

# Radiační biofyzika

## 3/2019

**Hmota, atom, atomové jádro, částice**

Martin Falk

# Antické Řecko - ATOMISMUS



**Leukippos**

(500 - 440 př. n. l.)

Zakladatel ATOMISMU

Již dále nedělitelné = ATOMOS

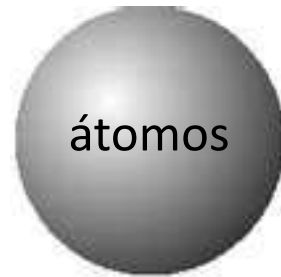


# Antické Řecko - ATOMISMUS

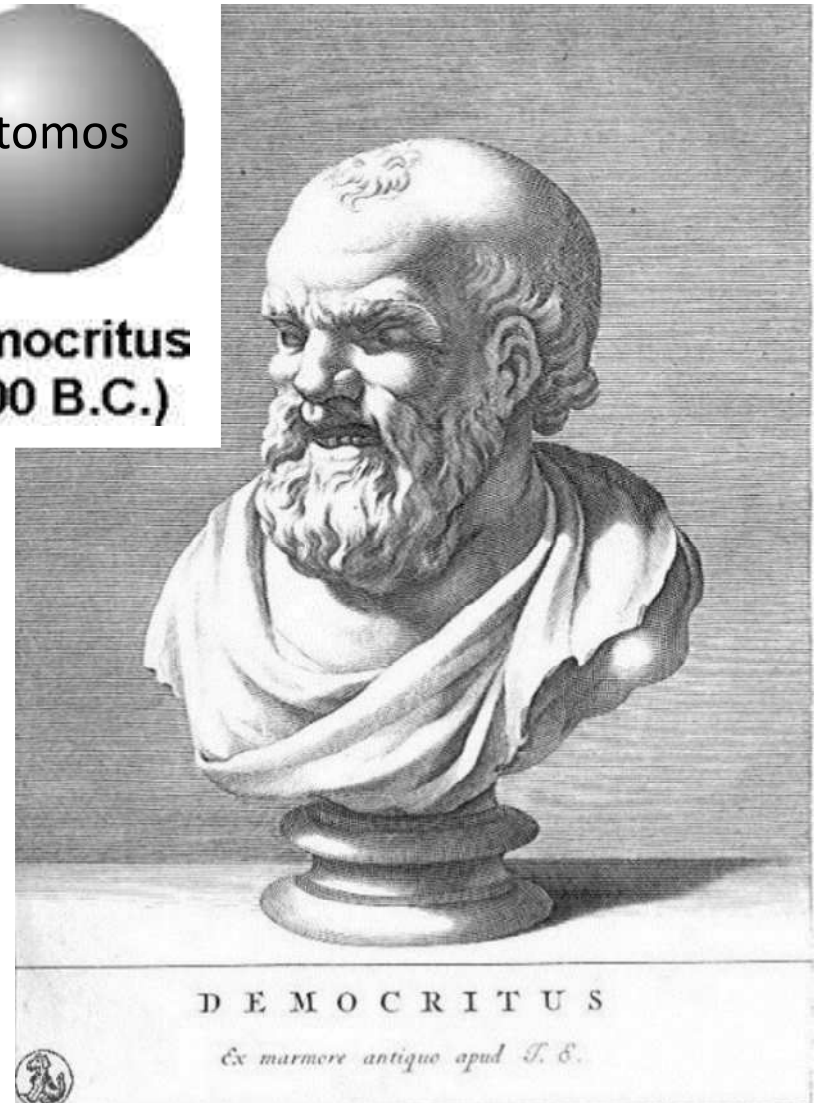
- **Démokritos** 460 - 370 př. n. l., žák Leukippose
- Nekonečné prázdno, v němž se pohybuje nekonečné množství atomů, které se liší tvary, polohou i uspořádáním

*„Není nic než atomy a prostor, všechno ostatní jsou jen domněnky“*

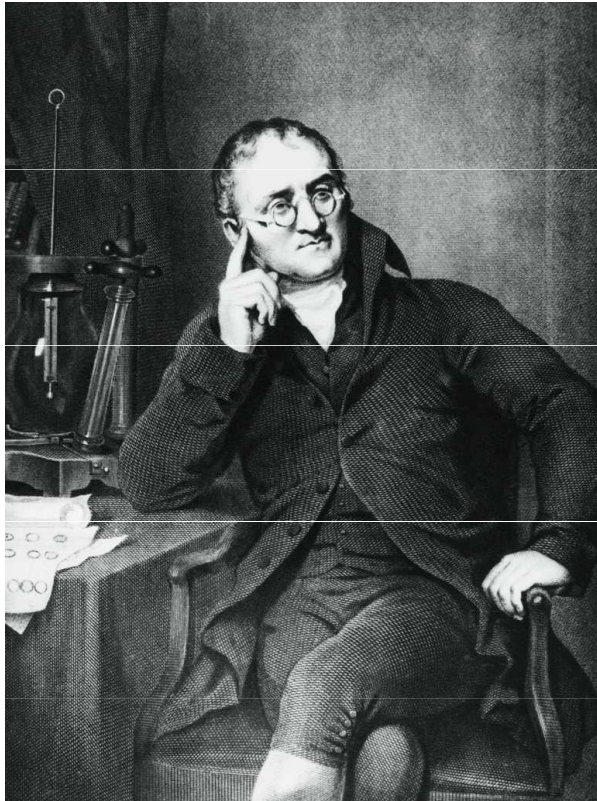
- Části existují v prázdnu, nezanikají a nepodléhají žádným vlivům tyto části byly označeny jako átomos (ἄτομος) – nedělitelné, nesmírně malé
- považoval atomy za neviditelné, nedělitelné, nezničitelné a neměnné, ze kterých se skládá vše, i bohové atomy se pohybují a střetávají



**Democritus**  
(400 B.C.)

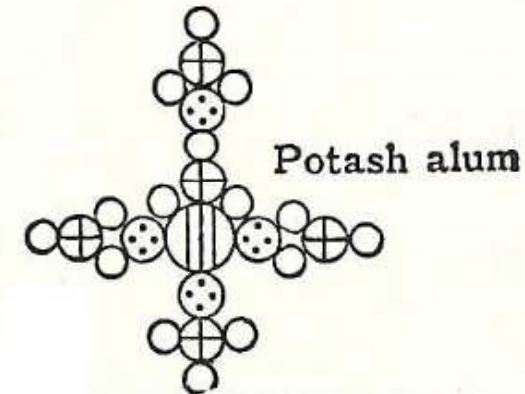
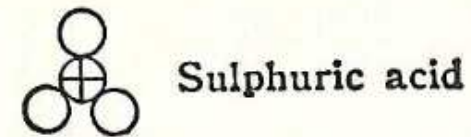


# DALTON, 1801 – ATOMOVÁ TEORIE



⊙	Hydrogen
⊖	Nitrogen
●	Carbon
○	Oxygen
⊕	Sulphur
⊗	Phosphorus
⊙	Alumina
⊖	Soda
⊖	Potash
⊙	Copper
⊖	Lead

⊙○	Water
⊙⊖	Ammonia
⊙●	Olefiant gas
○●	Carbonic oxide
○●○	Carbonic acid



- Vzkříšení myšlenky teprve počátkem 19. st
- **Jon Dalton** 1766 – 1844: všechny prvky se skládají z neviditelných atomů
- Jejich kombinací vznikají chemické sloučeniny



**JOHN  
DALTON**

# DALTONOVA ATOMOVÁ HYPOTÉZA



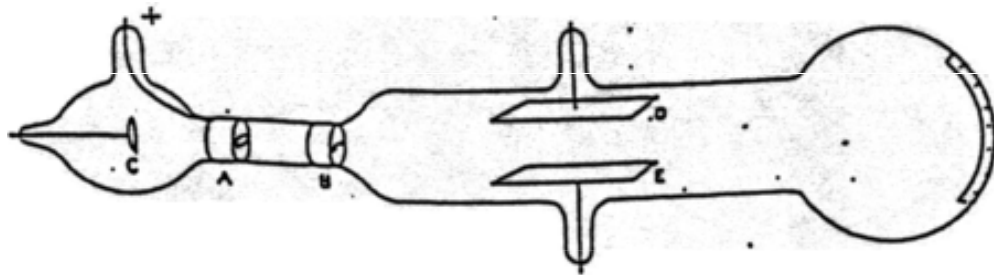
**AMEDEO  
AVOGADRO**

## postuláty

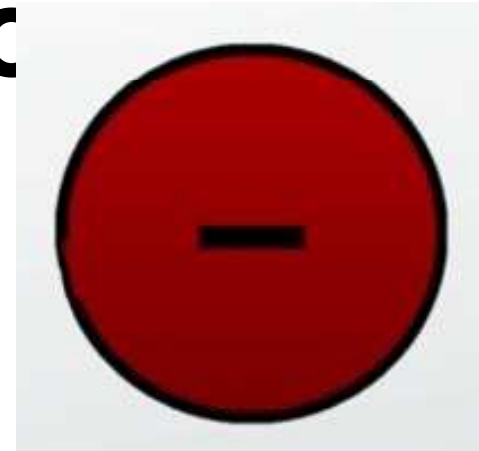
- prvky se skládají z velmi malých **dále nedělitelných** částic – atomů
  - **atomy téhož prvku jsou stejné**, atomy různých prvků se liší svými vlastnostmi (hmotností, velikostí,...)
  - v průběhu chemických dějů se atomy spojují, oddělují nebo přeskupují, **nemohou však vznikat a zanikat**
  - **sloučením dvou či více prvků vznikají chemické sloučeniny**, slučování probíhá jako spojování celistvých počtů atomů těchto prvků
- 
- **Amedeo Avogadro** (1811) později nazval složitější částice skládající se z atomů pojmem **MOLEKULA**
  - nedělitelnost atomů (dnes platí pouze z chemického hlediska)

# Objev elektronu – první částice menší než atc

- Josef Jon Thomson, anglický fyzik
- 1897 - Objev elektronu (první, záporná částice) při experimentech s katodovou trubicí (Nobelova cena za fyziku 1906)

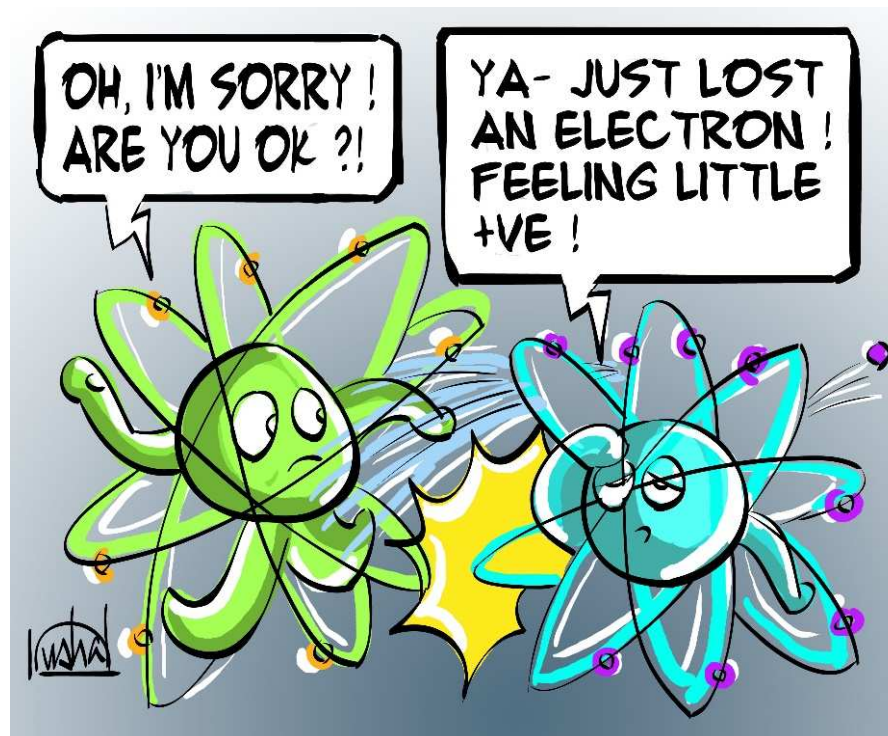


- **První menší částice než atom** → (1897) vyvrácena nedělitelnost atomu (dále už platí jen z chemického pohledu) → **spuštění debat o stavbě atomu**



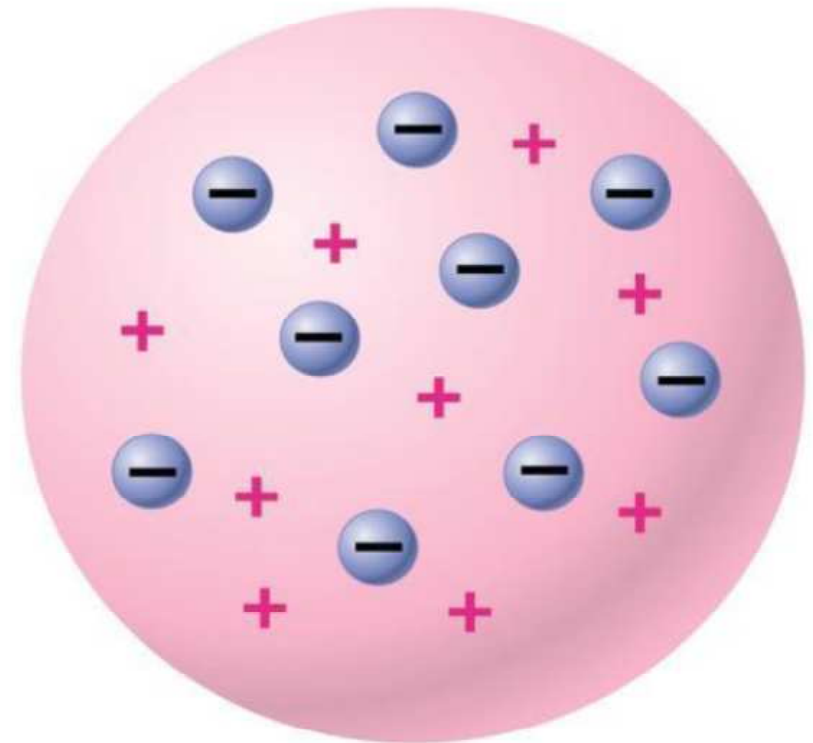
# Elektron a první naivní modely atomu

- za skutečně elementární částici se tak na přelomu 19. a 20. století začal považovat elektron
- velikost náboje elektronu byla přitom přirozeně nazvána elementárním nábojem.
- záhy bylo také zřejmé, že **elektrony nesou jen velmi malou část hmotnosti atomu**, neboť např. nejjednodušší (jednoelektronový) atom – atom vodíku – je o tři řády těžší než elektron.
- **to vede k myšlence, že právě kladně nabitá složka dodává atomu téměř veškerou jeho hmotu**



# THOMSONŮV PUDINKOVÝ MODEL

- Joseph J.Thomson – objev  $e^-$  (*zkoumal katodové záření*) → fyzika částic
  - lehká částice se záporným elektrickým nábojem → první model atomu (1903)
- Thomsonovy představy o struktuře (1897)
  - hlavní část hmotnosti atomu představuje látka s kladným elektrickým nábojem
  - **hmotnost a kladný elektrický náboj jsou spojitě rozloženy v celém objemu atomu**
  - **velmi lehké elektrony jsou rozprostřeny uvnitř kladně nabitě látky v rovnovážných polohách**
  - celkový elektrický náboj je nulový
- nedostatky
  - počet elektronů není přesně určen
  - nevysvětluje původ kladného náboje
  - nevysvětluje soudržnost kladného náboje i přes Coulombovy elektrické síly
  - frekvence elektromagnetického záření vypočtené dle modelu nesouhlasí s experimenty





# Další mezníky: objev $p^+$ a $n^0$



Ernst Rutherford

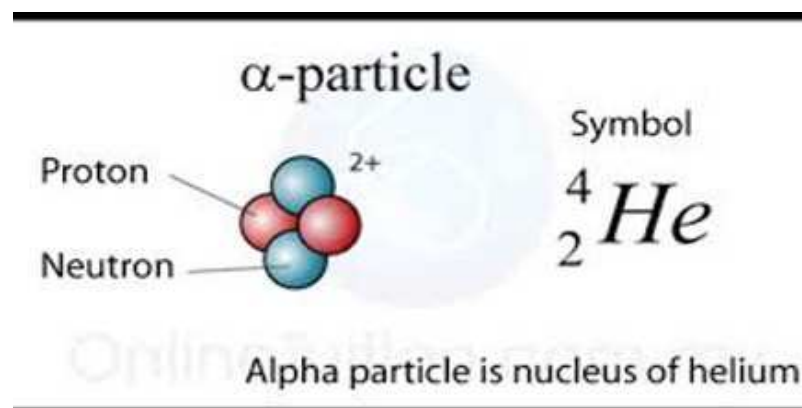


Jára Cimrman

- **Ernst Rutherford**, novozélandský fyzik, 1871 – 1937
- 1897 rozlišil podle pronikavosti dva druhy radioaktivního záření, snadněji absorbovatelné záření alfa a pronikavější záření beta. Zjistil **odklon záření alfa a beta v magnetickém a elektrickém poli**.
- → 1899 **objevil dva typy radioaktivity**
- 1900 Rutherford zjistil, že neaktivnější prvek není samotné rádium, ale radioaktivní plyn vznikající v důsledku rozpadu rádia, který se dnes nazývá **radon**. Spolu s Fredericem Soddyem přezkoumali vlastnosti tohoto plynu a zjistili, že svými vlastnostmi se podobá vzácným plynům. Tak byla poprvé objevená samovolná přeměna jednoho chemického prvku v jiný, a byl objeven nestálý prvek radon.

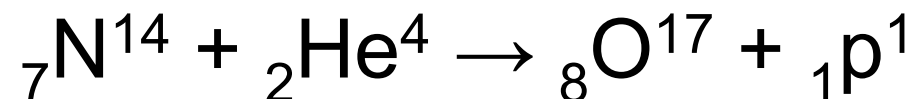
# Další mezníky: Rutherford

- V roce 1903 si uvědomil, že typ radiace objevený (ale nepojmenovaný) francouzským chemikem Paulem Villardem při pokusech s radiem v roce 1900, nemůže být alfa či beta zářením, protože je mnohem pronikavější → pojmenoval tento nový druh záření jako **paprsky gama**.
- Když v roce 1904 William Ramsay a Frederic Soddy zpozorovali nápadný výskyt helia při radioaktivních sloučeninách rádia, Rutherford vyslovil domněnku, že **helium se tvoří z rádia**, což i roku 1909 spolu s Roydsem experimentálně potvrdil.
- Dále určil, že elektrický **náboj alfa částice je 2+**. Spolu s **Thomasem Roydsem** provedli pokusy, kterými určili, že **alfa částice jsou jádra atomů helia**, tedy  ${}^4_2\text{He}^{2+}$



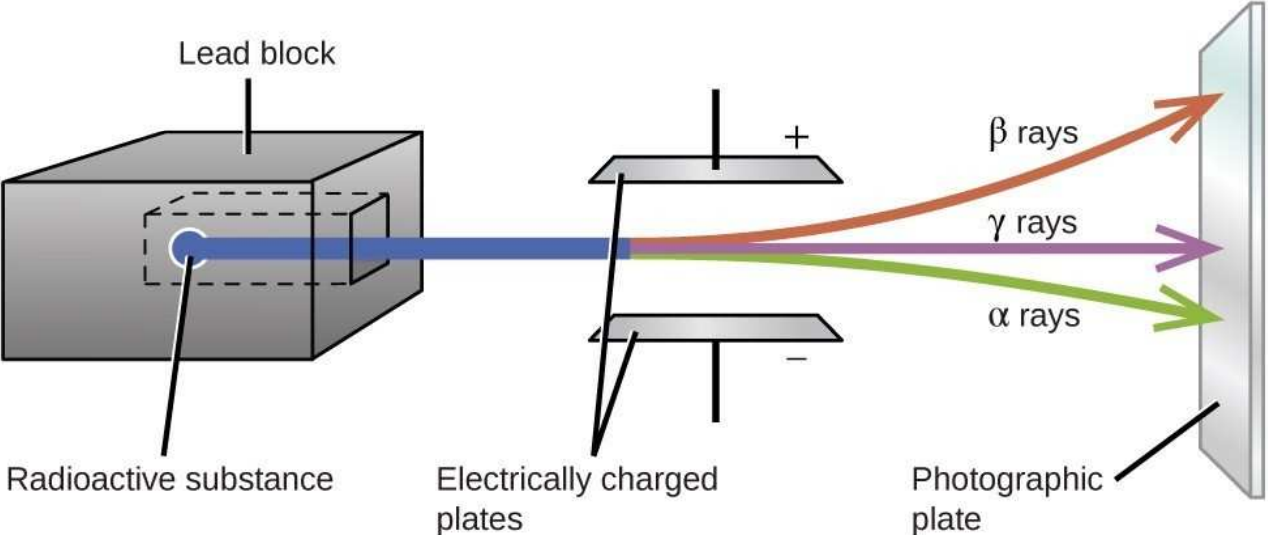
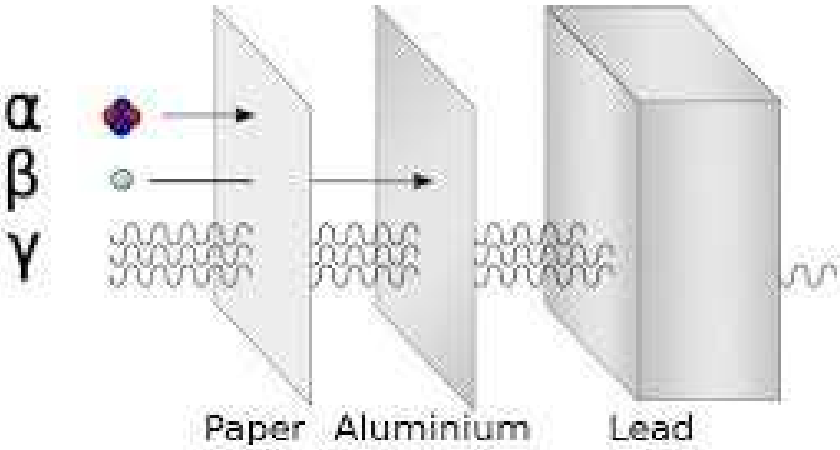
# Další mezníky: Rutherford

- 1919 **první transmutace** (převodl dusík na kyslík)


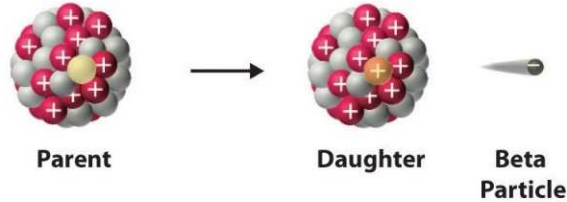
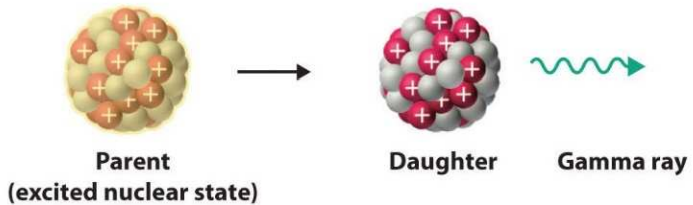


- Pokračoval ve výzkumu záření alfa, spolu s **Hansem Geigerem** objevili metodu detekce alfa záření pomocí záblesků na stínítku ze sulfidu zinečnatého a ionizační komoru, která umožňuje počítat alfa částice.
- Zavedl pojem **poločas rozpadu**
- 1908 **Nobelova cena za chemii**, za výzkum rozpadu prvků a chemii radioaktivních látek
- navrhl metodiku radioaktivního datování.

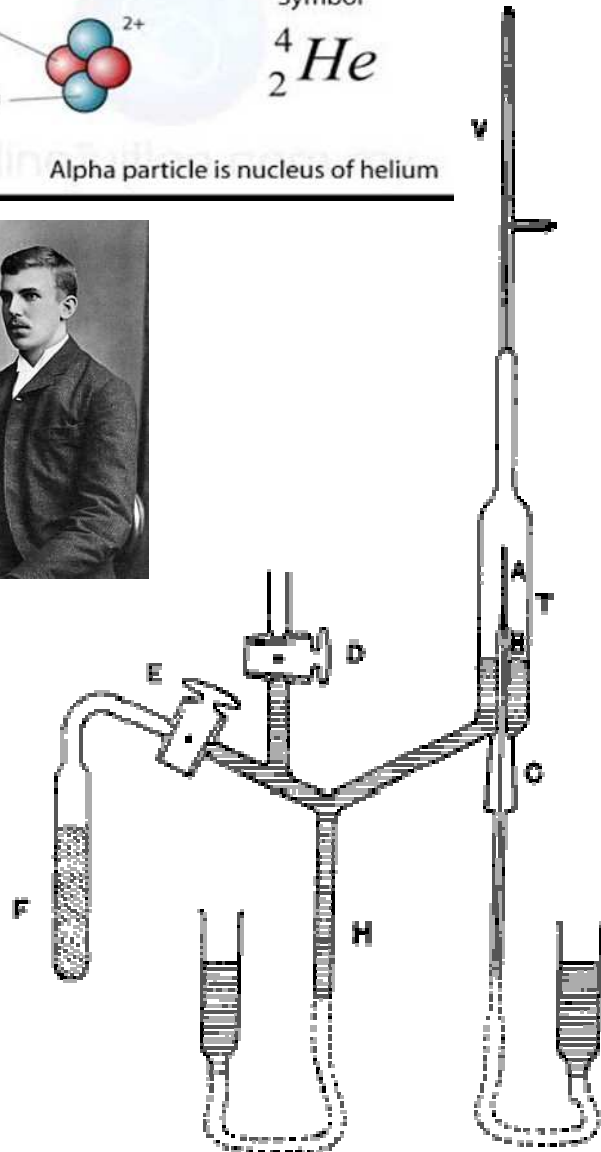
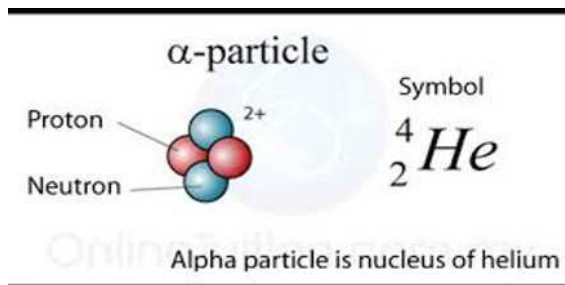
# Ernst Rutherford



# Tři druhy ionizujícího záření

Decay Type	Radiation Emitted	Generic Equation	Model
Alpha decay	${}^4_2\alpha$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X' + {}^4_2\alpha$	 <p>Parent → Daughter + Alpha Particle</p>
Beta decay	${}^0_{-1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A}_{Z+1}X' + {}^0_{-1}\beta$	 <p>Parent → Daughter + Beta Particle</p>
Gamma emission	${}^0_0\gamma$	${}^A_ZX^* \xrightarrow{\text{Relaxation}} {}^A_ZX' + {}^0_0\gamma$	 <p>Parent (excited nuclear state) → Daughter + Gamma ray</p>

# Záření alfa = jádra hélia



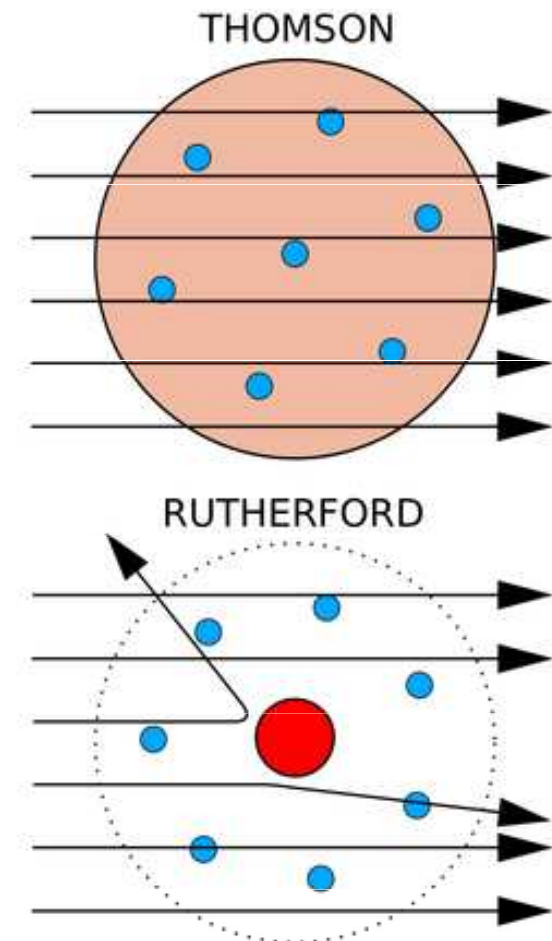
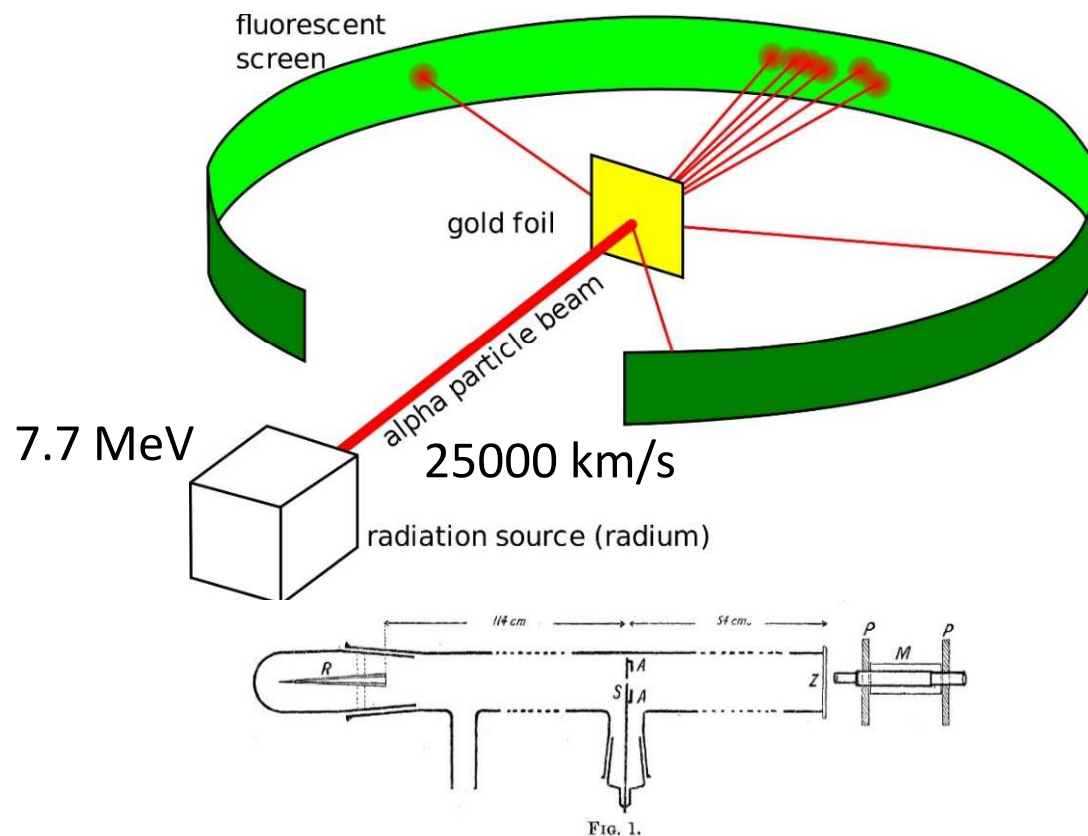
Skleněnou trubičku (A) z tenkých stěn naplnili radonem, jako zdrojem částic alfa. Tloušťka stěn byla asi 0,01 mm, **většina částic alfa jimi prošla. Atomy radonu s menší kinetickou energií stěnami difundovat nemohly.** Tato rourka byla obklopena ještě širší trubicí (T), ke které přitavili výbojovou trubicí s elektrodami (V). **Částice alfa hromadící se v širší trubicí (případně ve rtuti) (T) se neutralizovaly na atomy helia,** které difundovaly do evakuovaného prostoru a se stlačením přemístily do kapilární výbojové trubice (V). Po šesti dnech při elektrickém výboji ve vyzařovaném světle **zjistili spektrální čáry helia.** Tím bylo dokázáno, že částice alfa jsou ionty, tj. jádra helia.

D – ventil pro napojení pumpy pro evakuaci trubice v  
F – dřevěné uhlí pro dokončení evakuace trubice v (chlazené vzduchem)  
H – zásobník rtuti – rtuť se přiváděla do trubice T až po spodek trubice A

# Rutherfordův (Geigerův-Marsdenův) experiment, 1909

Alfa částice vystřelované proti tenké Au fólii: **8000 částic prošlo : 1 se odrazila**

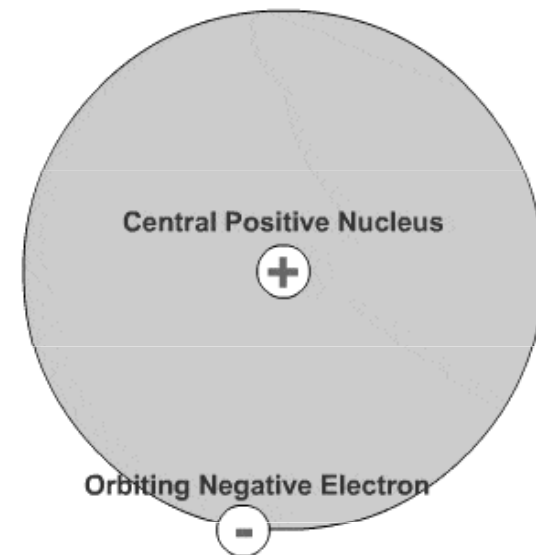
Odraz možný pouze při interakci s něčím mnohem masívnějším, co zabírá pouze malou část objemu atomu



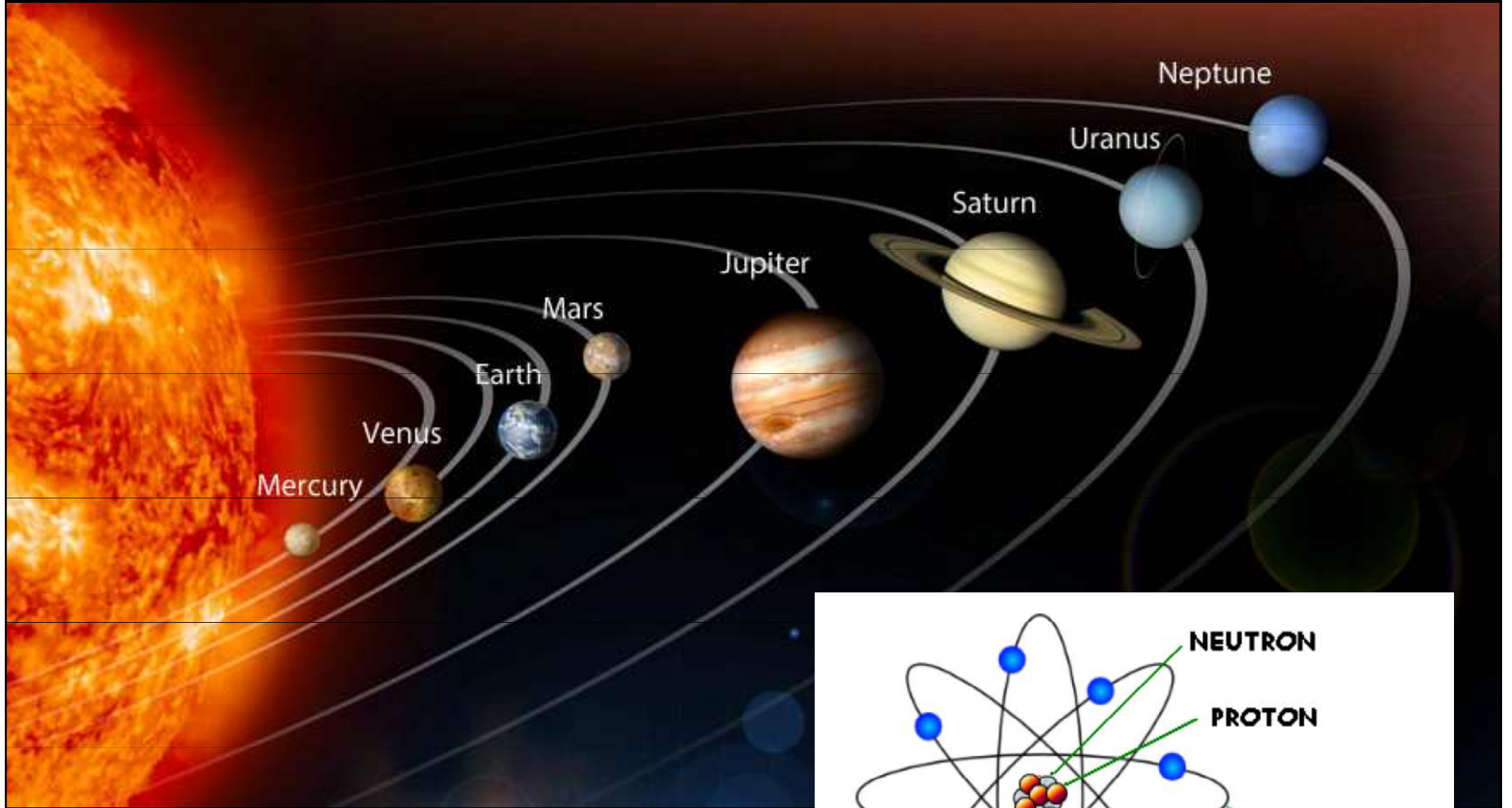
The schematics for the original two meter long tube that Geiger constructed and used to first detect the scattering of alpha particles by the atomic nucleus. At the point labeled R is the radon particle emission source, and Z the detector screen. (Source: Wikimedia Commons)

# Ernest Rutherford – Model atomu

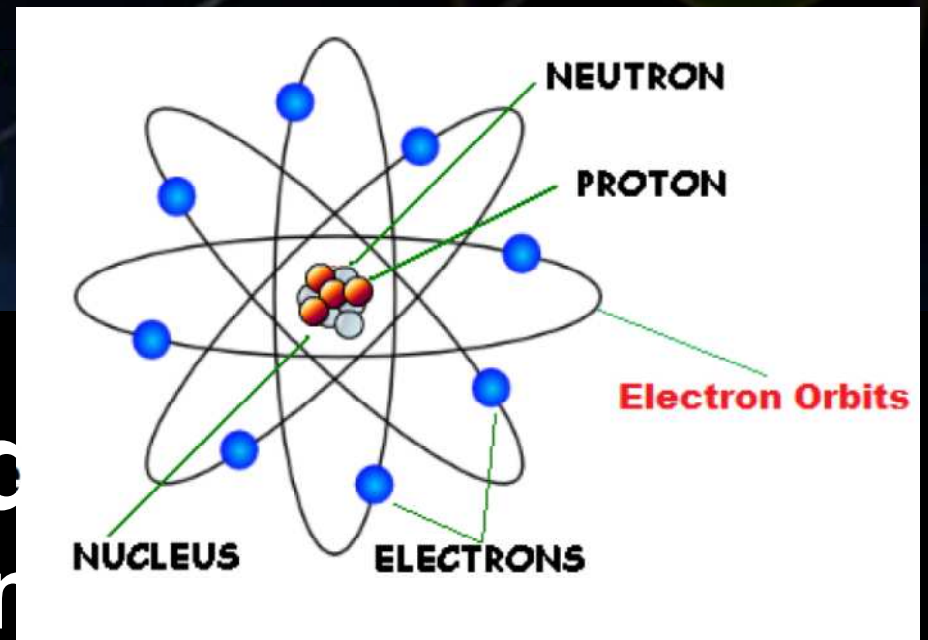
- 1911 Atom se skládá ze dvou částí:
  - a) **jádro**, kde je uložena kladně nabitá hmota atomu
  - b) **obal**, tvořený elektrony
- bývá často označován jako **planetární model atomu**, ve kterém se elektrony pohybují na stabilních drahách (**orbitách**), díky působení přitažlivé síly
- **Elektrony elektrostaticky přitahovány k jádru** → již se nemůže jednat o statické „hrozinky v pudinku“, musí se pohybovat
- jádro obsahuje jedinou částici, která je přítomna i v jiných atomech → **objev protonu**



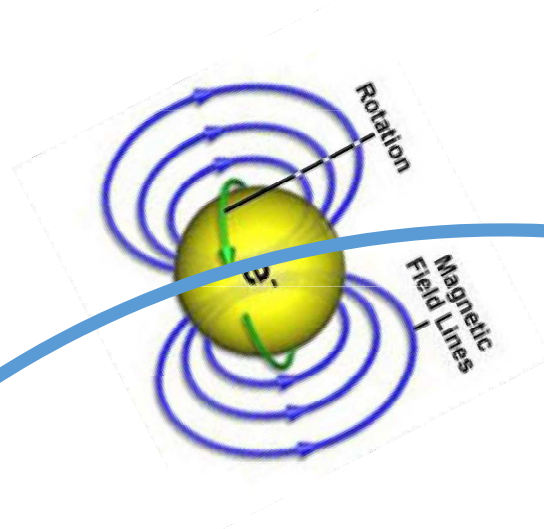
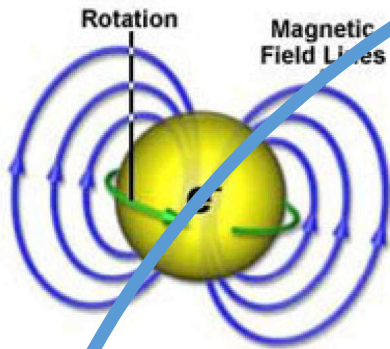




# Ernest Rutherford Planetární model atomu

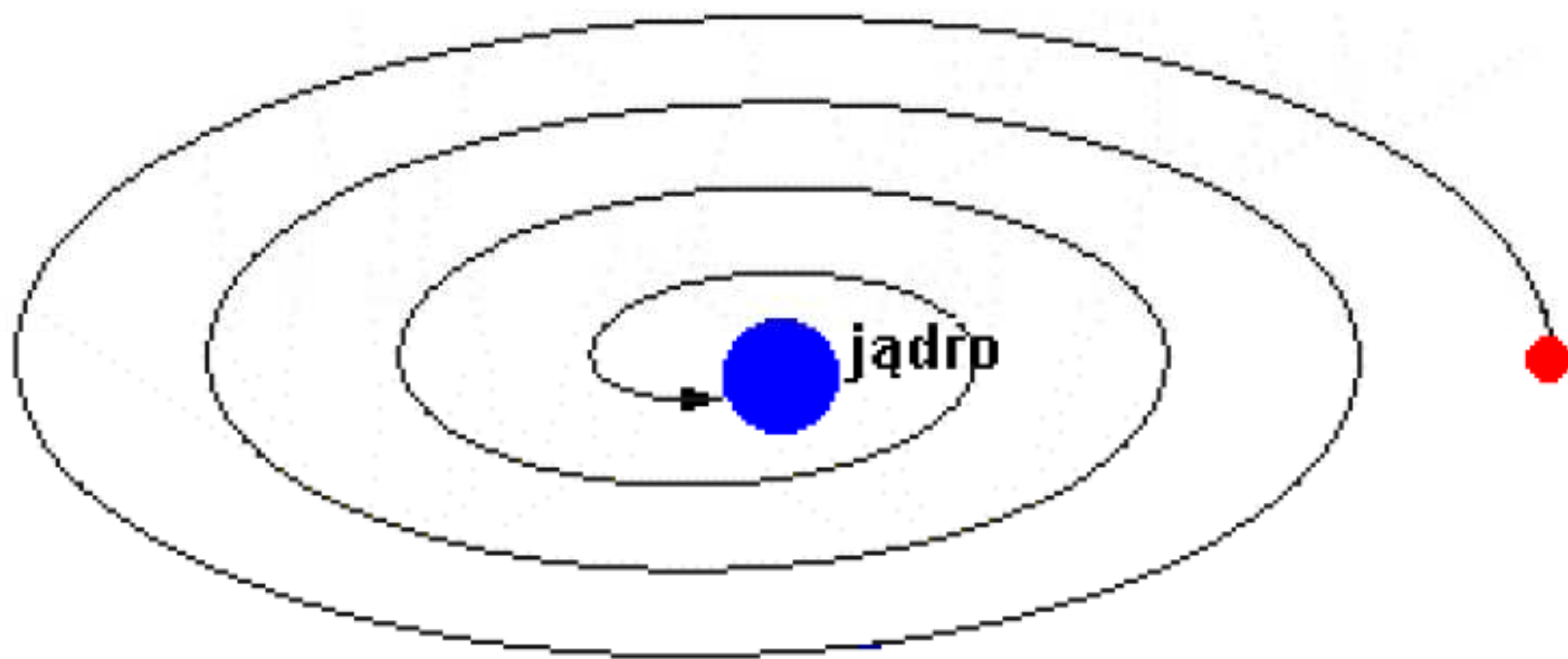


# Planetární model atomu – Problémy



- Jenže problém: **elektron má náboj**
- Když se náboj pohybuje (oběh + rotace), generuje magnetické pole
- Magnetické pole se ovšem také pohybuje (mění), takže generuje elektrické pole atd.
- **Vyzařováním el-mag ple ztrácí elektron kinetickou energii** a měl by tedy postupně spirálně padat do jádra
- z modelu navíc vyplývá spojité spektrum, zatímco experimentálně získaná spektra atomů jsou čárová

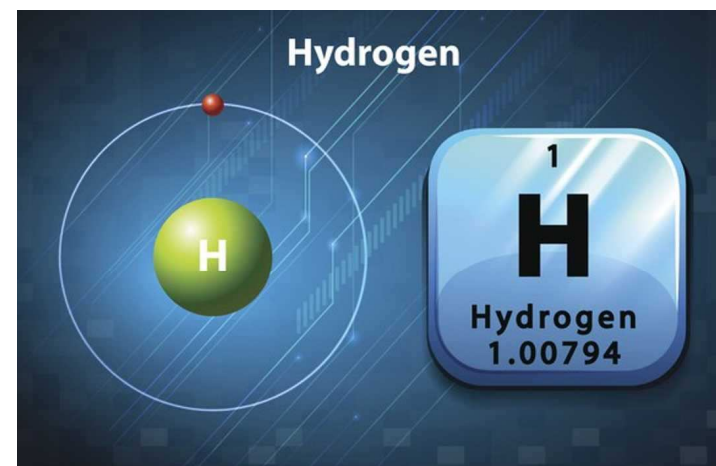
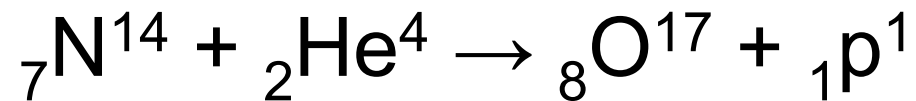
# Planetární model atomu – Problémy



- Spočítáno, jak rychle by k tomu elektrickému kolapsu atomu došlo – kdyby to bylo např. 20 mld let, nemusel by to být ještě problém –
- jenže **vyšlo  $10^{-10}$  s- $10^{-8}$  s**, což evidentně odporuje skutečnosti (atomy tu stále jsou)

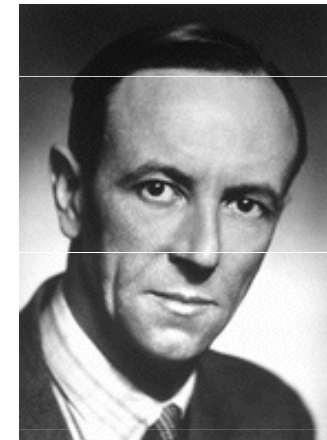
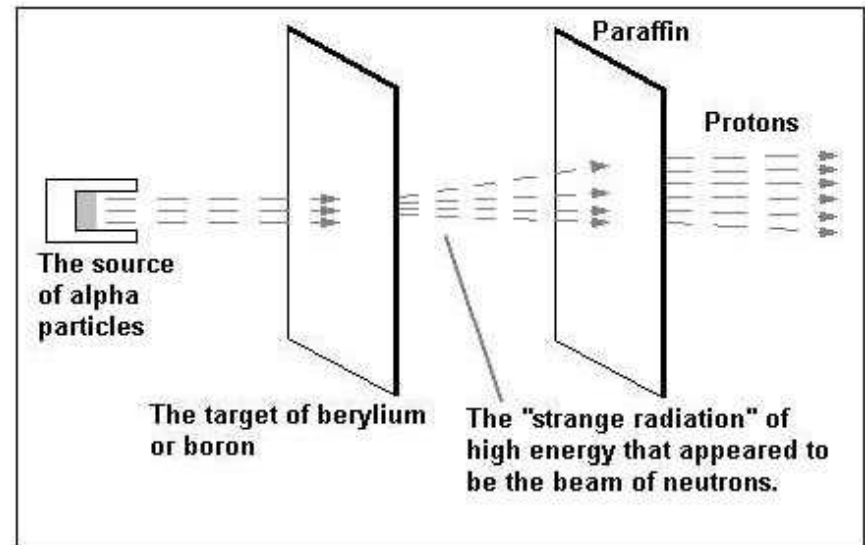
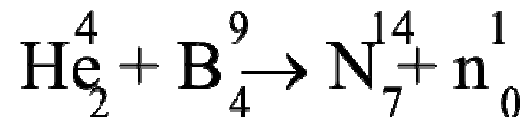
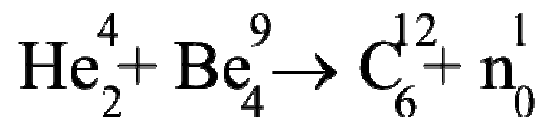
# A zase ten Rutherford - PROTON

- Až do roku **1918** se hovořilo pouze o elektronu a kladně nabitým jádru.
- Pak ale **E Rutherford objevil p+**,
- Vstřeloval alfa částice do plynného dusíku a ty se ve scintilačním detektoru jevily jako jádra vodíku.
- Myslel si, že **jádra vodíku, o nichž věděl, že mají atomové číslo 1**, jsou hledané elementární částice. Pojmenoval je tedy **PROTON**, z řeckého protos, první.



