkci neutrin).

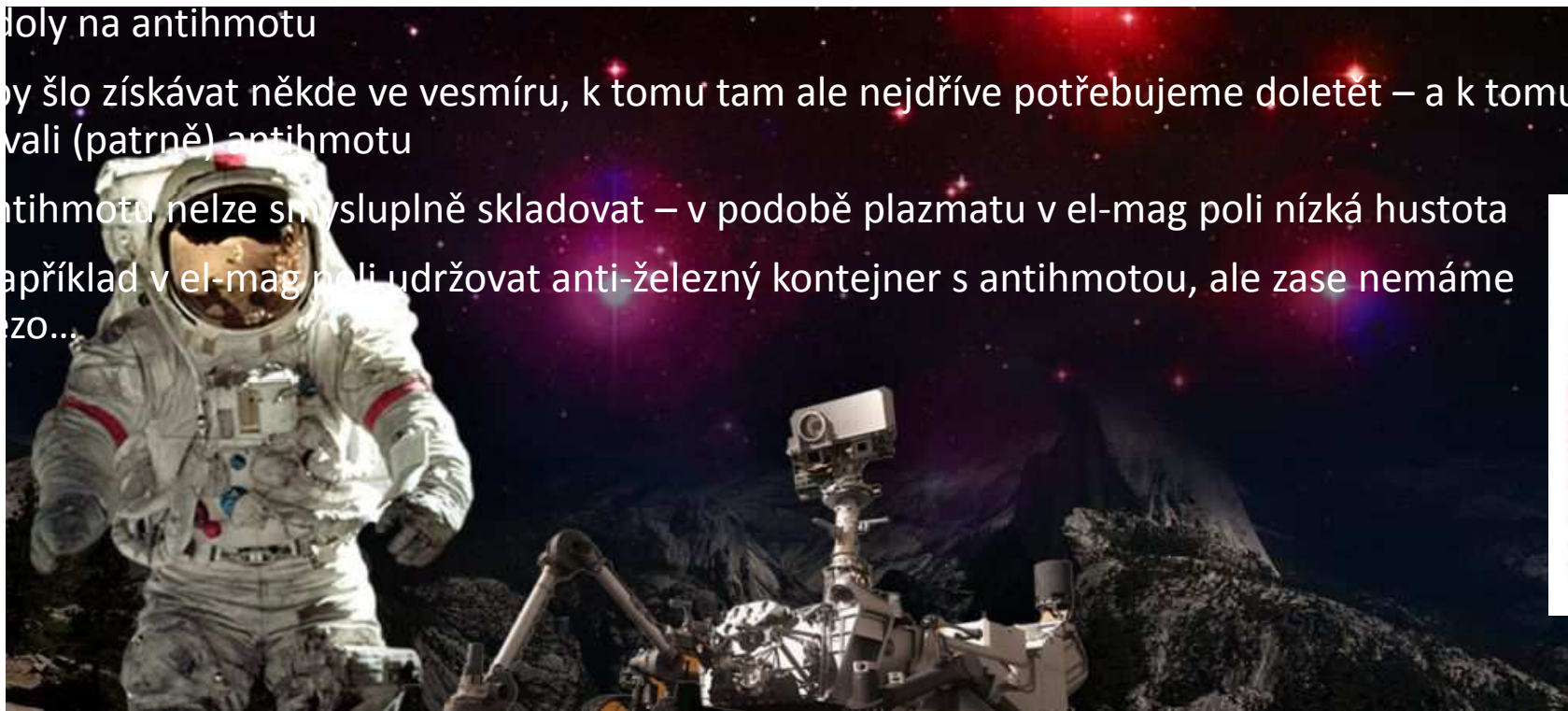
Přednáška prof. Vladimír Wagner: Antihmota ve vesmíru, 2016
https://www.youtube.com/watch?v=oyqus_9xPis

...doly na antihmotu

...by šlo získávat někde ve vesmíru, k tomu tam ale nejdříve potřebujeme doletět – a k tomu
...vali (patrně) antihmotu

...antihmotu nelze smysluplně skladovat – v podobě plazmatu v el-mag poli nízká hustota

...apříklad v el-mag poli udržovat anti-železný kontejner s antihmotou, ale zase nemáme
...ZO...



