

Radiační biofyzika

Přednáška 3 2021

Atomy & Radioaktivita

Martin Falk



1939... HITLER 1



2022... HITLER 2 with
thermonuclear bombs



<https://www.sujb.cz/aktualne/detail/pokyny-pro-pripad-nutne-ochrany>

Pokyny pro případ nutné ochrany – radiální poplach

28.02.2022

I když pevně věříme, že pravděpodobnost je mizivá, na četné dotazy použití jaderných zbraní, doporučuje SÚJB veřejnosti pro případ přípravy ochrany před jaderným útokem postupovat následujícím způsobem:

- připravte si **evakuační zavazadlo** s nezbytnými osobními potřebami, náhradním oblečením a doklady, případně i nouzový balíček (trvanlivé potraviny, dostatek nápojů, zdravotnické a hygienické potřeby na několik dnů, zejména léky, které užíváte, funkční rádio a svítilnu s náhradní sadou baterií atd.),
- domluvte si s rodinnými příslušníky systém náhradní komunikace pro případ výpadku mobilních služeb,
- v případě útoku se **okamžitě odeberte do sklepů, krytů nebo jiných podzemních prostor se silnými betonovými zdmi**, zavřete dveře a okna a zastavte veškerou ventilaci,
- po útoku **vyčkejte alespoň několik hodin**, než vyjdete ven, kvůli možnému radioaktivnímu spadu,
- při opuštění úkrytu si **zakryjte dýchací cesty** šátkem nebo respirátorem, abyste zabránili vdechnutí radioaktivní látek,
- po příchodu do bezpečí se co nejdříve **osprchujte a vyměňte si oblečení**, abyste zabránili dalšímu rozšiřování kontaminace,

<https://www.sujb.cz/aktualne/detail/pokyny-pro-pripad-nutne-ochrany>

Pokyny pro případ nutné ochrany - aktualizace

28.02.2022

•**řídíte se pokyny složek integrovaného záchranného systému.**

Protože záležitosti civilní ochrany a nemírového využití jaderné energie nejsou v přímé působnosti SÚJB, pro další informace odkazujeme na **weby a informační kanály Ministerstva vnitra a Ministerstva obrany ČR**. Obecně se problematice ochrany obyvatelstva na našem území věnuje **HZS ČR**, viz ochrana obyvatelstva.

Aktualizace 28.2.2022 16:30

Vzhledem k enormnímu náporu na webové stránky SÚJB, HZS ČR a hl. m. Prahy, který způsobil jejich dočasnou nefunkčnost, jsme pro tuto chvíli odstranili odkazy na seznamy krytů. Po konzultaci se zástupci Generálního ředitelství HZS ČR bude na jejich webu v nejbližší době zveřejněno upřesnění k uvedeným pokynům.

VIVAT UKRAINE!



DEKONTAMINACE

- **Cílem** dekontaminace je **odstranit** radioaktivní látky z povrchů. Tento proces však **nezpůsobuje deaktivaci** radionuklidů, které nadále zůstávají zdroji ionizujícího záření.
- **Dekontaminací nelze snížit ozáření způsobené vnitřní kontaminací osoby.** Kontaminace není způsobena ozářením, ale ulpěním RaL na povrchu.
- Poskytnutí přednemocniční neodkladné péče osobám v přímém ohrožení života nebo se závažným postižením zdraví a jejich transport do nemocnice je preferováno před dekontaminací.
- **Dekontaminační stanoviště** se zřizuje ve vnější zóně v prostoru s dávkovým příkonem menším než **1 $\mu\text{Gy/h}$** (1 $\mu\text{Sv/h}$) a plošnou aktivitou menší než **3 Bq/cm^2** . Jeho součástí je kontrola kontaminace, která je obvykle umístěna na vstupu a výstupu dekontaminačního stanoviště.
- Každá osoba přicházející z bezpečnostní zóny nebo prostoru podezřelého na přítomnost RaL musí projít kontrolou kontaminace a případně dekontaminací.
- Po dekontaminaci se provádí **kontrola účinnosti dekontaminace**. Pokud je plošná aktivita vyšší než kontrolovaná hodnota, provádí se **opětovná dekontaminace** se zaměřením na místa vykazující vyšší hodnoty. Po opětovné dekontaminaci mokřým způsobem se v případě překročení kontrolované hodnoty další dekontaminace už neprovádí. U osob vzniká podezření, že kontaminant pronikl do pokožky, nebo že došlo k vnitřní kontaminaci.

DEKONTAMINACE

- Dekontaminace osob se provede **nejprve suchým způsobem svlečením svrchních částí oděvu** tak, aby nedošlo ke kontaminaci těla. **Oděv se roluje nebo se rozstříhá, nikdy se nepřetahuje přes hlavu** a odkládá se do označených uzavíratelných obalů.
- Pokud je nezasahující osoba vybavena **prostředky pro ochranu dýchacích cest, odkládají se jako poslední.**
- Dále se provede **odstranění RaL z odkrytých částí těla otíráním dekontaminačním roztokem**, vypláchnutí úst, nosu a očí pitnou vodou nebo speciálním roztokem (borová voda nebo fyziologický roztok). Po dekontaminaci suchým způsobem následuje kontrola kontaminace.
- **Zjistí-li se hodnota vyšší**, než je kontrolovaná hodnota, odloží se zbylé ošacení do uzavíratelných transportních nádob a provede se **dekontaminace těla mokrým způsobem**, řádným omytím celého těla včetně vlasů tekutým mýdlem nebo dekontaminační směsí.
- Po důkladném **osprchování vodou o teplotě nepřesahující 37 °C a osušení** následuje další **kontrola kontaminace**. Je-li výsledná hodnota povrchové kontaminace nižší než kontrolovaná hodnota, osoba se obleče do náhradního oblečení a postupuje na lékařskou prohlídku.
- Pokud ani při opakované dekontaminaci mokrým způsobem nedošlo k poklesu plošné aktivity pod kontrolovanou hodnotu, vzniká podezření, že kontaminant pronikl do povrchu kůže nebo že došlo k vnitřní kontaminaci (viz dříve). Po konzultaci se **SÚJB** je osoba odeslána do specializovaného zdravotnického zařízení.

DEKONTAMINACE

- Pro odhad vnitřní kontaminace proměříme oblast úst, nosu, očí, a uší, kde se radioaktivní látky snadno zachycují
- Osprchování vodou (nejlépe proudem teplé vody od hlavy)
- **Dekontaminace kůže:** houbou nebo kartáčkem a dekontaminujeme vhodným detergentem, poté provedeme znovu oplach proudem vody a pokožku osušíme. Jako detergent je nejvhodnější **kyselé mýdlo**, případně **10% EDTA** (kyselina ethylendiamintetraoctová, $C_{10}H_{16}N_2O_8$) nebo **1% DTPA** (Kyselina pentetová nebo kyselina diethylentriaminpentaoctová $C_{14}H_{23}N_3O_{10}$), **v případě nouze obyčejným (zásaditým) mýdlem**
- U nechodících, pokud není osprchování možné, provádí ho zdravotnický personál pomocí tampónů
- **Dekontaminace úst:** vyčistit zuby kartáčkem a dutinu ústní v průběhu procedury opakovaně vyplachovat 3% roztokem kyseliny citrónové
- **Dekontaminace hltanu:** vyklotání **3% roztoku peroxidu vodíku**
- **Dutina nosní a uši:** vodou nebo **fyziologickým roztokem**
- **Oči a spojivkový vak:** **borovou vodou** nebo **fyziologickým roztokem**
- Omezíme vstřebávání radionuklidů **v případě porušení kůže podporou krvácení a podvázáním končetiny, ránu vypláchneme fyziologickým roztokem nebo převařenou vodou a sterilně překryjeme**
- Dekontaminaci přerušíme, pokud bylo dosaženo aktivity pod stanovenou hodnotou nebo hrozí-li porušení kůže a nevedou-li opakované dekontaminační postupy ke snižování kontaminace

DEKONTAMINACE

- Instruct them to **avoid excessive scrubbing** as this may break the skin and introduce surface contamination to internal circulation (Lin, Machleder, DiPoce, & Brenner, 2013).
- **Avoid allowing water to run into orifices or open wounds and wear properly fitting eye protection** if performing decontamination (Wolbarst et al., 2010).
- Showering and bathing the patient continue **until surveys read < 0.5 mR/h (5 μ Gy/h; 1 R ~0.01 Gy)**
- **or until no further contamination can be removed** (Lin et al., 2013).
- Pay close attention to, and avoid, any fluid, water, or object after it touches the wound.
- Survey the wound before and after decontamination to determine how much radioactivity is removed and when decontamination is complete (REAC/TS, 2014).
- **Treat radiological burns such as any other burn or thermal injury.**
- **Once the wound has been decontaminated, it can be covered, and the area around the wound can be decontaminated** (REAC/TS, 2014).