# 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.
- Již v roce 1930 Walter Bothe a H. Becker bombardovali berylium  ${}^9_4\text{Be}$   $\alpha$  částicemi a pozorovali emisi energetického záření, které se nezahýbalo v magnetickém poli. Zprvu se domnívali, že se jedné o  $\gamma$  záření. Později manželé Curieovi zjistili, že toto záření vyráží protony z parafínu. Chadwick pochopil, že probíhají reakce (níže). a Hmotnost neutronu určil ze znalosti hmotností  ${}^{11}_5\text{B}$  a  ${}^{14}_7\text{N}$  určil.



# Bohrův model atomu

- **Niels Bohr** dánský fyzik, rok 1913. (1922 NC za fyziku)
- PROBLÉM: Rutherfordův planetární model atomu není stabilní podle klasických zákonů fyziky (Maxwellova elektrodynamika).
- CO S TÍM: N. Bohr vylepšil Rutherfordův model tím, že do něj začlenil Planckovu teorii o kvantování energie. Prohlásil, že elektromagnetické zákony uvnitř atomů neplatí, tj. že známé fyzikální zákony nejsou aplikovatelné v oblasti mikrosvěta. → **první kvantový model atomu**
- MAX PLANCK: Již v roce 1900 objevil, že záření pohlcované nebo vydávané atomy nemůže mít libovolnou energii, ale je vždy pohlcováno nebo vydáváno v určitých kvantech, tato energie je úměrná frekvenci a tzv. Planckově konstantě

$$E = h * \nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$\nu$  [ny:] = frekvence záření

$h$  = Planckova konstanta =  $6.626 \cdot 10^{-34}$  Js

$c$  = rychlost světla

$\lambda$  = vlnová délka záření

# Bohrův model atomu

- Na základě experimentů a s tehdy vznikající kvantovou mechanikou **vylovil 3 zásadní (Bohrovy) postuláty** (které jsou v rozporu s klasickou mechanikou tak i s elektrodynamikou).

- **Postuláty:**

1) elektrony obíhají atomové jádro **jen na pevně daných dovolených kvantových drahách s přesně určenými diskrétními hodnotami poloměru**. Možné jsou pouze takové dráhy, kde moment hybnosti obíhajícího elektronu odpovídá celistvým násobkům  $h/2\pi$

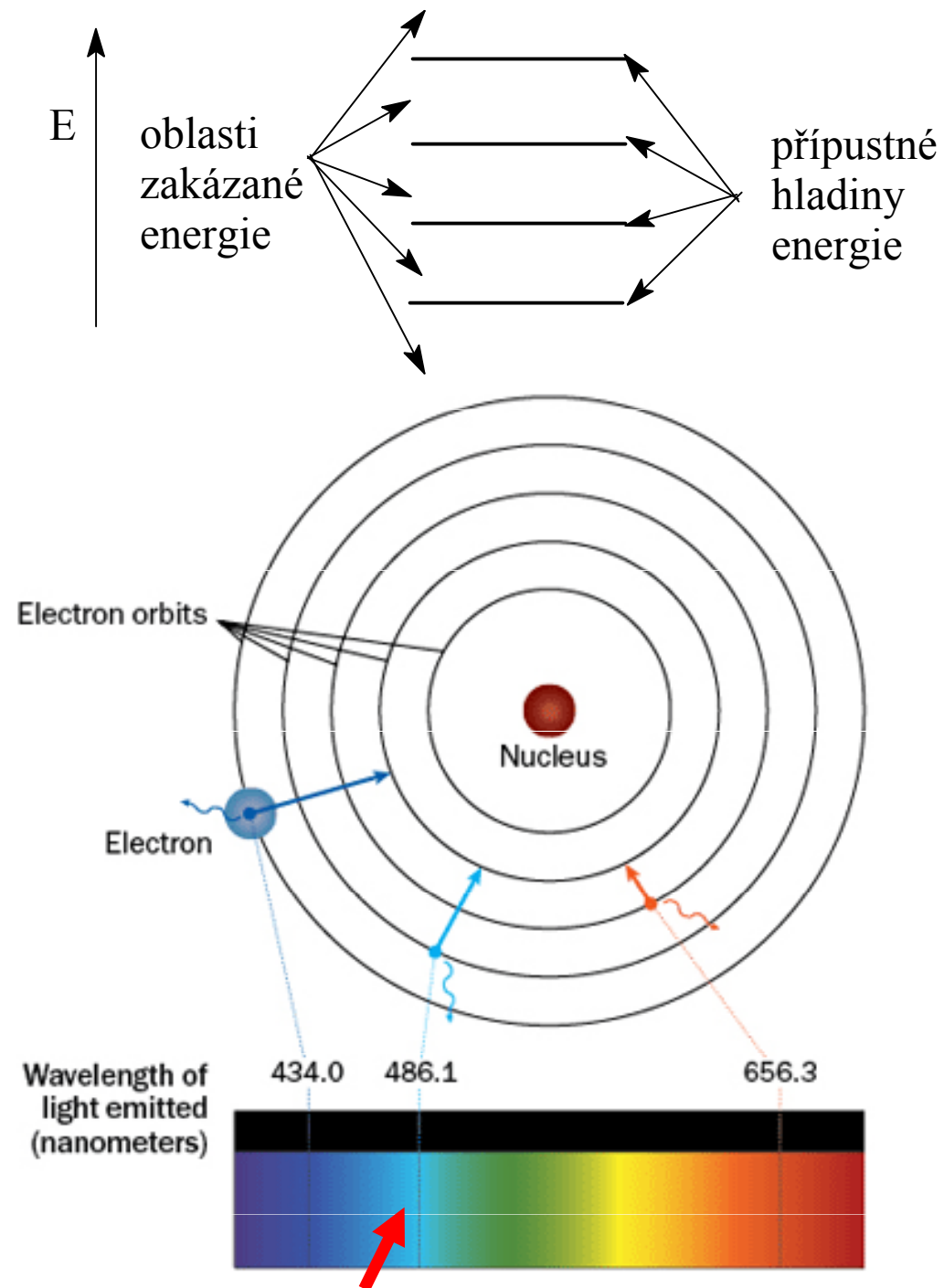
2) Dráhy (elektronové orbitaly), na nichž je splněn první postulat, **jsou stacionární. Elektron při pohybu na těchto drahách nevyzařuje elektromagnetické vlny** a jeho energie je stálá.

3) Energie může být vyzářena nebo přijata pouze při přechodu na jinou kvantovou dráhu. Přejde-li  $e^-$  na dráhu na níž bude mít nižší energii, je atomem **vyzářena přebývající energie v podobě fotonu**.

Platí:  $h\nu = E_i - E_f$ , kde je  $E_i$  energie počátečního stavu a  $E_f$  energie koncového stavu. Atom tedy emituje nebo absorbuje záření po kvantech.

# Bohrův model atomu

- planetární model doplněný o tři Bohrovy postuláty, které úspěšně popisují nejdůležitější kvantové vlastnosti stavby atomu (mj. diskrétní (nespojité) čárová spektra záření vysílaného atomy), ovšem nevysvětlují je.
- Model je tedy víceméně v souladu s tím, co pozorujeme v přírodě, ale není v pořádku (chybí vysvětlení) – to až za 25 let.
- Je to navíc model plošný a nevysvětluje štěpení spektrálních čar



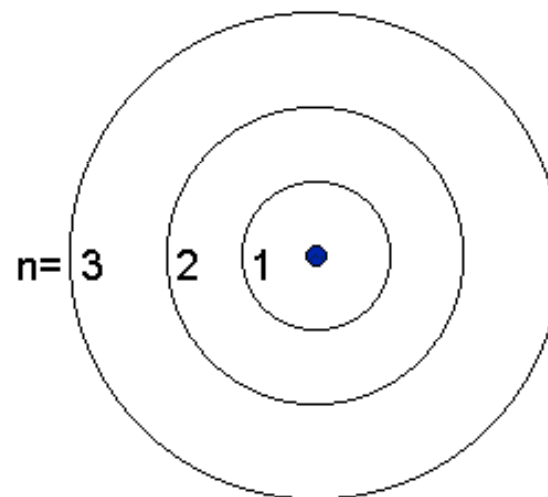
Při vyšším rozlišení je ale pozorováno „štěpení“ spektrálních čar



# Hlavní kvantové číslo ( $n$ )

- Bohr označil energetické hladiny (tj. orbity, slupky) písmenem  $n$ .
- $n$  – hlavní kvantové číslo – zásadním způsobem určuje energii elektronu v atomu
- Může nabývat hodnot  $n = 1, 2, 3, 4, \text{etc...}$

Electronic "Orbits" in an Atom

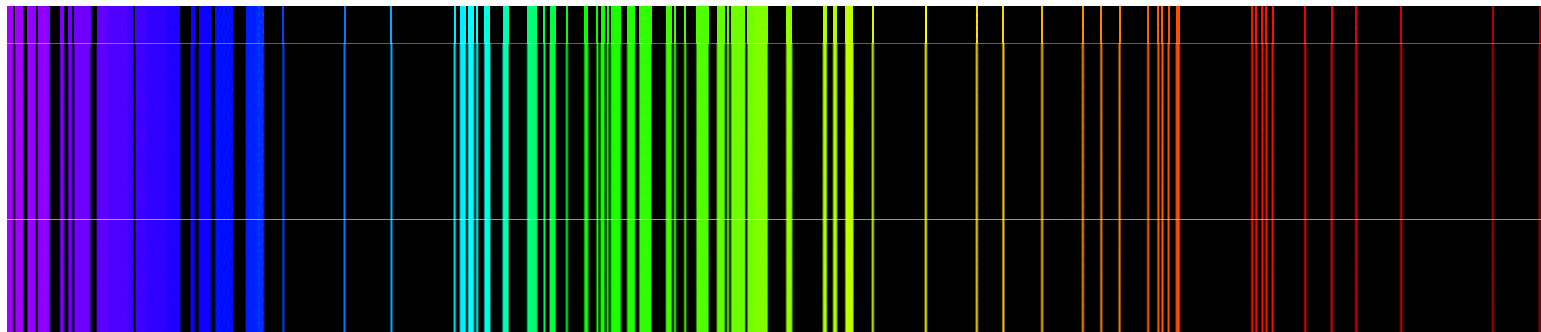


# Sommerfeldův model atomu

- Přestože Bohrov model atomu v hrubých rysech správně...
- ...při použití spektrometrů s vyšším rozlišením byla pozorována tzv. **jemná struktura spekter (štěpení spektrálních čar)**,
- ukázalo se, že některé spektrální čáry jsou ve skutečnosti **skupinami blízkých čar**, tzv. **multiplety**.
- Při existenci kruhových drah elektronu předpokládali při přeskoku z jednoho orbitu na druhý jednu ostrou spektrální čáru.
- Sommerfeld **zobecnil** původní jednoduchou Bohrovu kvantovací podmínku pro moment hybnosti **pro případ pohybu částice po libovolné uzavřené dráze**
- Kvantovací podmínky jsou v rámci této teorie doplněny jako dodatečný pos-tulát, jehož aplikace pak vede zprostředkovaně i ke kvantování dalších fyzi-kálních veličin, např. energie.

Pokud každá spektrální čára představuje přechod elektronu do základního stavu, kde se berou ostatní kvantové čáry

Spektrum  
železa



# Sommerfeldův model atomu

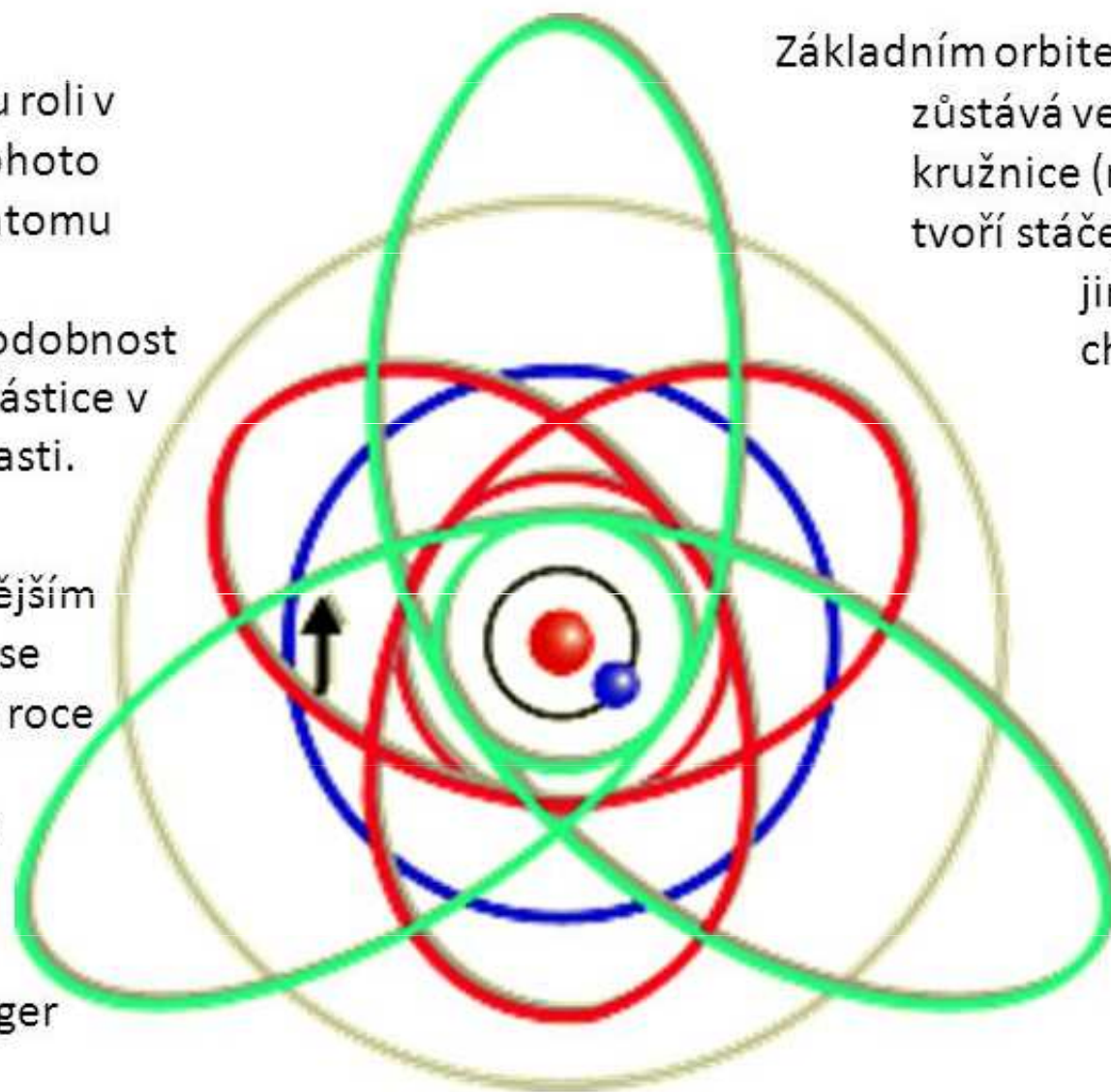
- Aby objasnil jemnou strukturu spekter, předpokládal Sommerfeld, že elektrony se mohou pohybovat i po **eliptických drahách**.
- Na rozdíl od pohybu po kruhové dráze, při kterém se nemění vzdálenost elektronu od jádra a lze tudíž vystačit s popisem pomocí jediného stupně volnosti, musíme při pohybu po elipse uvažovat **stupně volnosti dva**.
- Je tedy třeba uvažovat, na rozdíl od Bohrova modelu, **dvě kvantovací podmínky s dvěma kvantovými čísly**. K hlavnímu kvantovému číslu  $n$  přidal tedy i vedlejší kvantové číslo  $l$ .
- Hlavním kvantovým číslem je určena velká poloosa  $a = n^2 r_1$
- a vedlejším kvantovým číslem malá poloosa  $a' = n(l + 1)r_1$ .
- Aby v krajním případě přešla elipsa v kružnici, je třeba, aby  $n = l + 1$ , proto vedlejší kvantové číslo může nabývat maximální hodnoty  $n - 1$ . Nejmenší možná hodnota je 0.
- Sommerfeld předpokládal, že energie bude záviset na obou kvantových číslech, což by mohlo objasnit pozorované multiplety.

# Sommerfeldův model atomu

Důležitou roli v popisu tohoto modelu atomu hraje pravděpodobnost výskytu částice v dané oblasti.

Podrobnějším popisem se zabýval v roce 1926 rakouský fyzik Erwin Schrödinger

Obr. 9

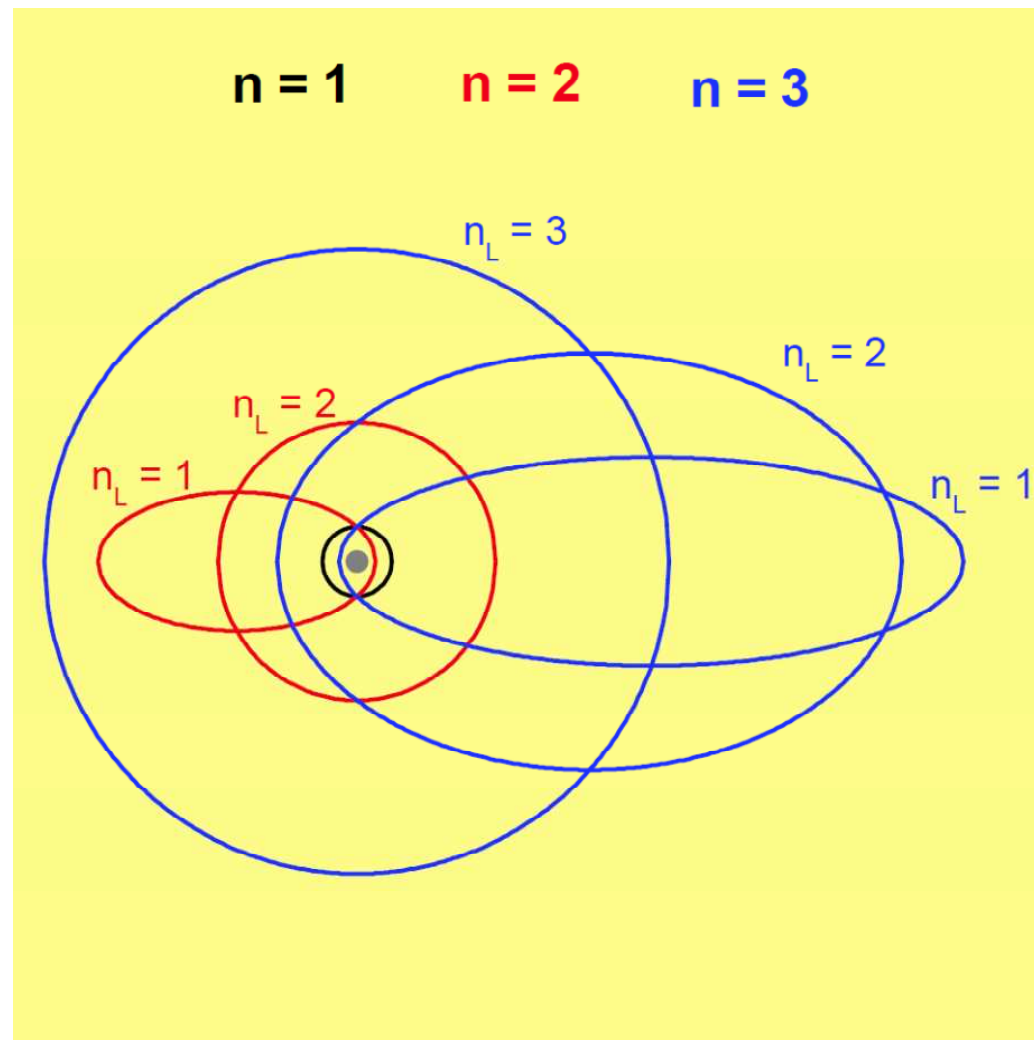


Základním orbitem pro kvantovou dráhu  $n=1$  zůstává ve shodě s Bohrovým modelem kružnice (resp. koule). Vyšší orbity však tvoří stáčejší se elipsy (kvantové číslo  $l$ ) jimiž je nový model (viz obr. 9) charakteristický.

Tato představa o atomovém obalu je základem současného pohledu na atom. Nehledáme konkrétní pozici částice, řešíme však pravděpodobnost jejího výskytu.  
Erwin Schrödinger,  
Paul Dirac...

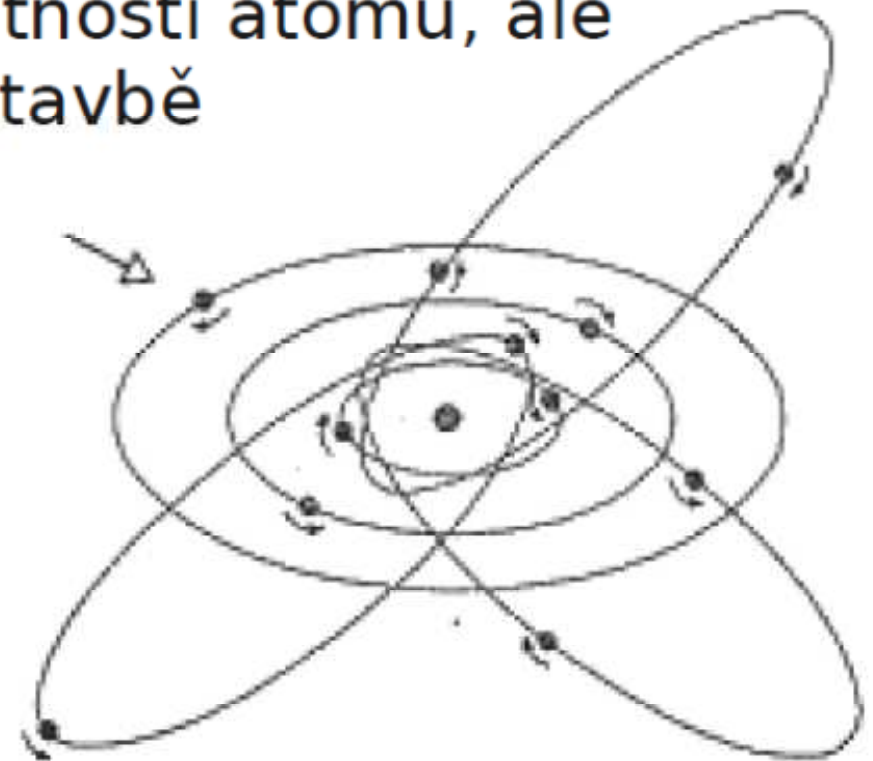
# Sommerfeldův model atomu

- Tvar elips pro vedlejší kvantová čísla  $n_L$
- $n_L = 1, 2, \dots, n-1$



# Sommerfeldův model

- elektrony se pohybují nejen po kruhových, ale také po eliptických drahách
- elektron se pohybuje po elipse, která se otáčí
- elektron se při svém pohybu také otáčí
- neumí vysvětlit všechny vlastnosti atomu, ale poskytuje představu o jeho stavbě



# Luis de Broglie



- Svou určitou platnost má tento model dodnes, Bohr ale nedokázal vysvětlit, **proč se elektrony pohybují právě na kvantových drahách.**

- Vysvětlení: **Luis de Broglie – 1923**, nejenže se světelné vlny mohou chovat jako částice, ale **částice se mohou také chovat jako vlny**

- → zavedení pojmu **hmotné vlny**

Vztah mezi vlnovou délkou hmotné vlny  $\lambda$ , příslušející tělesu o hmotnosti  $m$ , pohybujícímu se rychlostí  $v$ :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv},$$

$h$  = hybnost částice, Planckova konstanta  $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$  Js

Přítomnost Planckovy konstanty říká, že hmotné vlny jsou kvantové povahy

# Luis de Broglie

- Aby mohla podle Brogliho hmotná vlna elektronu stabilně „obíhat“ kolem jádra po dráze o polěru  $r$ , musí se na dráhu (obvod)  $2\pi r$  vejít **celý počet vlnových délek elektronu**, tj. buď jedna celá vlna  $\lambda$ , nbo  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  atd.
- Pokud by počet vlnových délek nebyl celý, došlo by k interferenci a dráha nebude stabilní. Tato **nestabilita se „zformuje“ do kvanta el-mag. záření – atom vyzáří foton**, který odnese z atomu příslušné množství energie a e- přejde na nejbližší stabilní dráhu s celočíselným počtem vlnových délek  $\lambda$

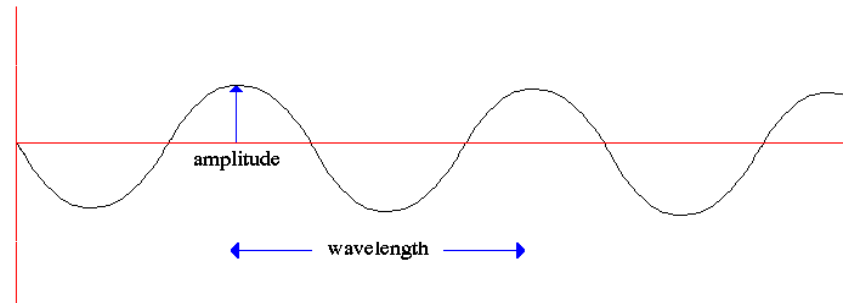
$$2 \pi r_n = n \lambda_e, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

- **$n$  = hlavní kvantové číslo** a určuje nejen pořadí „dovolené“ kvantové dráhy, ale také energii elektronu na této dráze (viz dříve)



# Luis de Broglie – hmotná vlna

A composition of several waves of different wavelength can produce a wave packet that looks like this:



having no beginning and no end. A composition of several waves of different wavelength can produce a wave packet that looks like this:



So a photon, or a free moving electron, can be thought of as a wave packet, having both wave-like properties and also the single position and size we associate with a particle. There are some slight problems, such as the wave packet doesn't really stop at a finite distance from its peak, it also goes on for every and every. Does this mean an electron exists at all places in its trajectory?



## The De Broglie Wavelength

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

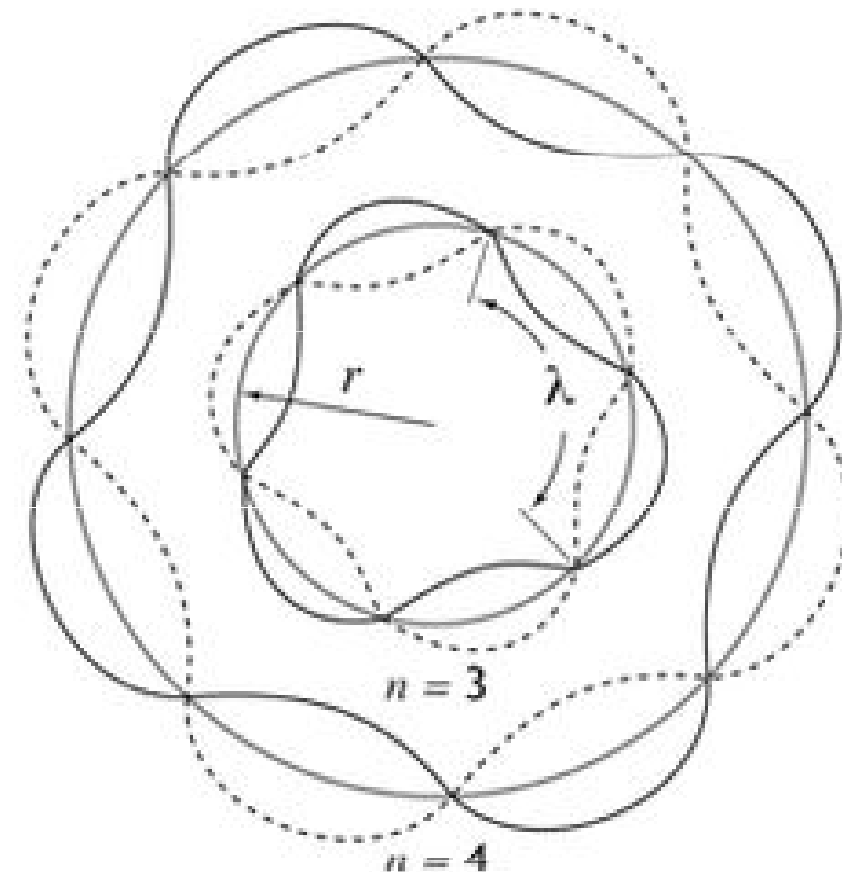
$\lambda$  = wavelength

$h$  = Planck's constant ( $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

$p$  = momentum

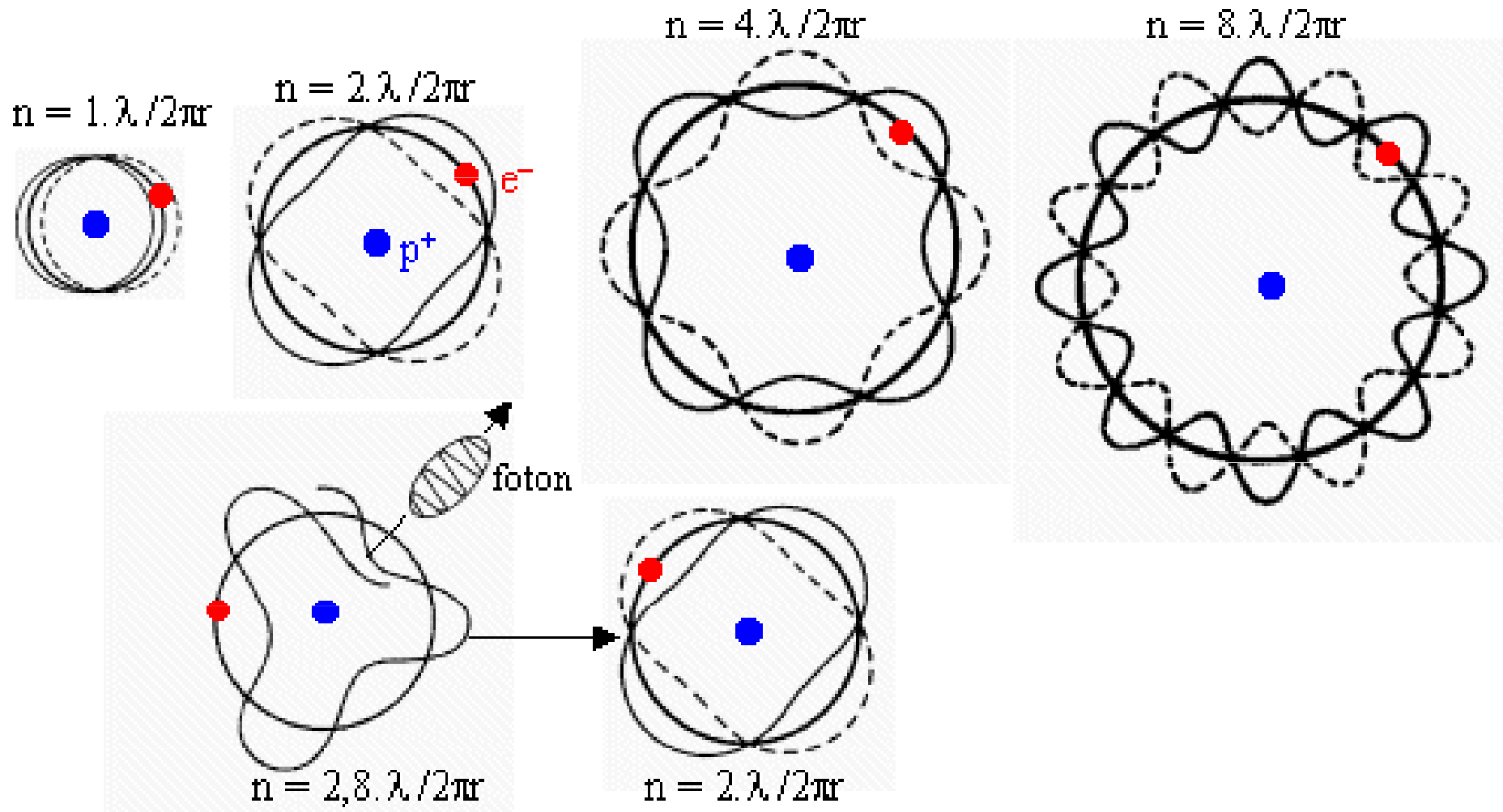
$m$  = mass

$v$  = speed



*De Broglie's extension of the concept of particle-wave duality from photons to include all forms of matter allowed the interpretation of electrons in the Bohr model as standing electron waves. De Broglie's work marked the start of the development of wave mechanics.*

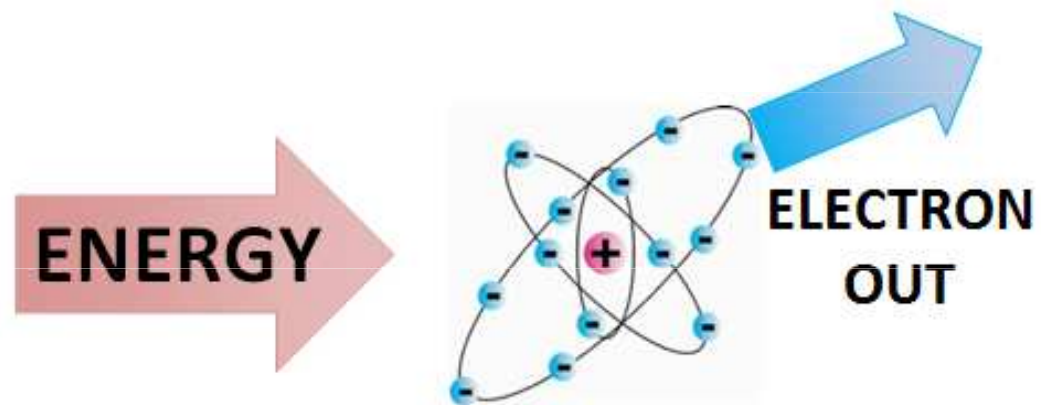
Na dráhu (obvod)  $2\pi r$  se musí vejít **celý počet vlnových délek elektronu**, tj. buď jedna celá vlna  $\lambda$ , nbo  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  atd.



Pokud je vlna kratší nebo delší, dojde k rušivé interferenci a vyzáření „nestability“ ve formě fotonu

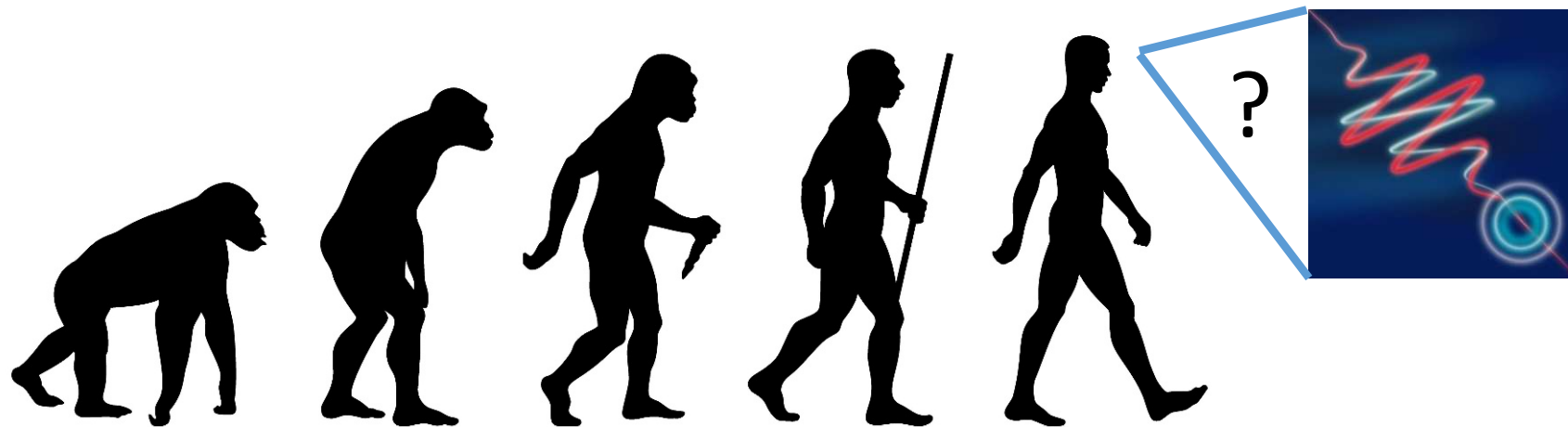
# Luis de Broglie – model atomu

- Obíhá-li e- na nejnižší kvantové dráze → je v **základním stavu** (nevzbuzeném)
- **Přechod na vyšší energetickou dráhu je možný pouze po dodání E** (absorbce fotonu, působením el-mag sil při průletu nabitě částice či při nárazu dalšího atomu)
- Je-li dodána vyšší energie než je energie vazbová  $|E_n|$ , uvolní se elektron z pole jádra → **ionizace**



# Problémy člověka s mikrosvětem

- Evoluce člověka – zaměření na makrosvět
- Náš mozek nemá receptory pro mikrosvět
- Nedokážeme mikrosvět vnímat, a tudíž si ho ani představit  
→ umíme ho pouze popsat
- Kvantové teorii nerozumí vůbec nikdo (Faymann)



# Záhadné vlastnosti mikrosvěta

<https://www.youtube.com/watch?v=p-MNSLsjjdo>

- Diskrétní oddělené hladiny - **Energie a ostatní veličiny mohou a nemusí být kvantovány**
- Našimi smysly ani přístroji nejsme schopni rozdíly mezi energetickými hladinami detekovat → zdá se nám to kontinuální - projeví se ale např. ve spektru atomu (díky přeskokům e- mezi hladinami).
- Již bylo zmíněno - Kvantování objevil **M. Planck** při studiu vlastností záření absolutně černého tělesa.

Planck studoval vyzařování černého tělesa na jeho teplotě a **zjistil, že těleso vyzařuje jen elmag. záření určitých vlnových délek.**

Pro energii tohoto záření odvodil vztah:

$$E = h\nu,$$

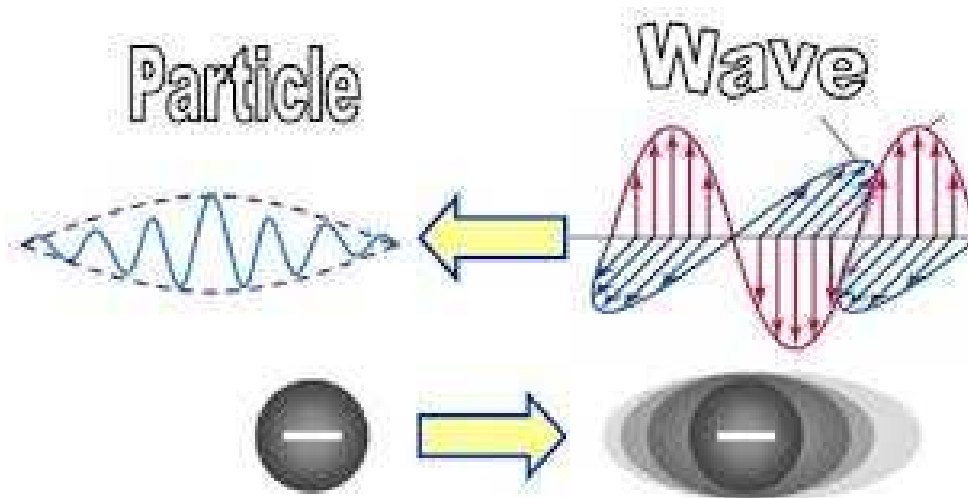
kde  $\nu$  je frekvence záření a  $h$  je Planckova konstanta ( $h = 6,626 \text{ J}\cdot\text{s}^*$ )

$$* \text{ J}\cdot\text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

# I. Duální povaha elektronu

– částicově vlnový dualismus (též → fotoelektrický jev)

- **Není to ani částice ani vlna, náš mozek tomu dává interpretaci** – jednou vnímáme jako částici jindy jako vlnění



# Částicově-vlnový dualismus – příklad 1



Dle: Petr Kulhánek - MatFyz



# Částicově-vlnový dualismus – příklad 2

- Obdobně demonstrující dav – vidíme-li z dálky, pozorujeme jakési vlnění
- Pokud se ale objeví nějaký plamenný řečník, všichni se kolem něho shluknou a vytvoří se jakási částice
- Dav opět není ani vlnění ani částice



Dle: Petr Kulhánek - MatFyz

# Částicově-vlnový dualismus – experimenty

## Experiment potvrzující vlnový charakter e-:

Interference proudu elektronů na krystalech,  
štěrbinový experiment

[https://www.youtube.com/watch?v=JIsPC2BW\\_UI](https://www.youtube.com/watch?v=JIsPC2BW_UI).