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


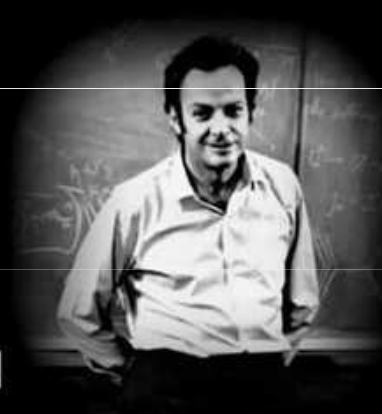
hvězdy

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.
	

SOJ

anti-deuteronu

prvé „anti-jádro“
z více elementárních částic

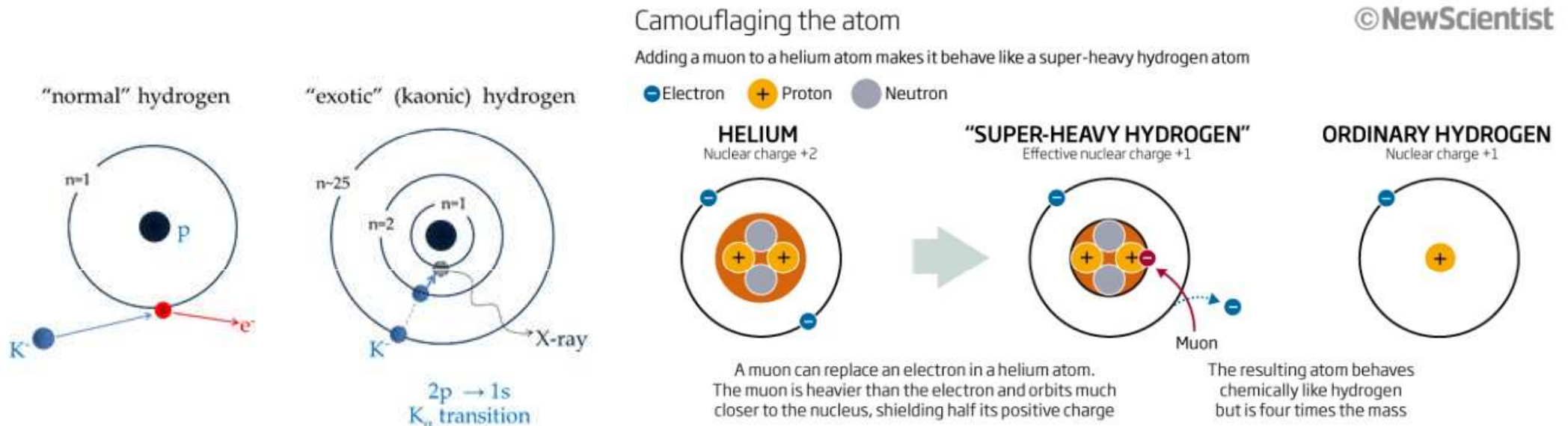
antiprotonu antineutronu
anti-jádro těžkého vodíku