VNITŘNÍ KONTAMINACE

- **Po vdechnutí časně směsi štěpných produktů** v rámci první pomoci **poskytujeme jodovou profylaxi** podáním dostupných **tablet jodidu draselného** s cílem zabránit akumulaci radioaktivního jodu ve štítné žláze
- **Při vnitřní kontaminaci lze dekontaminovat pouze zažívací trakt.** Jinak lze jen snižovat resorpci a naopak zvýšit vylučování radionuklidů (výplach žaludku, očistné nálevy a výplachy ústní dutiny, podáváme **aktivní uhlí** a **projímadla**
- Ke zvýšené eliminaci přispívá **podávání chelátů, eventuálně specifických kompetitorů** metabolických mechanismů
- U látek vylučovaných ledvinami – **diuretika**
- **Radioprotektiva** (význam spíše terapeutický než protektivní – většinou by se musela podat před útokem, což lze u civilních osob jen těžko)

První pomoc – instruktážní videa

<https://www.krizport.cz/rady/videoklipy-ty-zvladnes/prvni-pomoc>

ŘEČTÍ FILOSOFOVÉ

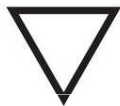
Vše je dělitelné do
nekonečna



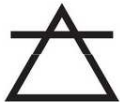
earth



water



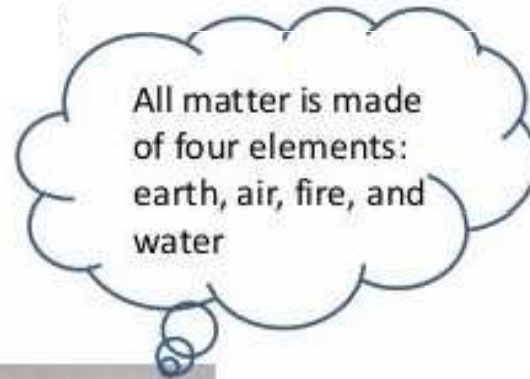
air



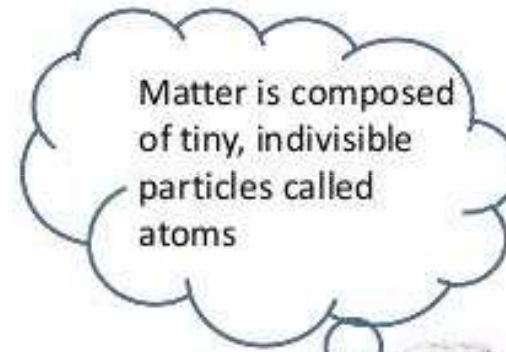
fire



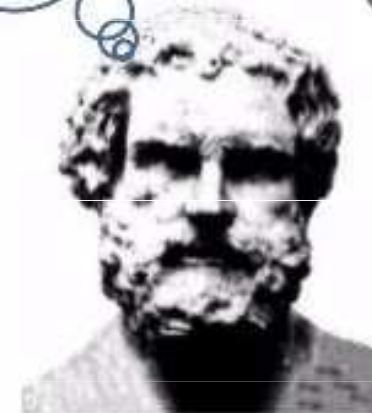
Aristotle



Leukippos + Démokritos



ATOM



Democritus

versus

Antické Řecko - ATOMISMUS



Leukippos

(500 - 440 př. n. l.)

Zakladatel ATOMISMU

Již dále nedělitelné = ATOMOS

Učitel Démokrita

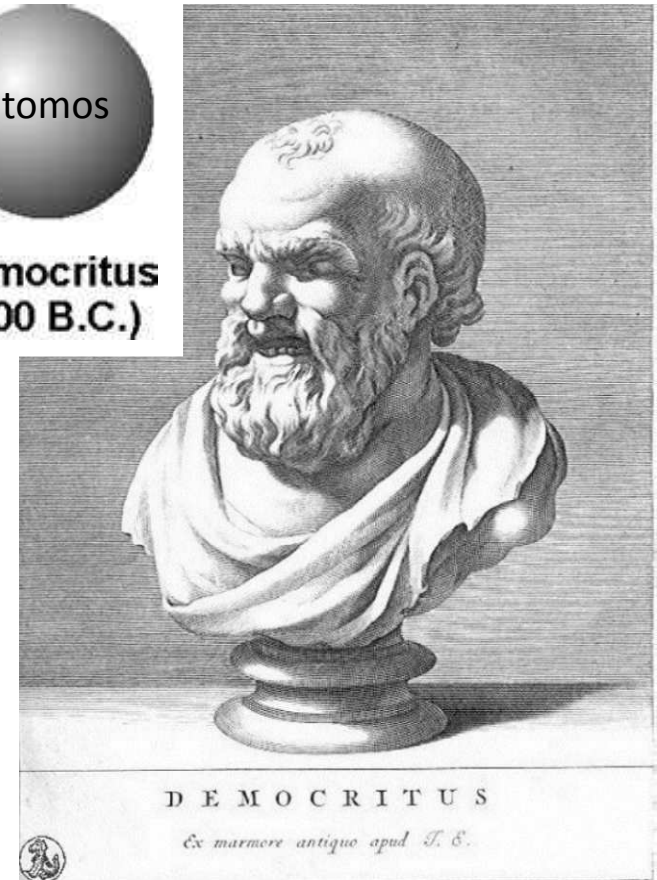


Antické Řecko - ATOMISMUS

- **Démokritos** 460 - 370 př. n. l., žák Leukippose
- Hmotu nelze dělit do nekonečna. Nejmenší částice nazval átomos (ἄτομος) – z řečtiny nedělitelné
- Existuje bytí a nebytí. Svět je tak nekonečné prázdno (nebytí), v němž se pohybuje nekonečné množství neviditelných atomů tvořících hmotu
- Různá hmota (např. kameny vs. zářivé hvězdy, ale třeba i bohové) je tvořena nestejnými atomy, které se liší tvary, polohou i uspořádáním
- Atomy nezanikají a nepodléhají žádným vlivům
- ... jsou nedělitelné, nezničitelné a neměnné,
- ... pohybují se a střetávají



Democritus
(400 B.C.)



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



JOHN DALTON

1766-1844

DALTONOVA ATOMOVÁ HYPOTÉZA

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



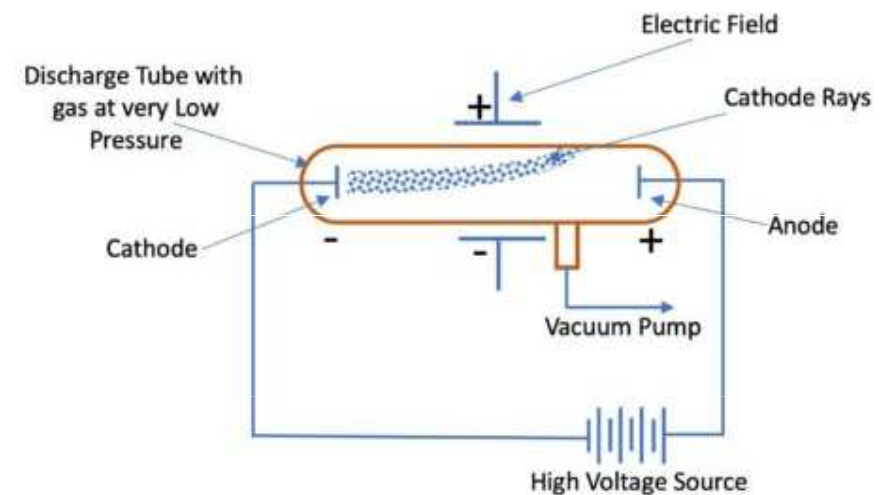
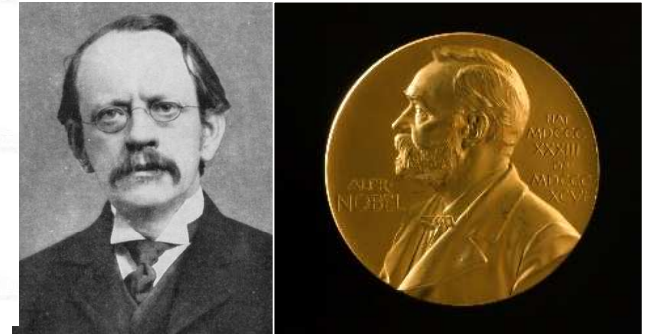
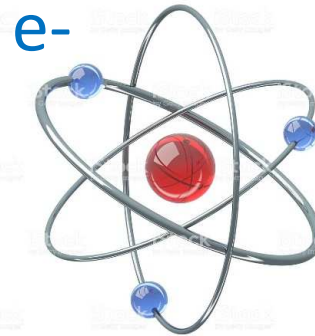
AMEDEO
AVOGADRO

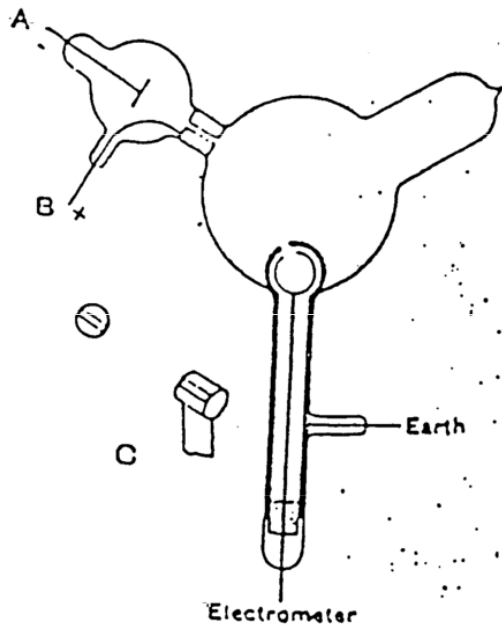
Amedeo Avogadro (1811) později nazval složitější částice skládající se z atomů pojmem **MOLEKULA**

nedělitelnost atomů (dnes platí pouze z chemického hlediska)