Zajímavý článek + „vědecký“ komix:

<https://nielsbohr.webnode.cz/zahada-sterbinoveho-experimentu/>

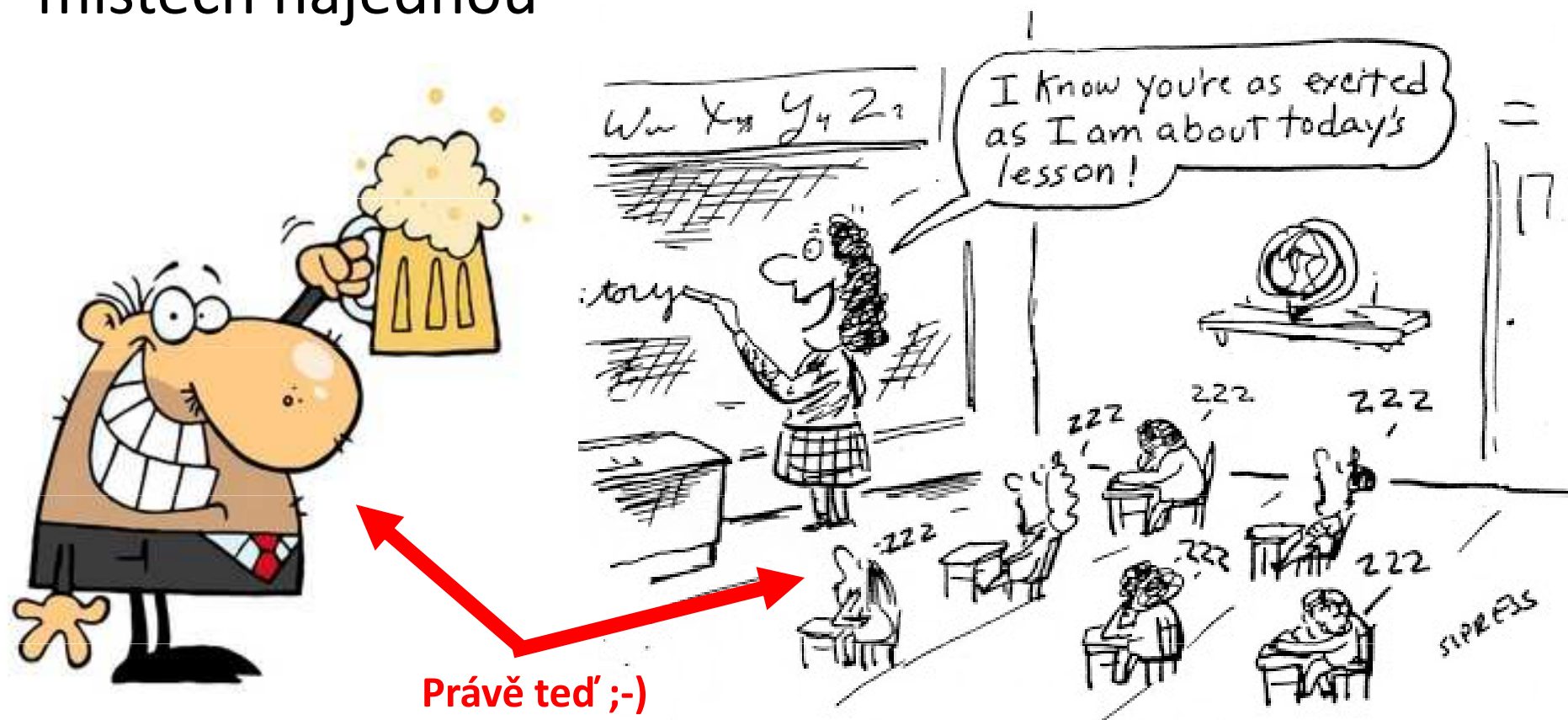
## Experiment potvrzující korpuskulární charakter e-:

Tok elektromagnetických vln při dopadu na tuhou  
podložku předává této podložce měřitelnou  
hybnost (pohyb nebo fotoelektrický jev).

<https://www.youtube.com/watch?v=MFPKwu5vugg>

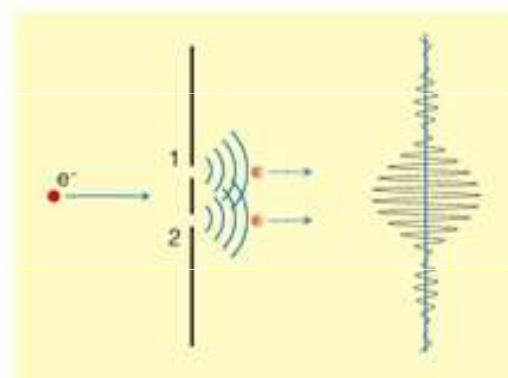
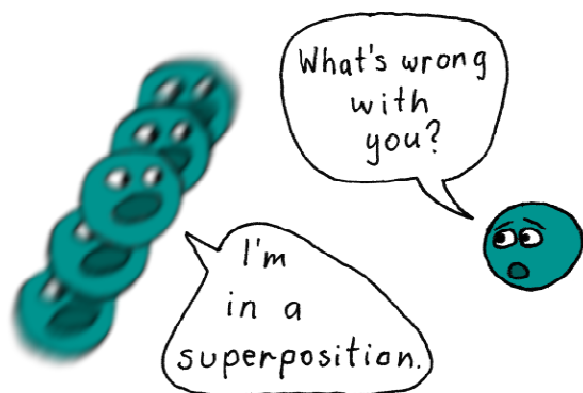
## II. SUPERPOZICE STAVU:

- V mikrosvětě můžete sedět zde na přednášce a zároveň popíjet svůj drink v oblíbené hospůdce
- Makro-objekty nemohou být zároveň na více místech najednou

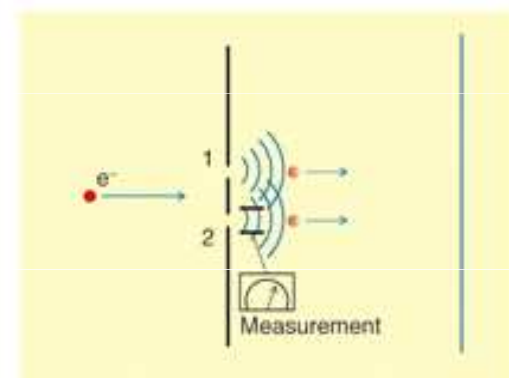


# II. SUPERPOZICE STAVU:

- Elektron prochází oběma otvory naráz
- Zároveň se jeví jako částice a vlna → interference sama se sebou (charakteristický dopadový obrazec)
- Platí superpozice stavu



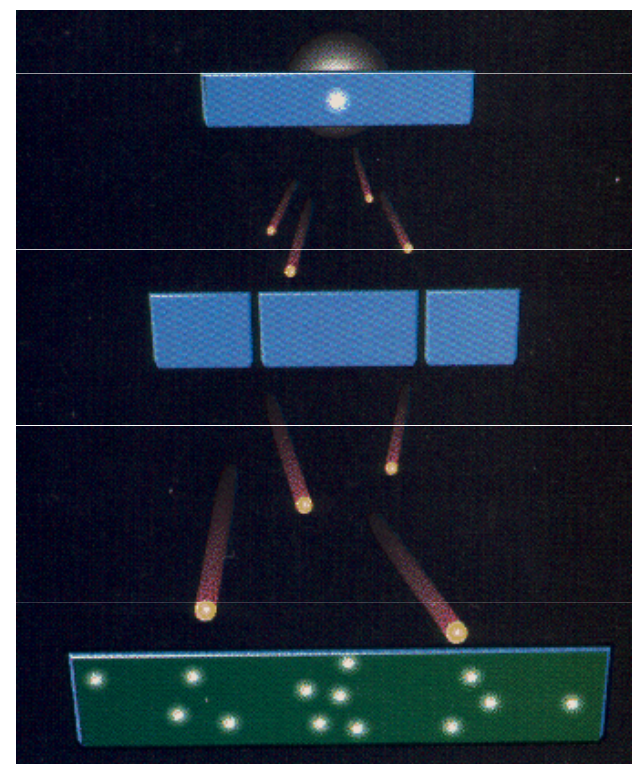
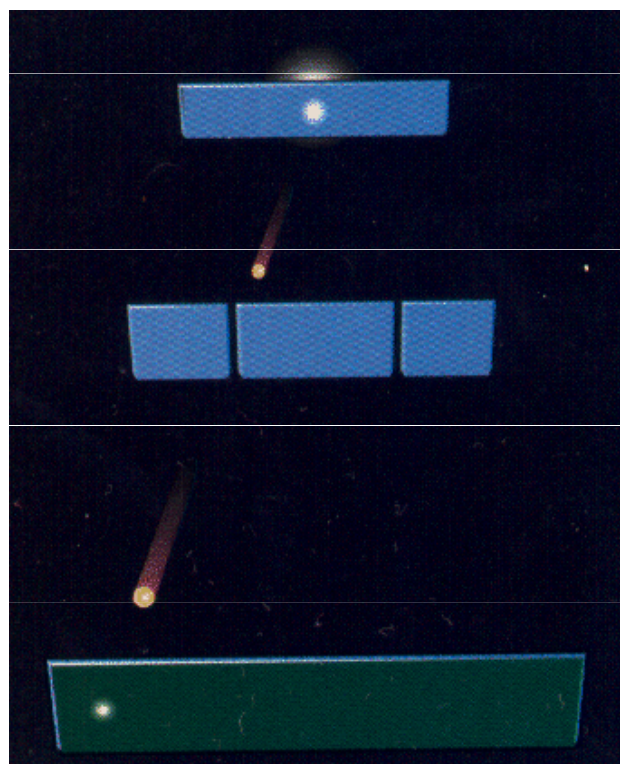
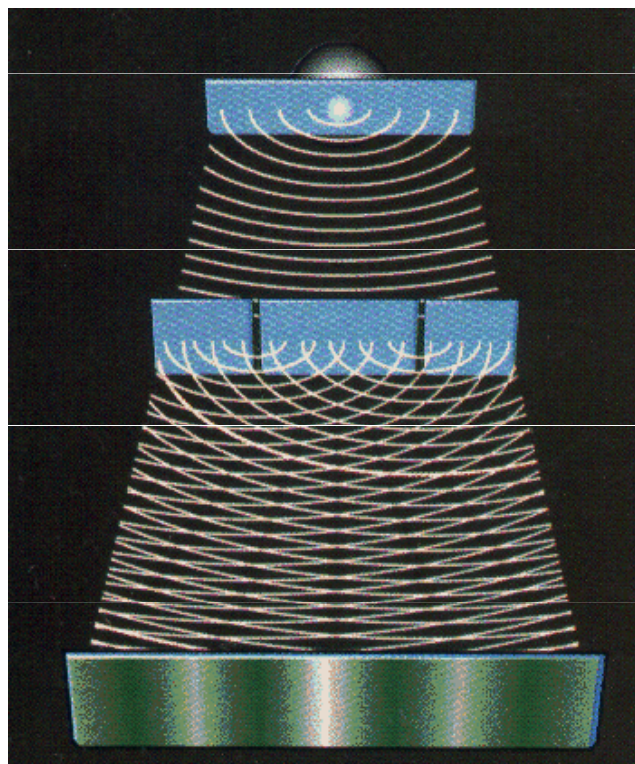
(a) Single-electron interference



(b) No interference: disappearance caused by measurement.

But wait, what if we do this so slow that only one electron or one photon passes through the slits at a time, then what is interfering with what? i.e. there are not two waves to destructively and constructively interfere. It appears, in some strange way, that each photon or electron is interfering with itself. That its wave nature is interfering with its own wave (!).

The formation of the interference pattern requires the existence of two slits, but how can a single photon passing through one slit 'know' about the existence of the other slit? We are stuck going back to thinking of each photon as a wave that hits both slits. Or we have to think of the photon as splitting and going through each slit separately (but how does the photon know a pair of slits is coming?). The only solution is to give up the idea of a photon or an electron having location. The location of a subatomic particle is not defined until it is observed (such as striking a screen).

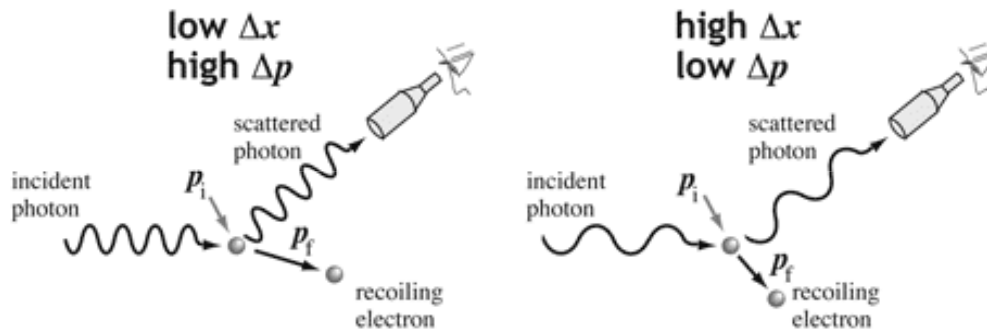


# Záhadné vlastnosti mikrosvětla

## The Heisenberg Uncertainty Principle

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

$\Delta x$  = uncertainty in position  
 $\Delta p$  = uncertainty in momentum  
 $\hbar = h / 2\pi$




*A high frequency (short wavelength) photon gives a more accurate measurement of position, but it causes a greater uncertainty in the momentum of the recoiling electron. The act of measurement itself limits how well-defined the electron's position and momentum can be. The indeterminacy derives from the quantum wave nature of the electron itself.*

- **III. Heisenbergův princip neurčitosti** (relace neurčitosti): *kanonicky sdružené veličiny* [poloha a hybnost atd.] *můžeme současně určit pouze s charakteristickou nepřesností.*

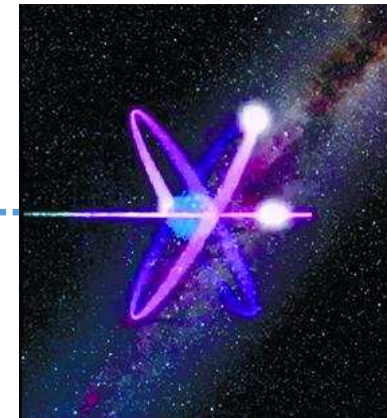
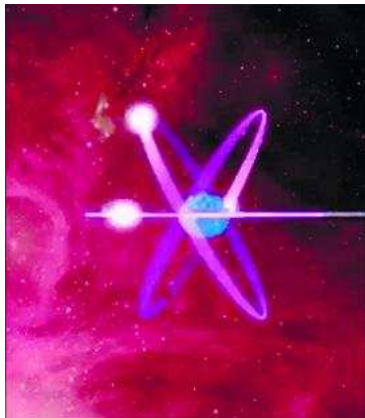
Více např. zde:

<https://nielsbohr.webnode.cz/zahada-sterbinoveho-experimentu/>

-  Velký otvor, kterým pouštím světlo – prošlo hodně částic, vím znám dobře rychlost částice, ale nevím, kudy přesně prošla (poloha)
- A naopak, použiji-li velmi malý otvor, budu přesně vědět, kudy částice prošla (pozici), ale nebudu moci změřit její rychlost
- Malá štěrbinina totiž vlnu ohne – zpřesnění jednoho měření znelepší měření jiné Heisenbergovy rovnice neurčitosti
- **Nemožnost měření pozice a rychlosti zároveň (např. rčení W. Pauliho „Člověk může vidět svět s p-okem [okem hybnosti] a může jej vidět s q-okem [okem polohy], avšak pokud bude chtít otevřít obě oči současně, potom bude zmatený.**

# Záhadné vlastnosti mikrosvěta

- **VI. Nedeterminismus** kvantové teorie (mikrosvěta) – Experimenty v kv. teorii nejsou opakovatelné → statistika, nelze předpovědět, jak experiment dopadne
- **V. Princip nerozlišitelnosti** – dvě stejné částice nelze rozlišit (označit)
- **VI. Kvantová provázanost** – určením stavu jedné částice je ovlivněn stav druhé částice



# Záhadné vlastnosti mikrosvěta

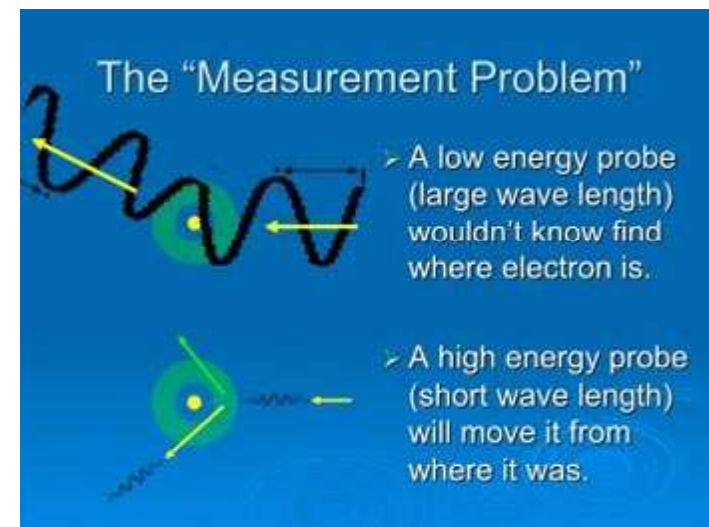
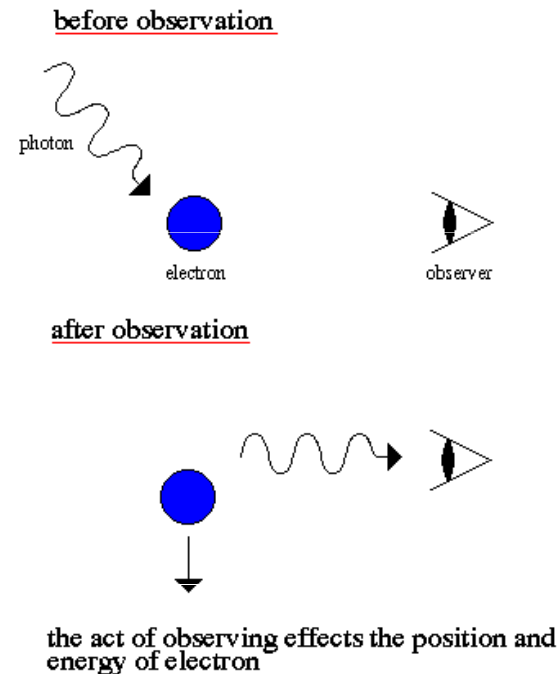
- TUNELOVÝ EFEKT
- částice mohou prostupovat zakazanými oblastmi (přes překážku, na kterou nemají energii) – tunelový jev



# MĚŘENÍ SE STÁVÁ SOUČÁSTÍ VÝSLEDKU

- Asi nejpodivnější: Sami se stáváme součástí experimentu
- Měříme-li stůl, měření mu neublíží. Musí na něj ale dopadat fotony, abychom ho mohli změřit – alespoň jeden foton se od stolu musí odrazit, aby bylo možné zjistit jeho polohu
- V mikrosvětě ale foton měřenému systému ublíží
- Akt měření objekt velmi silně naruší, většinou úplně zlikviduje.
- Změřím-li polohu elektronu na základě fotonu, co se od něj odrazil, změnil jsem stav elektronu. Pokud pak změřím jeho rychlost, dostanu něco zcela jiného, než pokud bych rychlost měřil jako první a pak až jeho pozici!!!
- **MĚŘENÍ JE SOUČÁSTÍ KVANTOVÉ TEORIE**

## Measurement Problem in Quantum Mechanics

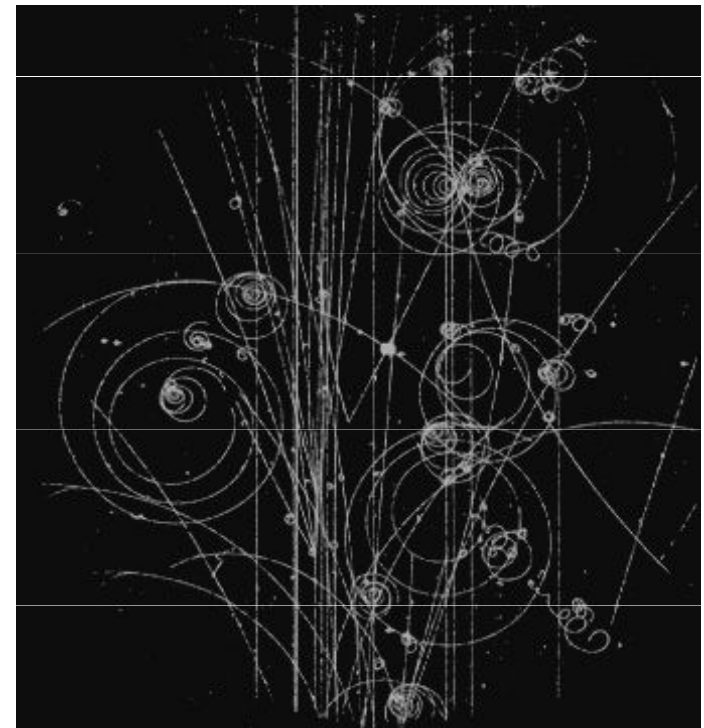


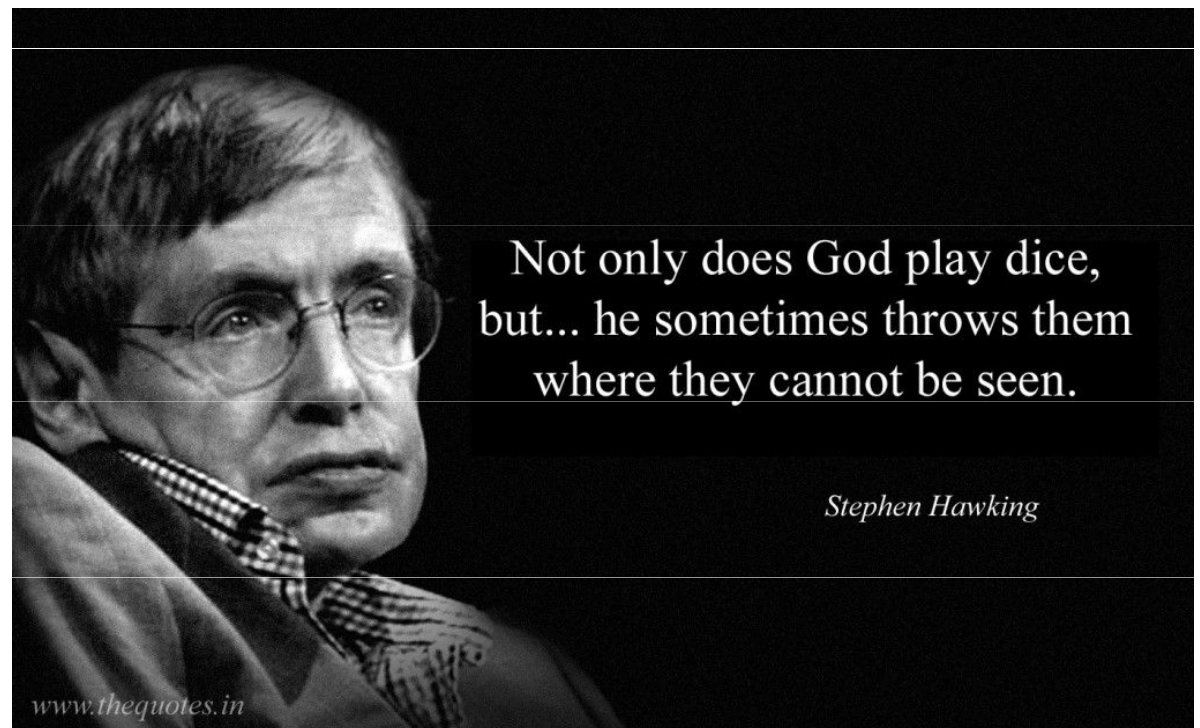
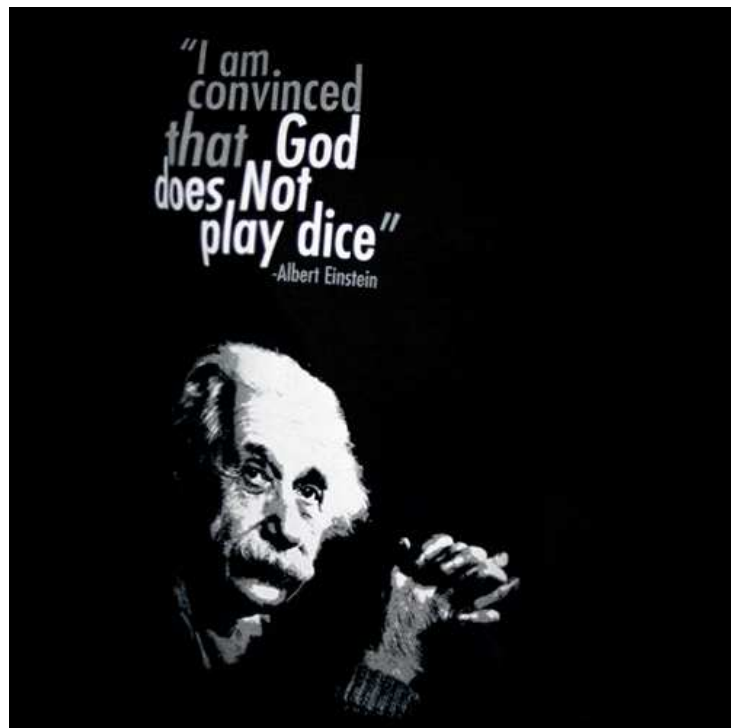
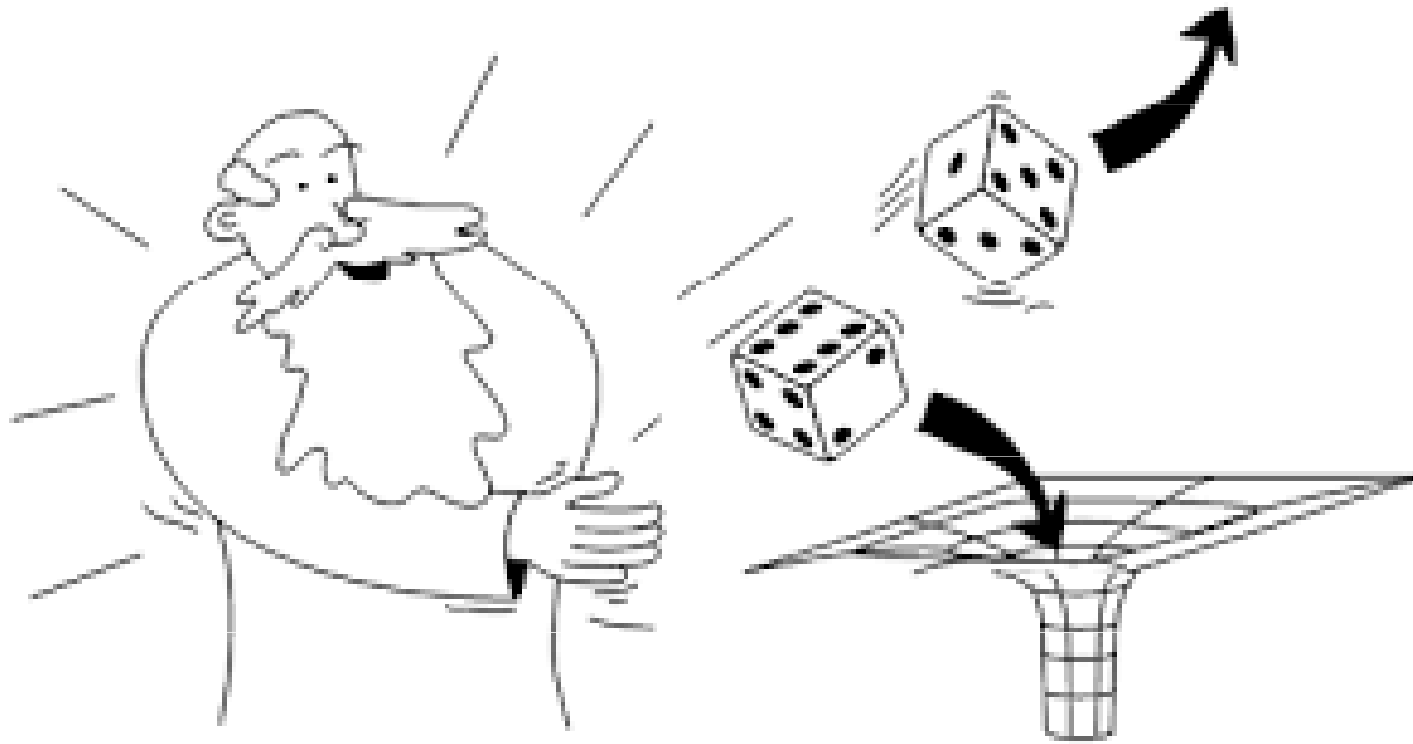
# MĚŘENÍ SE STÁVÁ SOUČÁSTÍ VÝSLEDKU

- Sekera – štípu dříví, odštěpky jsou pokaždé menší než byl původní celek – ve všech smyslech – menší bude hmotnost třísek, jejich objem, počet atomů v nich atd.
- V mikrosvětě ale k rozbití nějaké částice můžeme použít pouze jinou urychlenou elementární částici, tzn. musíme do systému dodat hmotnost a energii → zlomky, které z toho vylétnou budou mít tak větší hmotnost než měl původní celek



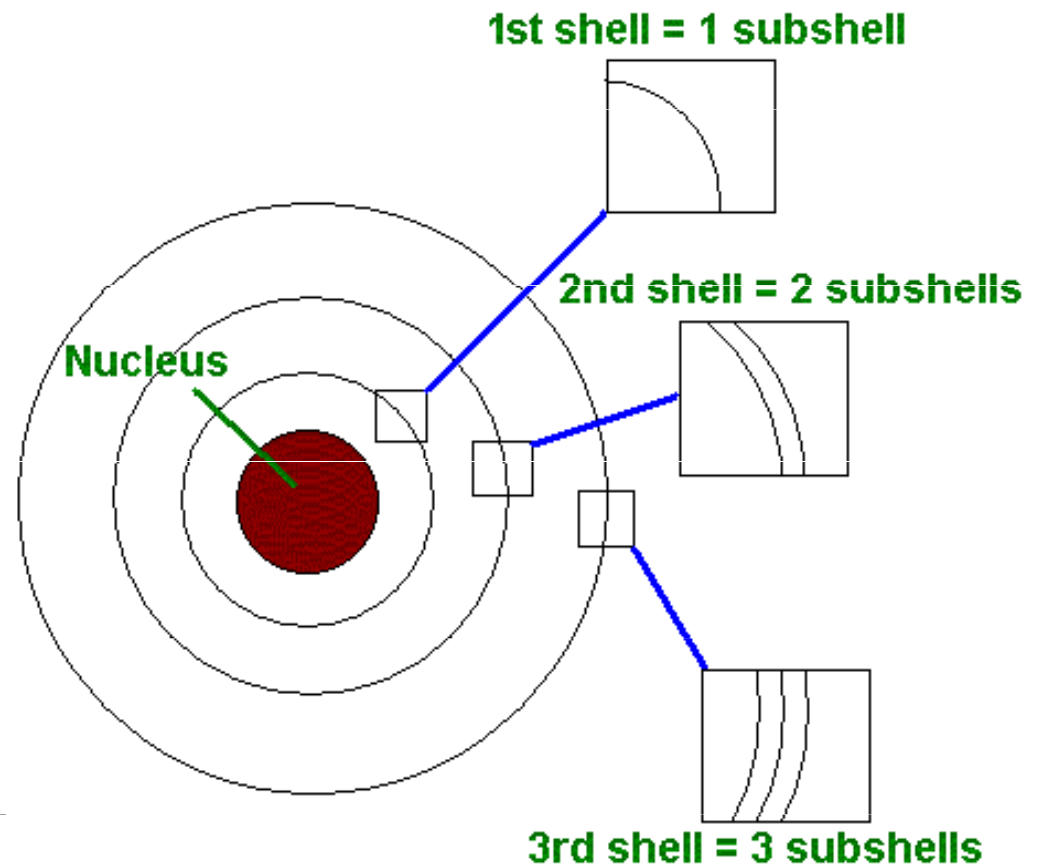
*"Don't overdo it, dear."*





# 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 Luis 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
- **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?

# Různé přístupy k témuž...



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



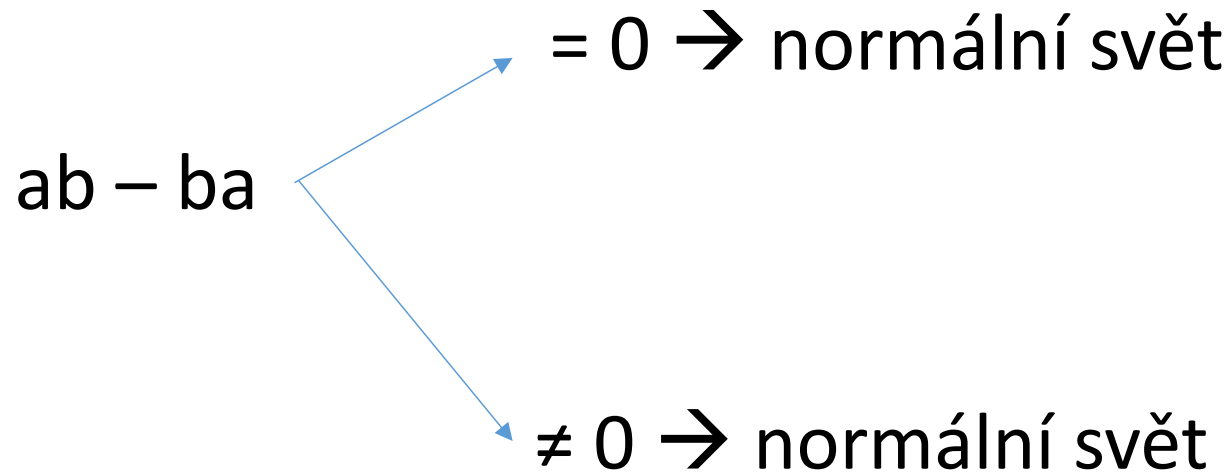
**WERNER HEISENBERG  
(1901-1976) German  
theoretical physicist**

# 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



# Rozsah komutace



**Schrödinger** použil funkce (vlnová funkce), **Hisenberg** matice – oba tedy nekomutující svět, jen jiné cesty k témuž

Kvantová mechanika lze vybudovat různými způsoby, ale musí se zachovat určitá pravidla nekomutace

Kvantová **nekomutující varianta ještě stále není hotová pro gravitaci** (pro všechny ostatní síly ano).




# Schrodingerova rovnice

- Určuje pravděpodobnost výskytu elektronu v atomu => 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)

**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**.

f/Physicist Page

# Atomový orbital

- úvod

Pro určitý systém tedy řešením Schrodingerovy rovnice získáme soubor vlnových funkcí a ke každé z nich také příslušnou energii.

Každá vlnová funkce přísluší jednomu AO

Každá vlnová funkce obsahuje 3 celá čísla, která jsou pro ní charakteristická (tzv. kvantová čísla).

Kvantová čísla:

- **Hlavní kvantové číslo (n):**
  - charakterizuje energii AO
  - nabývá hodnot:  $n = 1, 2, 3, \dots$
- **Vedlejší kvantové číslo (l):**
  - určuje tvar AO
  - nabývá hodnot:  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$
- **Magnetické kvantové číslo ( $m_l$ ):**
  - určuje orientaci AO k souřadnému systému

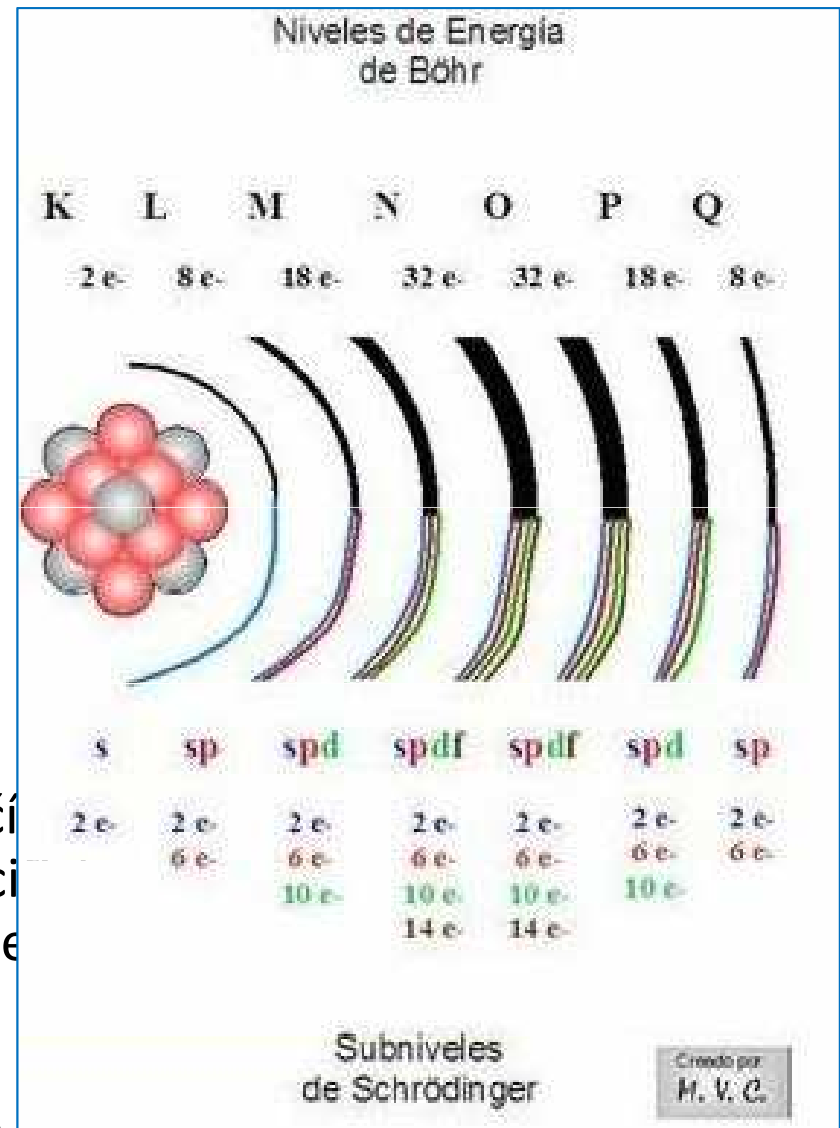
**Spin:** nabývá hodnot:  $m_s = -l, -l+1, \dots, -1, 0,$

$1, \dots, l-1, l$   
K popisu pohybu elektronu v atomu nestačí funkce  $Y_{n,l,m_l}$ . Elektron má totiž ještě speciální vlastnost, která nemá analogii v klasické me

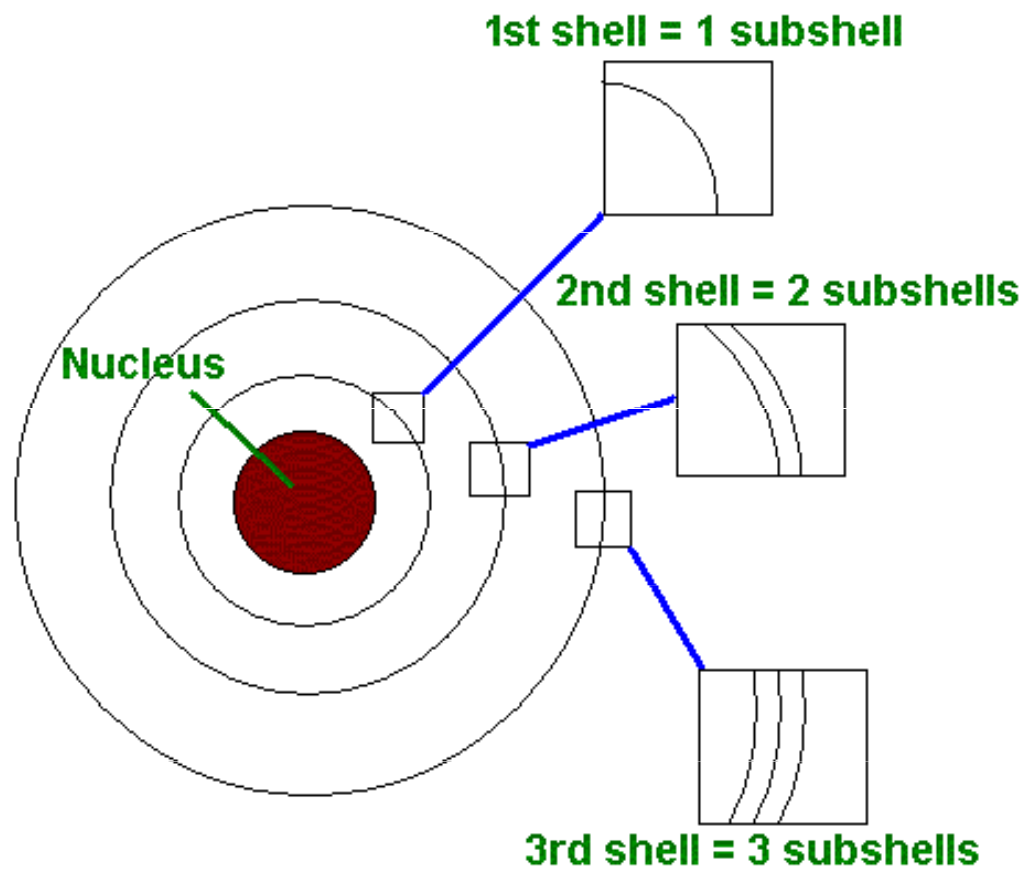
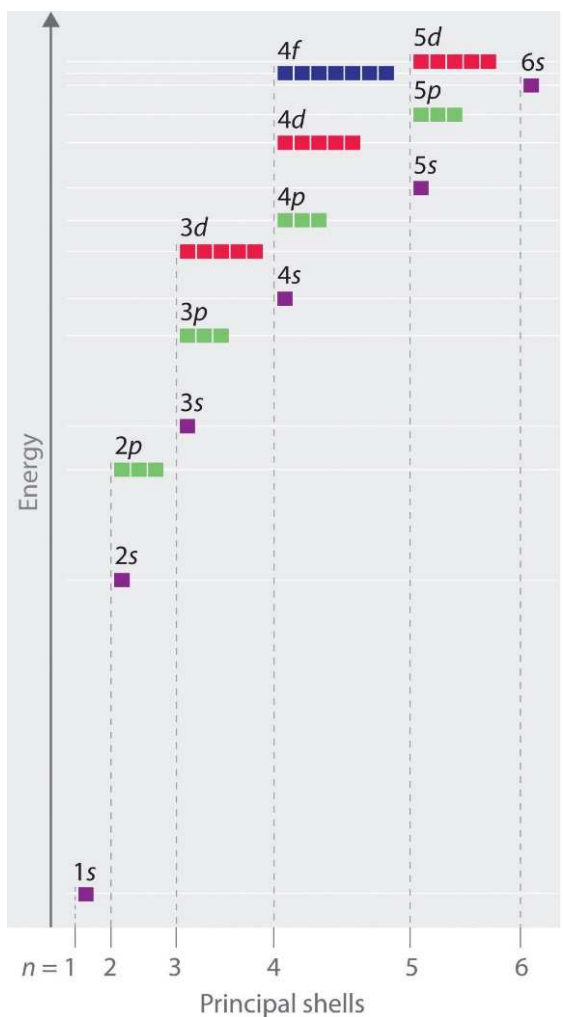
vnitřní moment rotace neboli spin

Hodnotu spinu vyjadřuje spinové kvantové číslo  $m_s$ , které nabývá hodnot:  $1/2$  a  $-1/2$