antihmoty

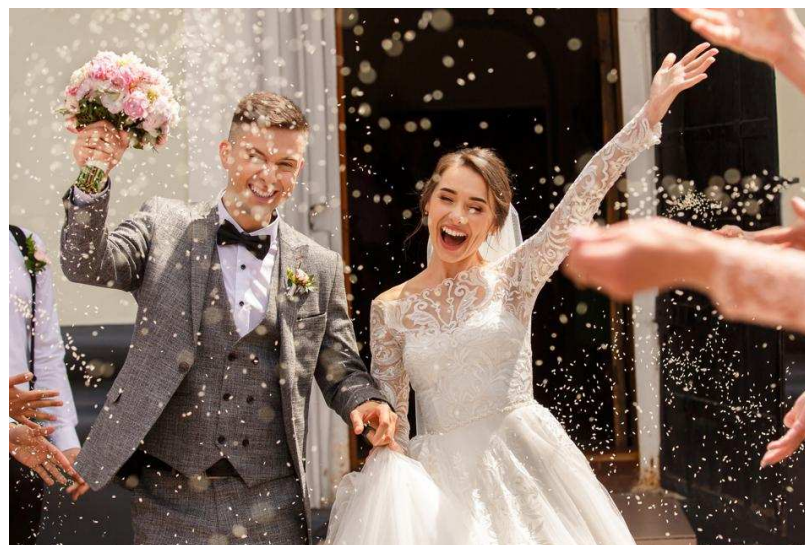
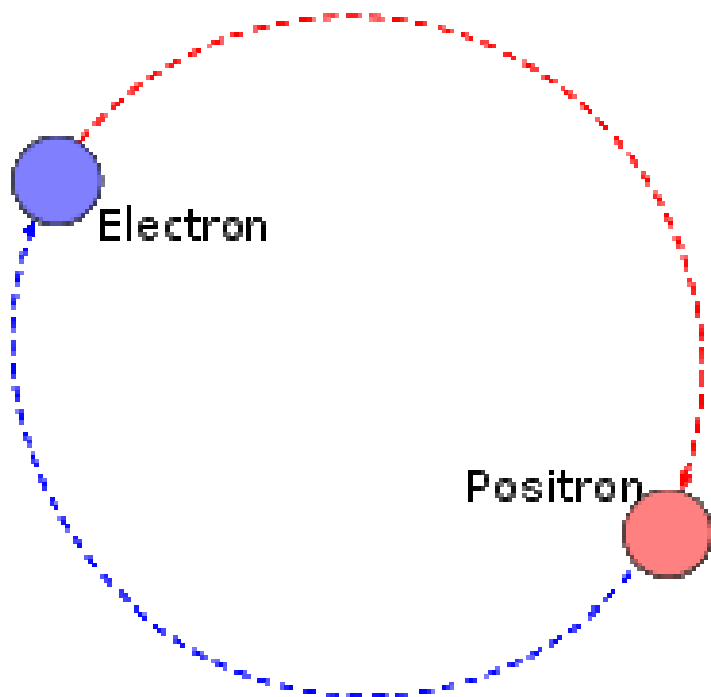


EXOTICKÉ ATOMY a ANTIATOMY

- 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 Λ**
- 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.

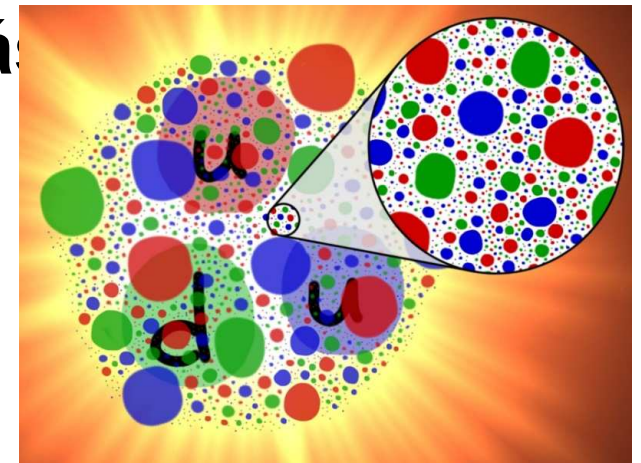
**Je to vada?
Je naděje je
z něčeho spočíst?**

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).



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.

	swanne preon	antipreon
positron	●●●●●●	
up quark	●●●●●●	●
down antiquark	●●●●●●	●●
neutrino, photon	●●●●●●	●●●
down quark	●●●●●●	●●●●
up antiquark	●●●●●●	●●●●●
electron		●●●●●●

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