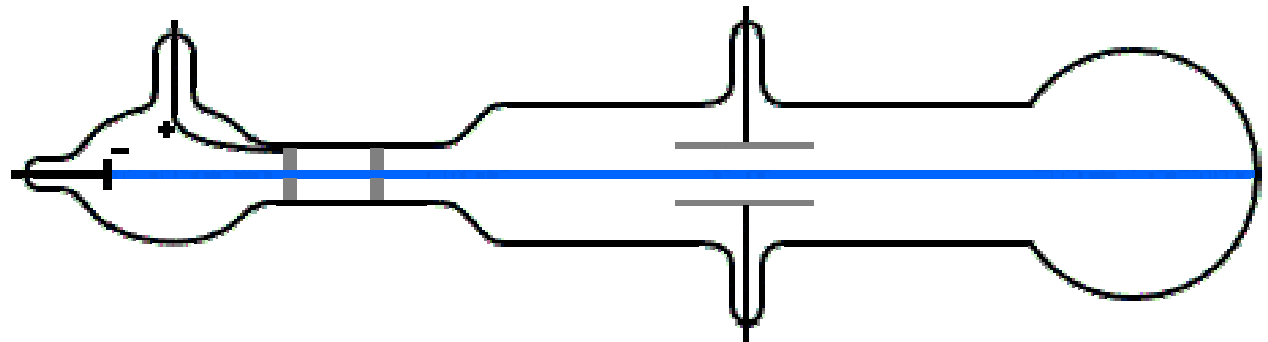
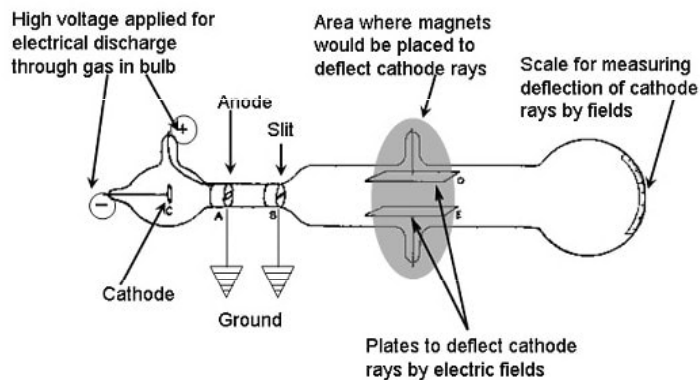
Objev elektronu – první částice menší než atom

- Josef Jon Thomson, anglický fyzik
- 1897 - **Objev elektronu** při experimentech s katodovou trubicí
- **První subatomární částice** → (1897) **vyvrácena teorie o nedělitelnosti atomu** (dále už platí jen z chemického pohledu)
- → **spuštění debat o stavbě atomu, počátek částicové fyziky, první model atomu (1903)**
- Nobelova cena za fyziku 1906





Thomson's Apparatus for Research on Cathode Rays

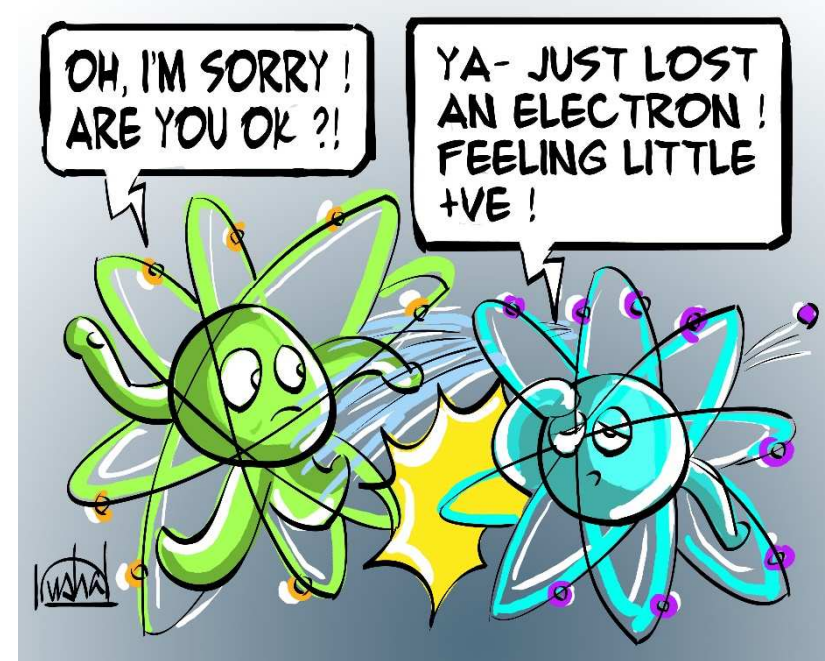


- Náboj nelze oddělit od katodového záření – elektroměr měřil signál pouze tehdy, když jeho směrem Thomson odklonil paprsky pomocí magnetu
- Na základě odklonu záření v el/mag poli: Katodové paprsky jsou partikule cca. 1000-2000 x lehčí než atom vodíku, jsou záporně nabitě a mají vysoký poměr náboje k hmotnosti
- Tyto vlastnosti (elektronu) nezáleží na materiálu katody ani anody, což je rozdíl od anodových paprsků (tvořených různými kationty)
- Thomson tak usoudil, že objevené částice se musí vyskytovat uvnitř atomu a nazval je elektrony -> **objevil tak první subatomární částice**

Elektron a první naivní modely atomu

Skutečnosti, že:

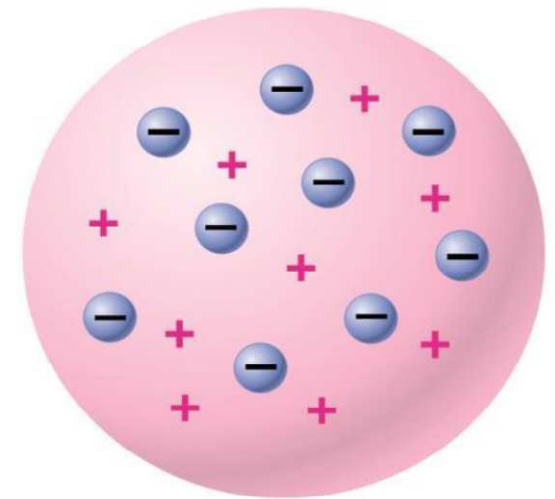
- elektron byl na přelomu 19. a 20. století jediná známá elementární částice,
- **elektrony nesou jen velmi malou část hmotnosti atomu** → např. nejjednodušší atom, (tj. atom vodíku s jedním e^-) je o tři řády těžší než elektron,
- hmota je běžně **elektricky neutrální**,



vedou k myšlence, že musí existovat kladně nabitá složka, jež dodává atomu téměř veškerou jeho hmotu

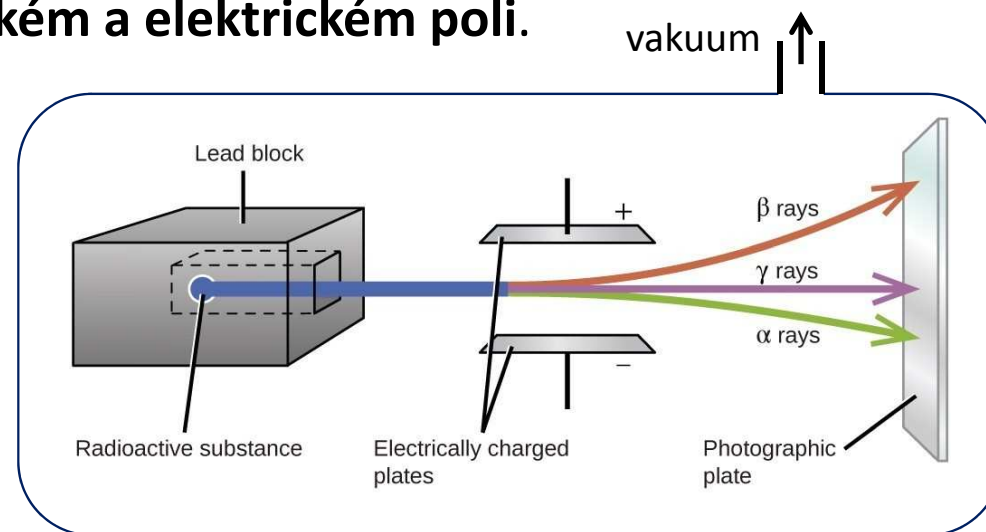
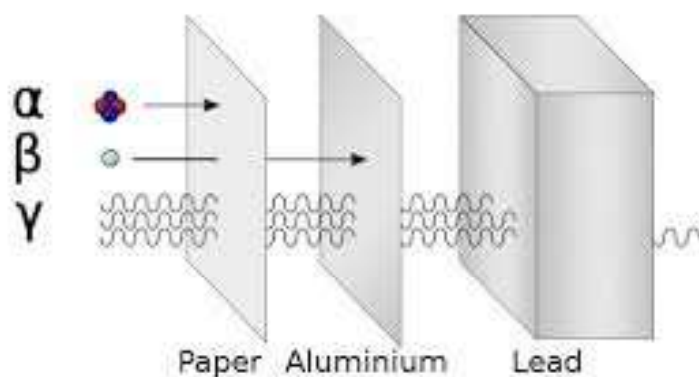
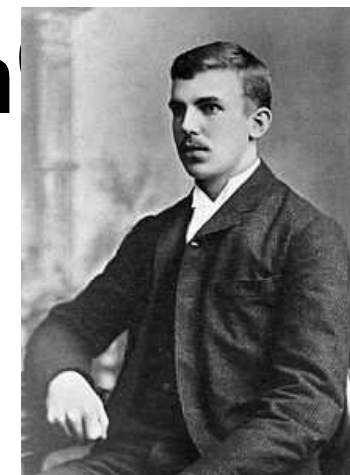
THOMSONŮV PUDINKOVÝ MODEL