Pro popis pohybu elektronu v atomu je tedy nutno znát:  
Y a  $m_s$

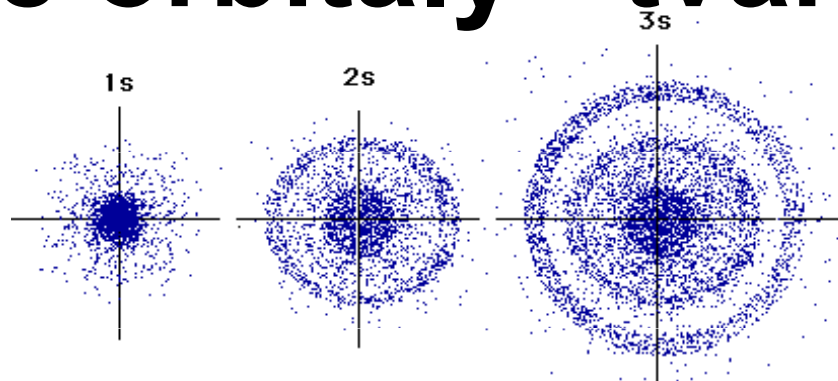


# Vedlejší kvantové číslo - podslupky

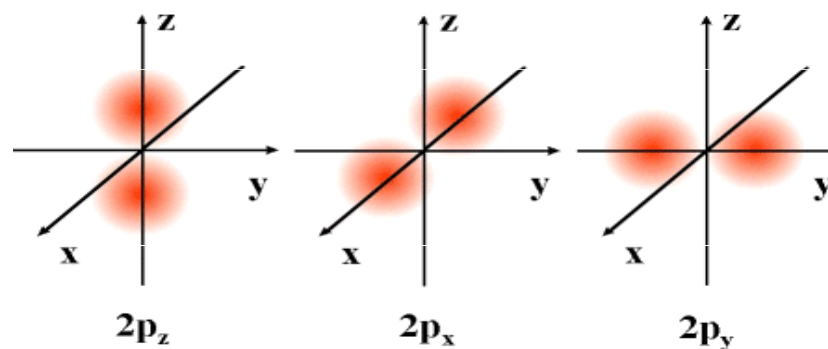


# Atomové orbitály - tvar

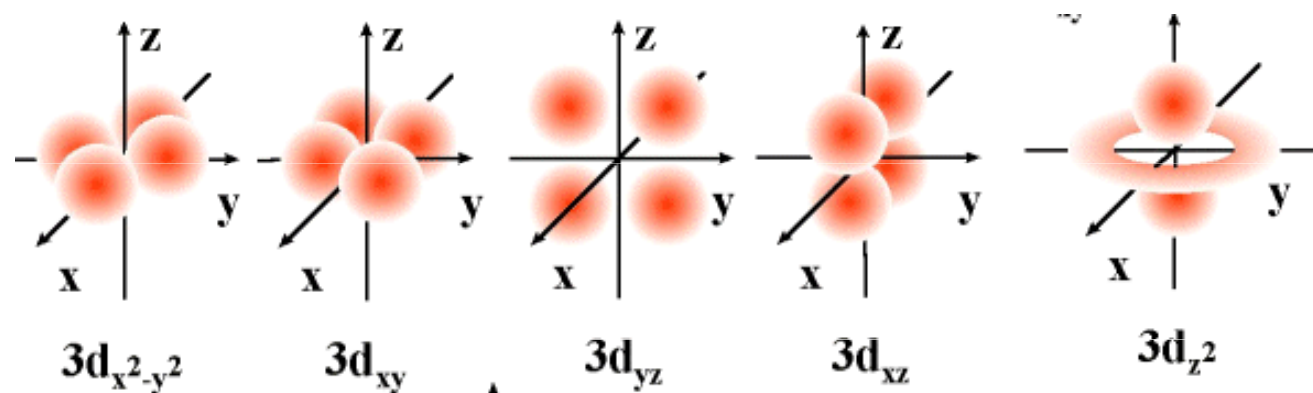
Orbitály s:

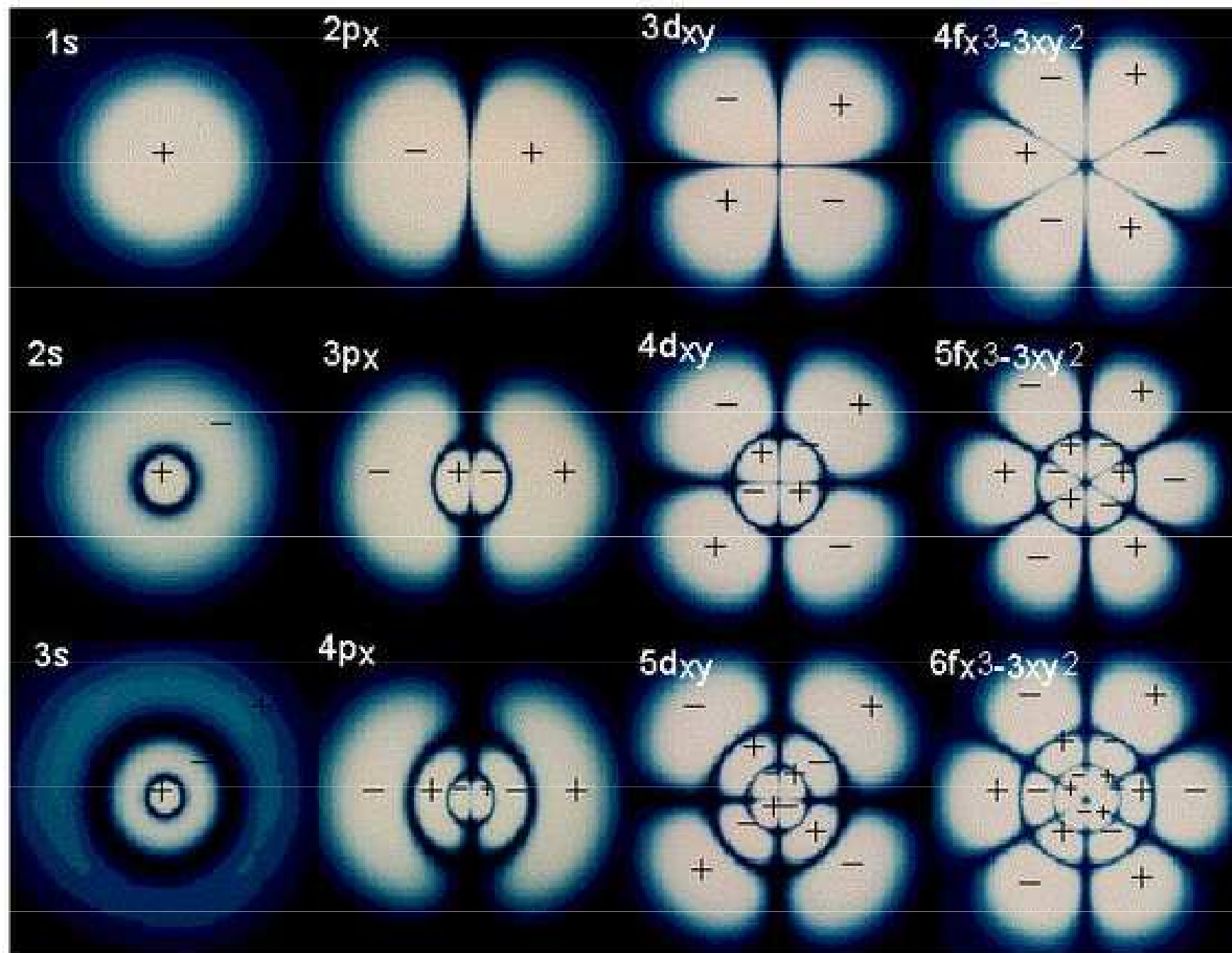


Orbitály p:



Orbitály d:



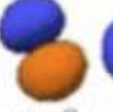




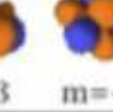





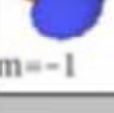



# Atomové orbitaly

- obsazování - příklad

Kvantová čísla			Symbol AO	Obsazení elny	Symbol zaplněných AO	Vrstva
n	l	m <sub>l</sub>				
1	0	0	1s	2	1s <sup>2</sup>	K
2	0	0	2s	2	2s <sup>2</sup>	
2	1	-1	2p	6	2p <sup>6</sup>	L
2	1	0				
2	1	1				
3	0	0	3s	2	3s <sup>2</sup>	M
3	1	-1	3p	6	3p <sup>6</sup>	
3	1	0	3p			
3	1	1	3p			
3	2	-2	3d	10	3d <sup>10</sup>	
3	2	-1	3d			
3	2	0	3d			
3	2	1	3d			
3	2	2	3d			

# Elektronový obal: kvantová čísla, orbitaly, spin

	$s: l=0$	$p: l=1$	$d: l=2$	$f: l=3$
$n=1$	 $m=0$			
$n=2$	 $m=0$	 $m=-1$  $m=0$  $m=1$		
$n=3$	 $m=0$	 $m=-1$  $m=0$  $m=1$	 $m=-2$  $m=-1$  $m=0$  $m=1$  $m=2$	
$n=4$	 $m=0$	 $m=-1$  $m=0$  $m=1$	 $m=-2$  $m=-1$  $m=0$  $m=1$  $m=2$	 $m=-3$  $m=-2$  $m=-1$  $m=0$  $m=1$  $m=2$  $m=3$
$n=5$	 $m=0$	 $m=-1$  $m=0$  $m=1$	 $m=-2$  $m=-1$  $m=0$  $m=1$  $m=2$	
$n=6$	 $m=0$	 $m=-1$  $m=0$  $m=1$		
$n=7$	 $m=0$			

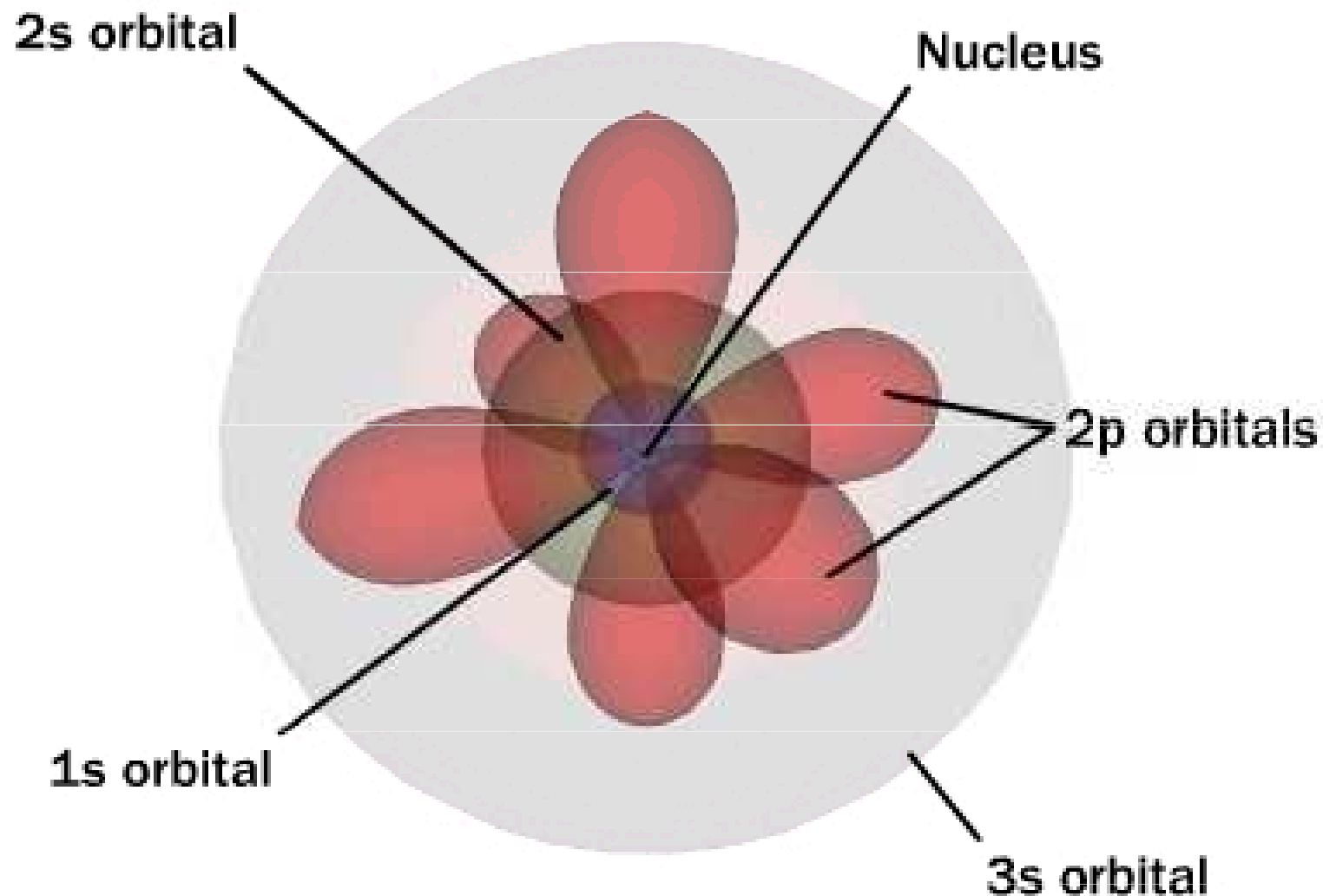


# Shrnutí

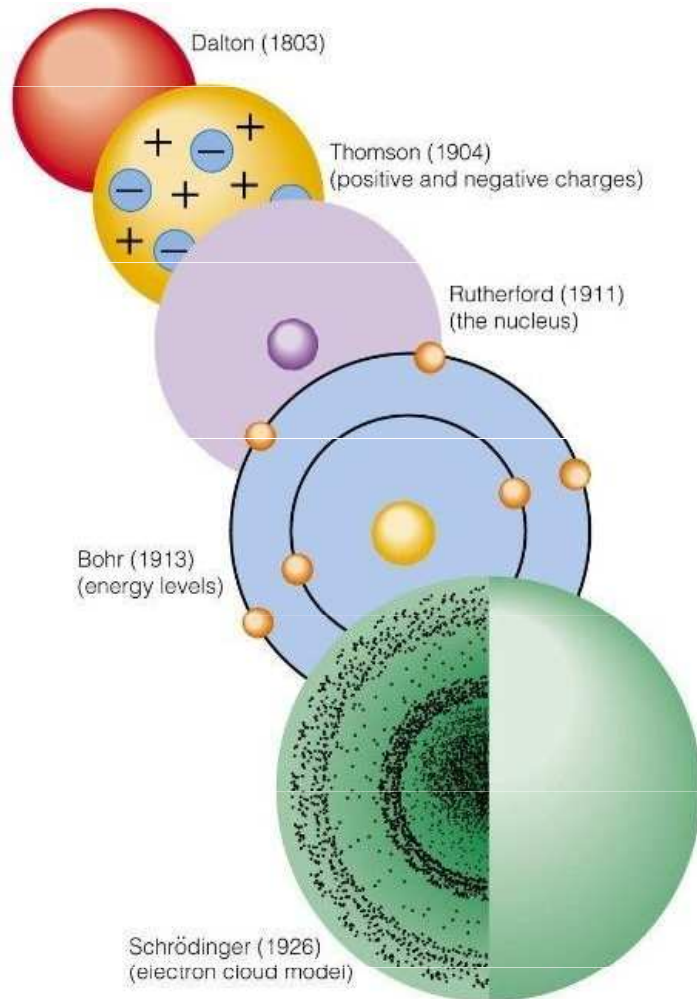
Schrödingerova rovnice (n, l, m) + spin (s)

<b>Kvantové číslo</b>	<b>Symbol</b>	<b>Hodnoty</b>	<b>Vyjadřuje</b>
Hlavní	n	1, 2, 3, ....., 7	Velikost orbitalu
Vedlejší	l	0, 1, 2, ....., n-1	Prostorový tvar orbitalu
Magnetické	m	-1, ....., 0, ....., +1	Orientaci orbitalu v prostoru
Spinové	s	$+1/2, -1/2$	Chování elektronu v orbitalu

# KVANTOVÝ MODEL ATOMU – ORBITALY (jen některé)



# MODEL - přehled

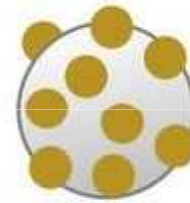


## Dalton, 1808

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  $\alpha$ -particles bounced back

+ Protons & electrons

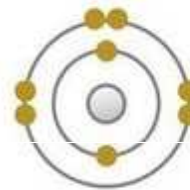


## Rutherford, 1911

Rutherford shot  $\alpha$ -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"



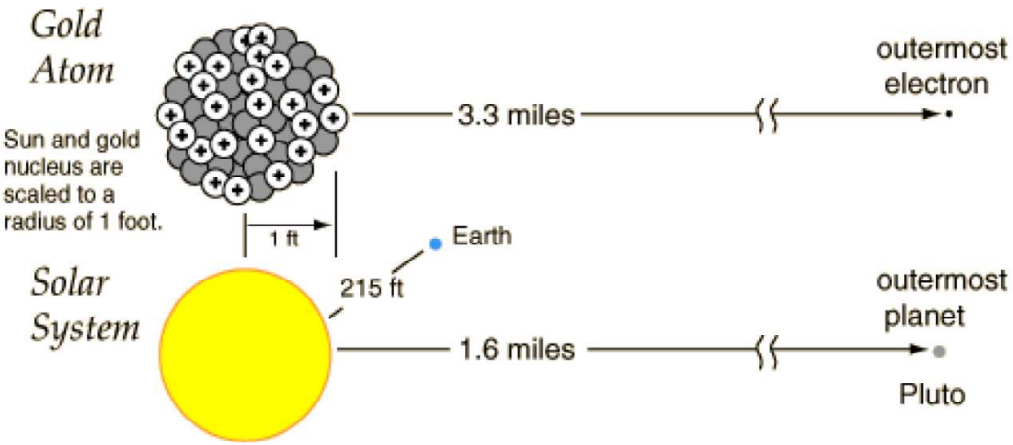
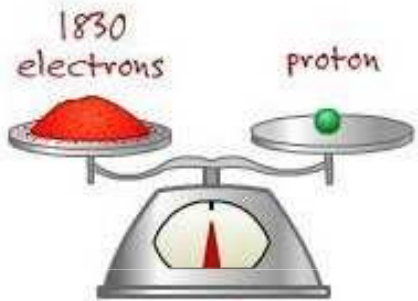
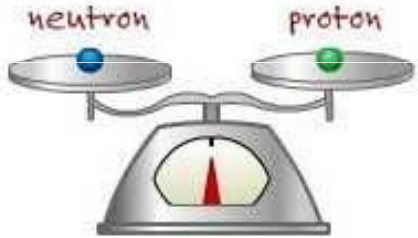
## Chadwick, 1932

+ Neutrons!

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

- Jádru 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.



# Elementární (?) částice

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

## Srovnání částic

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

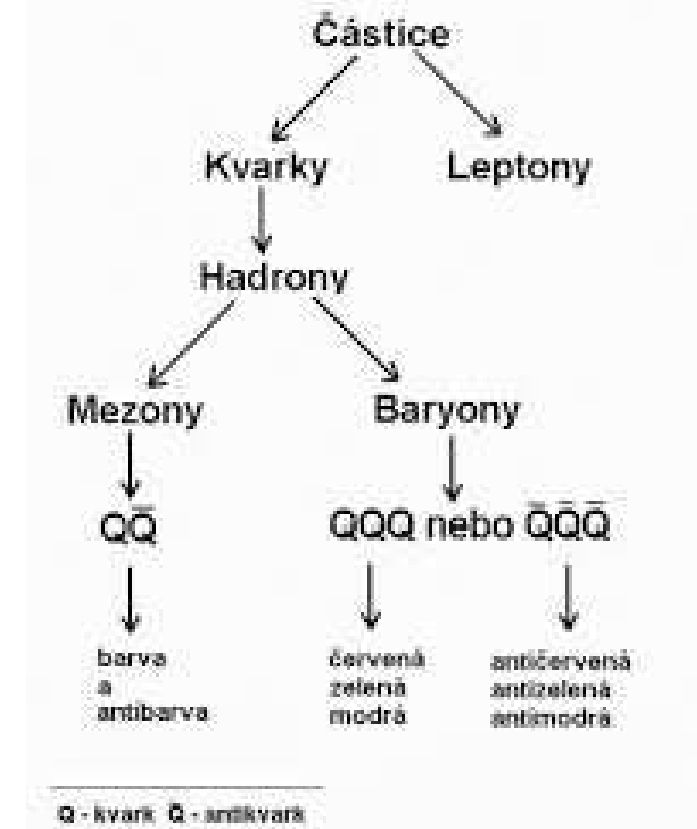
e - elementární náboj 0,000 000 000 000 000 000 160 2 C ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C)

u - atomová hmotnostní jednotka

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

# ČÁSTICE

- 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



## *Klasifikace subnukleárních částic*

### *Podle spinu:*

*fermiony* pololočíselné spinové kvantové číslo Př. leptony (elektron, neutrino ...), kvarky (up, down, charm...), baryony (proton, neutron)  
Pauliho princip

*Bosony* celočíselné spinové kvantové číslo (foton, gluon...)

### *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 ( $106 \text{ MeV}/c^2$ )

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*



Podle interakcí, kterých se účastní, nebo které vedou k jejich rozpadu

účastní se tzv. *silné interakce*:

*hadrony* (z řeckého „silný“) dále se dělí na mesony (bosony) a baryony (fermiony)

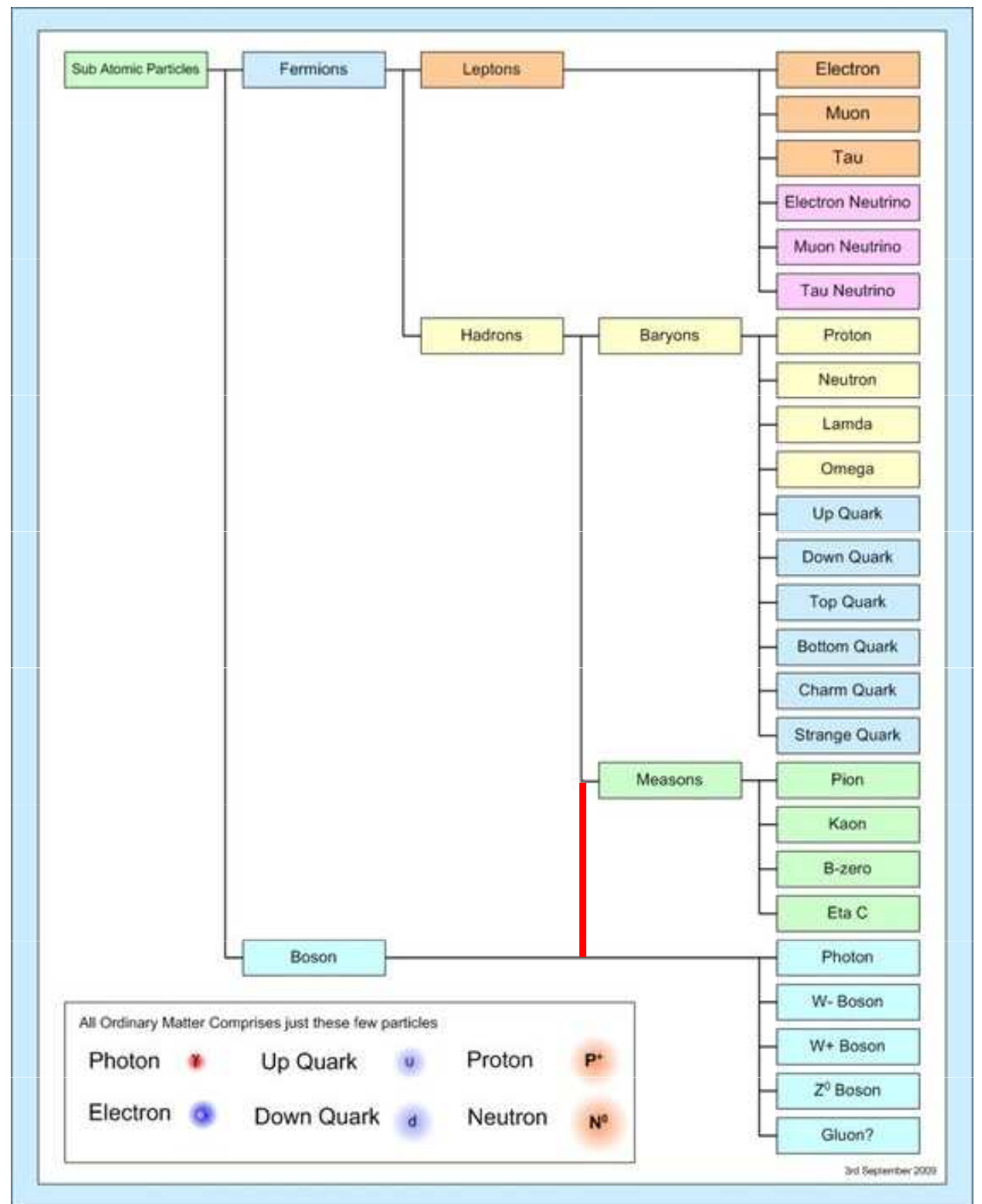
neúčastní se *silné interakce*:

*leptony*

Při interakcích a rozpadech platí zákony zachování:

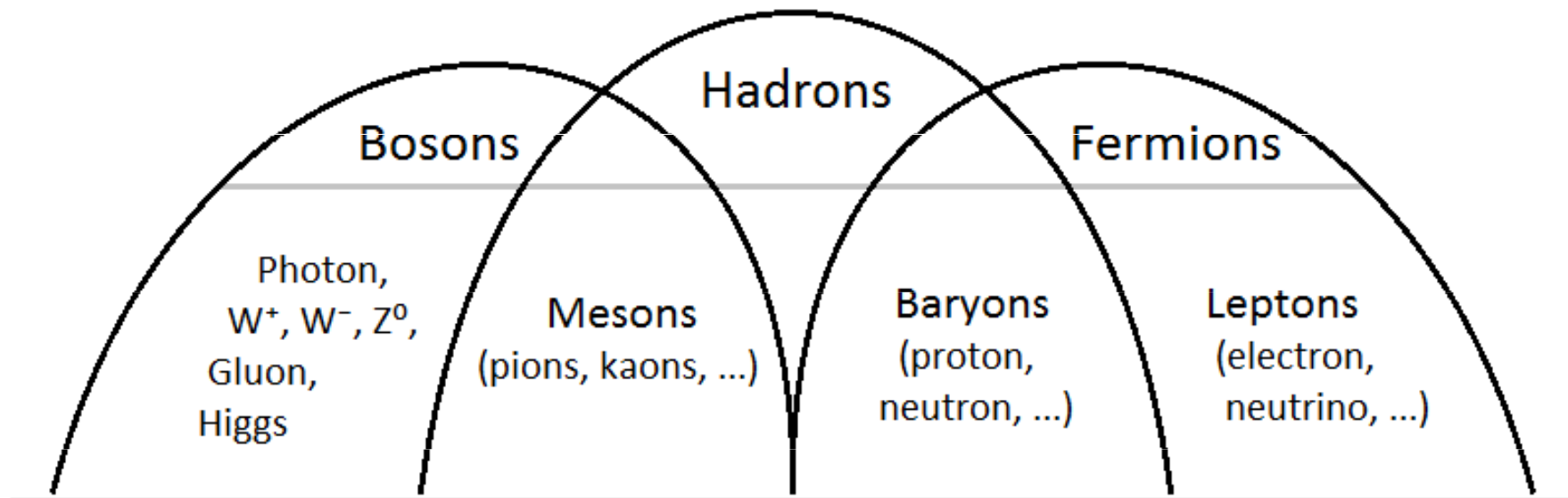
- „obyčejné“ (z.z. hmotnosti, náboje, hybnosti, spinu)
- „neobyčejné“ (z.z. leptonového čísla, baryonového čísla, podivnosti, půvabu (charm), barvy, bottomness)

# Systematika elementárních částic



# Systematika elementárních částic

-další kritéria



## Částice hmoty

Fermiony (spin 1/2)

Kvarky

Leptony

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

## Částice interakcí

Bosony (celočíslný spin)

Silná interakce:



Elektromagnetická interakce:



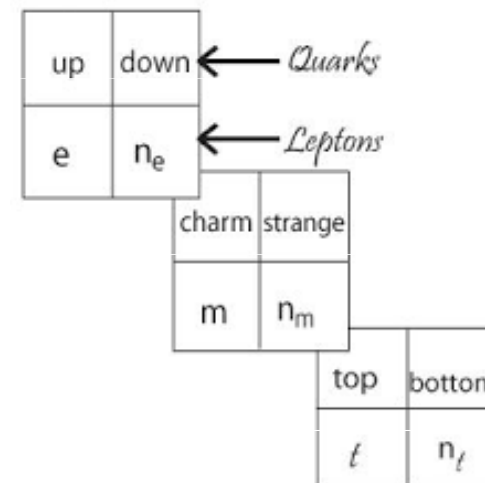
Slabá interakce:



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.

**LEPTONY**

# LEPTONY

- Leptos = lehký. Smysl tohoto názvu je ale již jen historický, nejtěžší částice z této skupiny, **tauon**, má téměř dvojnásobně větší hmotnost než proton
- Mají spin  $\frac{1}{2}$  a buďto nemají žádný náboj nebo nesou 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 **neutrína** (*elektronové, mionové a tauonové*).
- Antičástice k leptonům (antileptony) jsou kladné částice – pozitron ( $e^+$ ), mion  $m^+$ , tauon  $t^+$  a odpovídající antineutrína se od neutrín 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.
- 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).
- elektrony **interagují elektromagnetickou i slabou interakcí**
- **neutrino interagují jen slabou interakcí** (proto je pro ně látka velmi průhledná, například sluneční neutrino projdou bez problémů celou zeměkoulí)

# 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 ( $\hbar$ )	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



# LEPTONY – ELEKTRONY

- **Elektron je první objevenou elementární částicí.** Nalezl ho anglický fyzik **John Joseph Thomson** (1856–1940) v roce 1897 v katodovém záření.
- Jde o stabilní částici s hmotností  $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- a elektrickým nábojem  $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Elektron hraje nesmírně důležitou roli v atomární látce. Rozdílné chování různých atomů je způsobeno rozdílnou konfigurací elektronových obalů.
- 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.

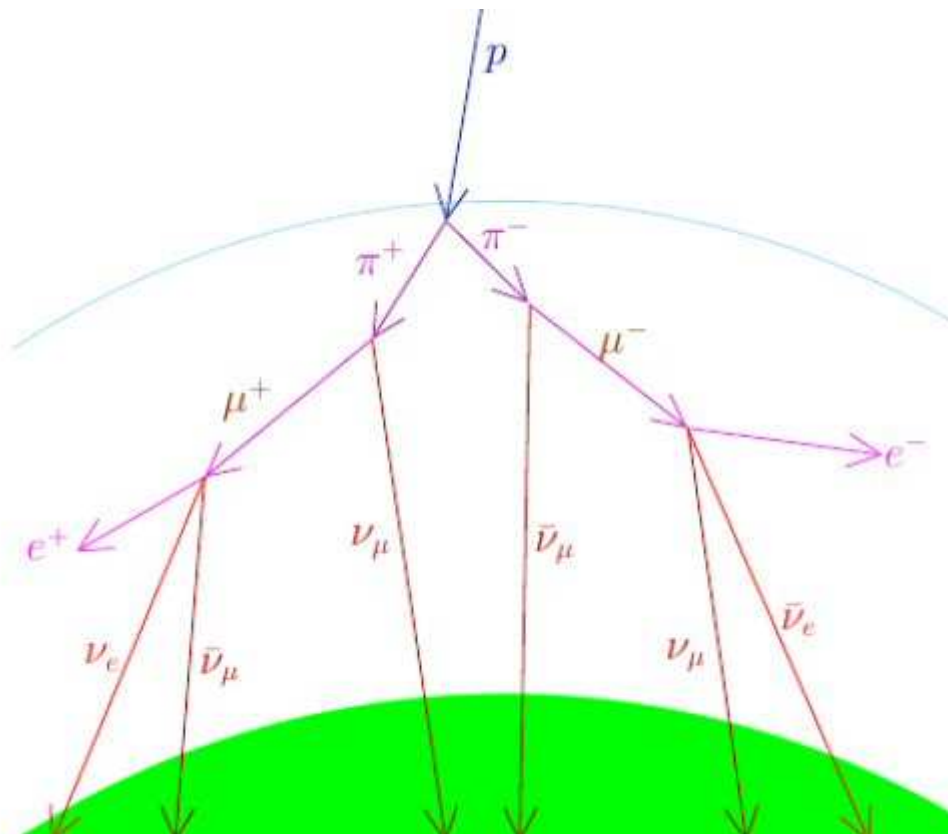
# LEPTONY – MIONY (řecky μείον = 'mínus', v angl. muon)

- Tentýž Carl Anderson, který objevil pozitron, objevil za pomoci mlžné komory ve sprškách kosmického záření také **těžký elektron** neboli **mion**, a to v roce 1936 (ve stejném roce, kdy obdržel **Nobelovu cenu** za nalezení pozitronu).



- Mion 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:  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ .

# LEPTONY – MIONY

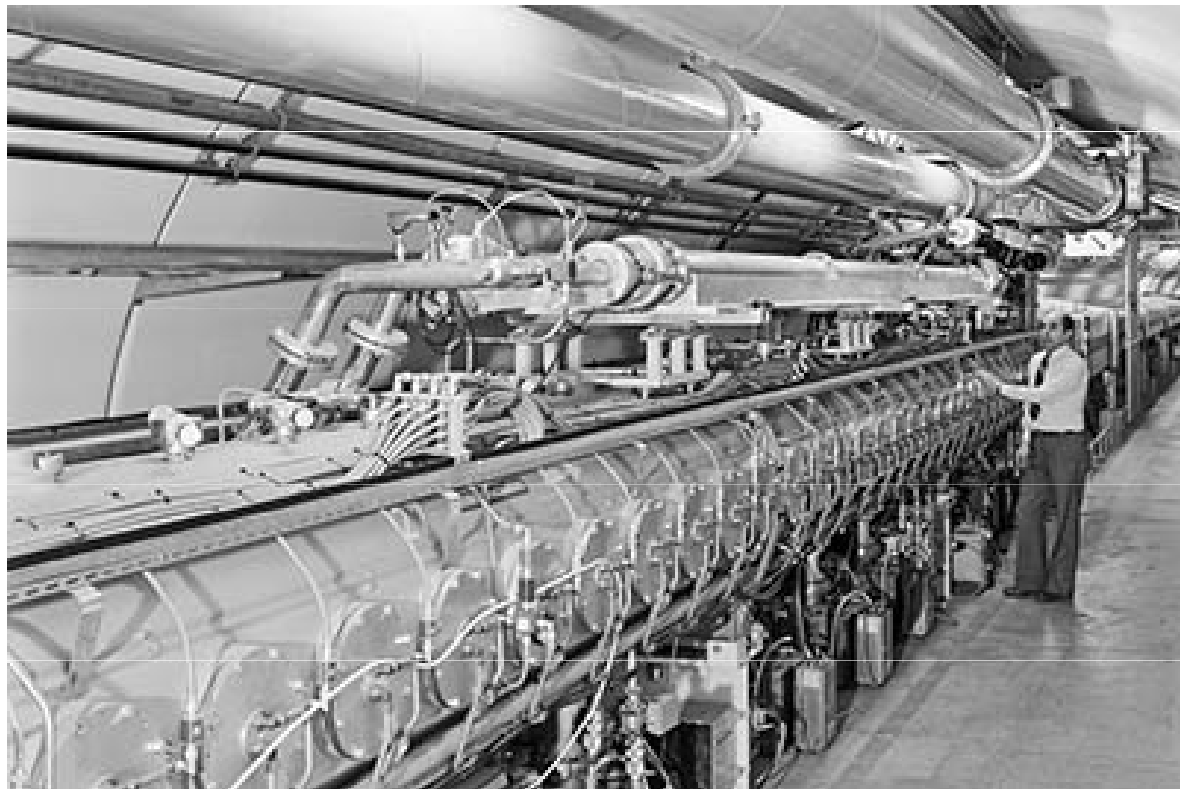


- Miony s relativistickými rychlostmi vznikají interakcí kosmického záření s horními vrstvami atmosféry.
- Vzhledem ke své krátké době života by neměl mion nikdy dopadnout na zemský povrch. Avšak díky dilataci času žije mion z hlediska pozorovatele na Zemi „déle“ a má dosti času, aby dopadl na povrch 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.

# LEPTONY – TAUONY (Lepton

$\tau$ )

- Tauon je třetí z elektronů, říkáme mu supertěžký elektron.
- Má **náboj stejný jako elektron** a **hmotnost 3 484  $m_e$** , to je téměř dvojnásobek klidové hmotnosti protonu.
- Jde o **nestabilní** částici s dobou života 0,3 ps. Rozpadá se na své lehčí dvojníky (elektron nebo mion) a neutrino.
- V přírodě se dnes běžně nevyskytuje, **lze ho připravit uměle** na urychlovačích.



# LEPTONY – TAUONY

## (Lepton $\tau$ )

- V raných horkých fázích vesmíru byly všechny tři formy elektronu rovnoměrně zastoupeny. Tato rovnováha se narušila až tehdy, když průměrná energie částic ve vesmíru klesla pod klidovou energii tauonu, což znemožnilo jeho samovolný vznik.
- ...Ve vesmíru se tak stalo při teplotě 20 bilionů kelvinů (ve zlomku mikrosekundy po jeho vzniku).
- Tauon byl **objeven v roce 1977 na urychlovači SPEAR** ve Stanfordském urychlovačovém centru týmem, který vedl americký fyzik Martin Lewis Perl (\*1927).
- Za **objev tauonu** získal Martin Lewis Perl **Nobelovu cenu za fyziku** pro rok 1995. Druhou polovinu této ceny získal Frederick Reines za **objev neutrina**.



# LEPTONY – NEUTRINA

Spolu s fotony nejhojnější částice ve vesmíru

Neutrino jsou **věrní souputníci elektronů**. Pokud při slabé interakci vznikne lepton, musí se také objevit příslušná částice, tedy antilepton → **Zákon zachování**

**leptonového čísla**: celkové leptonové číslo (L) před a po interakci musí být stejné

## Beta-minus Decay



## Beta-plus Decay



- **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.

Energie rozpadu se rozdělí náhodně mezi **elektron a antineutrino** nebo mezi **pozitron a neutrino**. Proto jsou spektra beta-částic i (anti)neutrín **spojitá** s určitou **maximální energií**.

- Tři rodiny...stejné vlastnosti kromě hmotnosti
- Zákon zachování tří leptonových čísel  $L_e, L_\mu, L_\tau$  (a tím i celkového leptonového čísla)

$L_x$  je +1 pro částici z rodiny  $x$ , -1 pro antičástici z rodiny  $x$ , 0 pro jinou částici

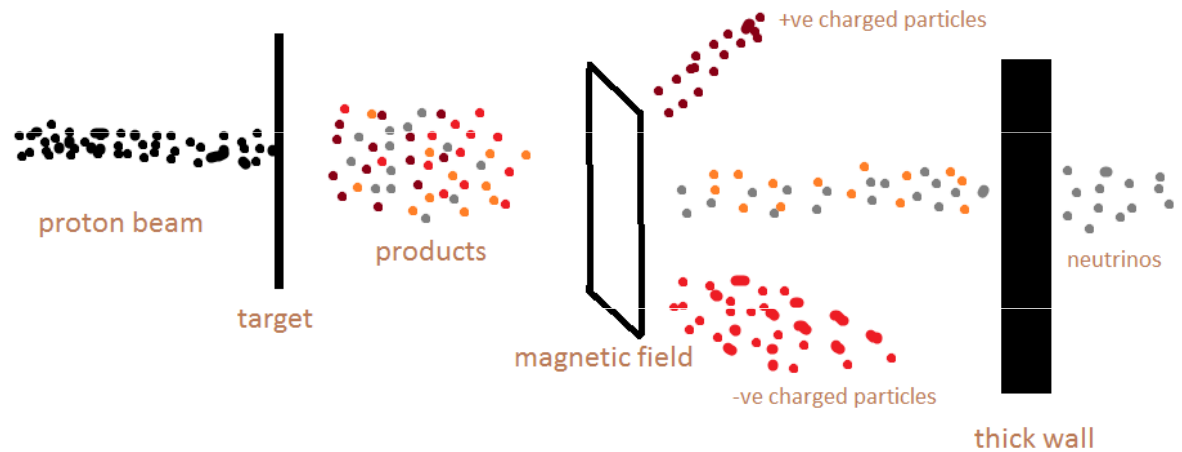
např. právě uvedený rozpad mionu

$$\mu^+(L_\mu = -1) \rightarrow e^+(L_e = -1) + \nu_e(L_e = +1) + \bar{\nu}_\mu(L_\mu = -1)$$

# LEPTONY – NEUTRINA

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

- Neutrina mají **bodovou strukturu, poloviční spin a nulový elektrický náboj**.



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

Learn Something New Every Day  
LEARNED.com





# LEPTONY – NEUTRINA

Neutrina se vyskytují ve 3 podobách. Neutrinové stavy jsou superpozicí tzv. hmotových stavů



VLASTNÉ STAVY HMOTNOSTI



VLASTNÉ STAVY VŮNE



RODINA	ČÁSTICE	SYMBOL	HMOTNOST (MeV/c <sup>2</sup> )	NÁBOJ	ANTIČÁSTICE
Elektron	elektron	$e^-$	0,511	-1	$e^+$
	elektronové neutrino <sup>b</sup>	$\nu_e$	0	0	$\bar{\nu}_e$
Mion	mion	$\mu^-$	105,7	-1	$\mu^+$
	mionové neutrino <sup>b</sup>	$\nu_\mu$	0	0	$\bar{\nu}_\mu$
Tauon	tauon	$\tau^-$	1 777	-1	$\tau^+$
	tauonové neutrino <sup>b</sup>	$\nu_\tau$	0	0	$\bar{\nu}_\tau$

# 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



## Takaaki Kadžita / Takaaki Kajita (Higašimacujama, 1959)

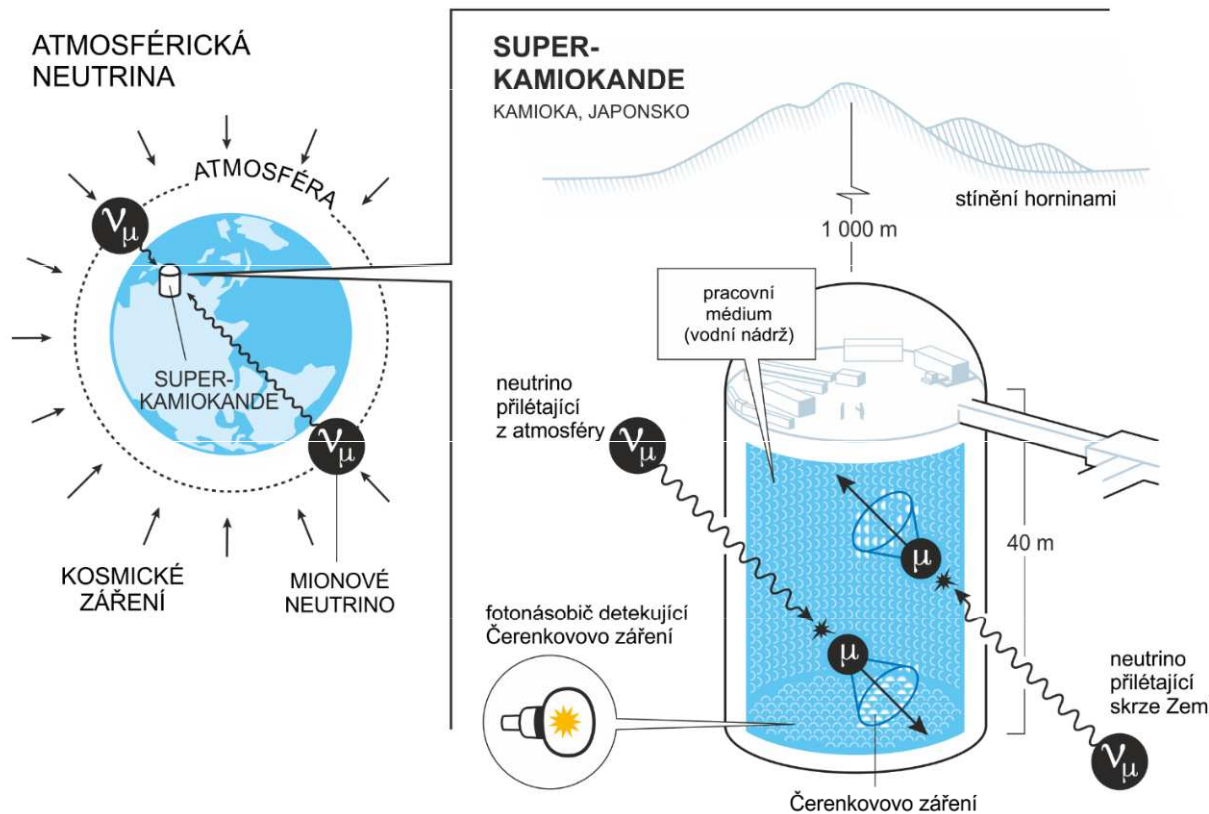


Schéma principu měření oscilací v japonském detektoru Super-Kamiokande.

Zdroj: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.

Hledání oscilací neutrin trvalo tři desítky let. Nakonec byly objeveny na detektoru Super-Kamiokande, který je citlivý jak na elektronová, tak na mionová neutrina. Na Zemi neustále dopadá intenzivní tok kosmického záření – velkého množství energetických protonů a dalších částic. Při interakci s atomy a molekulami v horní vrstvě atmosféry vznikají tzv. sekundární spršky částic, které obsahují mionová a elektronová neutrina v poměru 2:1. Z oblasti nad detektorem uletí neutrina jen několik desítek kilometrů a nestačí oscilovat, tj. změnit svou podobu, a tím poměr detekovaných neutrin. Atmosférická neutrina ale vznikají i na druhé straně Zeměkoule, projdou Zemí a vletí do detektoru z jeho spodní části. Taková neutrina ulétla několik tisíc kilometrů, některá stihla oscilací změnit svou podobu, a poměr počtu mionových a elektronových neutrin je proto směrově závislý. Právě tuto závislost naměřili v roce 1998 na detektoru Super-Kamiokande, a definitivně tak potvrdili existenci oscilací neutrin a jejich nenulovou hmotnost.