- 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, velikost náboje elektronu byla přitom přirozeně nazvána **elementárním nábojem**.
- 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^-

- Ernst Rutherford, novozélandský fyzik, 1871 – 1937
- 1897/98 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.



Rutherford – tři druhy radioaktivního záření

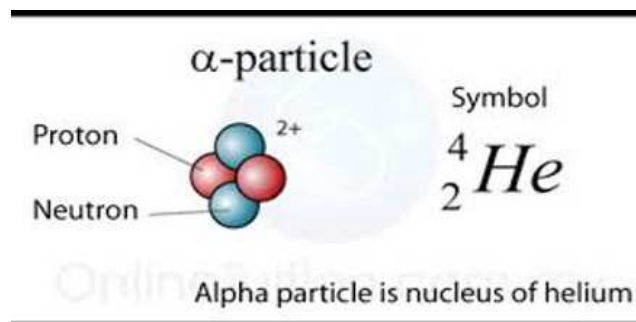
V roce 1903 si uvědomil, že typ radiace objevený (ale nepojmenovaný) francouzským chemikem **Paulem Villardem** při pokusech s radiem v roce 1900, nemůže být alfa či beta zářením, protože je mnohem pronikavější → pojmenoval tento nový druh záření jako **penetrating gamma**.



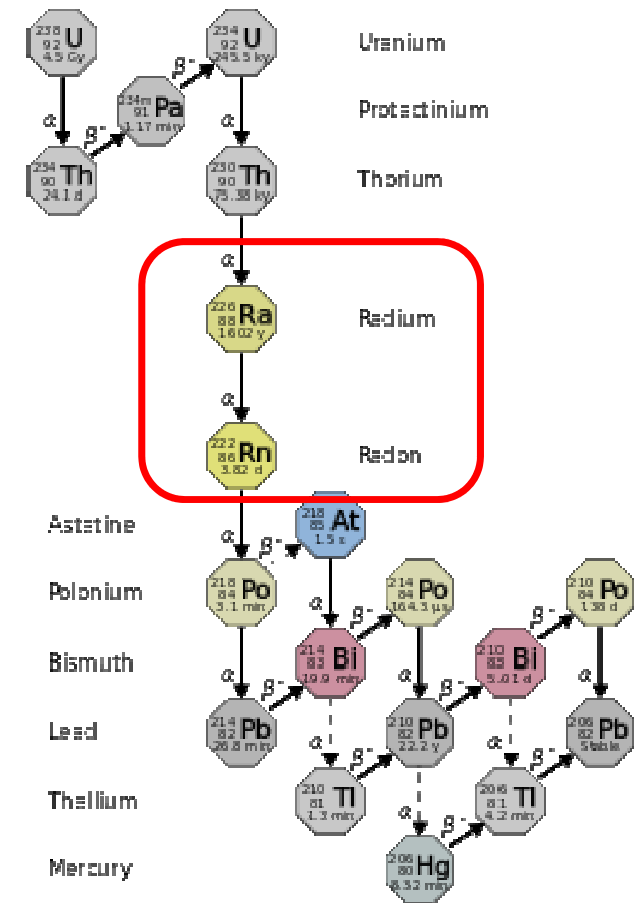
Paulem Villardem,
studoval paprsky X

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>

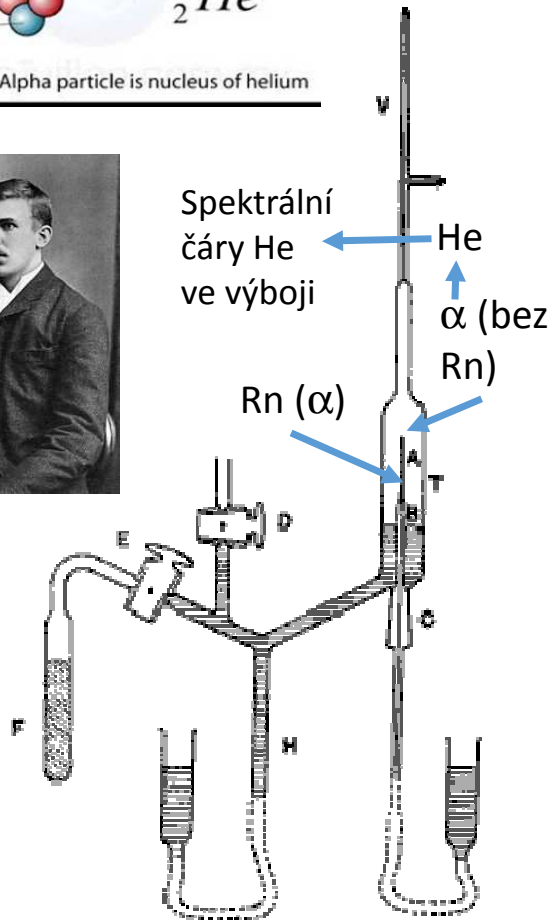
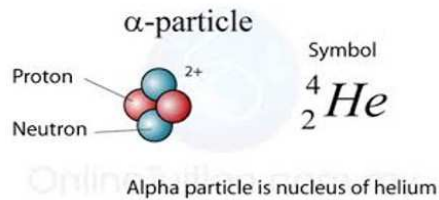
- V roce 1900 Rutherford zjistil, že nejaktivnější prvek není samotné rádium, ale radioaktivní plyn vznikající v důsledku rozpadu rádia. Spolu s Fredericem Soddyem přezkoumali vlastnosti tohoto plynu a zjistili, že se podobá vzácným plynům.
- **Tak byla poprvé objevena samovolná přeměna jednoho chemického prvku v jiný, a byl objeven nestálý prvek radon.**
- Když v roce 1904 William Ramsay a Frederic Soddy zpozorovali nápadný výskyt helia kolem radioaktivních sloučeninách rádia, domnívali se, že **helium se tvoří z rádia**.
- Spolu s **Thomasem Roydsem** provedli pokusy (1909), kterými určili, že helium v okolí α -zářičů vzniká z **alfa částic, jež představují jádra helia**, tedy ${}^4_2\text{He}^{2+}$



- Dále určil, že elektrický náboj alfa částice je $2+$.



Záření alfa = jádra hélia



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

D – ventil pro napojení pumpy pro evakuaci trubice V

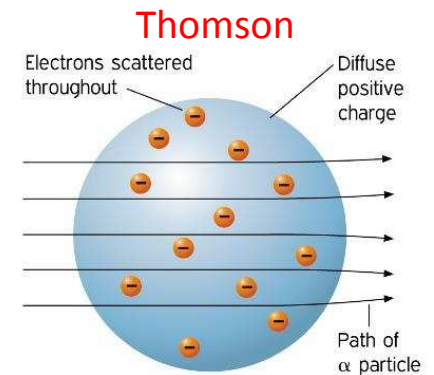
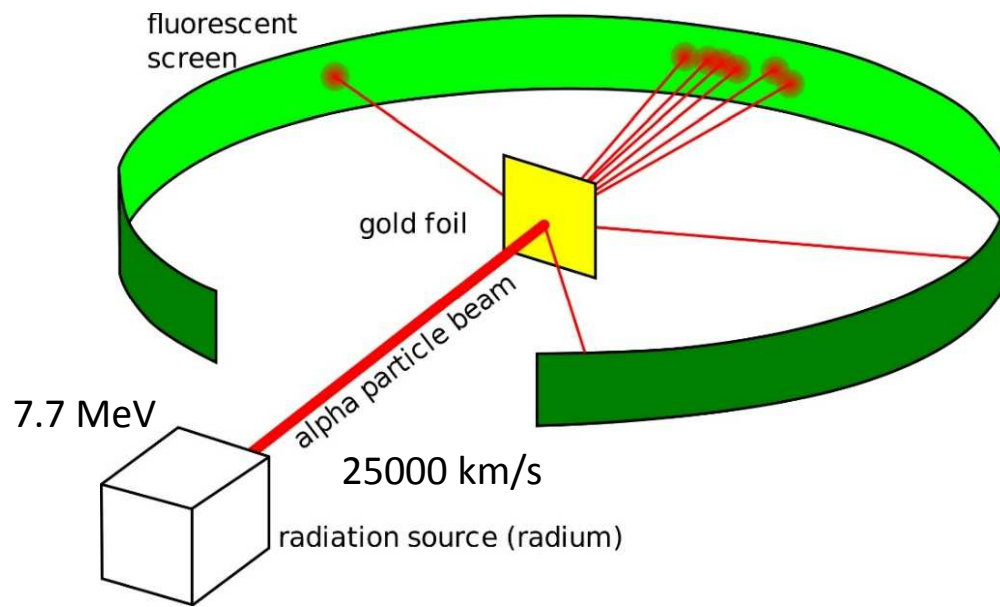
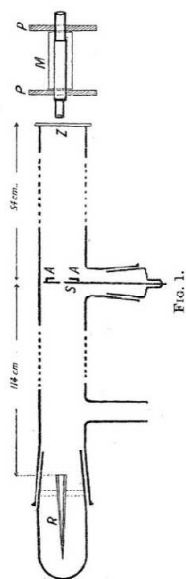
F – dřevěné uhlí pro dokončení evakuace trubice V (chlazené vzduchem)