# LEPTONY – NEUTRINA

- Objev neutrin souvisí s objevem radioaktivity. Už na počátku 20. století bylo zjevné, že něco není v pořádku. Elektrony vylétávající z rozpadajících se jader měly spojitou energii. Podle teorie by ale měly mít jen některé hodnoty energie odpovídající příslušným kvantovým přechodům v jádře.
- → V roce 1930 navrhnul rakousko-německo-americký fyzik Wolfgang Pauli (1900–1958), že by spolu s elektronem měla vznikat ještě velmi malá neutrální částice, která by odnášela část energie, a tím by se problémy se zákonem zachování energie vyřešily.
- V roce 1932 **objevil** anglický fyzik James Chadwick (1891–1974) **neutron**, ale tato částice byla příliš hmotná na to, aby problémy vyřešila.
- V roce 1933 navrhuje italský fyzik Enrico Fermi (1901–1954), aby se hledaná částice jmenovala **neutrino**, což v italštině znamená „**malý neutron**“.
- Na objev neutrina si ale lidstvo muselo počkat až do roku 1956, kdy od Pauliho návrhu uplynulo 26 let, tedy více než čtvrt století.
- Neutrino nakonec polapili američtí fyzikové **Frederick Reines a Clyde Cowan** v toku částic z jaderné elektrárny v Savannah River v Jižní Karolíně. → zrod neutrinové fyziky a neutrinové astronomie.



# LEPTONY – NEUTRINA -

## zdroje

- Neutrina k nám přilétají z **niter všech hvězd**, kde vznikají při termojaderné fúzi.
- Země je doslova zaplavena **slunečními neutriny** z naší nejbližší hvězdy.
- Dalším zdrojem jsou exploze supernov, kde neutrina odnášejí uvolněnou energii z nitra explodující hvězdy.
- Na povrch Země dopadají také **atmosférická neutrina**, která vznikají při interakci kosmického záření s atmosférou.
- V nitru Země vznikají při radioaktivním rozpadu **geoneutrina**.
- Neutrina uměle vytváříme v jaderných elektrárnách a při srážkách částic v urychlovačích.
- A měl by tu být ještě jeden zajímavý zdroj neutrin – tzv. **reliktní neutrina**, která se oddělila od zárodečné polévky našeho vesmíru přibližně v jedné sekundě jeho existence. Tato reliktní neutrina ale zatím chytat neumíme.
- Žijeme tedy v moři neviditelných neutrin, která procházejí bez povšimnutí nejen námi, ale i Zemí a ostatními tělesy ve vesmíru.

# zdroje neutrin

velký třesk

SN1987

20 v's

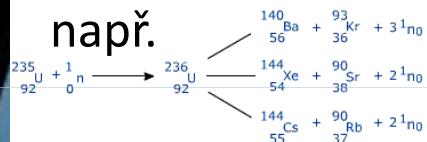
Slunce

atmosferická neutrina

lidské tělo

jaderné reaktory

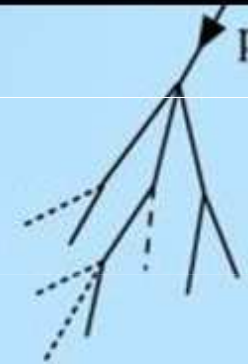
např.



pozemská radioaktivita

urychlovače

$E_\nu$  0.3 – 30 GeV



# LEPTONY – NEUTRINA – elektronové neutrino

- Elektronové neutrino má **nulový elektrický náboj, malou klidovou hmotnost a spin  $\frac{1}{2}$ .**
- Poprvé bylo **polapeno v roce 1956** v toku neutrin z jaderného reaktoru P-105 v jaderné elektrárně v Savannah River v Jižní Karolíně. Američtí fyzikové Frederick Reines (1918–1998 a Clyde Cowan (1919–1974) k detekci využili roztoku kadmiumchloridu.



- Některá z antineutrin letících z reaktoru slabě interagují s protonem za vzniku **pozitronu a neutronu**.
- ....Pozitron téměř okamžitě anihiluje s nějakým elektronem a přitom vznikne dvojice fotonů.
- ....Neutron je absorbován kadmiovým jádrem, které také vyše foton.
- ...Výsledkem je **dvojice charakteristických záblesků** s časovým odstupem 15 ms.

# LEPTONY – NEUTRINA – elektronové neutrino

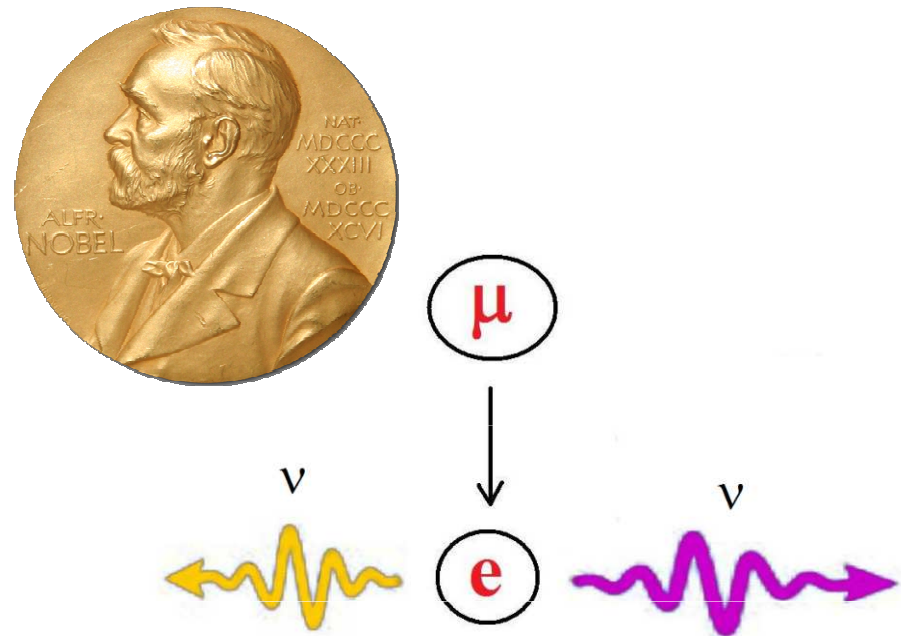
- Za **objev neutrina** resp. antineutrina získal **Frederick Reines Nobelovu cenu** za fyziku pro rok 1995. **Cowan** byl v té době již mrtvý, a proto mu nebylo možné cenu udělit.
- První **detektor** chytající sluneční neutrina zkonstruoval americký fyzik Raymond Davis (1914–2006) v Jižní Dakotě v opuštěném dole Homestake. Základem detektoru byla **nádoba s 615 tunami tetrachloretylénu**. Jádra chlóru se po spojení s neutrinem změnila na snadno detekovatelné radioaktivní jádro argonu s poločasem rozpadu 35 dní.
- Zachycený tok neutrin ze Slunce byl zhruba třetinový oproti teorii, což bylo způsobeno oscilacemi neutrin (Davisův detektor byl citlivý jen na elektronová neutrina). **Oscilace mezi elektronovým a mionovým neutrinem** byly prokázány v roce 1998 na japonském detektoru SuperKamiokande a téměř současně na americké Sudburské neutrinové observatoři SNO.





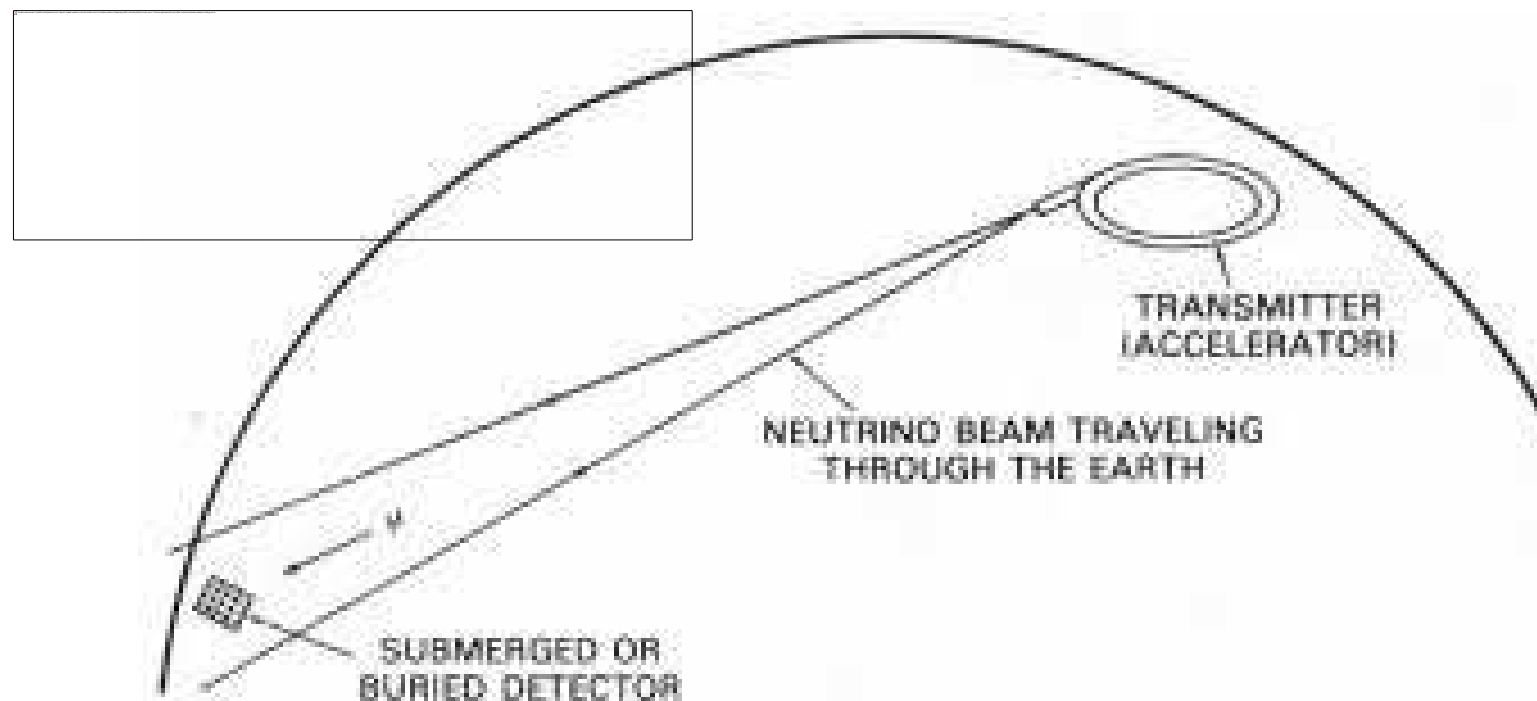
# LEPTONY – NEUTRINA – mionové neutrino

- Mionové neutrino má, stejně jako elektronové, **nulový elektrický náboj**, **malou klidovou hmotnost** a **spin  $\frac{1}{2}$** .
- O jeho existenci se spekulovalo od 40. let, **objeveno** bylo v roce **1962** americkými fyziky **Leonem Ledermanem** (\*1922), **Melvinem Schwartzem** (1932–2006) a **Jackem Steinbergerem** (\*1921) v Brookhavenské národní laboratoři na Long Island ve Spojených státech.
- Za tento objev získali všichni **tři Nobelovu cenu za fyziku pro rok 1988**.
- Mionová neutrina vznikají přirozenou cestou při rozpadu  $\pi$ -mezónov (piónov) a mionov.
- Uměle – kolize  $p^+$  s atomovými jádry v urychlovačích
- Oscilace mezi mionovými a elektronovými neutriny byla prokázána na detektoru Super-Kamiokande v roce 1998.

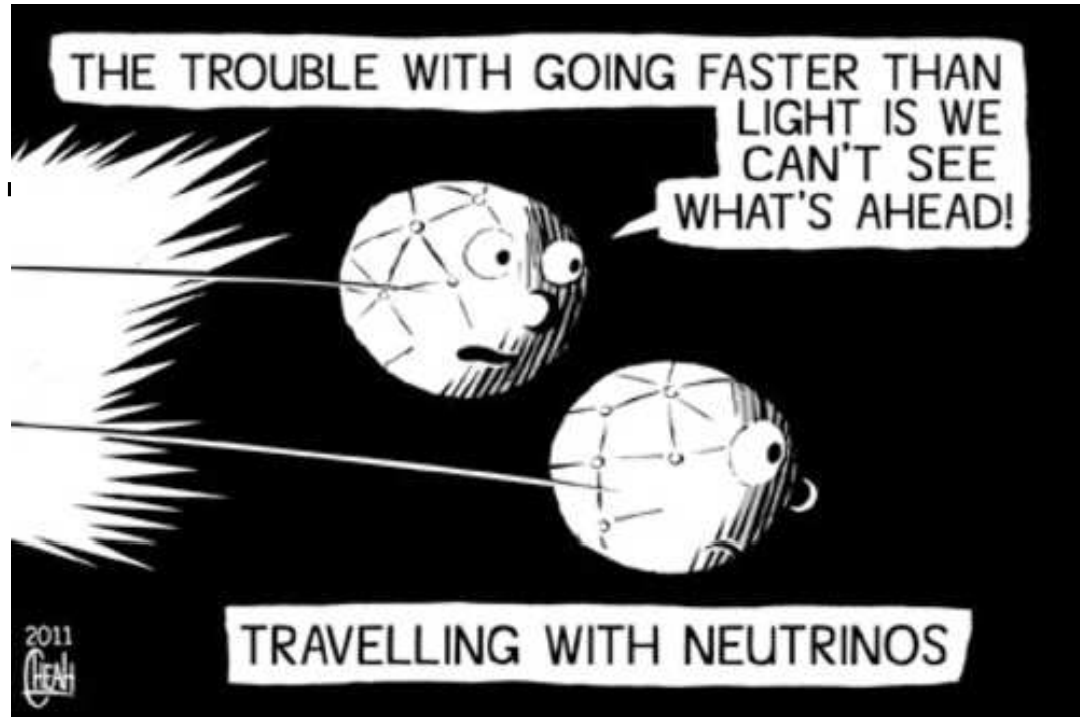


# LEPTONY – NEUTRINA – mionové neutrino

- V několika současných experimentech je vysílán svazek mionových neutrin do detektoru záměrně pod povrchem Země. Nejznámější je experiment CNGS (*CERN Neutrinos to Gran Sasso*), při němž se mionová neutrino vyrobená srážkami protonů v útlumovém členu posílají pod zemí do italského Gran Sasso (732 kilometrů daleko), kde je chytají detektory Opera a Icarus. Cílem experimentu je sledování oscilací neutrin.



# 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 – NEUTRINA – tauonové neutrino

- Tauonové neutrino má, stejně jako elektronové a mionové, **nulový elektrický náboj, malou klidovou hmotnost a spin  $\frac{1}{2}$ .**
- Po objevu tauonu v roce 1975 bylo zřejmé, že by mělo existovat i tauonové neutrino. Bylo objeveno až v roce 1999 v americkém Fermilabu v experimentu DONUT (*Direct Observation of the NU Tau*).
- Šlo už o období obřích kolaborací, kdy jsou na objevitelských člancích někdy i stovky jmen a lze jen těžko určit, kdo je skutečným objevitelem.
- V roce 2010 byla poprvé detekována oscilace mionového neutrina na tauonové v experimentu CNGS (*CERN Neutrinos to Gran Sasso*). Stalo se tak na experimentu Opera pod horou Gran Sasso.
- Všechna tři neutrina jsou superpozicí tří hmotových stavů. Úhly superpozice (koeficienty mixování) jsou dnes relativně dobře známy. Různé mixáže hmotových stavů vnímáme v experimentech jako jednotlivá neutrina. Nalezení konkrétní kombinace hmotových stavů má vždy jen pravděpodobnostní charakter.

# Detekce neutrin

Neutrina interagují s látkou velmi slabě

→ detektory musí být velké

Většinou jsou pod zemí – stínění kosmického záření

Velká pozornost věnována dalším zdrojům pozadí → výběr konstrukčních materiálů

## Metody detekce

- Čerenkovovy detektory – velký objem vody obklopený fotonásobiči
- Scintilátory
- Radiochemické metody

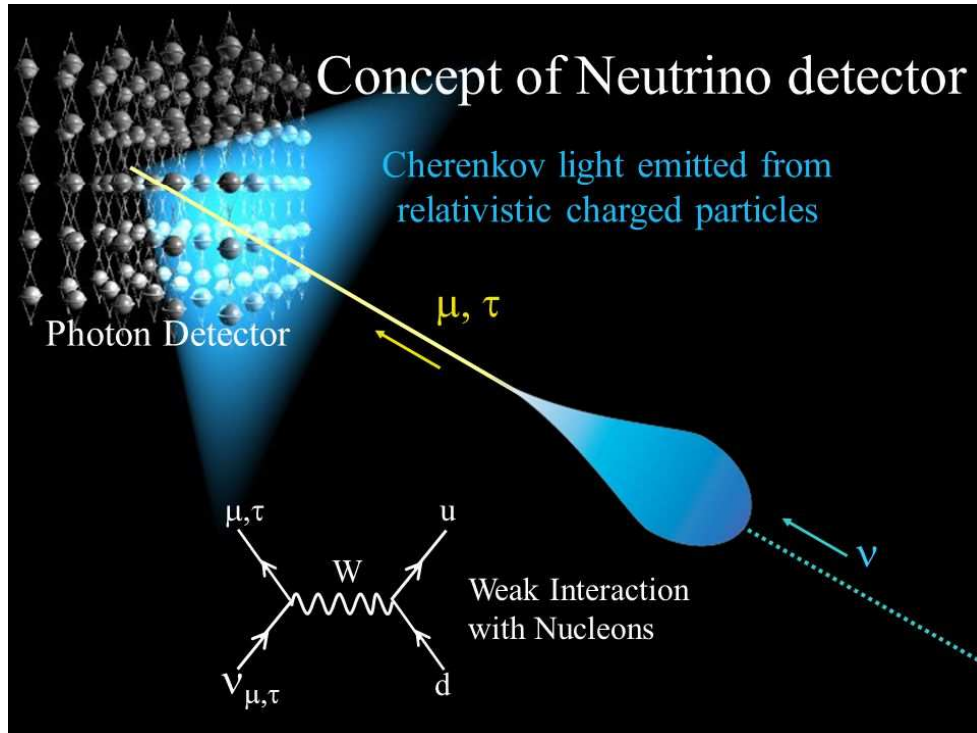
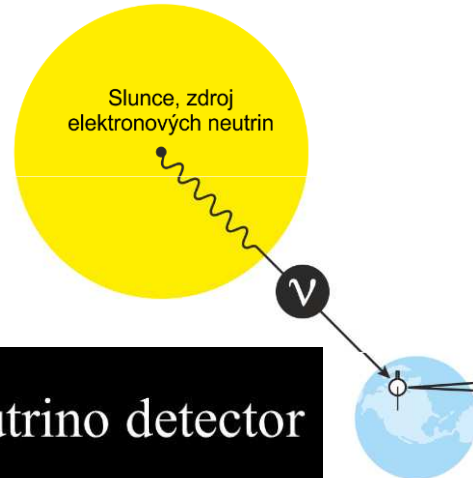
## DETEKCE NEUTRIN



Nositel Nobelovy ceny Raymond Davis se koupe v nádrži obklopující slavný detektor v dole Homestake, kde byl objeven tok neutrin ze Slunce neodpovídající teorii. Objev odstartoval hon za oscilacemi neutrin. Zdroj: Brookhaven National Laboratory.

# DETEKCE NEUTRIN

SLUNEČNÍ  
NEUTRINA



SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO)

ONTARIO, KANADA

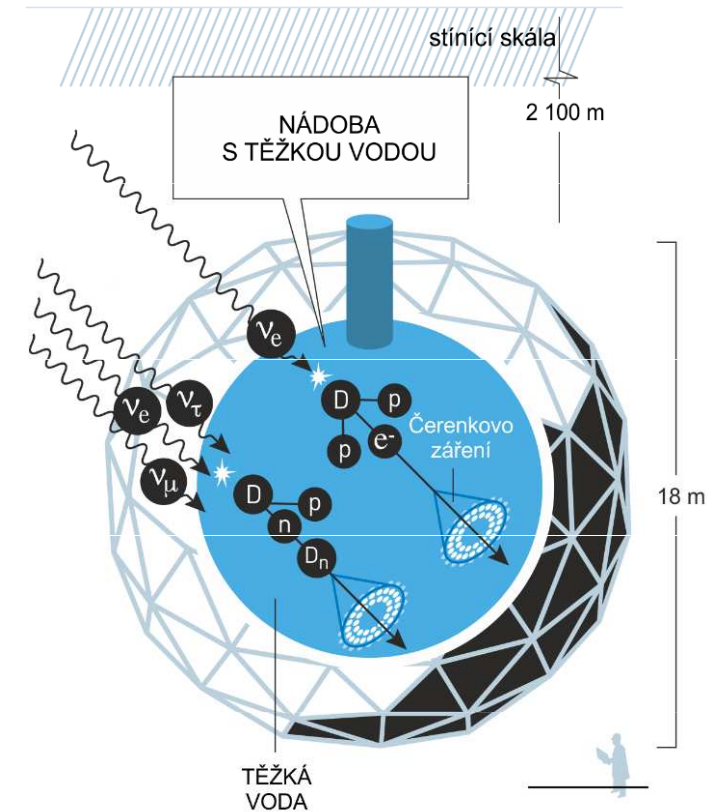


Schéma principu měření oscilací v Sudburské neutrinové observatoři v Kanadě.

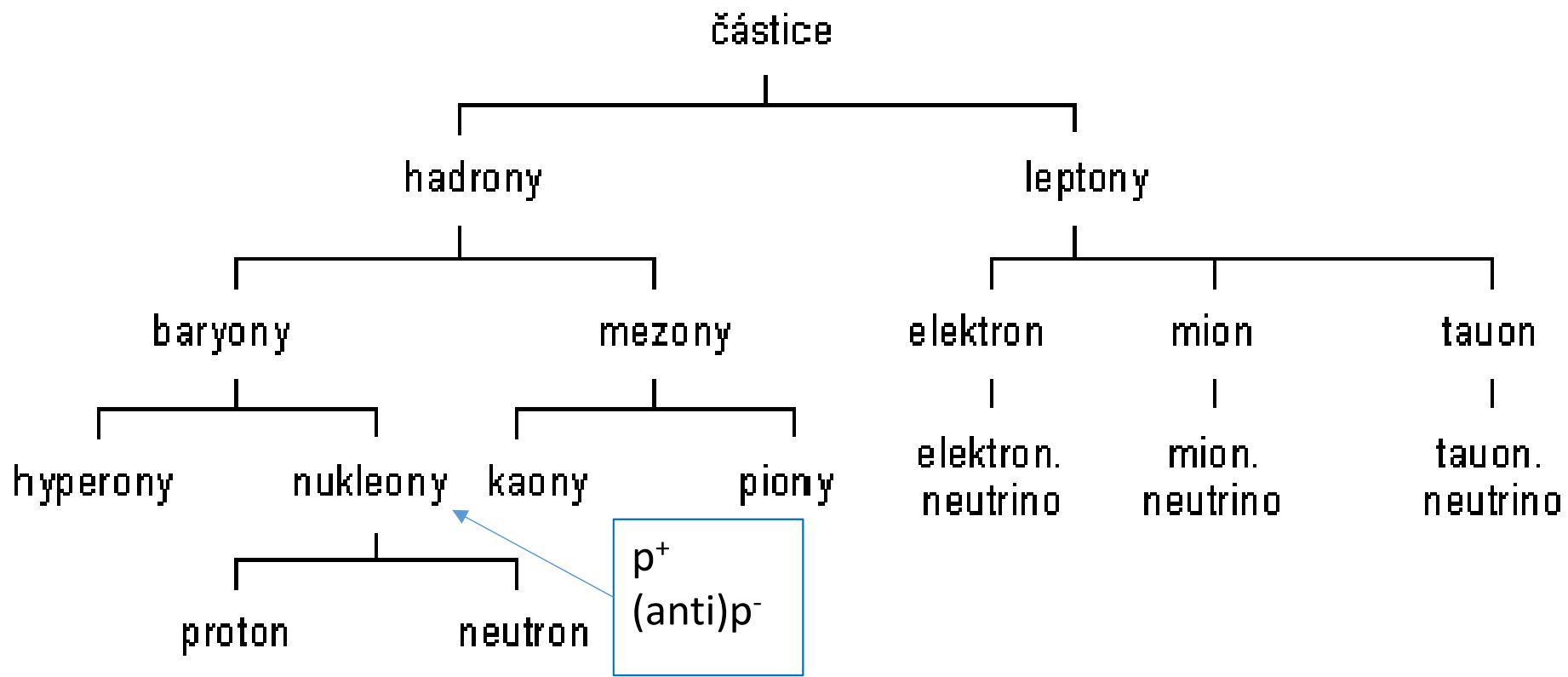
Zdroj: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences.



# DETEKCE NEUTRIN

- **Super-Kamiokande** – japonská neutrinová observatoř z roku 1996 umístěná 1 000 m pod povrchem hory Ikeno Jama ve starém zinkovém dole poblíž městečka Kamioka. Horniny nad detektorem jsou ekvivalentní 2 700 metrům vodního sloupce. Nádobu detektoru obsahuje 50 000 tun vody, na stěnách je 13 000 fotonásobičů, průměr nádoby je 40 metrů. Detektor detekuje Čerenkovovo záření elektronu nebo mionu vzniklého srážkou elektronového nebo mionového neutrina s neutronem. Z tvaru kužele Čerenkovova záření lze snadno odlišit elektronové a mionové neutrino. V průměru je zachyceno jedno atmosférické neutrino za hodinu a půl. V roce 1998 byl oznámen objev oscilací neutrin. V roce 2001 byl detektor vážně poškozen. Oprava trvala 5 let a stála 25 milionů USD.
- **SNO** – Sudbury Neutrino Observatory, podzemní těžkovodní Čerenkovův detektor v Ontariu v Kanadě. Je určen zejména pro detekci slunečních neutrin. Umístěn je v blízkosti městečka Sudbury ve starém niklovém dole Creighton 2 100 m pod zemí. Do akrylátové nádoby s průměrem 12 metrů je nalito 1 000 tun ultračisté těžké vody. Vně akrylátové koule je měřicí sféra o průměru 17 m, na které je umístěno 9 600 fotonásobičů. Vše je ponořeno do kontejneru s čistou vodou o rozměrech 22×32 m. V detektoru byly v roce 2001 potvrzeny oscilace slunečních neutrin.

**HADRONY**  
**(a KVARKY)**



# 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, tato nestabilita neutronu 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) protonem a (lehkým) elektronem, spin nejčastěji 0, vzácněji celočíselný (→ bosony)
- **BARYONY** – řec. *barys* = těžké částice (všechny baryony mají hmotnost rovnou nebo větší, než je hmotnost protonu); spin poločíselný  $\frac{1}{2}$  nebo  $\frac{3}{2}$



# Baryony

Škvarky! Škvarky!  
Škvarky!



- 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
- 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.

# 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**

# Mezony (kaony, piony, .

Středně těžké částice (těžší než  $e^-$  ale lehčí než  $p^+$  → z řeckého „mezos“ = střední)

reagují na silnou interakci a mají nulový nebo celočíselný spin - jsou tedy současně hadrony a bosony

Dnes známe:

**3 mezony  $\pi$  (piony):**  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  a  $\pi^0$ ,

**4 K-mezony (kaony)**

**a mezon Ds**

Vznik: jaderné reakce s vysokou energií, při rozpadu baryonů jako meziprodukty

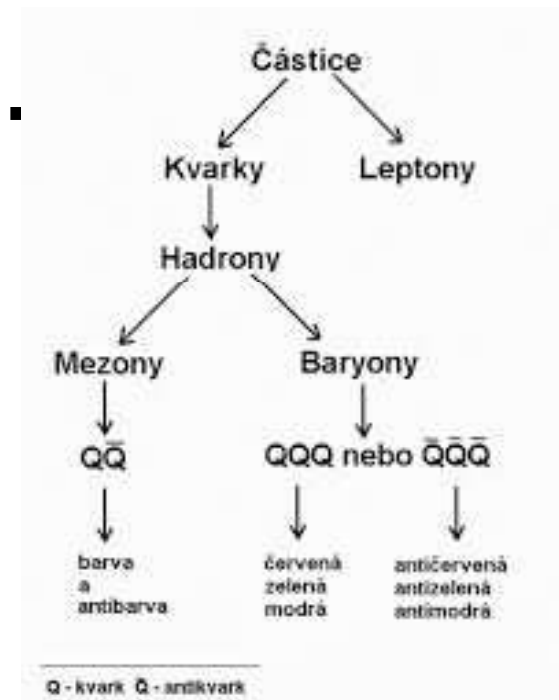
Životnost je velice **nízká**, od miliontiny sekundy po  $10^{-16}$  sekundy. To díky přeměně páru kvark - antikvark, ze kterých jsou mezony složeny

Složení: **1 kvark + 1 antikvark** (dané barvy a antibarvy)

Náboj: pozitivní, negativní nebo bez náboje

Spin: 0 nebo celočíselný (→ bosony)

Existenci mezonů poprvé předpověděl v roce **1935 Hideki Yukava**, za což v roce 1949 obdržel **Nobelovu cenu** za fyziku.



# MEZONY

MEZON $q\bar{q}$	kvarky	elektrický náboj	hmotnost (GeV/c <sup>2</sup> )	spin
$\pi^+$ pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
$K^-$ kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
$K^0$ kaon	$d\bar{s}$	0	0.498	0
$\rho^+$ ró	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
$D^+$ D	$c\bar{d}$	+1	1.869	0
$\eta_c$ éta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0
a mnoho dalších				

PIONY (mezony  $\pi$ )  
KAONY (K-mezony)

	hmotnost (u )	Z	S	C	kvarkové složení
$\pi^+$	0,150	+1	0	0	$u\bar{d}$
$\pi^-$	0,150	-1	0	0	$d\bar{u}$
$\pi^0$	0,145	0	0	0	$u\bar{u}$ nebo $d\bar{d}$
$K^+$	0,530	+1	+1	0	$u\bar{s}$
$K^-$	0,530	-1	-1	0	$s\bar{u}$
$\Phi$	1,095	0	0	0	$s\bar{s}$
$J/\psi$	3,32	0	0	0	$c\bar{c}$
$D^0$	2,00	0	0	+1	$c\bar{u}$
$D^+$	2,005	+1	0	+1	$c\bar{d}$

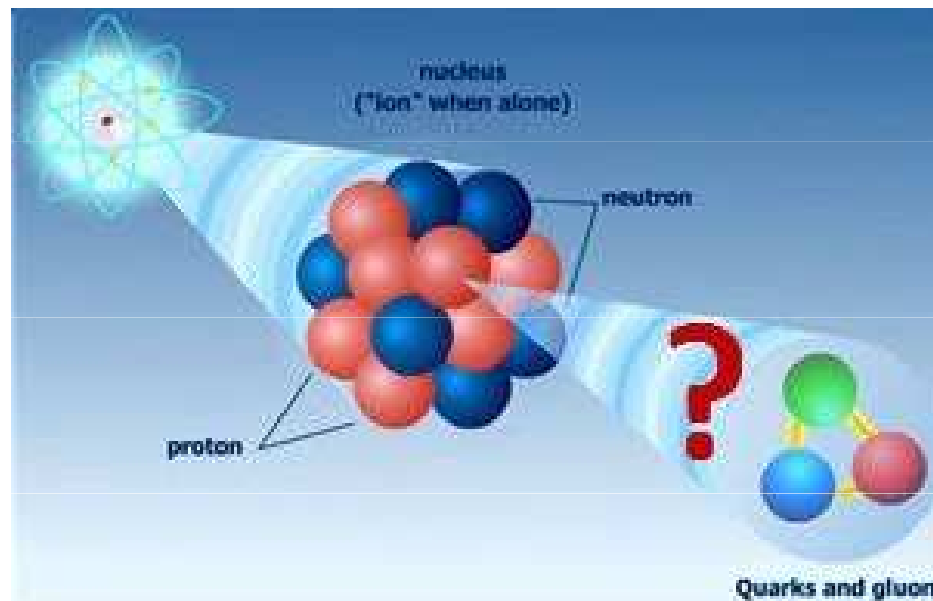
V tabulce jsou uvedeny některé mezony, Z je elementární náboj, S a C jsou vlastnosti kvarků.

$\pi$ -mezony (piony), K-mezony (kaony) a jiné těžké částice mají leptonový i baryonový náboj rovný nule



# KVARKY

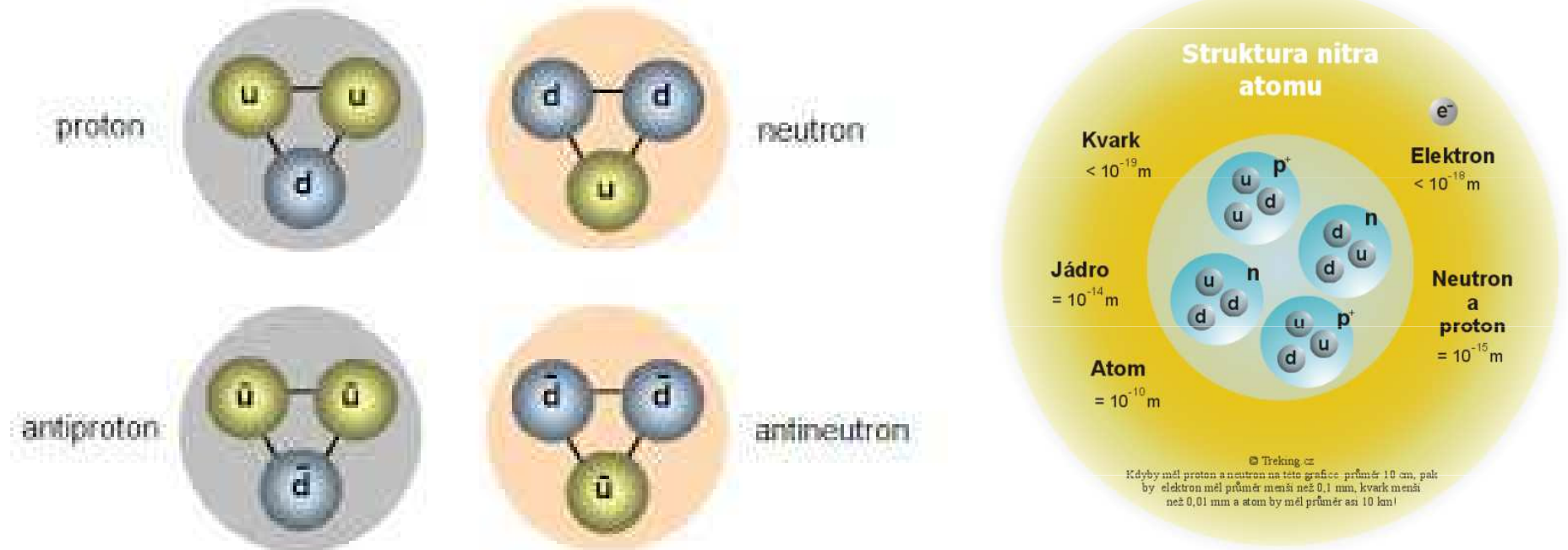
- Hadronů a leptonů (resp. fermionů a bosonů) a jejich antičástic bylo nakonec **nalezeno až příliš mnoho** na to, aby se daly považovat za fundamentální elementární částice, na jejichž základě by sedala vystavět **elegantní** teorie nejjemnější podstaty hmoty → patrně mají vnitřní strukturu → ještě menší částice ? → **KVARKY**
- že se protony a neutrony skládají z dalších částic (kvarků) nezávisle na sobě předpověděli George **Zweig**, Murray **Gell-Mann** (1964) – **Nc1964**
- **Nejprve šlo jen o matematický model.** Experimentální podpora : 1967. Poslední z předpovězených kvarků byl experimentálně potvrzen v roce 1994.



# KVARKY

- Téměř všechno kolem sebe (i sebe samé), všechny atomy a molekuly našeho světa, planety, Slunce, můžeme postavit ze dvou leptonů (elektronu a elektronového neutrina) a ze dvou kvarků (**up**, **down**).
- Fundamentální částice první generace

(běžné atomy, běžné energie): kvarky **u** a **d** + leptony **e<sup>-</sup>**, **ν<sub>e</sub>**,



# KVARK

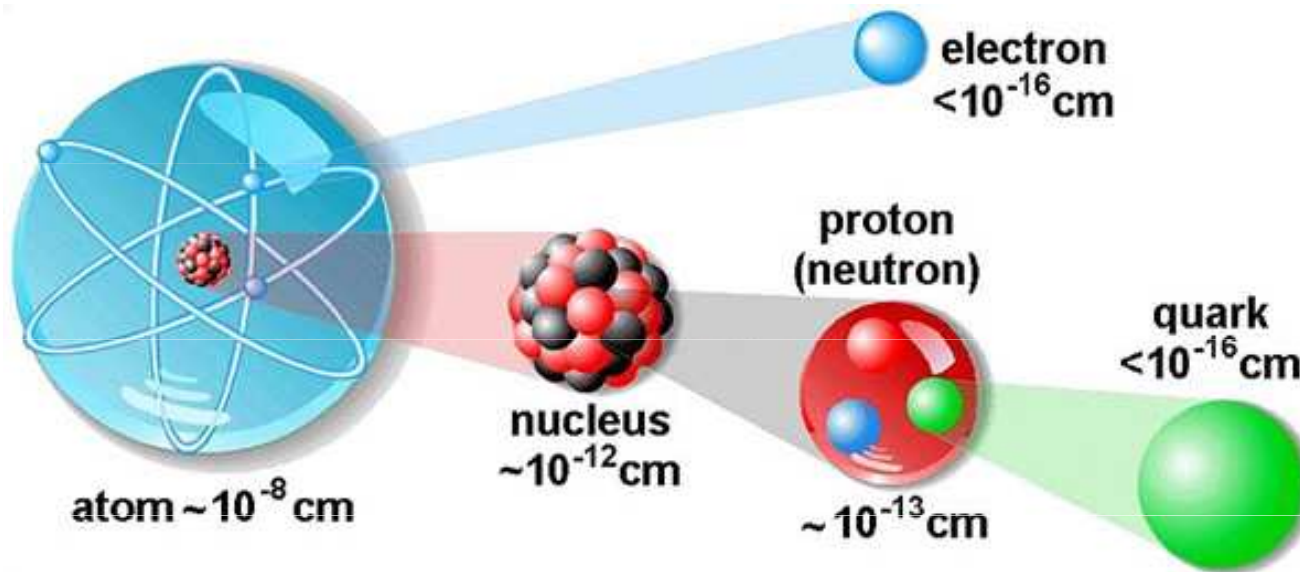


jméno částice	hmotnost (MeV)	spin ( $\hbar$ )	náboj ( $e$ )	síly	rok objevu	objevitel
down d (dolů)	5	1/2	-1/3	S, W, E, G	1968	Bloom (SLAC)
up u (nahoru)	3	1/2	+2/3	S, W, E, G	1968	Bloom (SLAC)
strange s (podivný)	95	1/2	-1/3	S, W, E, G	1968	-
charm c (půvabný)	1 300	1/2	+2/3	S, W, E, G	1974	Ting (BNL), Richter (SLAC)
bottom b (spodní)	4 200	1/2	-1/3	S, W, E, G	1977	Lederman (Fermilab)
top t (svrchní)	173 000	1/2	+2/3	S, W, E, G	1995	kolaborace CDF a D0

- Po jistou dobu tedy „postačovaly“ pouze kvarky  $u$ ,  $d$  a  $s$
- Později (1974) objeven mezon  $J/\Psi$  ( $\psi$ ), více než 3x těžší než proton – ten již nebylo možné pomocí uvedených kvarků zařadit → byla to první částice obsahující nový, těžký kvark s novou vlastností – **půvab ( $c$ )**
- Později pak byly objeveny další kvarky – **krásný/spodní ( $b$ )** a v roce 1994 při srážkách vysoce energetických protonů s antiprotony **kvarky truth/svrchní ( $t$ )**
- **Druhá generace fundamentálních částic**
- $s$  a  $c$  ( $+ \mu^-, \nu_\mu$ ) (vysoce energetické jevy)
- **Třetí generace fundamentálních částic**
- $b$  a  $t$  ( $+ \tau^-, \nu_\tau$ ) (silné urychlovače)
- 2. a 3. generace částic vytvářejí **neobvyklé a nestálé hadrony** při interakci částic s vysokou energií

# KVARKY

- Podle kvantové charakteristiky nazvané "vůně" (flavour) existuje šest kvarků *u*, *d*, *s*, *c*, *b*, a *t*.
- Každá "vůně" se přitom vyskytuje ve třech "barvách", což je další kvantová charakteristika (vnitřní stupeň volnosti), a to **červené**, **zelené** a **modré**



# KVARKY

- Kvarky  $s, c, b$ , a  $t$  a příslušné antikvarky jsou nositeli dalších vlastností, které se nazývají:
  - Podivnost (strangeness), kvant číslo, S
  - Půvab (charm), kvant číslo C
  - Krása (beauty), kvant číslo B
  - a pravda (truth), kvant číslo T
- Tyto názvy 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



Up



Down



Strangeness



Charm



Beauty (bottom)



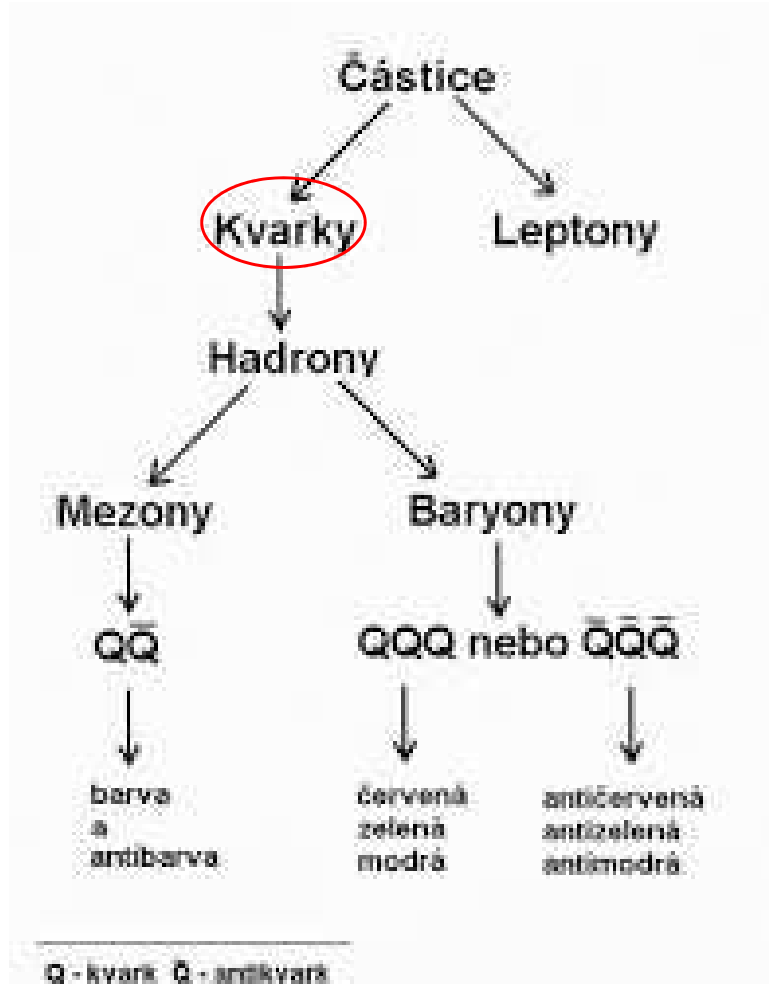
Truth (*in vino veritas*) (Top)

# KVARKY

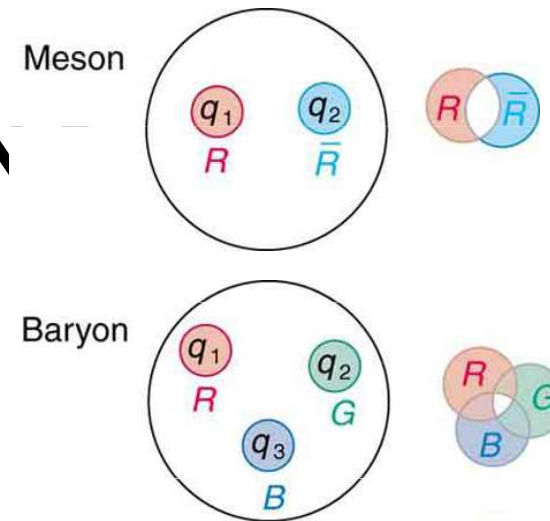
Původ slova KVARK: Slovo kvark našel Gell-Mann v románu Jamese Joyce "Finneganovo probuzení". Hlavnímu hrdinovi se zdá sen, ve kterém racci letící za plující lodí křičí: "Tři kvarky pro doktora Marka". V celém románu se toto podivné slovo již znovu nikde neobjeví.

Kvarky mají některé podivné vlastnosti:

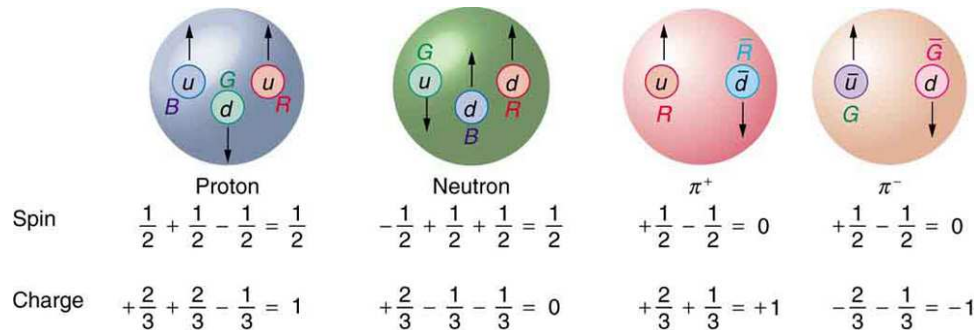
- fermiony se spinem  $\frac{1}{2}$
- jejich elektrický náboj představuje buď  $\frac{1}{3}$  nebo  $\frac{2}{3}$  jednotkového náboje.
  - Kvarky "u", "c" a "t" mají náboj  $Q(u, \dots) = \frac{2}{3}$
  - kvarky "d", "s" a "b" mají náboj  $Q(d, s, \dots) = -\frac{1}{3}$ .
- Kvarky mají baryonové číslo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



# KVARKY A HADRON



- **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  $uud$ ) =  $2/3 + 2/3 + (-1/3) = 1$



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



# KVARKY

- Příčinou soudržnosti kvarků je **SILNÁ JADERNÁ INTERAKCE (SJI)**
- Je to nejsilnější síla vůbec,
- přičemž je asi **100x silnější** než interakce elektromagnetická (proto mohou protony koexistovat v jádře i přes jejich stejný náboj)
- dosah SJI je extrémně malý, prakticky nepřesahuje hranice jádra
- současná fyzika (kvantová teorie pole) vysvětluje obecně interakci dvou částic jako proces, který je zprostředkován výměnou jiné 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 ji proto jakožto částici zaznamenat.
- Kvantům pole proto říkáme **VIRTUÁLNÍ ČÁSTICE**
- Kvanta silového působení mezi kvarky jsou tzv. **gluony**
- **Příčinou existence hadronů je tedy neustálá výměna – emise + absorpce – gluonů mezi kvarky**

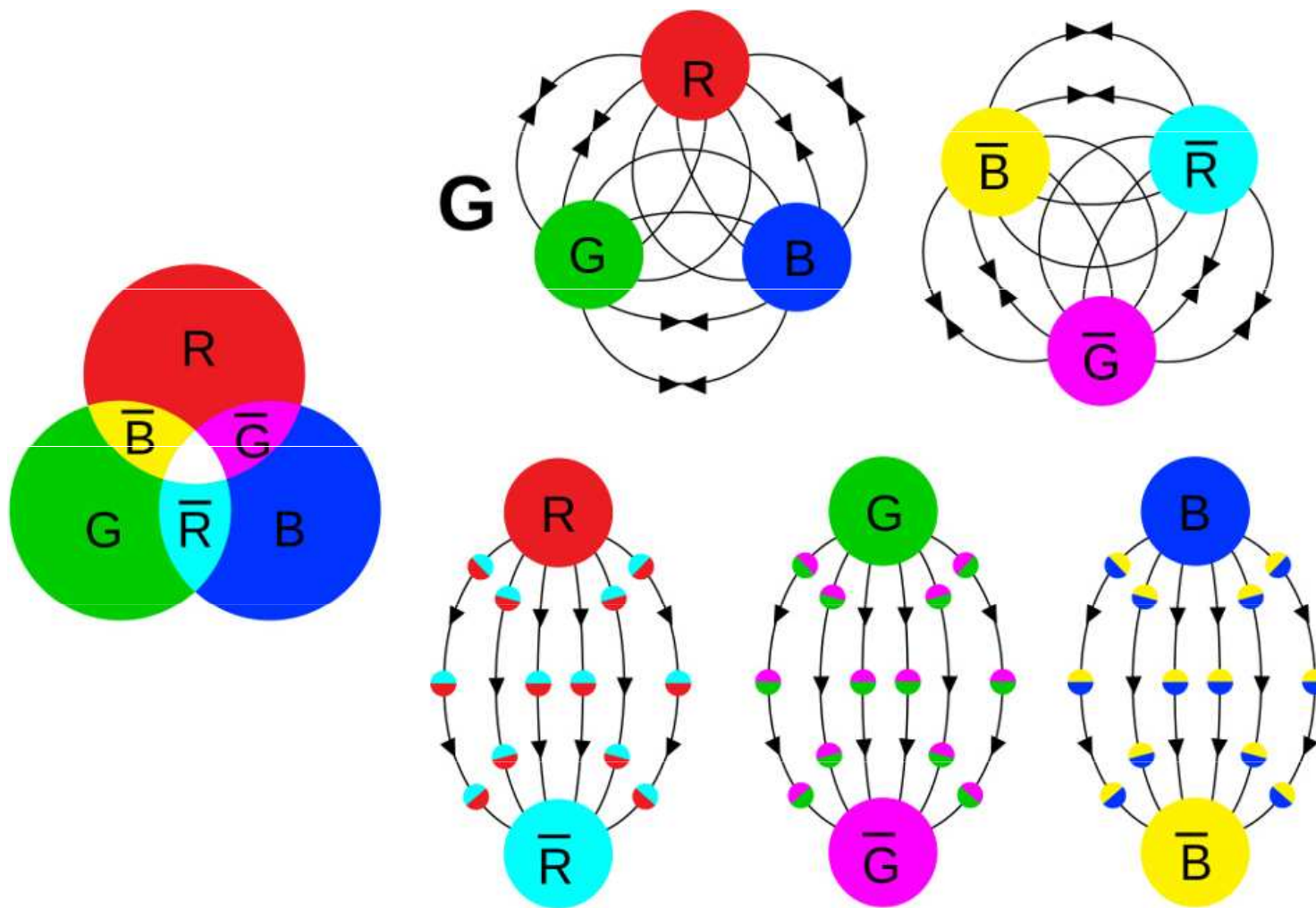


# KVARKY - interakce

- Kvarky se vyskytují **ve třech kvantových stavech – barvách** (červená, modrá, zelená), přičemž silná jaderná interakce působí právě mezi barevnými částicemi (obdobně, jako elektromagnetická interakce mezi elektricky nabitými částicemi)
- 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

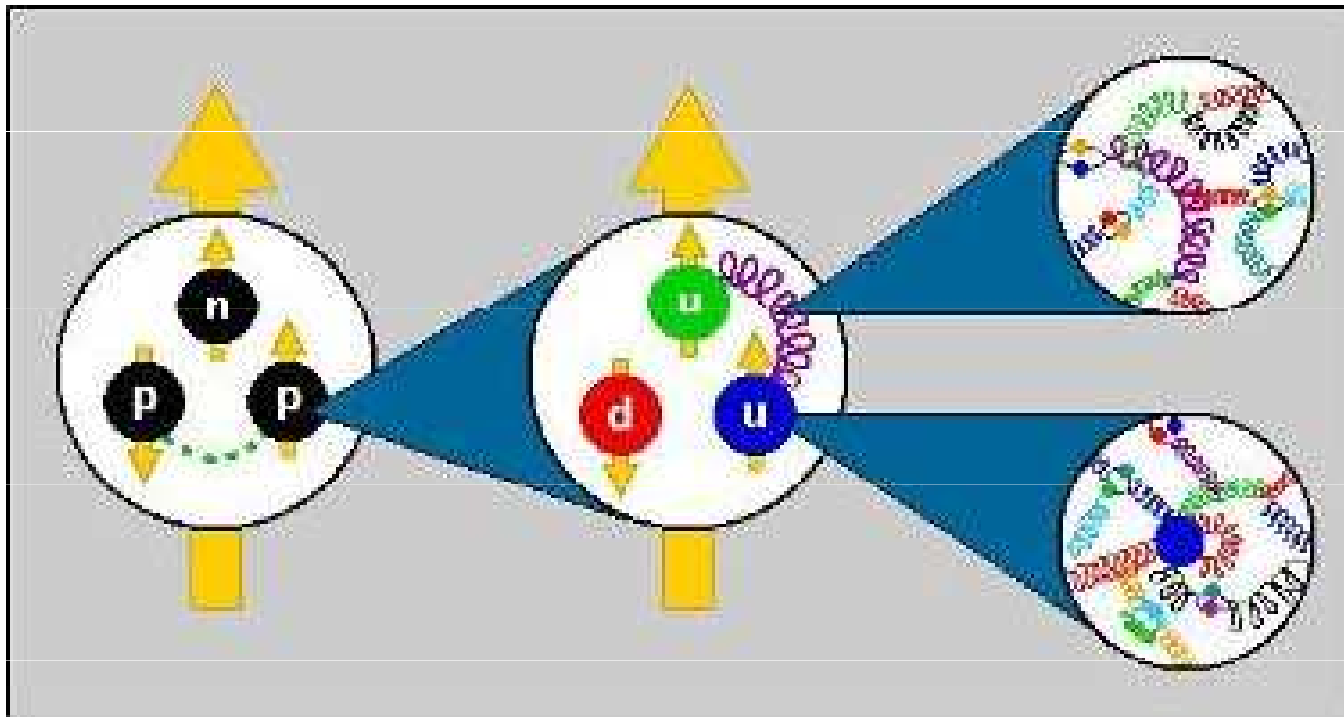


# (ANTI)KVARKY - interakce



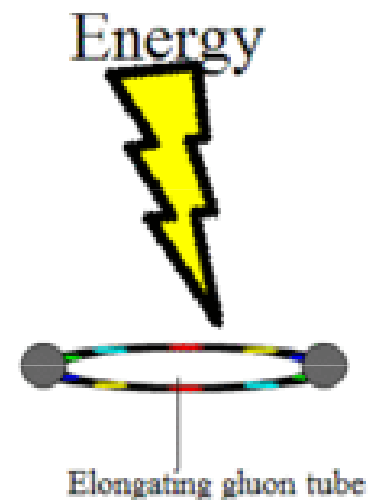
# KVARKY – SILNÁ INTERAKCE

- Proton se skládá ze tří kvarků s barevným nábojem (uprostřed). Kvarky uvnitř protonu si vyměňují gluony (vpravo). Takto probíhá **silná interakce**.



# KVARKY - interakce

- Díky silné interakci drží kvarky za normálních podmínek uvnitř hadronů a tudíž **se nemohou vyskytovat samostatně** (existují pouze ve vázaných stavech – hadronech) – mluvíme o „**uvěznění kvarků**“.
- Je to důsledkem extrémně krátkého dosahu SJI. Působení sil mezi kvarky je přitom dost podivné – energie mezi kvarky v hadronech neklesá se vzdáleností (na rozdíl od el-mag. interakce). Může dojít jen k jejich reorganizaci a vzniku nových 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)



# 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

©NewScientist

“normal” hydrogen      “exotic” (kaonic) hydrogen

Camouflaging the atom  
Adding a muon to a helium atom makes it behave like a super-heavy hydrogen atom

● Electron    ● Proton    ● Neutron

**HELIUM**  
Nuclear charge +2

**“SUPER-HEAVY HYDROGEN”**  
Effective nuclear charge +1

**ORDINARY HYDROGEN**  
Nuclear charge +1

A muon can replace an electron in a helium atom. The muon is heavier than the electron and orbits much closer to the nucleus, shielding half its positive charge

The resulting atom behaves chemically like hydrogen but is four times the mass

proton      anti-proton

electron      positron

**hydrogen**      **anti-hydrogen**

**ANTIATOMY** = tvořené pouze antičásticemi -  
např. antideuteron (anti-jádro těžkého vodíku) –  
antiproton + antineutron.

# Antičástice (předpověděl Paul Dirac, 1928)

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

**kvarky**

**leptony**

elektron, mion, tauon

**hadrony**

**baryony**

$qqq$

proton, neutron ... pí mezony, K mezony ...

**mezony**

$q\bar{q}$

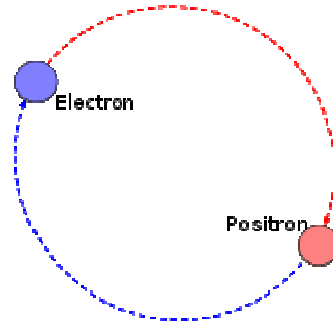
**jádra**

**atomy**

**hmota**

**hvězdy**

**svět**



**Positronium (Ps):**

Hmota a antihmota  
může tvořit i  
metastabilní útvar

**antikvarky**

**antileptony**

pozitron, antimion, antitauon

**antihadrony**

**antibaryony**

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

antiproton, antineutron ... pí mezony, K mezony ...

**antimezony**

$q\bar{q}$

**antijádra**

**antiatomy**

**antihmota**

**antihvězdy ???**

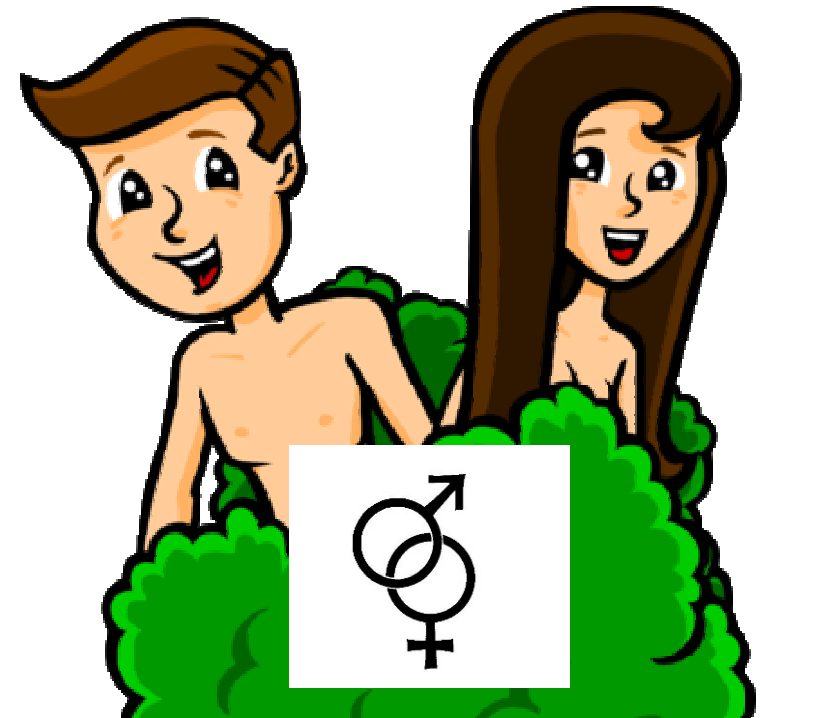
**antisvět ???**



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, směrem vlastního magnetického momentu vzhledem k vlastnímu momentu hybnosti, a leptonového, respektive baryonového čísla, **popř. jiné vlastnosti**
- Charakteristickou vlastností antičástic je jejich intenzivní reakce s příslušnou částicí – obě během reakce zanikají a přeměňují se na lehčí částice, případně fotony



Product of CERN

**Operation:  
Annihilate!**



# 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. Antičásticí neutronu **je antineutron** – můžeme ho od neutronu rozlišit např. právě směrem magnetického momentu





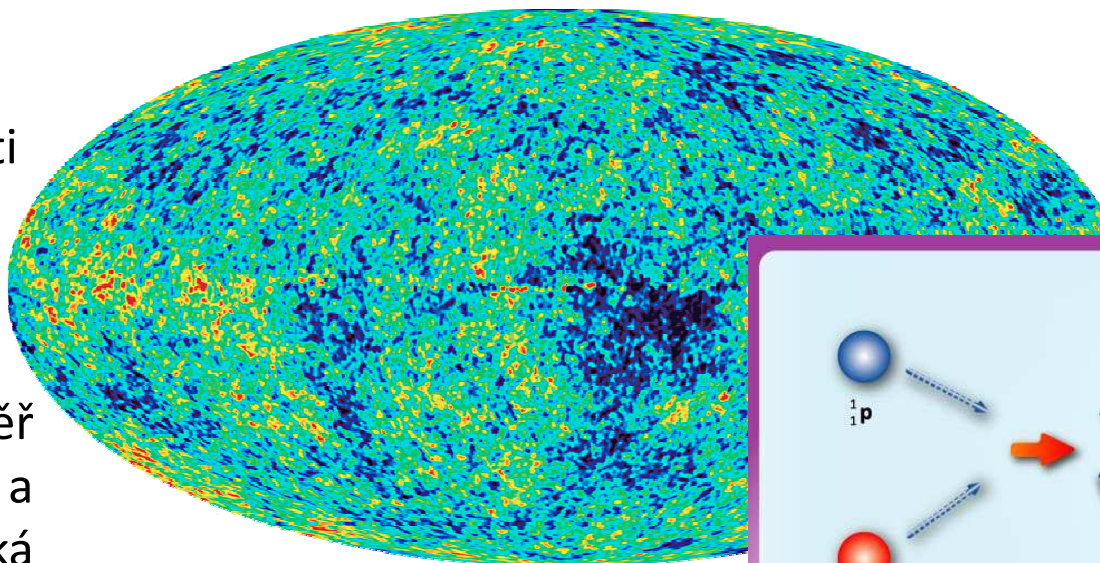
# ANIHILACE

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

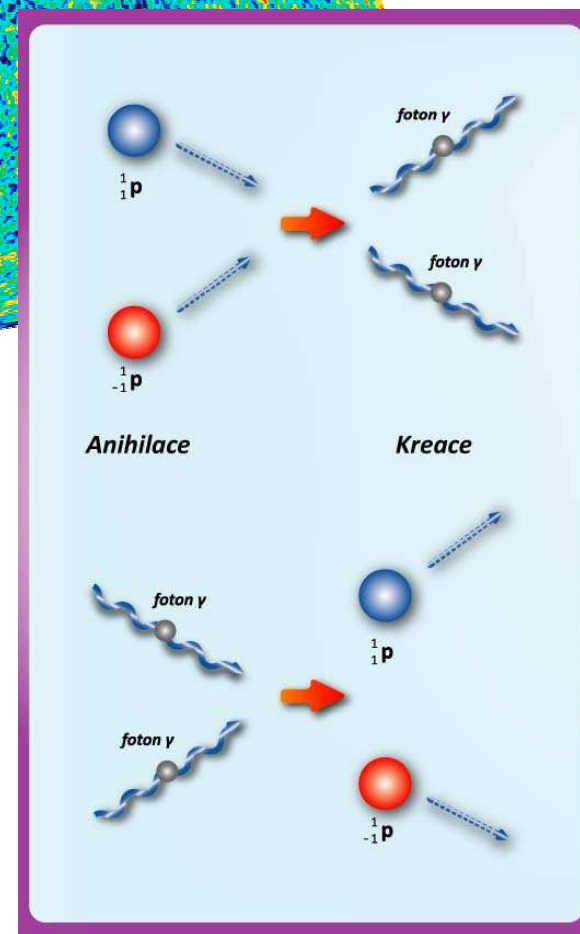
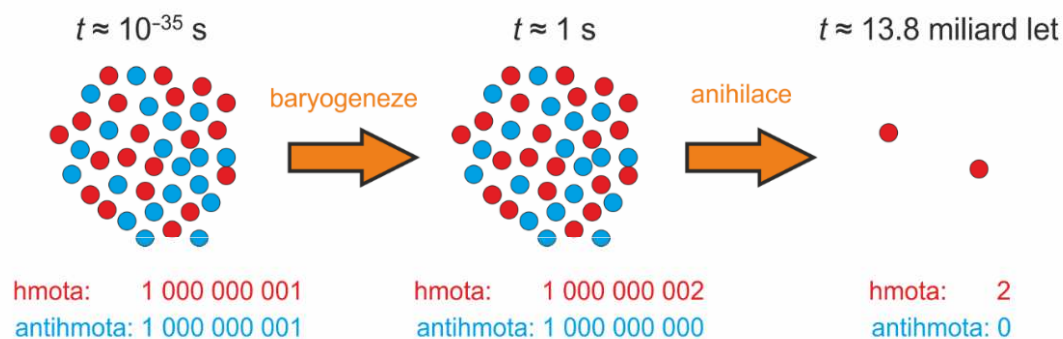
$$E = mc^2$$

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

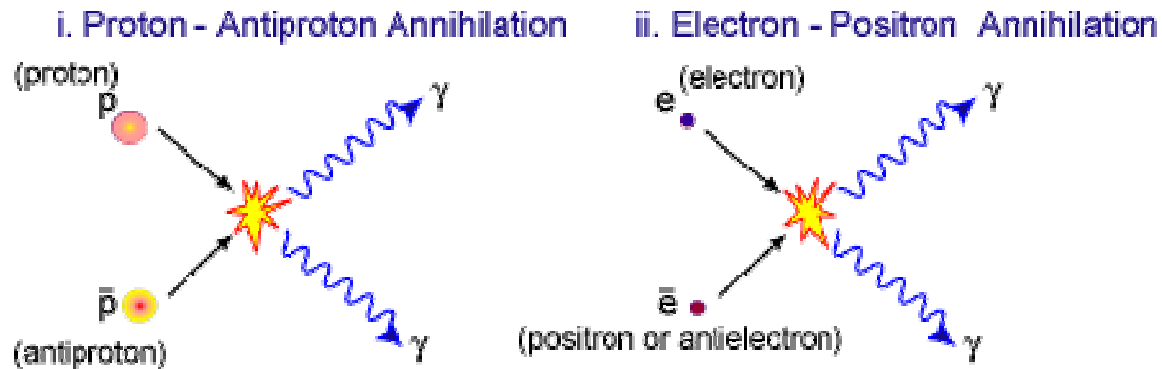
Počátek vesmíru → téměř  
shodné množství hmoty a  
antihmoty → obrovská  
anihilace (vzniká **reliktní  
záření**) – malý přebytek  
hmoty zůstává



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

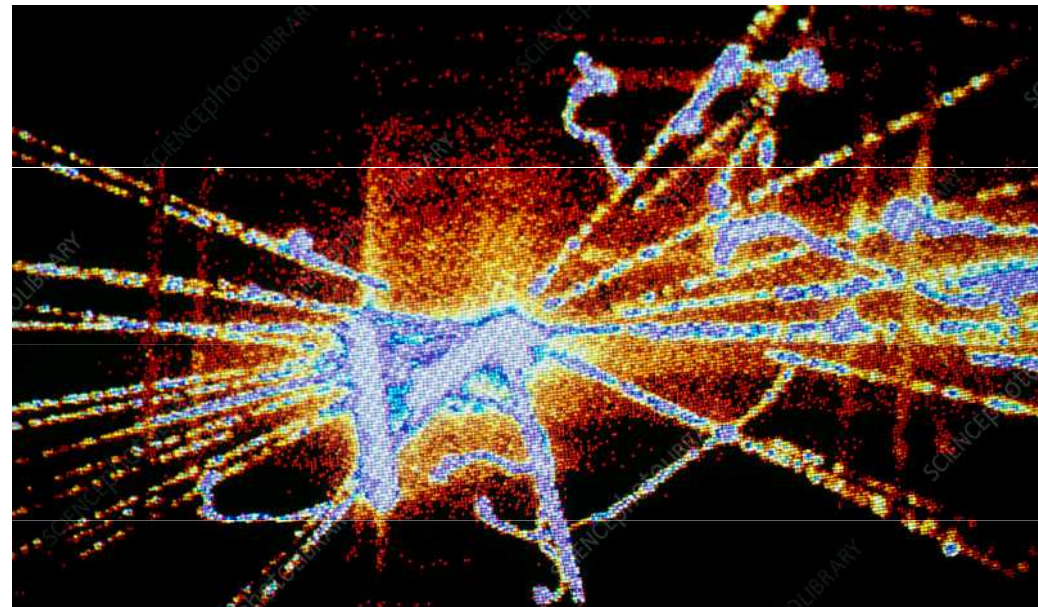
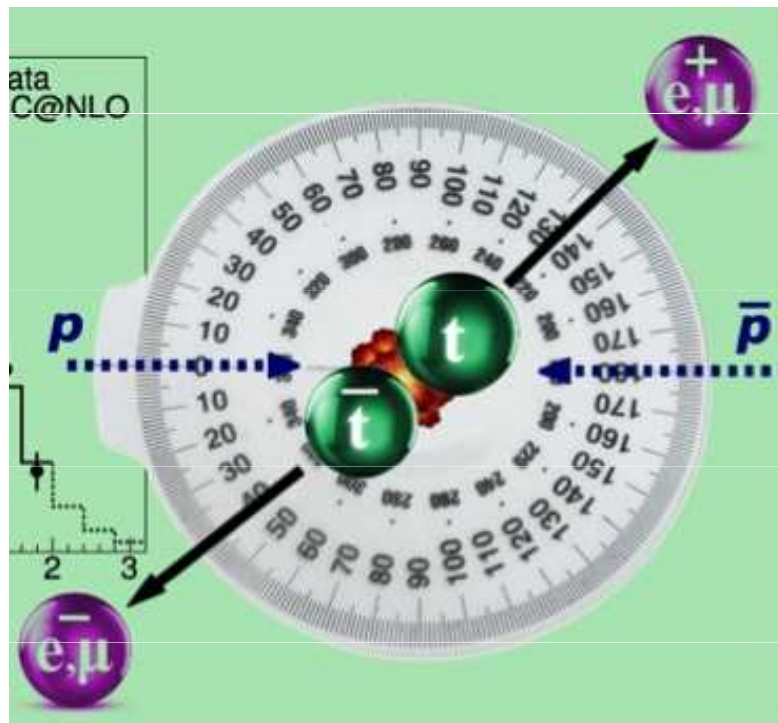


# ANIHLACE



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

- $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$
- (veškerá hmota-klidová energie na kinetickou energii)
- **Anihilace (anti)p a (anti)n<sup>0</sup> → rozpad na mezony**
  - mezony → rozpad na miony + neutrina
  - miony → rozpad na e<sup>-</sup> + neutrina
  - e<sup>-</sup> reagují s e<sup>+</sup> → fotony γ + neutrina
  - (ta mají malinkatou hmotnost)



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.

# ANTI-DEUTERO

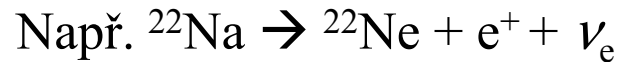
- Vznik **anti-deuteronu**. Je to prvé „anti-jádro“ (tedy jádro atomu antihmoty, složené z více elementárních částic, i když zatím jen ze dvou), jehož existence byla fyzikálně prokázána.
- Je složeno z **antiprotonu** a **antineutronu** a představuje anti-jádro těžkého vodíku, tedy anti-deuteria.
- Tento 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)



# 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



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

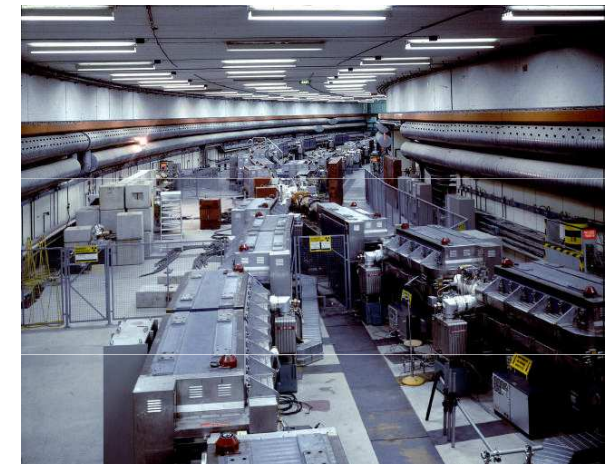
Umělé zdroje :

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

akumulační prsteneček ISR v CERNu (Ženeva)

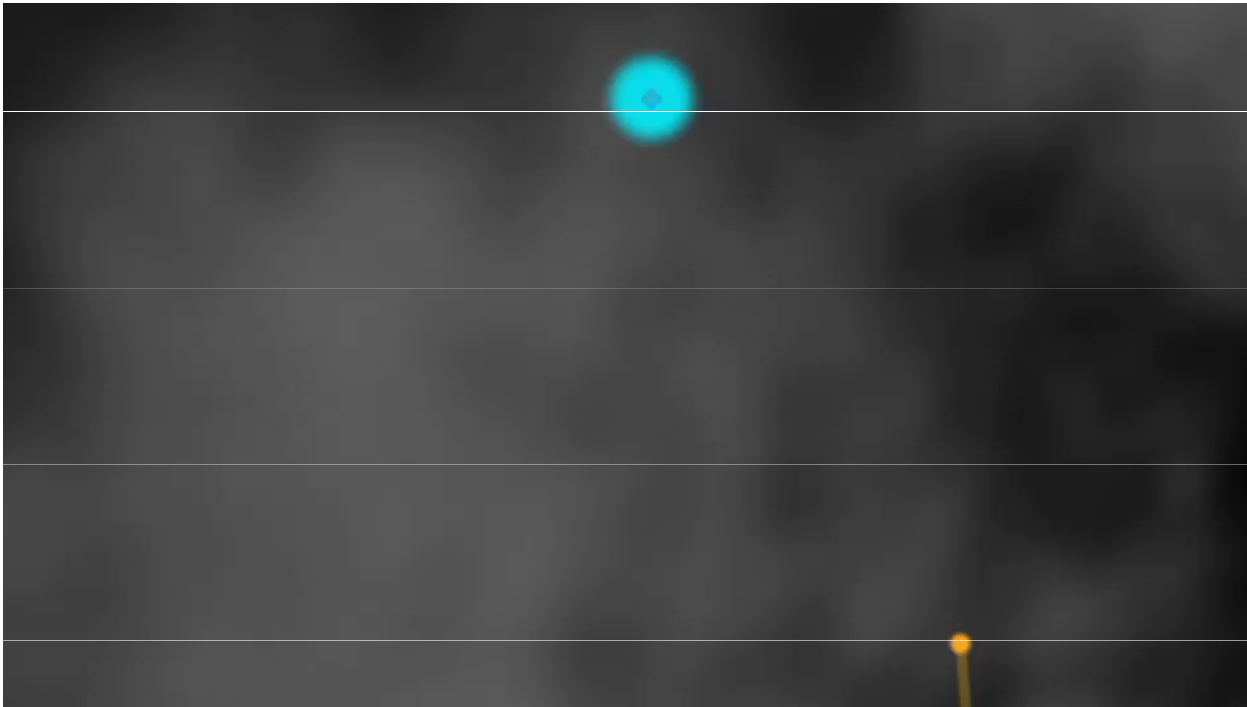
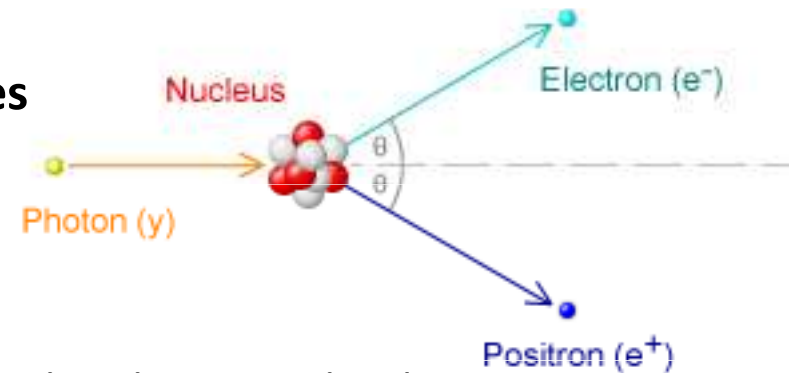


# BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

- **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)

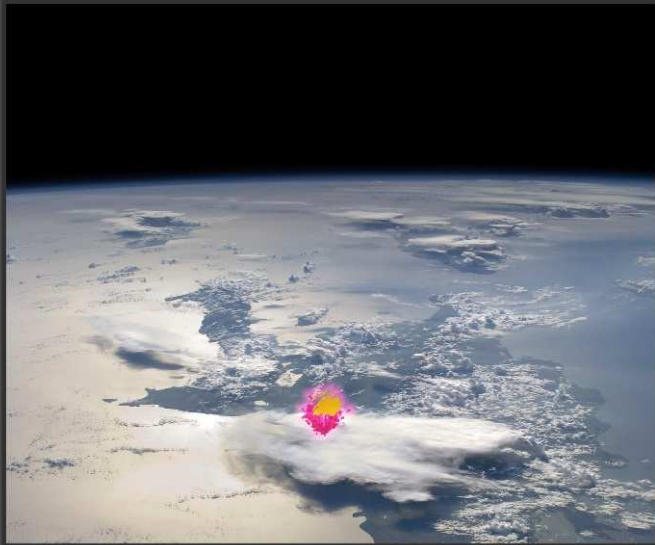
[Článek + různá videa dostupná na:](#)

[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.

# How thunderstorms launch particle beams into space



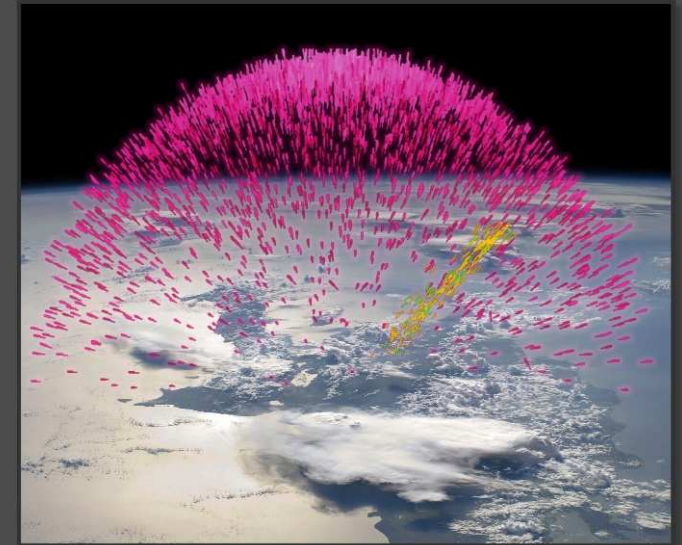
- 1.** Electric fields near the top of the storm create an upward-moving avalanche of **electrons**. When their paths are deflected by molecules in the air, these electrons emit **gamma rays**, the highest-energy form of light.

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.



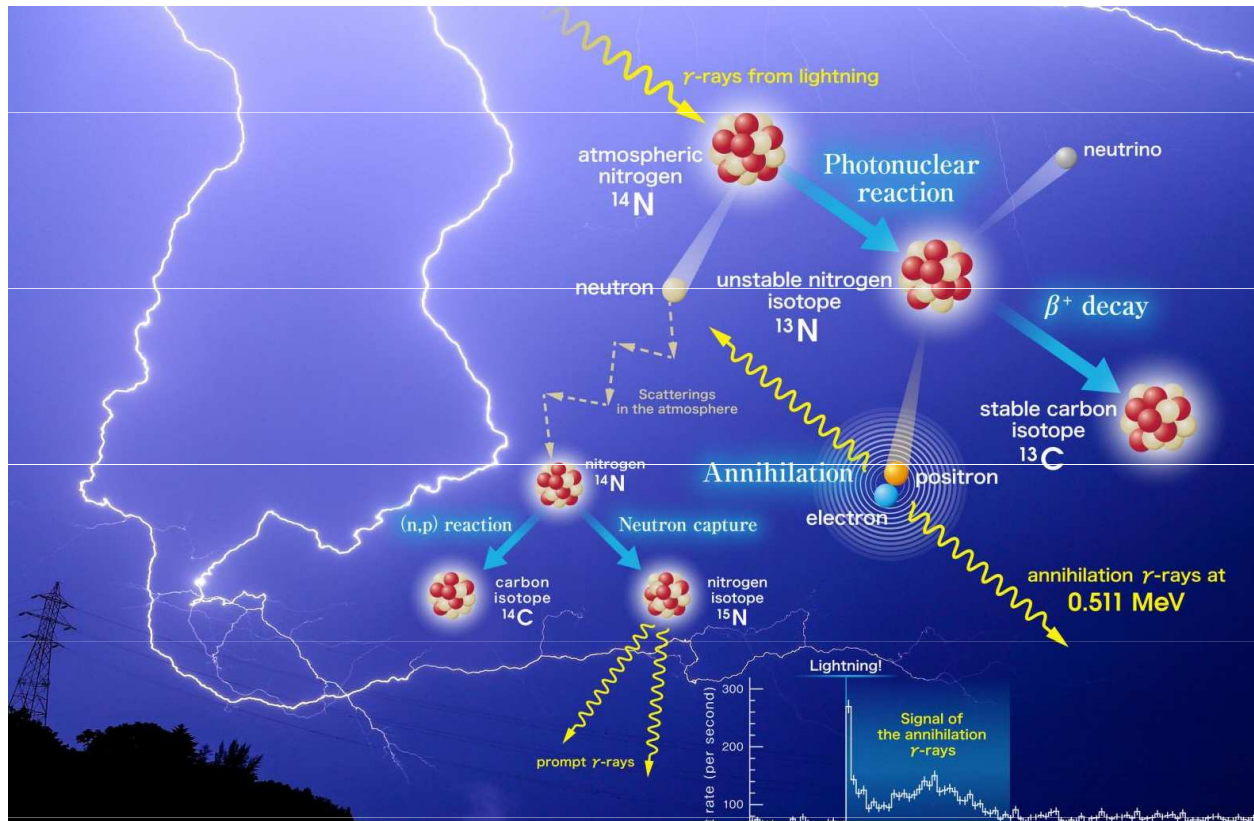
- 3.** Here the TGF is 1.98 milliseconds old, and its electron/positron beam is reaching altitudes where it may intercept spacecraft, such as NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope.

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.

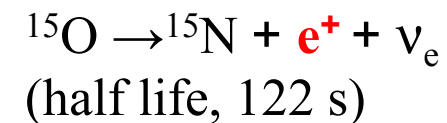
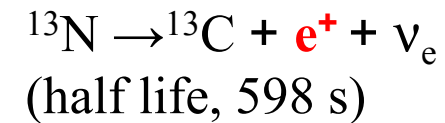
# BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

Teruaki Enoto et al., *Nature*, November 2017 | voL 551

(originální článek: <https://www.nature.com/articles/nature24630.pdf>)



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



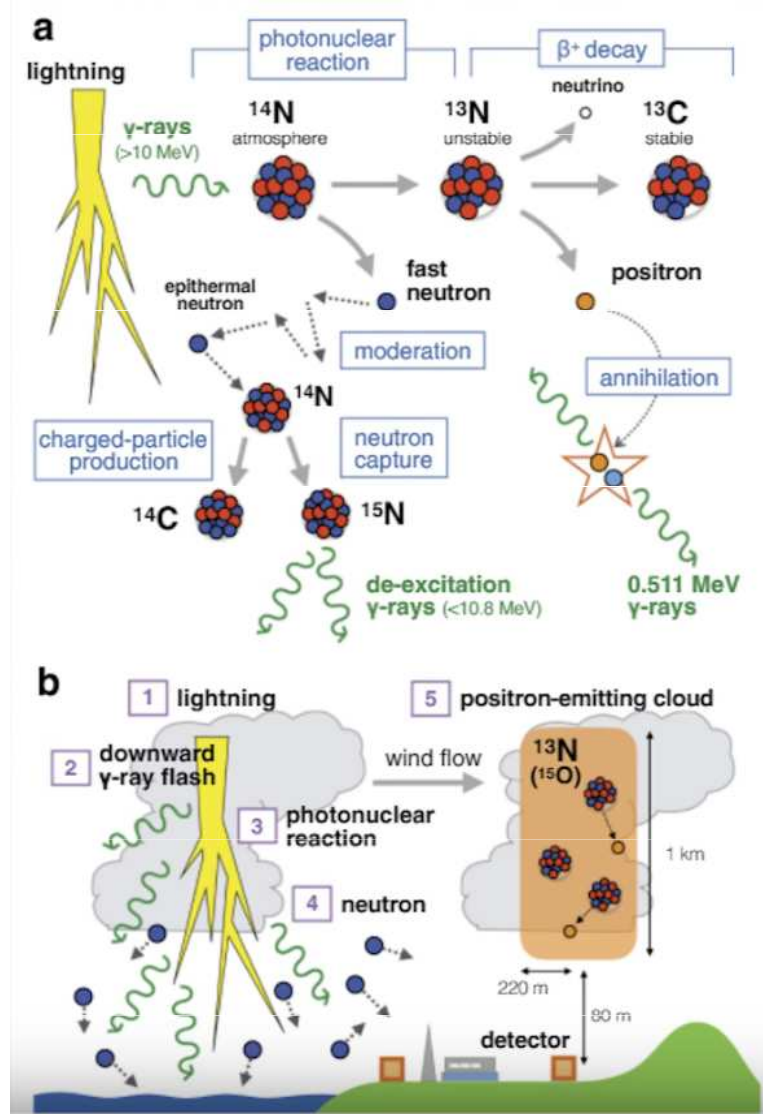
$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$  producing quasi-stable  $^{14}\text{C}$  nuclei (with a half life of 5,730 years) without emitting any strong  $\gamma$ -rays

$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{15}\text{N} + \gamma$

# BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

Teruaki Enoto et al., *Nature*, November 2017 | vol 551

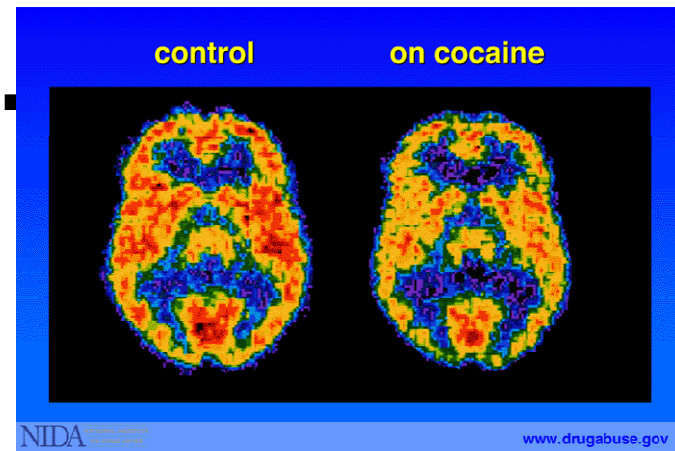
(originální článek: <https://www.nature.com/articles/nature24630.pdf>)



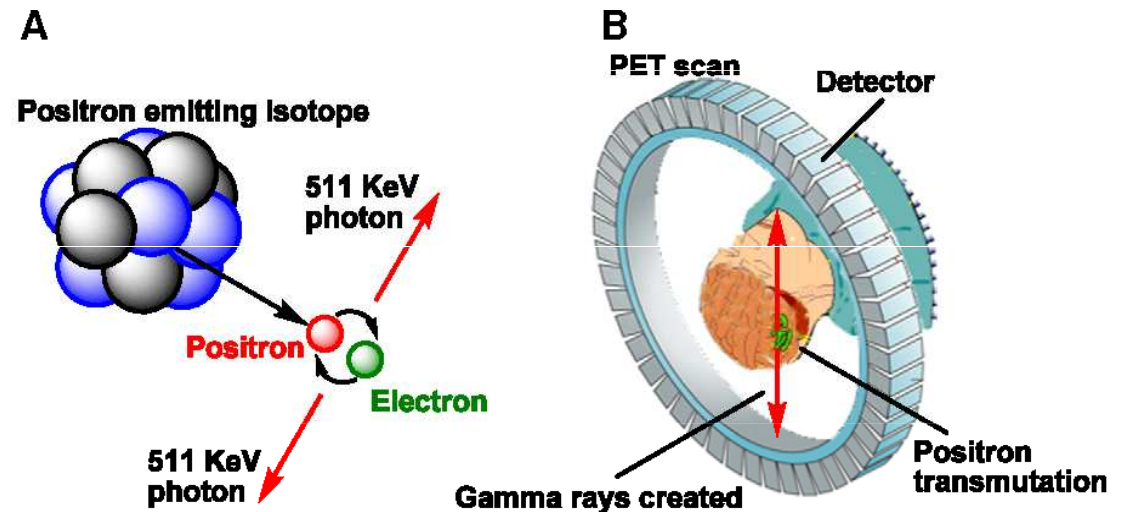
- region, or ‘cloud’, filled with these isotopes emits positrons for more than 10 min
- A **positron** emitted from  $^{13}\text{N}$  or  $^{15}\text{O}$  travels a few metres in the atmosphere, annihilates quickly in meeting an ambient electron
- ...and radiates **two 0.511-MeV photons**, the atmospheric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



# VYUŽITÍ ANTIHMO A. SOUČASNÉ



Lidská i veterinární medicína – PET – Positronová emisní tomografie



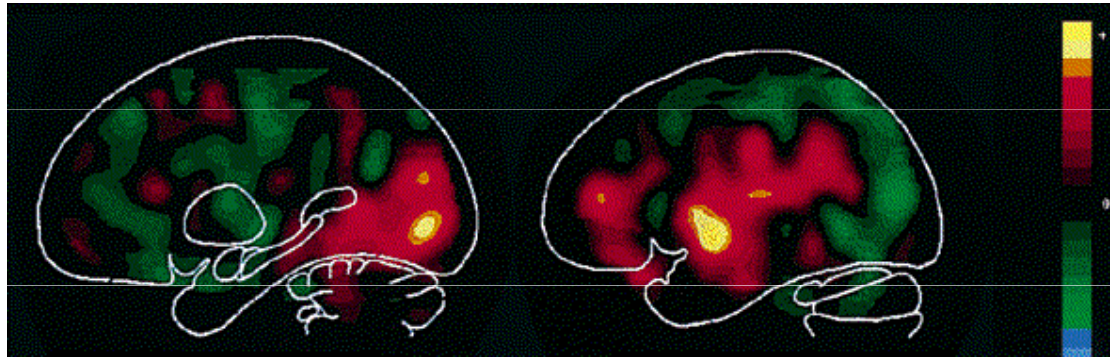
Radioaktivní izotopy s pozitronovým rozpadem → **anihilace  $e^+$**  v klidu → vznik **dvou fotonů  $\gamma$**  letících v opačném směru → jejich zachycení a určení polohy

6–70 million detector pair combinations record events from many different angles around subject simultaneously.

“Blocks” of detectors are arranged around the circumference, with each containing 32–64 detector elements, for a total of tens of thousands of elements. PET scanners provide **hundreds of tomographic image planes** of either selected organ or entire body.