H – zásobník rtuti – rtuť se přiváděla do trubice T až po spodek trubice A

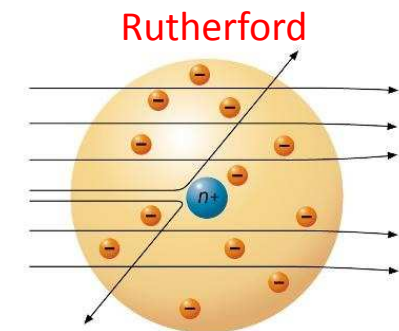
Rutherfordův (Geigerův-Marsdenův) experiment, 1909, objev atomového jádra

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

Odráz možný pouze při interakci s něčím mnohem masivnějším, co zabírá pouze malou část objemu atomu



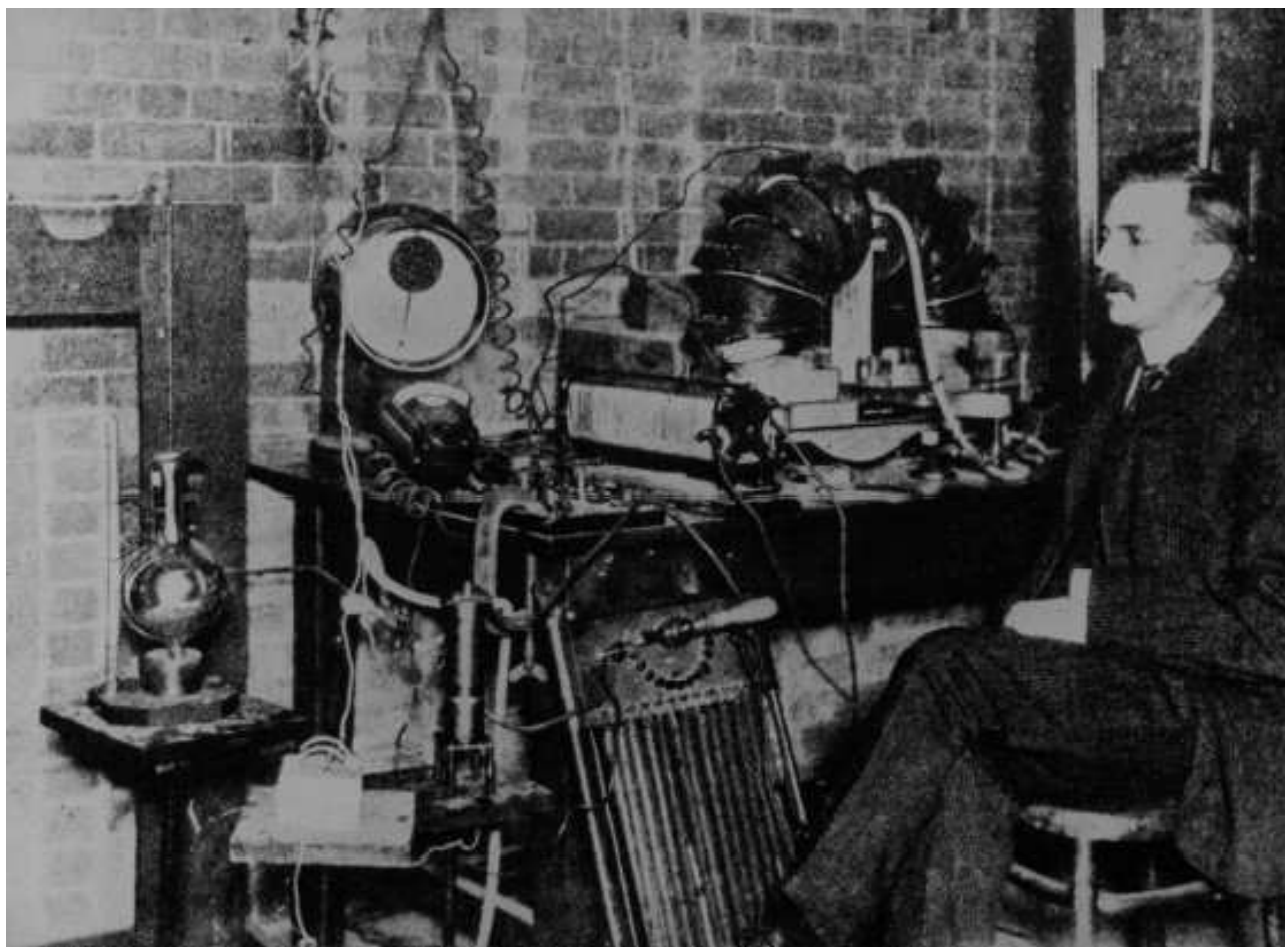
(a) Expected Results



(b) Actual Results

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)

Rutherford v jeho laboratoři



Ernest Rutherford – „první“ planetární model atomu

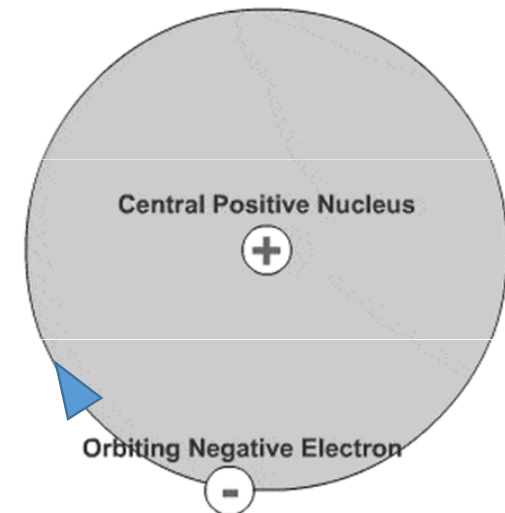
- 1911 Atom se skládá ze dvou částí:
 - a) Velice malé **jádro (100 000x menší než atom)**, kde je uložena kladně nabitá hmota atomu
 - b) **obal**, tvořený elektrony

Ale nový problém:

po separaci \oplus a \ominus náboje v rámci atomu musí jádro nutně elektrostaticky přitahovat záporné elektrony

→ e^- již nemohou být statické „hrozinky v pudinku“,

→ **musí se pohybovat**



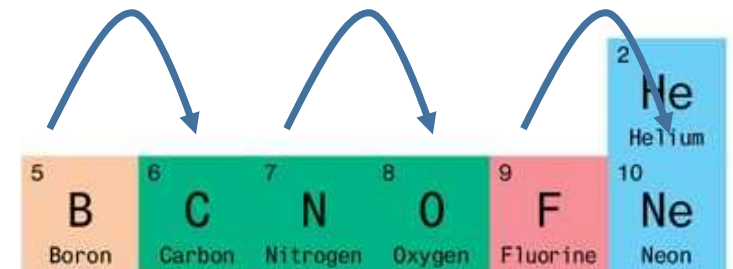
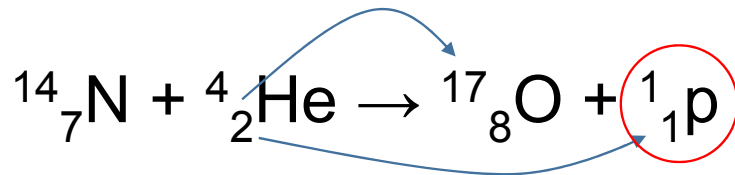
Ernest Rutherford – První planetární model atomu



Elektrony se pohybují na stabilních drahách (**orbitách**), kde jsou v rovnováze elektrostatické a odstředivé síly → pro tuto podobnost bývá často označován jako **planetární model**

A zase ten Rutherford - PROTON

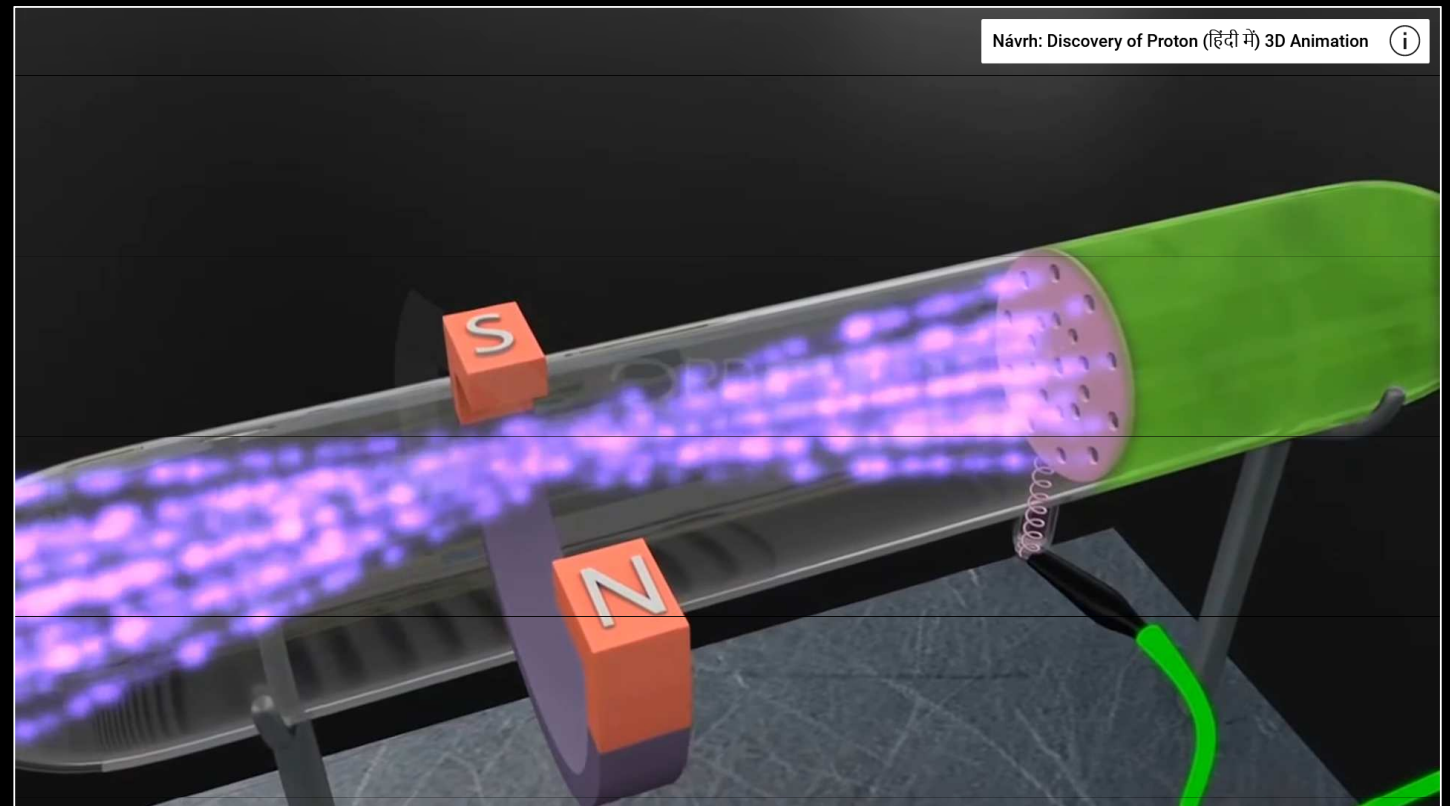
- Až do roku **1918** se hovořilo pouze o elektronu a kladně nabitém jádru.
- Pak ale **E Rutherford objevil p+**,
- Vstřeloval **alfa částice do plynného dusíku** a ty se ve scintilačním detektoru jeví jako jádra vodíku.
- Myslel si, že **jádra vodíku, o nichž věděl, že mají atomové číslo 1**, jsou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



Následné analogické experimenty provedené s bórem, fluórem, neonem, draslíkem a dalšími prvky daly podobné výsledky: v důsledku nárazu α -částice se zasažené jádro ostřelovaného atomu přeměnilo v jádro jeho pravostranného souseda v periodické tabulce za současné emise vodíkového iontu +H (i.e., protonu).

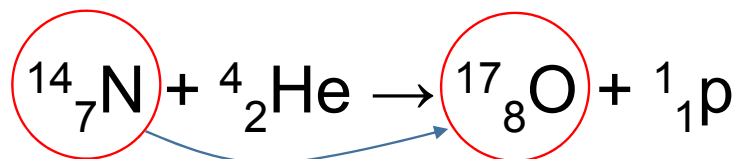
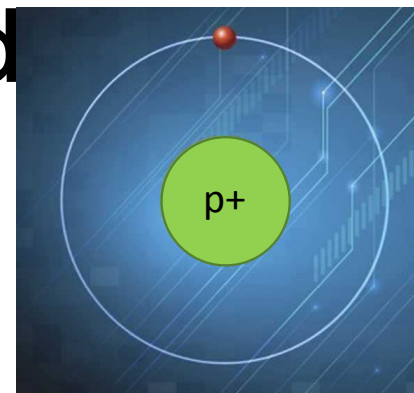
Discovery of the Proton

In 1886 **Eugene Goldstein** (1850–1930) discovered evidence for the existence of this positively charged particle. Using a **cathode ray tube with holes in the cathode**, he noticed that there were rays traveling in the opposite direction from the cathode rays. He called these **canal rays** and showed that they were composed of positively charged particles.



Další mezníky: Rutherford

- **UPŘESNĚNÝ RUTHERFORDŮV MODEL ATOMU:** jádro vodíku obsahuje jedinou kladně nabitou částici – proton – která je přítomna i v jádrech jiných atomů
- 1919 ostřelování dusíku částicemi $\alpha \rightarrow$ zároveň **první transmutace** (převodl dusík na kyslík)

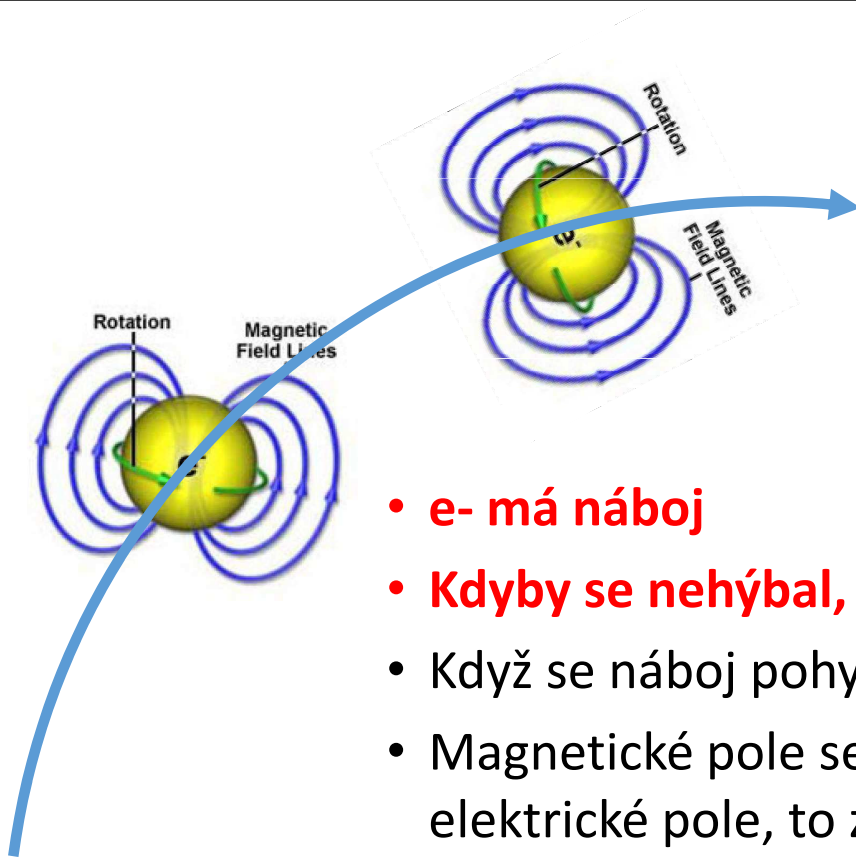


- Pokračoval ve výzkumu záření alfa, spolu s **Hansem Geigerem** objevili metodu detekce alfa záření pomocí záblesků na stínítku ze sulfidu zinečnatého a **ionizační komoru**, která umožňuje počítat alfa částice.
- Zavedl pojem **poločas rozpadu**
- navrhl **metodiku radioaktivního datování**.