# PET – Positronová emisní tomografie

Mozek čte



Mozek poslouchá

Velmi dobré **prostorové rozlišení** ( 2 mm ), stále nové sloučeniny pro PET kamery (systémy Pozitronové Emisní Tomografie)

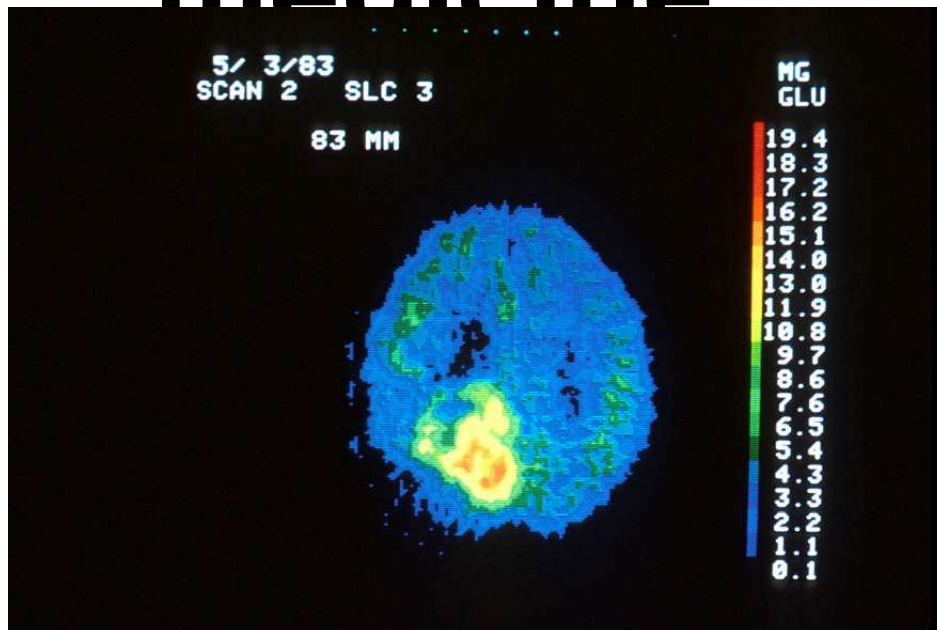
Vložení radioaktivního izotopu do sloučeniny usazující se ve studovaném orgánu (přesná diagnostika a medicinský výzkum):

- Určení **polohy a rozměru** rakovinného nádoru
- Určení prokrvené a neprokrvené části (**hypoxie**)
- Určení **metabolické aktivity/agresivnosti nádoru...**
- **Detekce metastáz**
- **Účinnost ozařování** při použití těžkých iontů ( $^{10}\text{C}$ ,  $^{11}\text{C}$ )
- **Účinnost terapie** obecně
- **Diagnostika a studium funkcí orgánů**, např. která část mozku pracuje při dané činnosti
- atd.

PET kamera v GSI  
Darmstadt



# PET v klinické medicině



- Neinvazivní metoda poskytující **informace o molekulárních aktivitách buněk + lokalizace těchto procesů** v těle s vysokou přesností
- Odhalování patologických stavů již **ve velmi raných stádiích**

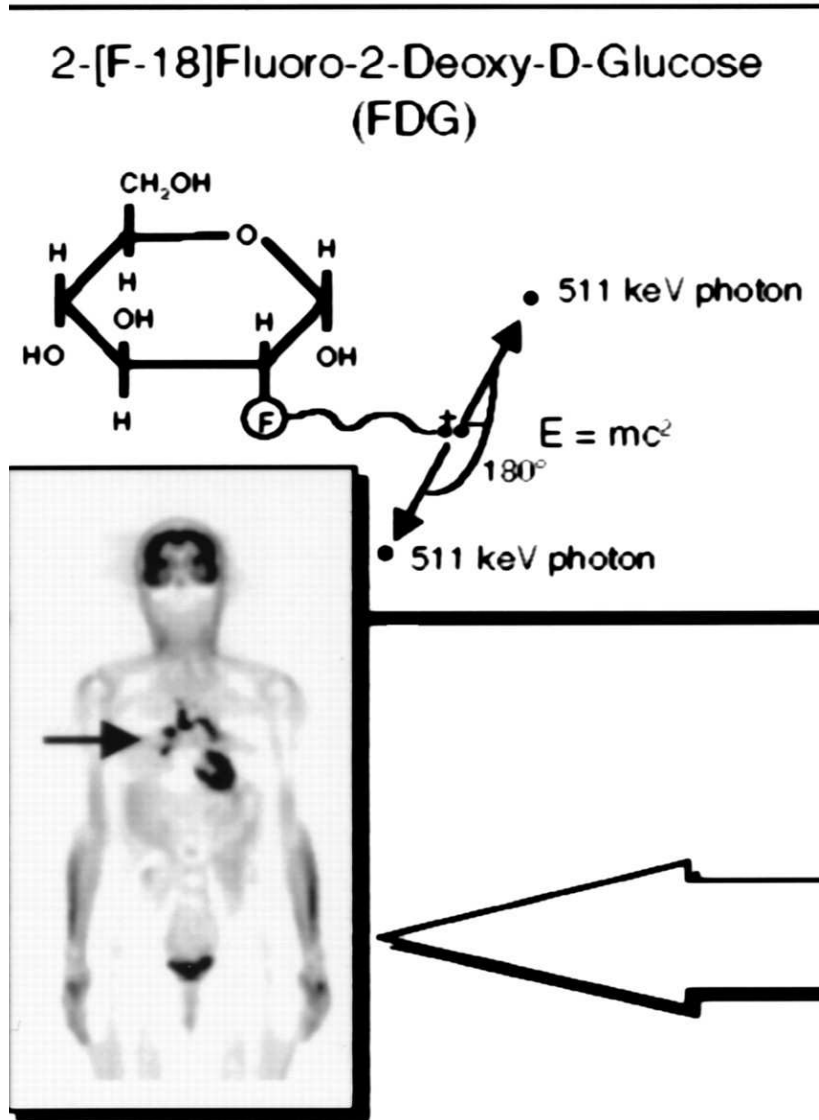
Určení funkce tkání a orgánů zejména na základě jejich

- Prokrvení
- Metabolismu
- a spotřeby kyslíku
- **Nádorová onemocnění:**
  - Přítomnost nádoru
  - Přítomnost metastáz (zdali jsou + kde jsou)
  - Příprava léčebného plánu
  - Sledování účinnosti terapie
  - Stanovení agresivnosti nádoru
  - Sledování rekurence nádoru po léčbě
- **Mozkové abnormality + neurologické choroby**
- **Průtok krve srdečním svalem + sledování funkce srdce** (např. po infarktu myokardu – stanovení rozsahu poškození)
- **Funkce endokrinních žláz**
- **Funkce gastro-intestinálního traktu...**

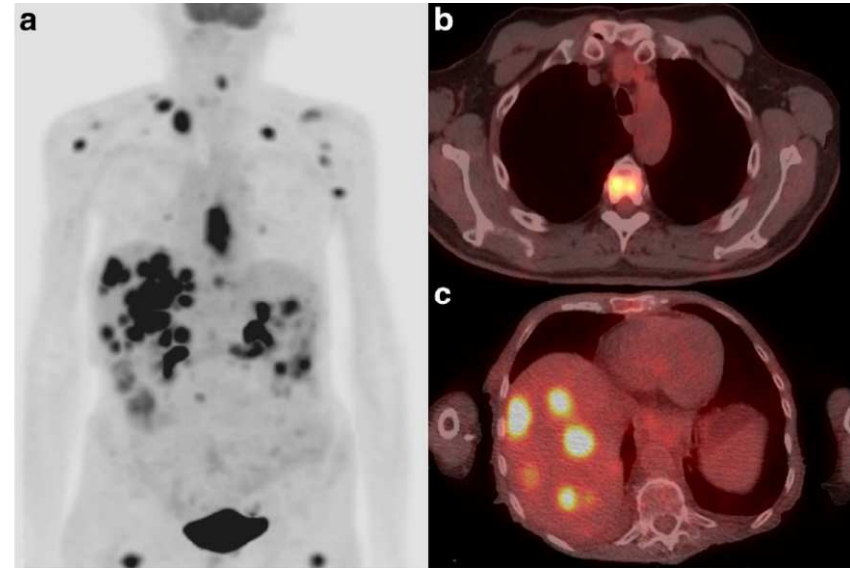
## Průběh PET

- $\beta^+$ -zářič (o malé aktivitě)
- → vpravení do těla (injekce, inhalace, perorálně)
- → akumulace zářiče v orgánech, zejména vyšetřovaném orgánu (akumulace je přímo úměrná metabolické aktivitě tkáně/orgánu, prokrvení a využívání kyslíku)
- → emise pozitronů
- → anihilace
- → emise 2 fotonů  $\gamma$
- → detekce na detektorech, počítačové zpracování signálu a vytvoření obrazu struktury a funkce orgánu
  
- Tzn. na rozdíl od běžných rdg. metod se jedná o obraz založený **na základě (pato)fyziologických pochodů** probíhajících v buňkách a následně orgánech

# METASTASIS DETECTION



Michael E. Phelps PNAS 2000;97:16:9226-9233



Examples of true positive metastatic lesions detected by **18F-FDG PET/CT** restaging. (Courtesy: Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging 45 1742/CC BY 4.0)

A single 6-mm-thick longitudinal section is shown from a **woman with metastasis bilaterally to lung** (arrow) from previously treated ovarian cancer. Black is highest metabolic rate in image. Human PET scanner resolution is about 5–6 mm in all three dimensions.

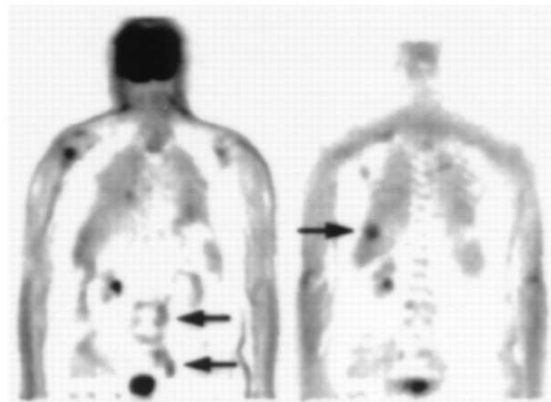
**FDG (Fluoro-2-Deoxy-D-Glucose)** is injected intravenously, distributes throughout the body via bloodstream, and enters into organs, where it traces trans...

PNAS

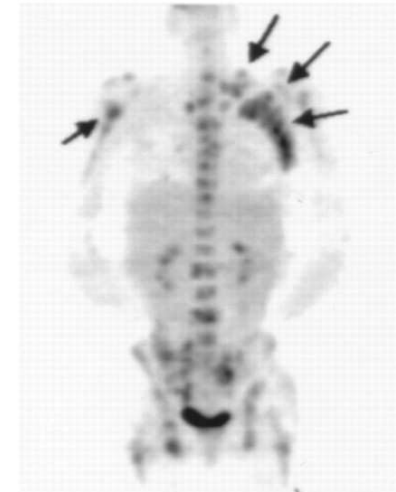
# PET images of glucose metabolism in various types of cancers.



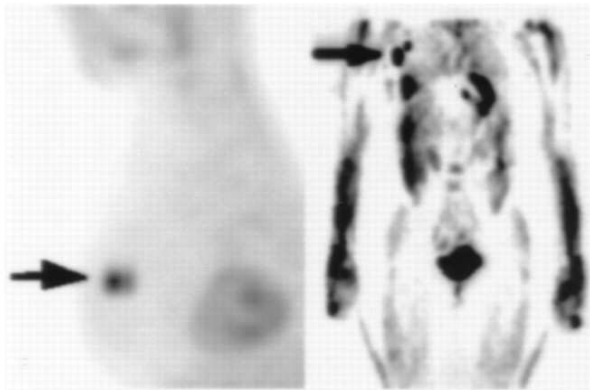
Ovarian Cancer



Prostate Cancer



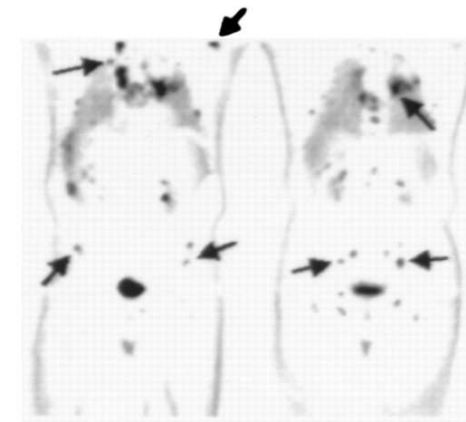
Hodgkin's Lymphoma



Breast Cancer



Lung Cancer

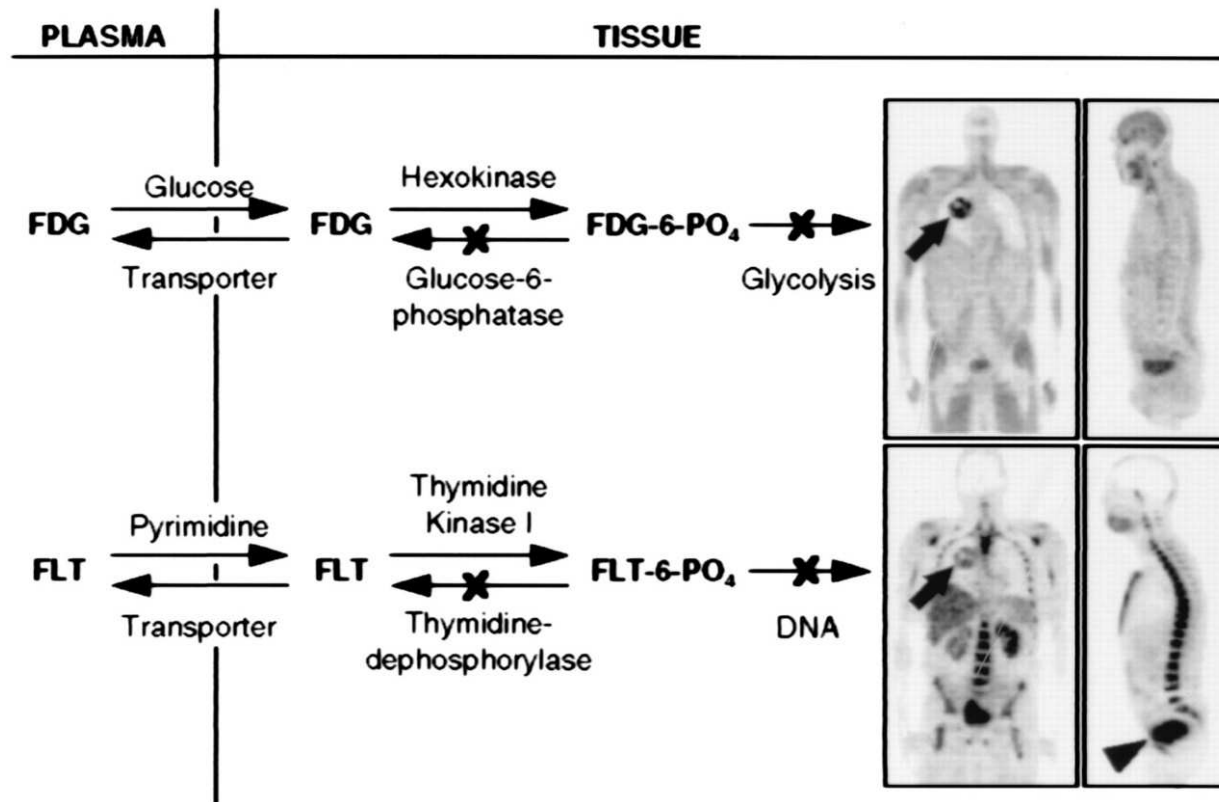


Melanoma

PET images of glucose metabolism in various types of cancers. Study illustrates that increased glycolysis is a common property of cancer, independent of organ of origin.

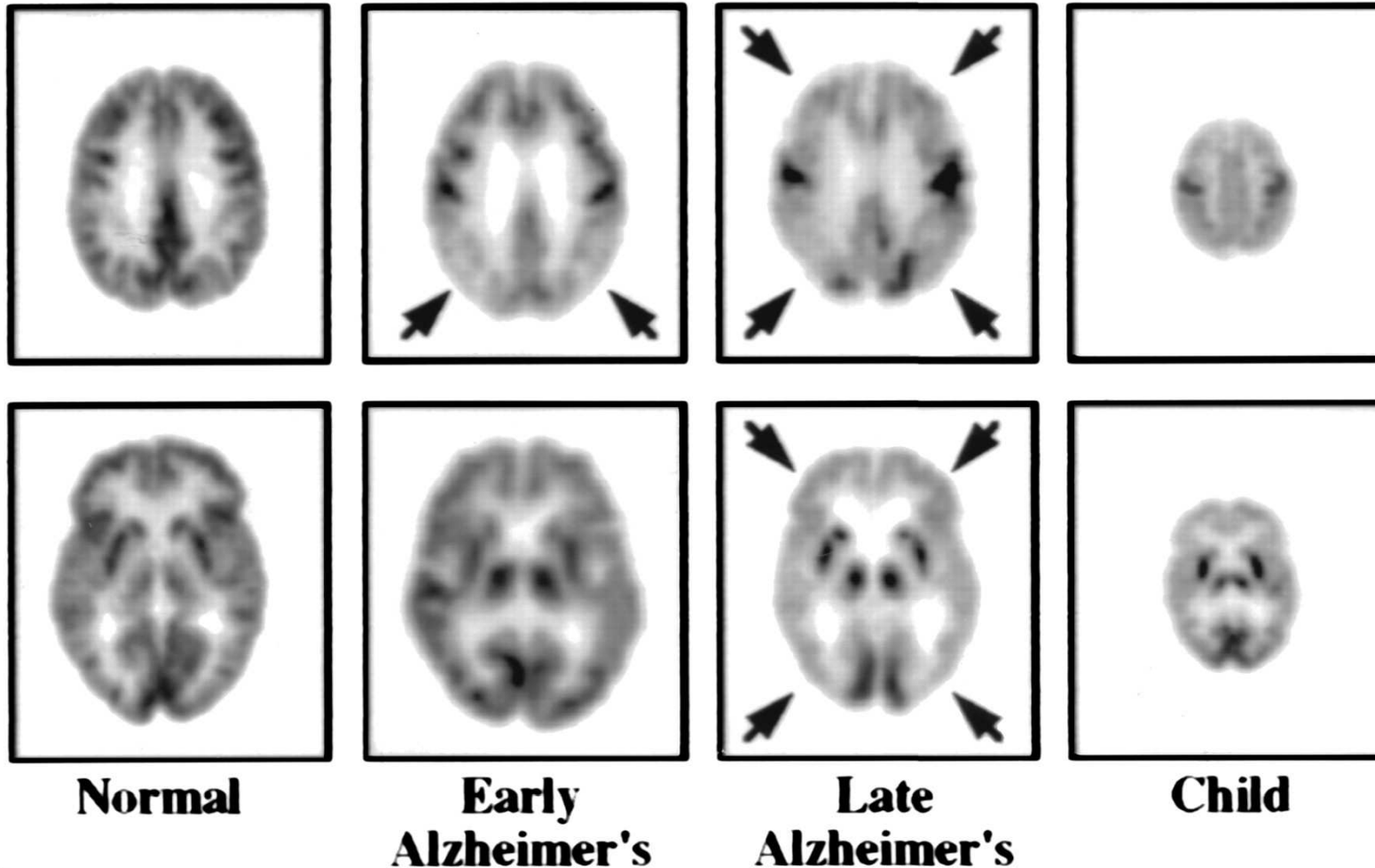
In breast example, a **6-mm lesion is just behind a 10-mm one. Mammogram was normal, and tumor had high expression of HER-2/neu oncogene.** Arrows point to some tumors.

## Tracer kinetic models for FDG and FLT. Arrows show forward and reverse transport between plasma and tissue, phosphorylation and dephosphorylation.



Images are 6-mm-thick longitudinal tomographic sections of a patient with a lung tumor (arrows), with high **glucose metabolism** and **DNA replication**. The rest of the images show normal distribution of glucose utilization and DNA replication, exceptions being clearance of both tracers to bladder (arrowhead) and, in the case of FLT, the glucuronidation by hepatocytes in liver.

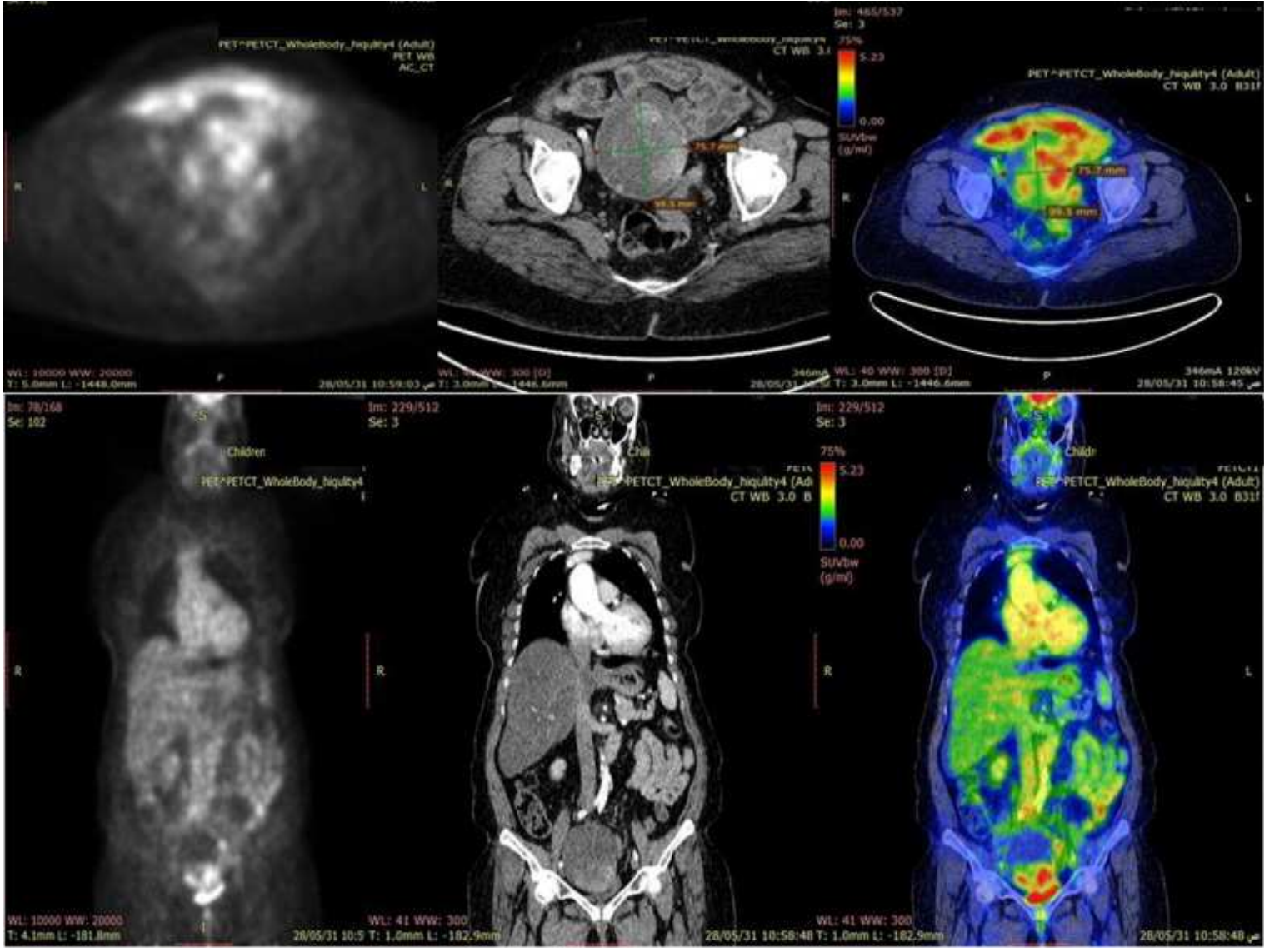
# PET study of **glucose** metabolism in **Alzheimer's disease**



PET study of glucose metabolism in Alzheimer's disease. The “**early Alzheimer's**” is at stage of “questionable Alzheimer's disease” and illustrates characteristic metabolic deficits in parietal cortex (arrows) of the brain. In “**late Alzheimer's**”, metabolic deficit has spread throughout areas of cortex (arrows), sparing subcortical (e.g., internal) structures (bottom image), and primary motor and sensory areas, such as visual (bottom image) and motor cortices (top image). At late stage disease, metabolic function in Alzheimer's is similar to that of newborn, shown to the far right, which underlies their similar behavior and functional capacity. MRI studies were normal.



# PET/CT (případně PET/MRI)

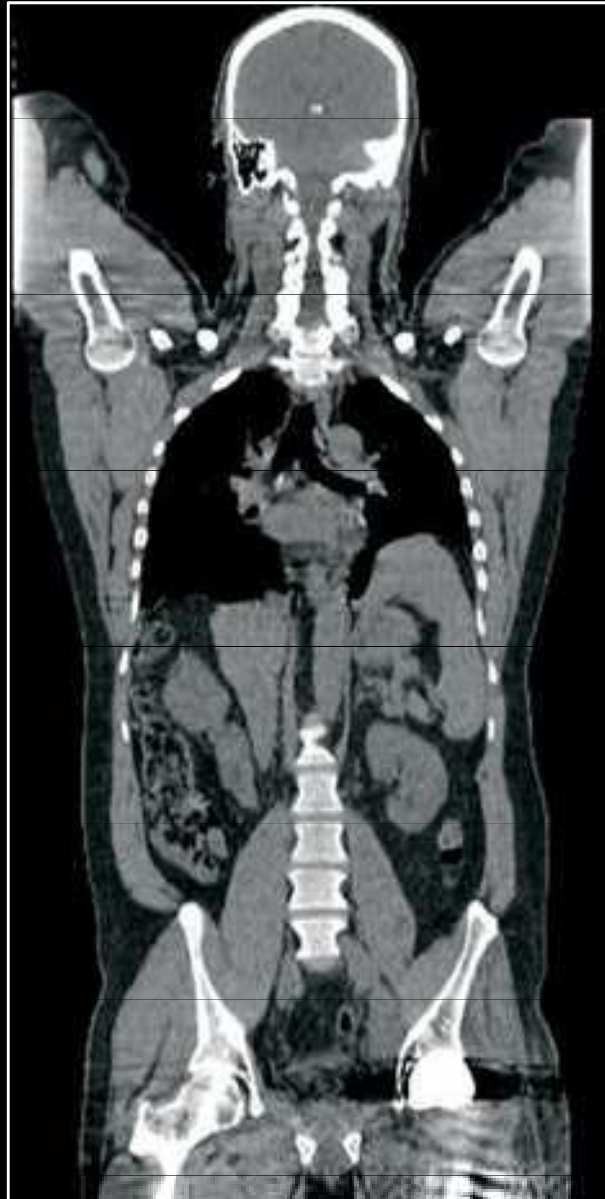


- PET lze kombinovat s dalšími důležitými zobrazovacími metodami
- CT (počítačová tomografie)
- MRI (magnetická rezonance)
- 
- **CT/MRI:** detailní anatomický obraz
- **PET:** funkční obraz

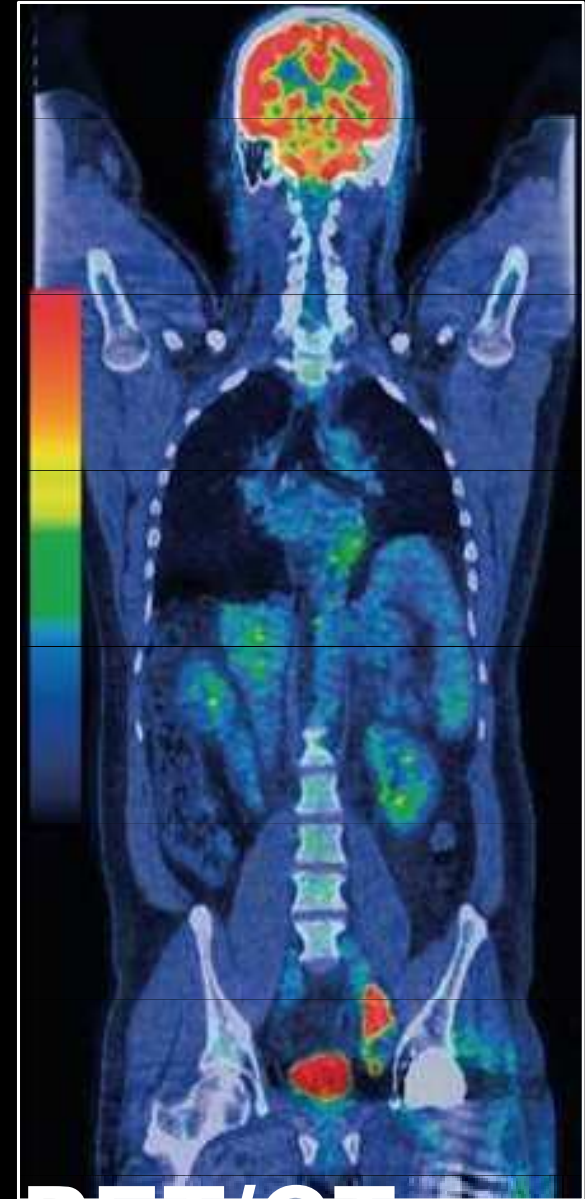
# Corte coronal - PET



**PE  
T**

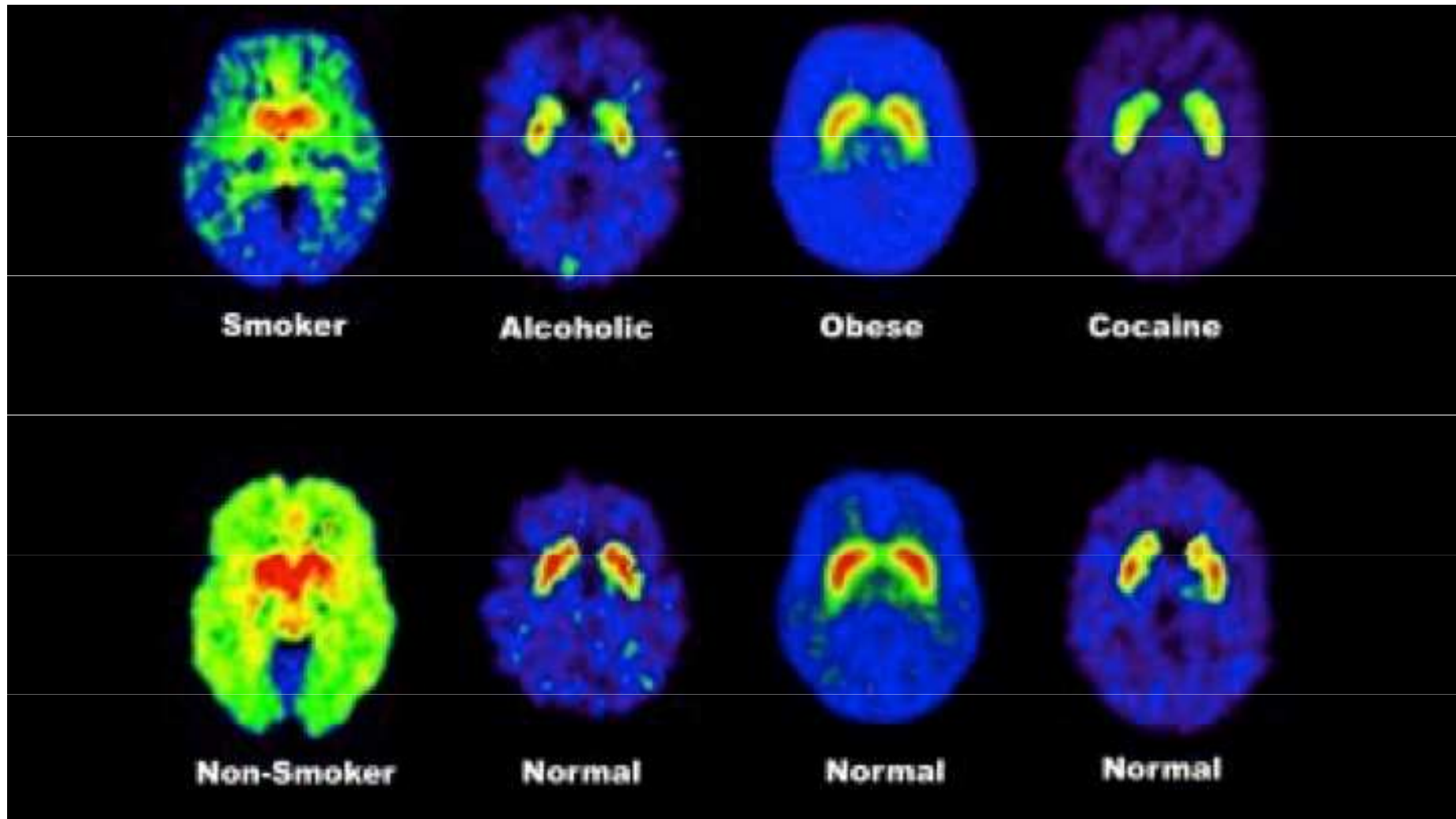


**CT**

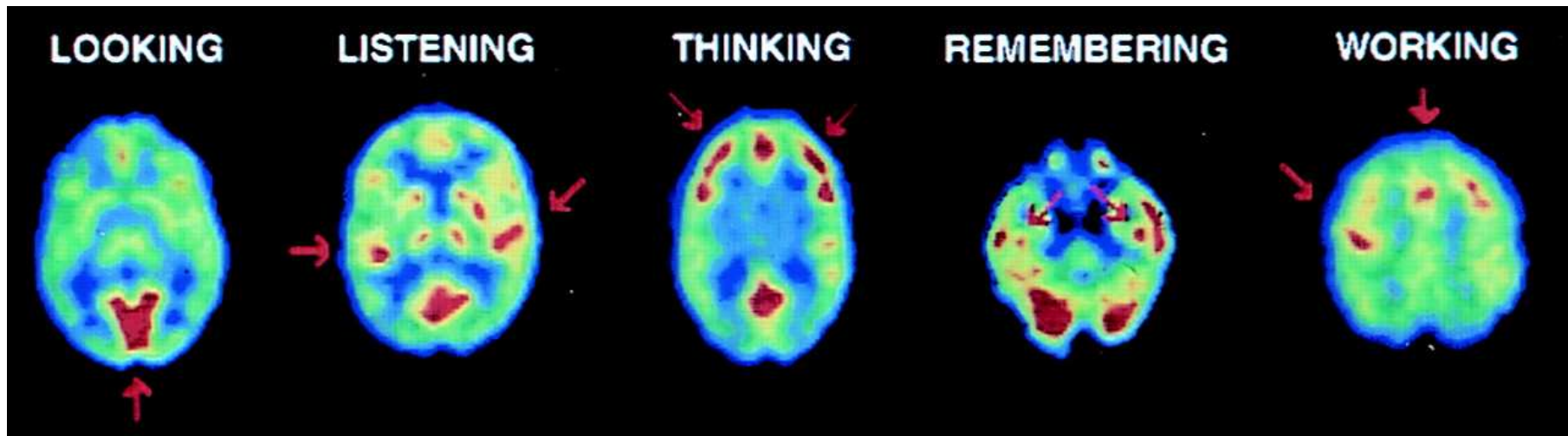


**PET/CT  
merged**

# PET ve výzkumu



# PET studies of **glucose** metabolism to map human brain's response **in performing different tasks**.

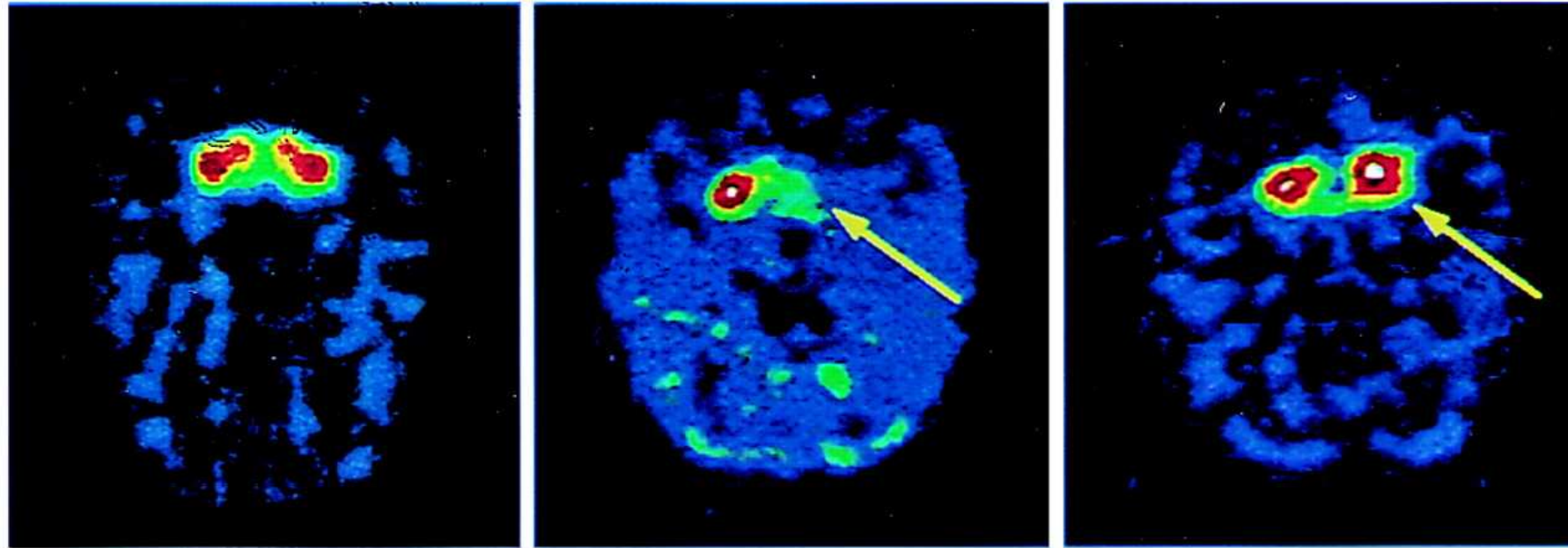


PET studies of **glucose metabolism** to map **human brain's response in performing different tasks**. Subjects looking at a visual scene activated visual cortex (arrow), listening to a mystery story with language and music activated left and right auditory cortices (arrows), counting backwards from 100 by sevens activated frontal cortex (arrows), recalling previously learned objects activated hippocampus bilaterally (arrows), and touching thumb to fingers of right hand activated left motor cortex and supplementary motor system (arrows). Images are cross-sections with front of brain at top. Highest metabolic rates are in red, with lower values from yellow to blue.

Michael E. Phelps PNAS 2000;97:16:9226-9233

PNAS

# Imaging gene therapy with PET in unilateral MPTP monkey model of Parkinson's.



**Normal**

**Before  
Gene Therapy**

**After  
Gene Therapy**

Dopamine synthesis was imaged with aromatic amino acid decarboxylase substrate, *meta*-[F-18]fluorotyrosine. (Left) **Normal dopamine synthesis** in caudate and putamen. (Center) **Unilateral dopamine MPTP-induced deficit** (arrow) before gene therapy. (Right) **Restoration of dopamine synthesis** (arrow) after gene therapy. Figure courtesy of K. Baukiewicz.

Michael E. Phelps PNAS 2000;97:16:9226-9233

PNAS

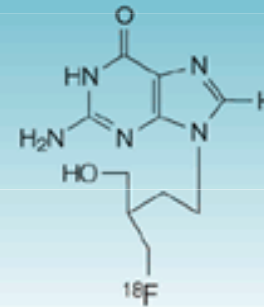
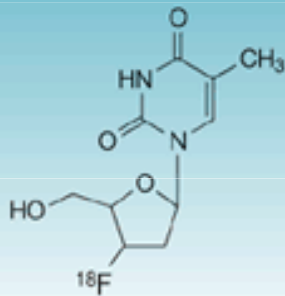
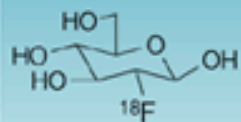
**a** FDG

**b** FLT

**c** Fluoride ion

**d** FHBG

**Chemical structures**



**Molecular targets**

Glucose transporter/  
hexokinase

Mammalian thymidine  
kinase

Hydroxyapatite  
crystals

Herpes simplex virus  
thymidine kinase

**Cancer targets**

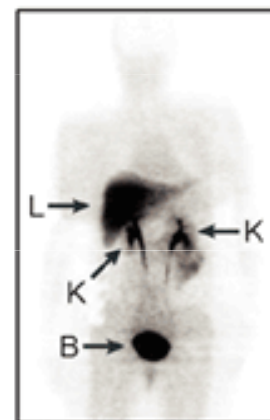
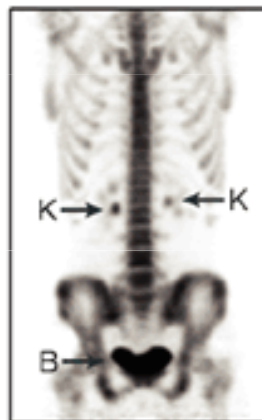
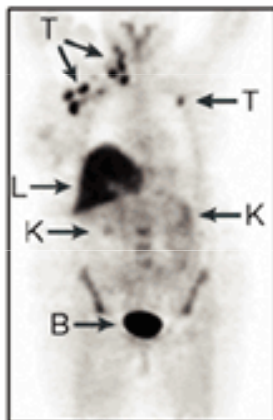
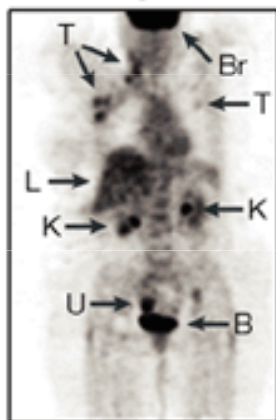
General tumour  
marker based on  
increased glucose  
utilization by tumours

Cells undergoing DNA  
replication  
  
Improved monitoring in  
response to cytostatic  
chemotherapy and of  
brain tumours

Bone reaction to  
tumours

Gene therapy

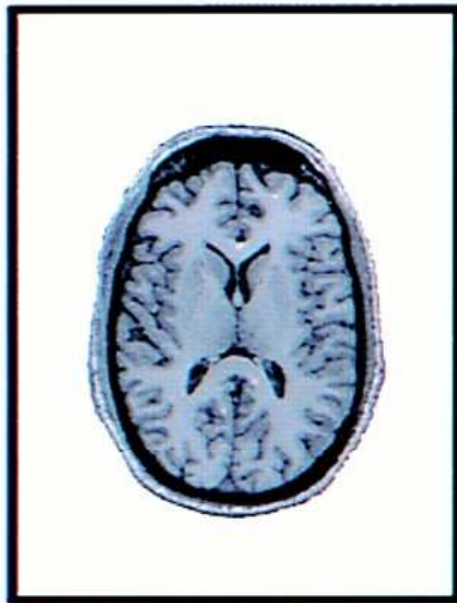
**PET images**



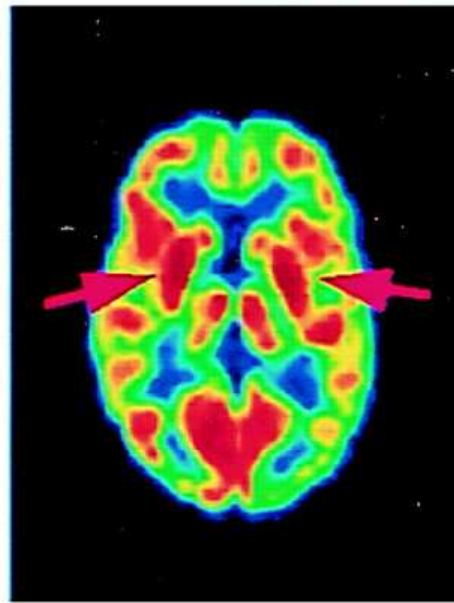
# PET- Různé možnosti značení pro různé zobrazované cíle/procesy

Sanjiv Sam Gambhir. Nature Reviews Cancer volume 2, pages 683–693 (2002)

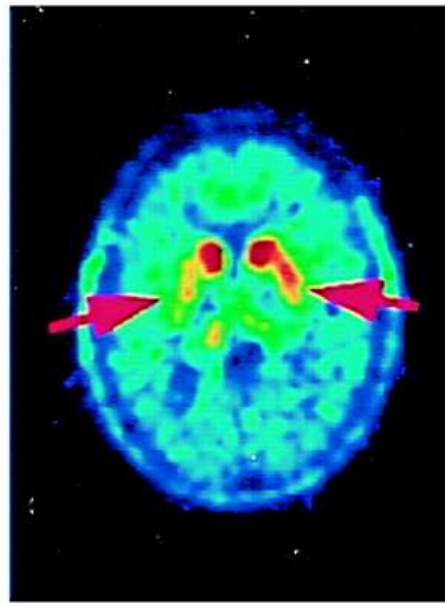
# Images of patient with early Parkinson's disease and rat model of Parkinson's.



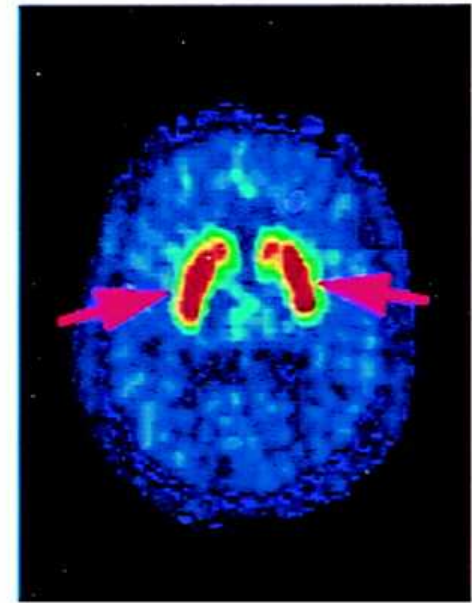
**MRI**  
*Human*



**Glucose  
Metabolism**

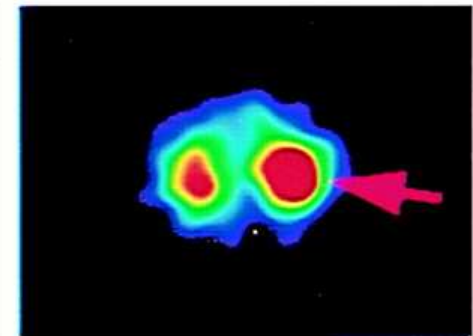
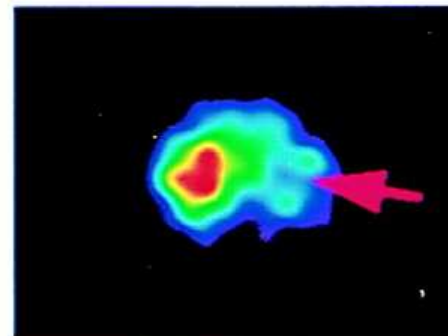


**Pre-Synaptic**



**Post-Synaptic**

*Rat*



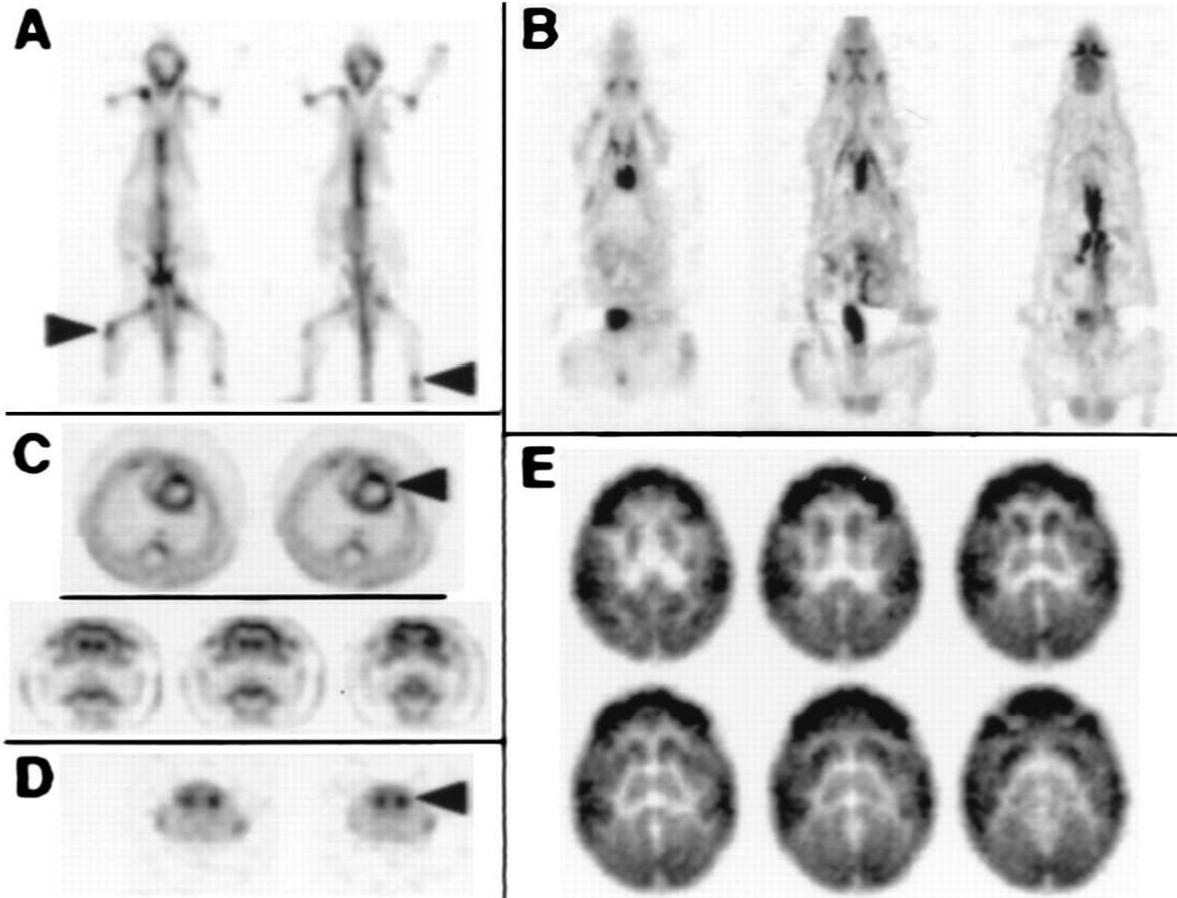
# Popis k předchozímu obrázku

- **MRI** shows there is no structural abnormality in the brain of patient.
- **PET** image of glucose metabolism shows hypermetabolic abnormality of putamen (arrows) with 10% increase over normal value.
- Image of presynaptic synthesis of dopamine with **[F-18]fluorodopa** shows a 70% reduction (arrows)
- whereas image of postsynaptic D<sub>2</sub> receptors with the ligand, **[F-18]fluoroethylspiperone**, shows 15% elevation (up-regulation) of receptors in putamen,...
- ...in an attempt to compensate for loss of presynaptic dopamine.
- (*Lower*) MicroPET images of **6-hydroxydopamine** unilateral lesion in rat model of Parkinson's. Image of presynaptic dopamine transporter with **[C-11]WIN 35425** shows 60% reduction on lesioned side (arrow) whereas postsynaptic D<sub>2</sub> receptors imaged with ligand **[C-11]raclopride** show compensatory up-regulation of receptors (arrow) in the striatum. Opposite striatum is a control.



Image quality of microPET I. (A) Two 1.5-mm-thick longitudinal whole body sections of a 25-g mouse using [F-18]fluoride ion to image skeletal system of prostate cancer mouse model with bone metastases (arrows).

## microPET



Michael E. Phelps PNAS 2000;97:16:9226-9233

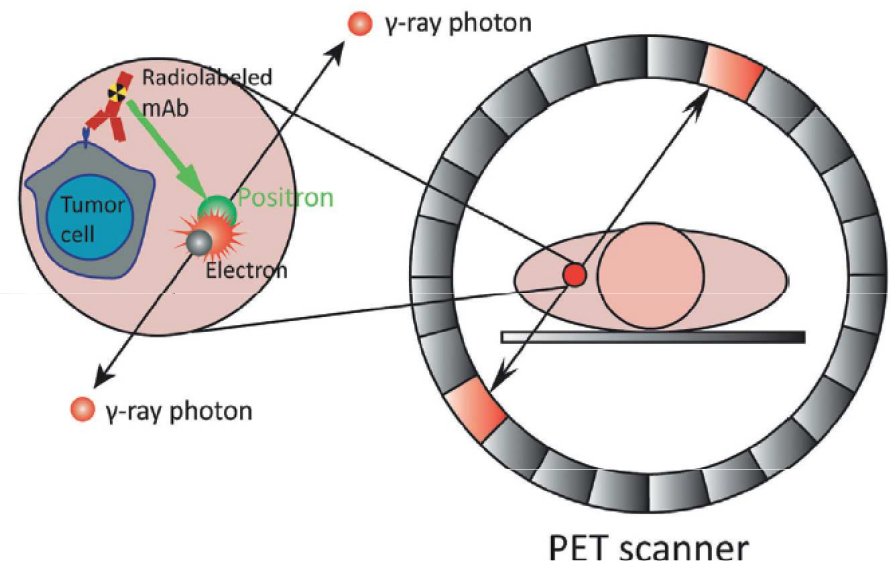
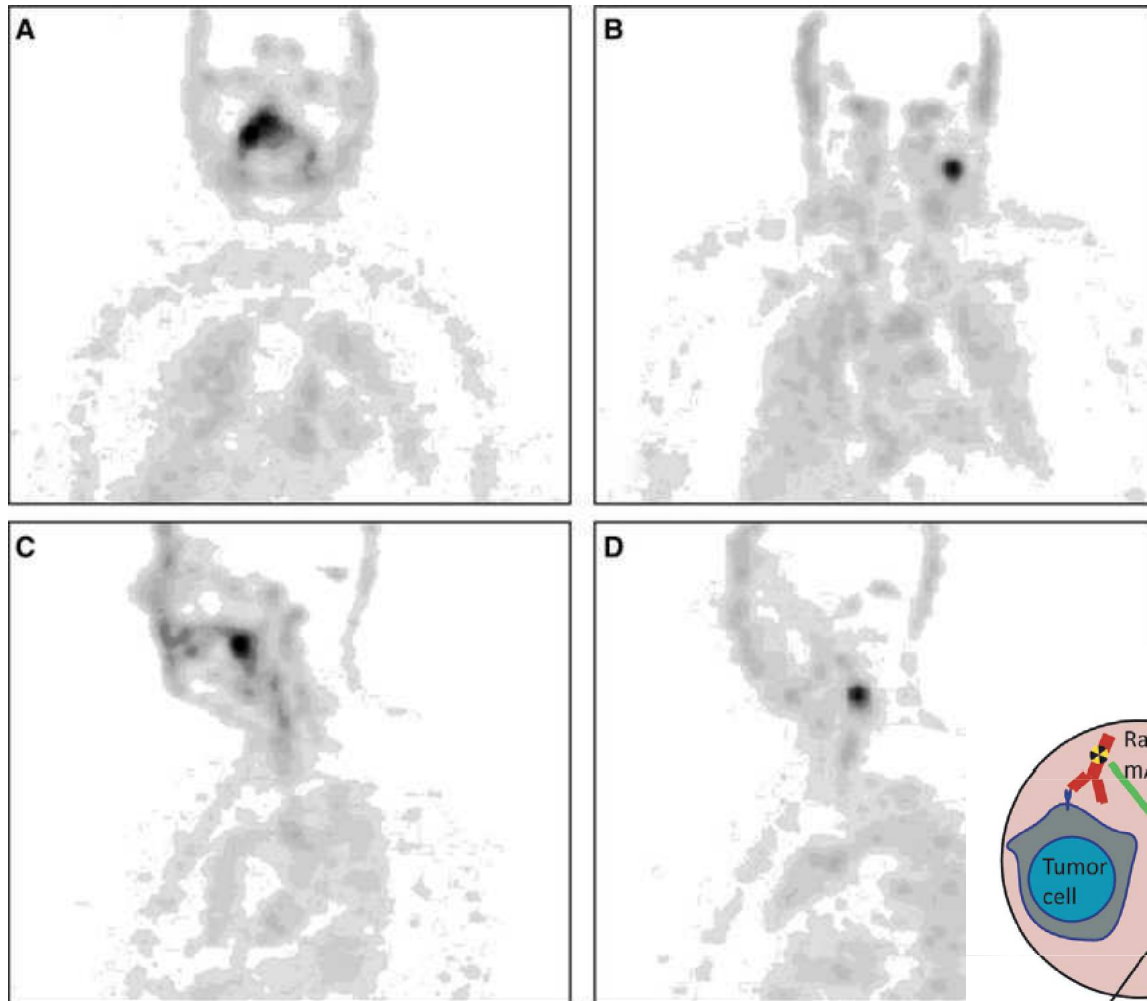
PNAS

# Popis k předchozímu obrázku

Image quality of microPET I. (A) Two 1.5-mm-thick longitudinal whole body sections of a 25-g mouse using [F-18]fluoride ion to image skeletal system of prostate cancer mouse model with bone metastases (arrows). (B) Longitudinal whole body FDG images of glucose metabolism in normal 250-g rat. (C *Upper*) Cross sections through chest of rat showing glucose metabolism in left (arrow) and right ventricles. Left ventricle is 9 mm in diameter, with 1-mm wall thickness. Right ventricle is thinner, and metabolic rate is 1/3 left. (*Lower*) Coronal sections of glucose metabolism in rat brain weighing 1 g, showing cortex well separated from internal structure of striatum. (D) Images of mouse brain with [C-11]WIN 35,428 that binds to dopamine reuptake transporters showing clear separation of left and right striatum (arrow) that each weigh about 12 mg. (E) FDG brain images of two-month-old Vervet monkey with good delineation of cortical and subcortical structures. Dimension across brain is 2 cm. Cortical convolutions of brain are not seen because the young monkey has few of them. Reprinted with permission from ref. [31](#).

# Imuno-onkologie

- **Immuno-positron emission tomography (immuno-PET)**, the tracking and quantification of mAbs with PET in vivo at superior imaging quality, is an exciting novel option for better understanding the in vivo behavior and efficacy of mAbs in individual patients.



Immuno-Positron Emission Tomography: Shedding Light on Clinical Antibody Therapy, Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals 2010, 25(4):375-85.  
DOI:10.1089/cbr.2010.0812

# Vision 20/20: Positron emission tomography in radiation therapy planning, delivery, and monitoring

Katia Parodi<sup>a)</sup>

*Faculty of Physics, Department of Medical Physics, Ludwig Maximilians University Munich, Munich 85748, Germany*

(Received 2 June 2015; revised 1 November 2015; accepted for publication 3 November 2015; published 1 December 2015)

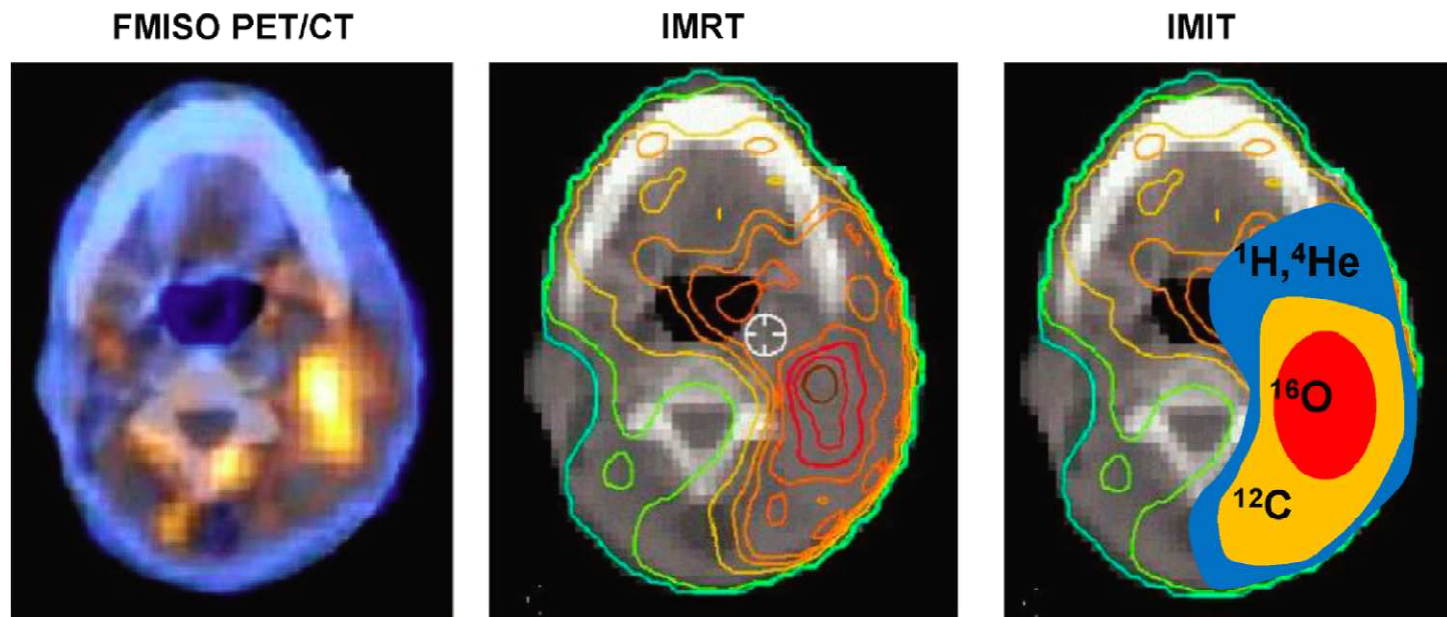


FIG. 3. Example of hypoxia imaging based on FMISO PET/CT (left), and corresponding locally enhanced dose to hypoxic structures for dose painting in IMRT (middle), as well as illustrative implementation of radiation-quality-modulated dose painting in IMIT, targeting with heavier ions ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{12}\text{C}$ ) the most resistant (i.e., hypoxic) tumor subareas while keeping low-LET radiation in the surrounding tumor volume. Adapted with permission from D. Thorwarth and M. Alber, "Implementation of hypoxia imaging into treatment planning and delivery," [Reprinted with permission from D. Thorwarth and M. Alber, Eberhard Karls University Tübingen (2011)].

# Vision 20/20: Positron emission tomography in radiation therapy planning, delivery, and monitoring

Katia Parodi<sup>a)</sup>

*Faculty of Physics, Department of Medical Physics, Ludwig Maximilians University Munich, Munich 85748, Germany*

(Received 2 June 2015; revised 1 November 2015; accepted for publication 3 November 2015; published 1 December 2015)

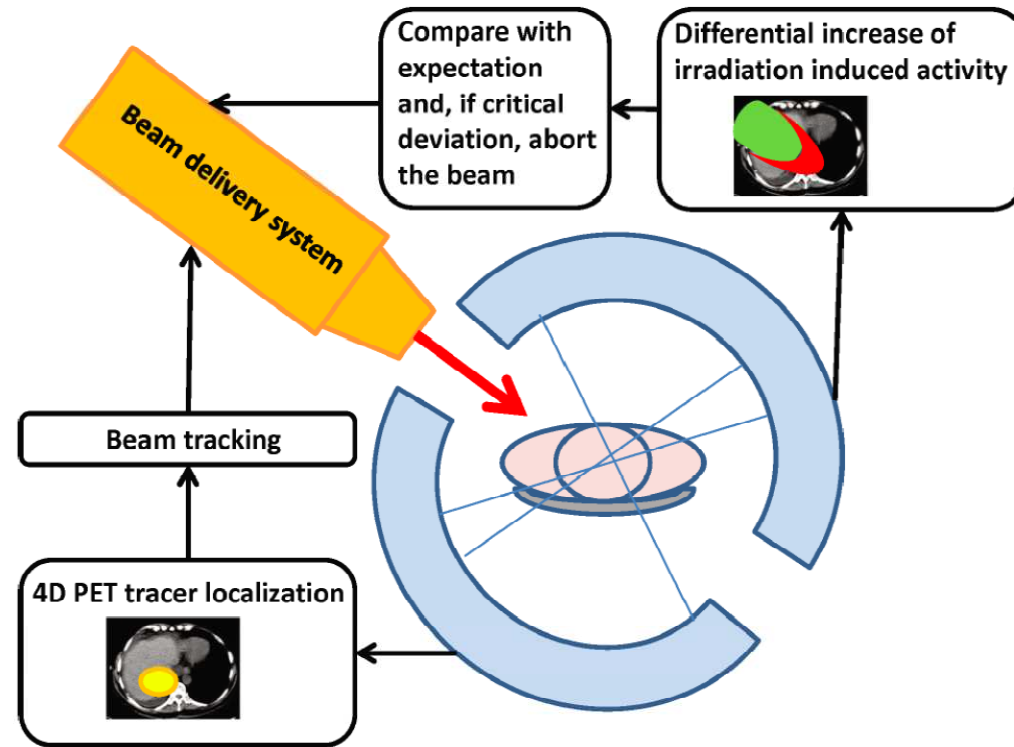
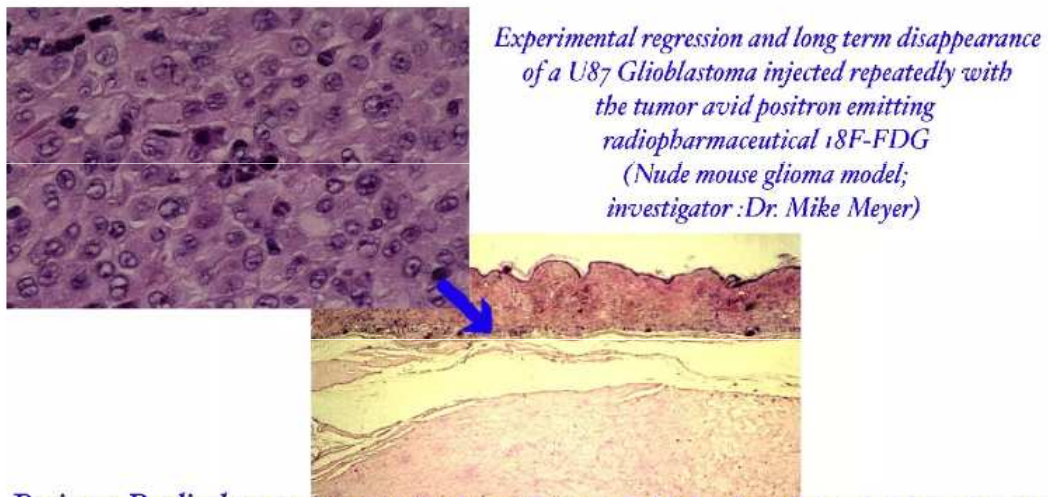


FIG. 7. Schematic illustration of possible future strategies of in-beam PET-based image guidance of ion (or energetic photon) treatment, combining information from injected isotopes for biologically based beam tracking with differential information on the build-up of the irradiation-induced activity for confirmation of the beam delivery and, in case of critical deviation, interruption of the treatment.

# POSITRONY – BUDOUCÍ APLIKACE?

čestný využití anihilace antiprotonů při ozařování nádorů



*Positron Radiotherapy is a new experimental approach that has been designed and developed by Neurologist and Nuclear Medicine Physician Dr. Mike Meyer for potential successful tumor directed radiation treatment with tumor avid positron emitting compounds. This novel approach can hopefully be developed for future clinical use to induce tumor regression through the selective intracellular release of positrons, which then can cause physical annihilation of electrons within tumor DNA, RNA, and key enzymes.*

**Hypothesis : Annihilation of electrons within DNA may lead to fatal errors and cause cell death**

*Positron Emission from  $^{18}\text{F}$ -FDG results in electron annihilation; the potential for interaction with tumor DNA electrons may be significant when the intracellular concentration of  $^{18}\text{F}$ -FDG is high (e.g. radiotherapeutic levels)*

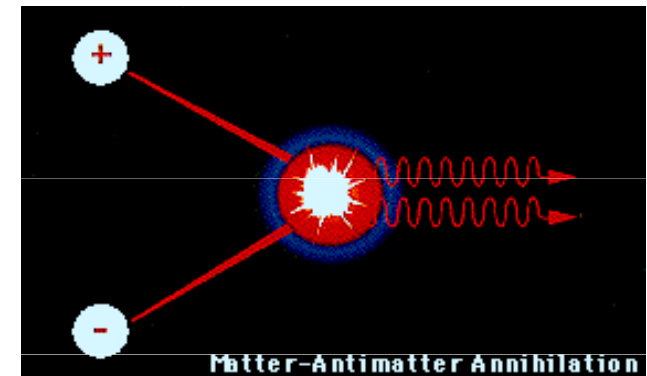
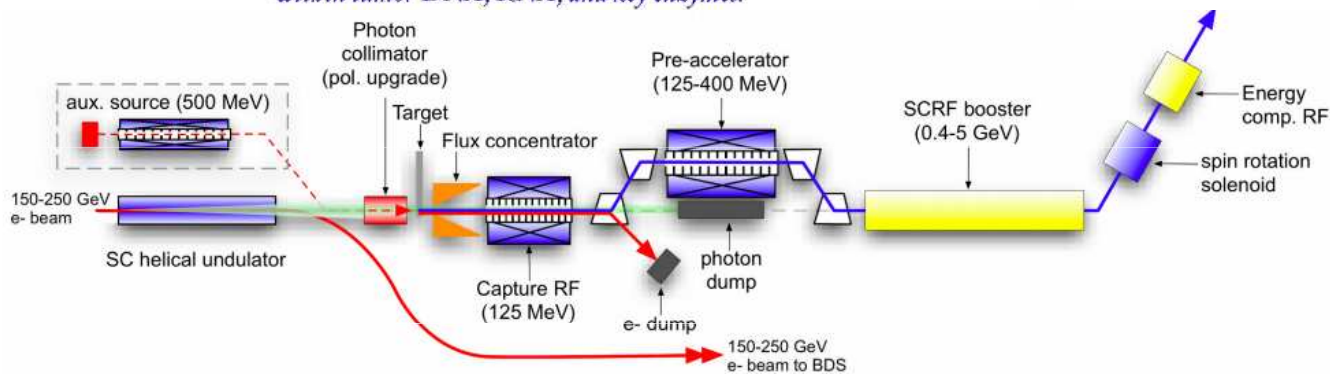


Figure 3.4. Overall Layout of the Positron Source, located at the end of the electron Main Linac.

# Imuno-onkologie

Anihilace – přeměna klidové energie na fotony (energii) → antihmota – nejučinnější zdroj energie – vysoký specifický impuls

Ekvivalent pohonu raketoplánu – ~ 100 mg antihmoty

Výroba antihmoty (chybí doly na antihmotu):

Účinnost výroby antiprotonů (nyní) –  $10^5$  protonů ( $E_p=120$  GeV) na jeden antiproton

→  $1,2 \cdot 10^7$  GeV/antiproton →  $1,16 \cdot 10^{21}$  J/g . Efektivita  $10^{-8}$ .

Současné metody umožňují – zlepšení o 3-4 řády

Skladování – magnetická a elektrická pole

Nyní v CERNu a Fermilabu – 10 ng antiprotonů za rok

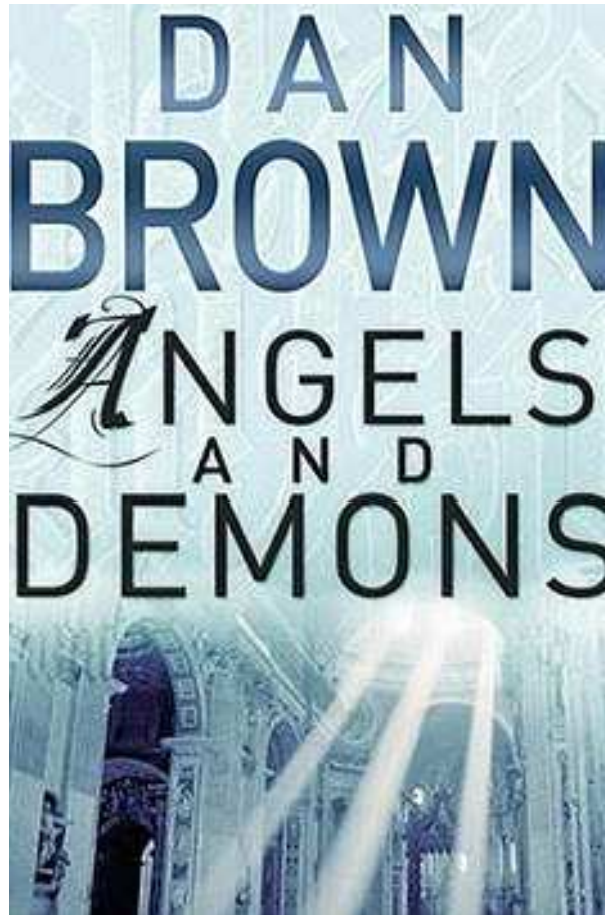


Mezihvězdná loď AIMstar projektovaná na Pensylvánské universitě



Enterprise zatím léta jen ve SCI-FI – zdrojem energie pro její pohon je kapalný antivodík

# Antihmotová bomba



The primary advantage of such a weapon is that antimatter and matter collisions convert and produce a greater fraction of the weapon's mass into explosive energy when compared to a hydrogen fusion reaction, which is only on the order of 0.4%. The basic equation governing the antimatter reaction is Einstein's famous  $E = mc^2$ , but, since a given mass of antimatter needs an equal mass of ordinary matter with which to react, this effectively becomes  $E = 2mc^2$ . Therefore a gram of antimatter would need a gram of ordinary matter to release its energy and the energy developed would be  $2 * 1e^{-3} * (3e8)^2 = 1.8e^{14}$  joules. Using the convention that 1 kiloton TNT equivalent =  $4.184e^{12}$  joules, the gram of antimatter reacting with its ordinary matter counterpart gives 43 kilotons of explosive force.

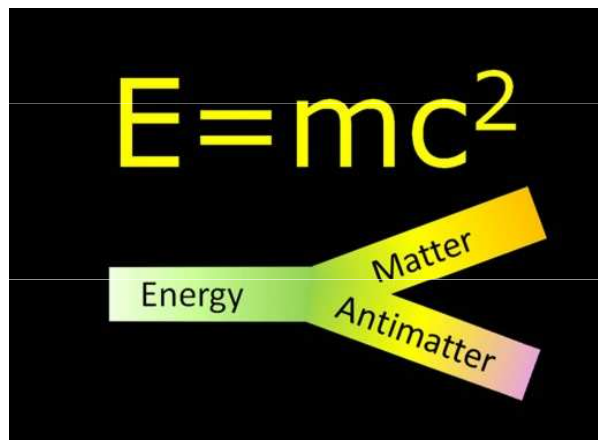
63 trillion [dollars](#) per gram

[mass energy equivalent](#) being released as energy, which is at least an order of magnitude greater than the energy release of the most efficient [fusion weapons](#) (100% vs 7-10%).

requires and converts exactly equal masses of antimatter and matter by the collision which releases the entire mass-energy of both, which for

1 gram hmoty + 1 g antihmoty =  $2mc^2 = \sim 1.8 \times 10^{14}$  J.

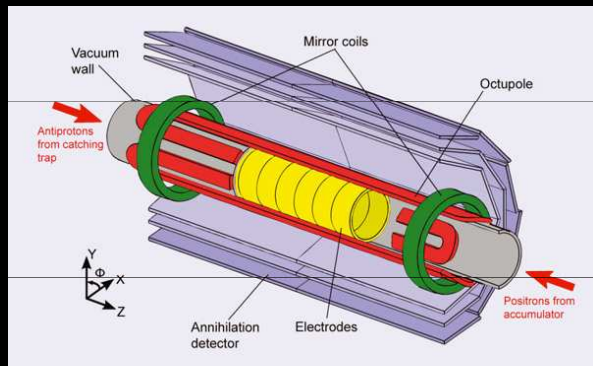
Using the convention that 1 kiloton [TNT equivalent](#) =  $4.184 \times 10^{12}$  joules (or one trillion calories of energy), one gram of antimatter reacting with one gram of ordinary matter results in 42.96 kilotons-equivalent of energy (though there is considerable "loss" by production of [neutrinos](#)).





# Problémy s antihmotou

Výroba antihmoty extrémně náročná a drahá, jen malé výtěžky



- 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...

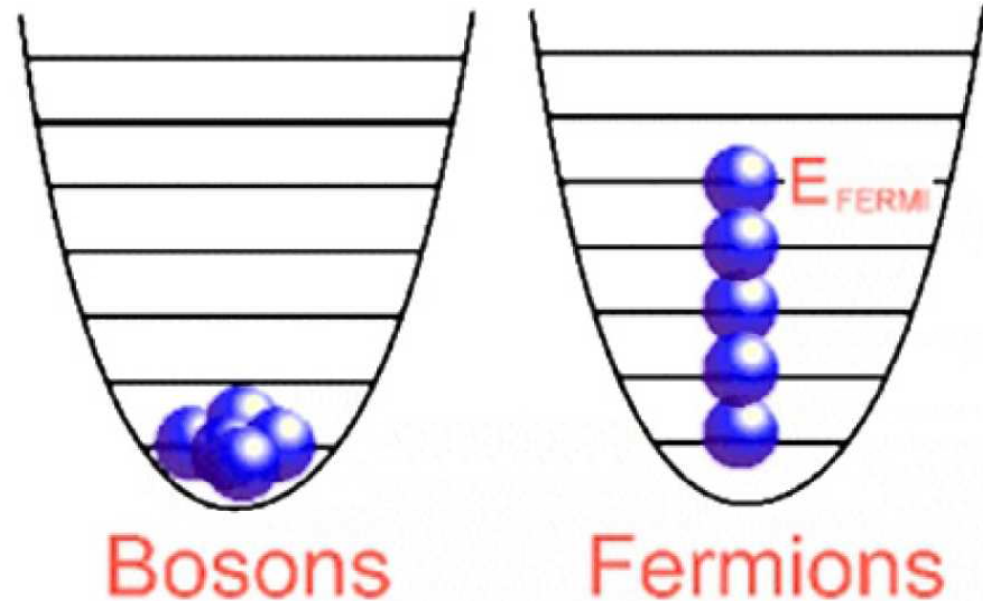
Přednáška prof. Vladimír Wagner: Antihmota ve vesmíru, 2016

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



# BOSONY („částice interakcí“)

- Jako bosony jsou označovány částice, které **zprostředkovávají interakce**.
- Všechny bosony mají **celočíslný spin** a jsou pravým opakem fermionů, nespolečenských částic řídících se Pauliho vylučovacím principem (tzn. velice **rády obsazují společný kvantový stav**)
- Existenci bosonů předpověděli ve svých pracích fyzici Steven Weinberg, Sheldon Glashow a Abdus Salam.
- Klidová hmotnost:
- **Nulová**: foton, gluon
- **Nenulová**: intermediální bosony (
- Jmenují se podle indického fyzika označovány jako **Boseho částice**).
- Zajímavým zástupcem bosonů je teprve v roce 2012 (nyní jsou teď modelu elementárních částic).



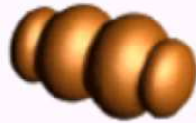
- **Gravitační síla ?** (zatím není známa polní částice)
- **Elektromagnetická síla:** protony a elektrony (elektricky nabité částice), udržuje e- v elektronovém obalu)
- **Silná jaderná síla:** drží protony a neutrony v jádře (částice s barevným nábojem) a tvoří tak atomové jádro (elektrárny, a-bomby)
- **Slabá jaderná síla:** „cítí“ ji všechny částice atomu, 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. <u>Compton</u> )
W, Z	$W^\pm, Z^0$	80 až 91	1	0	W	1983	C. <u>Rubia</u> , V. <u>Meer</u>
gluony	g	0	1	0	S	1979	kolaborace PLUTO

# The Four Fundamental Forces

## Strong

Gluons (8)



Quarks



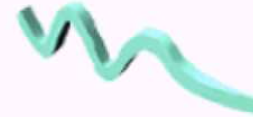
Mesons  
Baryons



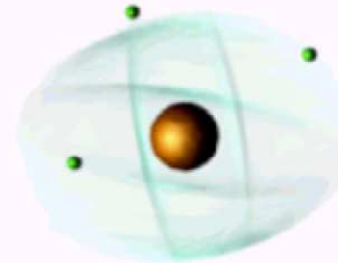
Nuclei

## Electromagnetic

Photon



Atoms  
Light  
Chemistry  
Electronics



## Gravitational

Graviton ?

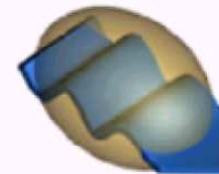


Solar system  
Galaxies  
Black holes

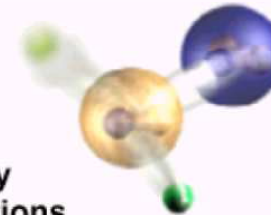


## Weak

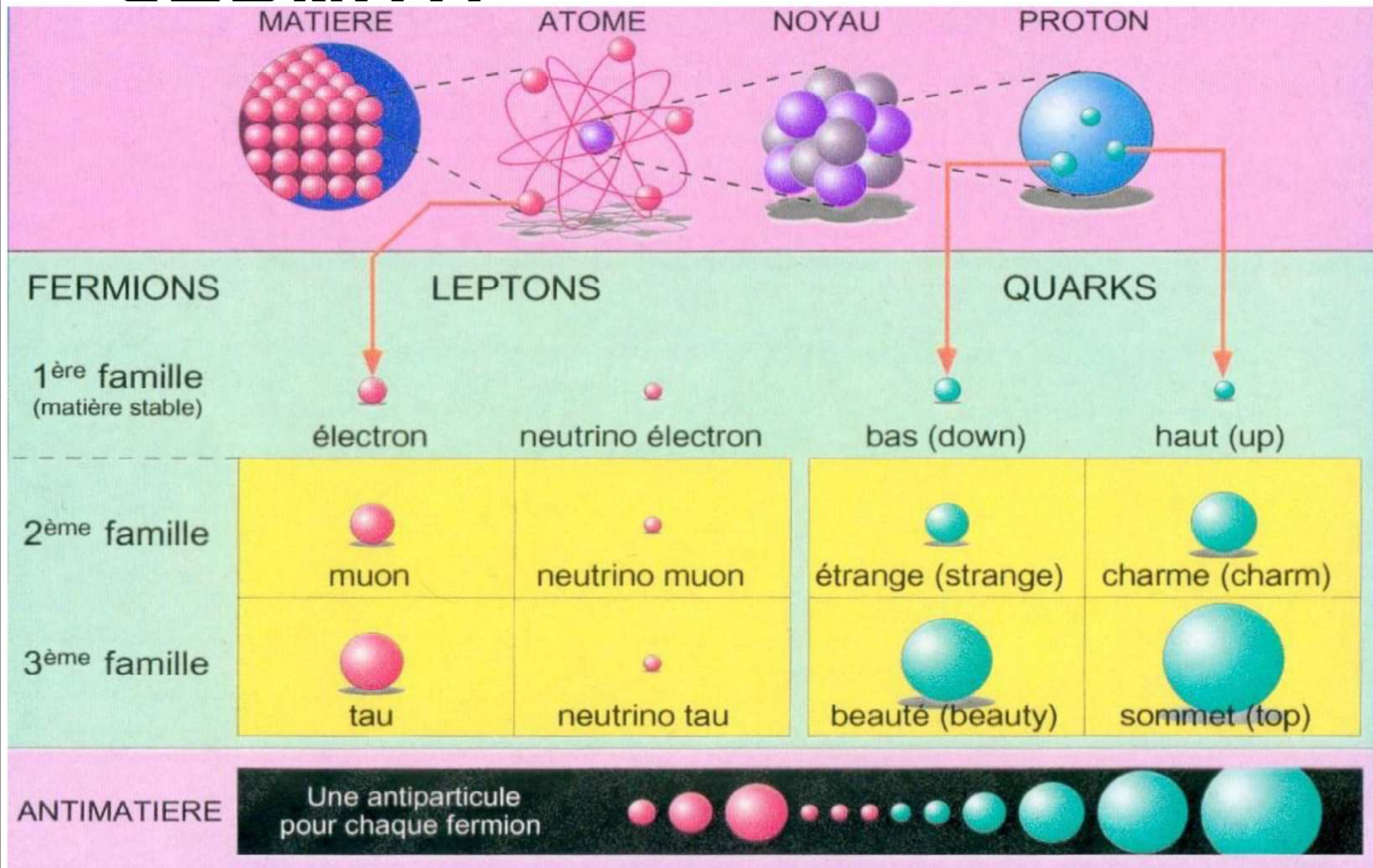
Bosons (W,Z)



Neutron decay  
Beta radioactivity  
Neutrino interactions  
Burning of the sun



# Částice + antičástice - SUDNITÍ



# Standard Model of Elementary Particles

		Fermions			Bosons
mass →		2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge →		2/3	2/3	2/3	0
spin →		1/2	1/2	1/2	1
name →		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
	Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
		-1/3	-1/3	1/3	0
		1/2	1/2	1/2	1
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	Leptons	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
		0	0	0	0
		1/2	1/2	1/2	1
		<b>ν<sub>e</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> muon neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson
		0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
		-1	-1	-1	±1
		1/2	1/2	1/2	1
		<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson
Three Generations of Matter (Fermions) →		I	II	III	

Quark		charge	Spin ( )	masse (MeV)	inter. E.m.	Inter. Faible	Inter. Forte
U	(up)	2/3	1/2	~1.5-5	Oui	Oui	Oui
D	(down)	-1/3	1/2	~3-9	Oui	Oui	Oui
C	(charm)	2/3	1/2	~1300	Oui	Oui	Oui
S	(strange)	-1/3	1/2	~60-170	Oui	Oui	Oui
T	(top)	2/3	1/2	~173800	Oui	Oui	Oui
B	(bottom)	-1/3	1/2	~4250	Oui	Oui	Oui
Leptons		charge	Spin ( )	masse (MeV)	inter. é.m.	Inter. Faible	Inter. Forte
e	(électron)	-1	1/2	0.5109..	Oui	Oui	Non
$\nu_e$	(e -neutrino)	0	1/2	< 4eV	Non	Oui	Non
$\mu$	(muon)	-1	1/2	105.658..	Oui	Oui	Non
$\nu_\mu$	( $\mu$ -neutrino)	0	1/2	<0.170	Non	Oui	Non
$\tau$	(tau)	-1	1/2	1777.05	Oui	Oui	Non
$\nu_\tau$	( $\tau$ -neutrino)	0	1/2	< 18.2	Non	Oui	Non

# 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.



# PARTICLE „ZOO“

**QUARKS**

**UP QUARK**  
A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the down quark.

**DOWN QUARK**  
A tiny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the up quark.

**STRANGE QUARK**  
Why is this second generation quark so strange?

**CHARM QUARK**  
A second generation quark, it is charmed, indeed.

**TOP QUARK**  
This heavyweight champion doesn't live long enough to make friends with anyone.

**BOTTOM QUARK**  
This third generation quark is puttin' on the pounds.

**LEPTONS**

**ELECTRON-NEUTRINO**  
These miniscule bandits like to steal away energy and escape detection.

**MUON-NEUTRINO**  
A slightly heavier bandit than its sibling to the left.

**TAU-NEUTRINO**  
Wily and sneaky, this bandit is the newest particle to arrive at the Zoo.

**ELECTRON**  
A familiar friend, this negatively charged, busy f'ill guy likes to bond.

**MUON**  
A "heavy electron" who lives fast and dies young.

**TAU**  
A "heavy muon" who could stand to lose a little weight.

TO MUCH TO BE

FUNDAMENTAL

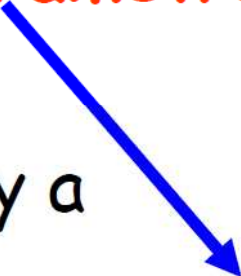
PARTICLES ??

**POSITRON**   **ANTIPROTON**   **ANTINEUTRON**   **ANTIMUON**   **ANTITAU**

**ANTI-UP QUARK**   **ANTI-DOWN QUARK**   **ANTI-STRANGE QUARK**   **ANTI-CHARM QUARK**   **ANTI-BOTTOM QUARK**   **ANTI-TOP QUARK**

**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.



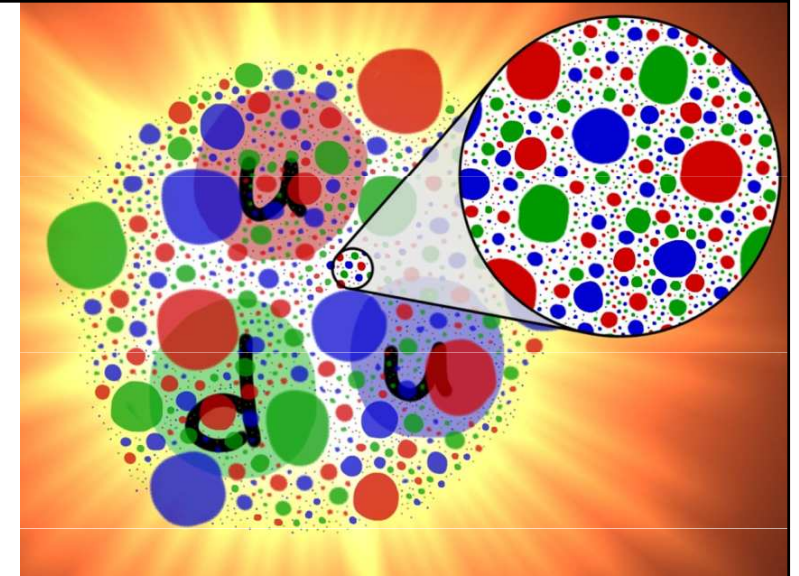
**Je to vada?  
Je naděje je  
z něčeho spočíst?**

## Otevřené problémy:

- proč jsou právě 3 generace
- otázky kolem hmotností neutrin
- proč není ve vesmíru stejně hmoty jako antimoty
- 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, hypoteticky se mohou skládat z **preonů** jak předpověděli Jogesh Pati a Abdus Salam (1974).
- **Proč je například velikost elektrického náboje shodná mezi protonem (složeným z kvarků) a elektronem (leptonem)?**
- Experimentálně však vnitřní struktura leptonů a kvarků dosud objevena nebyla (první náznaky možná ve Fermilabu, 1994).



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

aaaaaa = +1e = positron  
 aaaaab = +2e/3 = up quark  
 aaaabb = +e/3 = down antiquark  
 aaabbb = 0e = neutrino and neutral boson  
 aabbbb = -e/3 = down quark  
 abbbbb = -2e/3 = up antiquark  
 bbbbbb = -1e = 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.