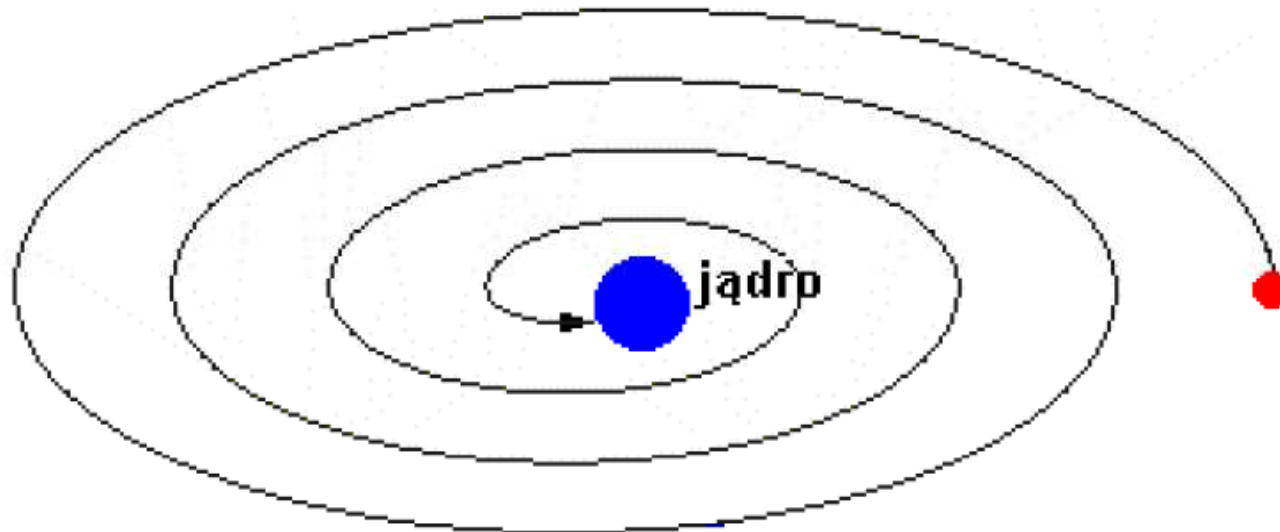
1908 **Nobelova cena za chemii**,
za výzkum rozpadu prvků a
chemii radioaktivních látek

Planetární model atomu – další problémy



- **e- má náboj**
- **Kdyby se nehýbal, přitáhne ho jádro (viz dříve) → obíhá**
- Když se náboj pohybuje (oběh + rotace), generuje magnetické pole
- Magnetické pole se ovšem také pohybuje (mění), takže generuje elektrické pole, to zase magnetické pole atd. → vyzařování el-mag. vln
- **Vyzařováním el-mag. vln ztrácí e- kinetickou** energii a měl by tedy postupně spirálně padat do jádra
- z modelu navíc vyplývá spojité spektrum, zatímco experimentálně získaná **spektra atomů jsou čárová**

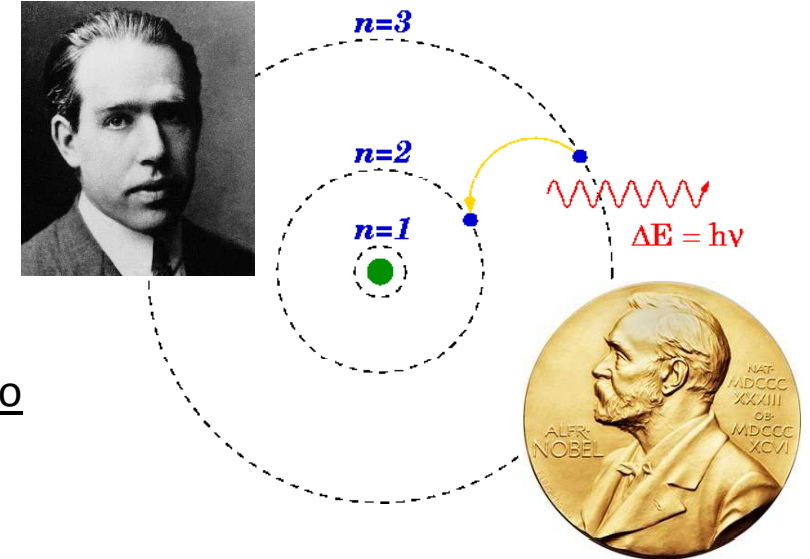
Planetární model atomu – Problémy



- 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} – 10^{-8} s**, což evidentně odporuje skutečnosti (atomy tu stále jsou)

Bohrův „kvantový“ planetární 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:
- **MAX PLANCK**: Již v roce 1900 objevil, že záření absorbované 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**
- **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**



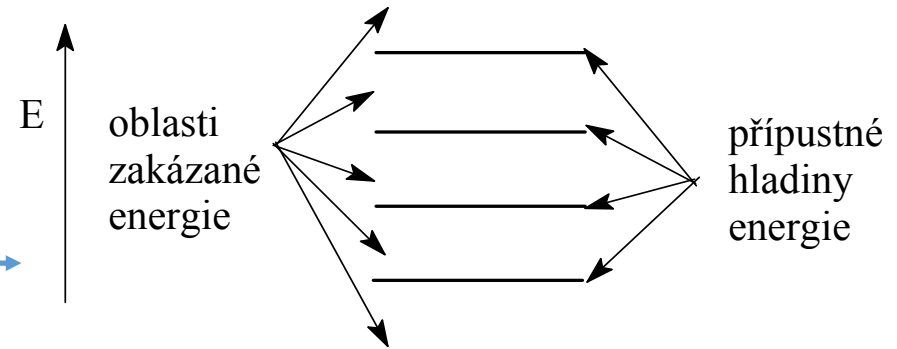
$$E = h * \nu = \frac{hc}{\lambda},$$

ν [ny:] = frekvence záření
 h = Planckova konstanta
= $6.626 \cdot 10^{-34}$ J.s
 c = rychlost světla
 λ = vlnová délka záření



Bohrův „kvantový“ planetární model atomu

- Na základě experimentů a s tehdy vznikající kvantovou mechanikou **doplnil planetární model o 3 zásadní (Bohrovy) postuláty** (které jsou v rozporu s klasickou mechanikou tak i s elektrodynamikou):



- 1) elektrony obíhají atomové jádro **jen na pevně daných dovolených kvantových drahách s přesně určenými diskrétními hodnotami poloměru.**

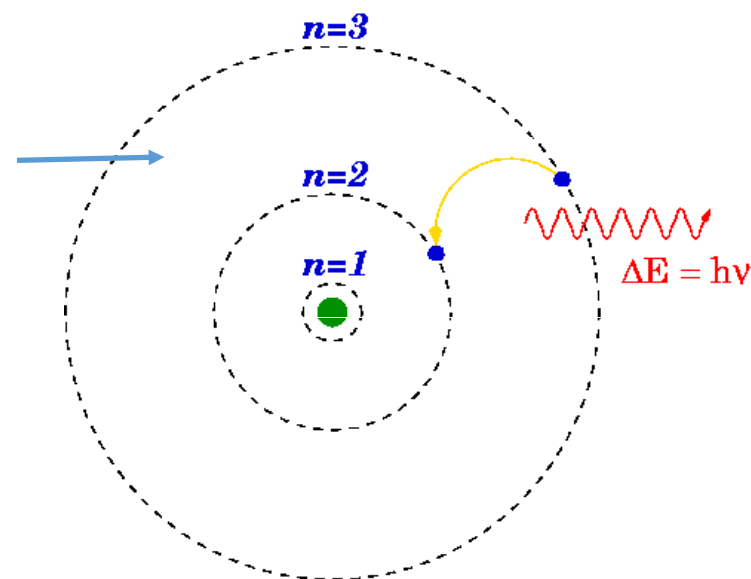
Možné jsou pouze takové dráhy, kde moment hybnosti obíhajícího elektronu odpovídá **celistvým násobkům $h/2\pi$** (moment hybnosti elektronu je kvantován v násobcích redukované Planckovy konstanty)

$$m_e v r = n \hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

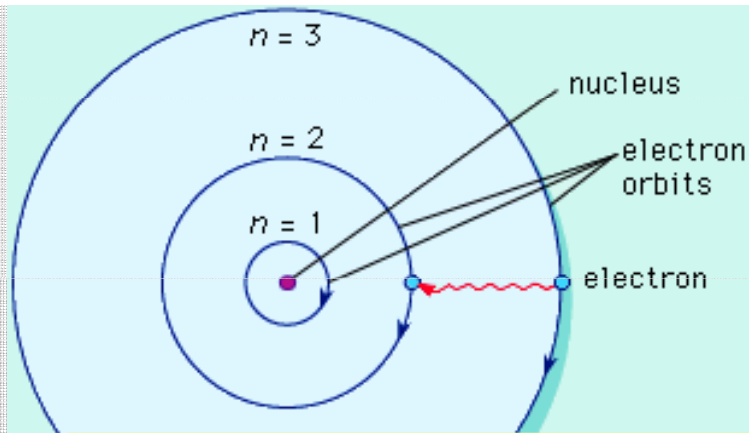
2) Dráhy (elektronové orbitaly), na nichž je splněn první postulát, jsou stacionární. Elektron při pohybu na těchto drahách nevyzařuje elektromagnetické vlny a jeho energie je stálá.

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.**

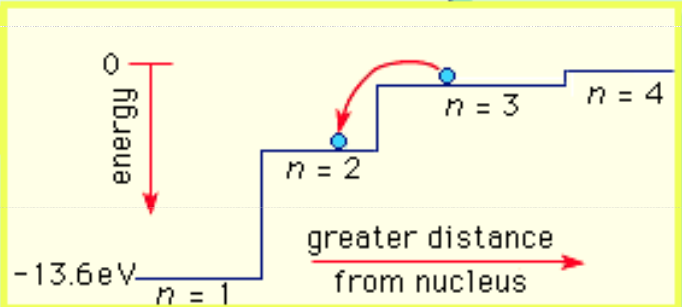
m_e = hmotnost elektronu
 R = poloměr kruhové dráhy e-
 v = rychlost e-
 n = kvantové číslo
 h = Planckova konst.



Hlavní kvantové číslo (n)



The electron travels in circular orbits around the nucleus. The orbits have quantized sizes and energies. Energy is emitted from the atom when the electron jumps from one orbit to another closer to the nucleus. Shown here is the first Balmer transition, in which an electron jumps from orbit $n = 3$ to orbit $n = 2$, producing a photon of red light with an energy of 1.89 eV and a wavelength of $656 \times 10^{-9} \text{ m}$.

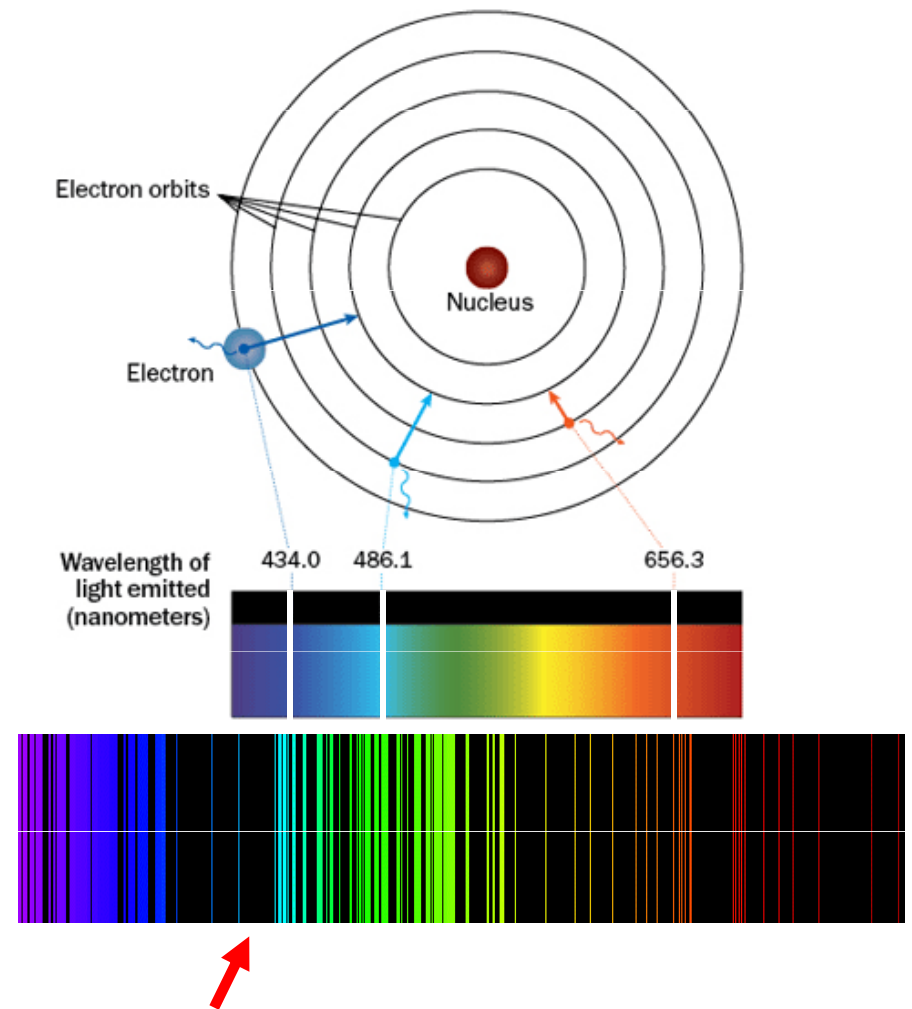


- Bohr označil energetické hladiny (tj. orbity, slupky) písmenem n .
- n – hlavní kvantové číslo – zásadním způsobem určuje energii elektronu v atomu
- Může nabývat hodnot $n = 1, 2, 3, 4,$ etc...

Bohrův model atomu

- Bohrovy postuláty úspěšně popisují nejdůležitější kvantové vlastnosti stavby atomu, **mj. diskrétní (nespojité) čárová spektra** záření vysílaného atomy
- Model je tedy víceméně v souladu s tím, co pozorujeme v přírodě, ale není v pořádku – **chybí vysvětlení** – to až za 25 let.
- Další problémy:
 - je to ale model **plošný**
 - a **nevysvětluje štěpení spektrálních čar**
(viz. přednáška 1 – spektra RTG záření)

Při vyšším rozlišení je ale pozorováno „štěpení“ spektrálních čar → jemná struktura spektra (skupiny blízkých čar, tzv. multiplety)



Potvrzení kvantového charakteru e-hladin

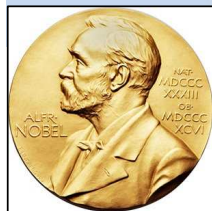
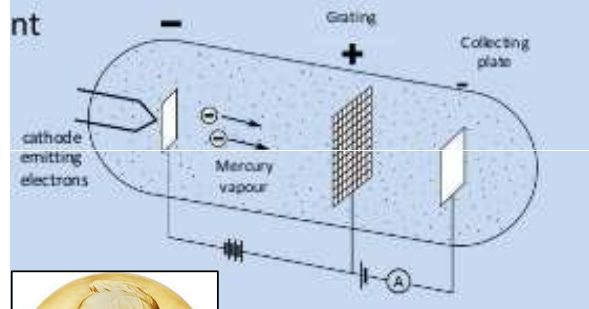
The Franck-Hertz experiment 1914



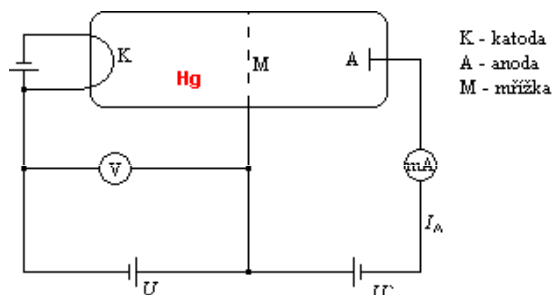
G. Hertz (1887-1975)



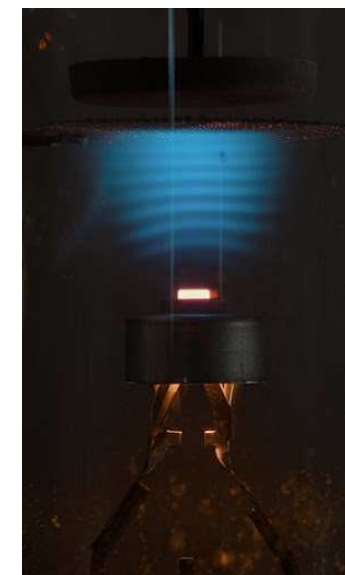
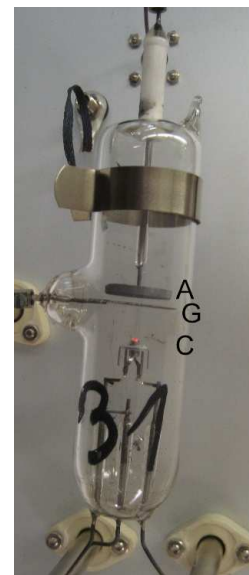
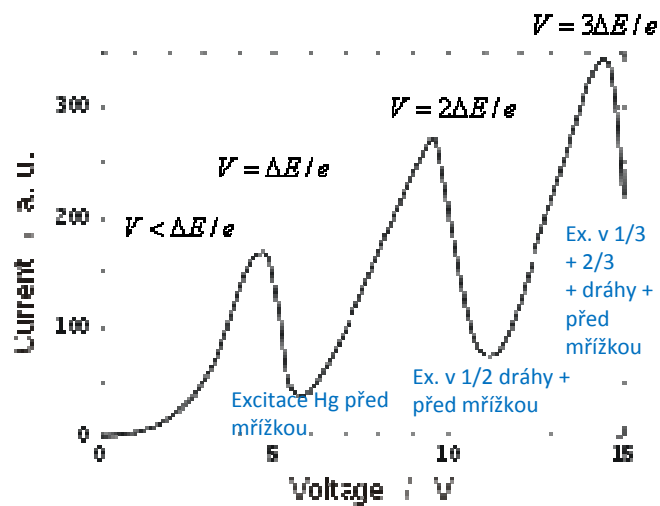
J. Franck (1882-1964)



- Díky ztrátě energie už není schopen překonat brzdné napětí a je zachycen mřížkou; nedoletí tak na anodu → pokles anodového proudu I_A
- Hg atom následně vyzáří přijatou energii ve formě fotonu
- V dokonalém souladu v absorpčním spektru rtuťových par spektroskopicky potvrzena čára o $\lambda=253,6$ nm, (což odpovídá $E_e=4,89$ eV).

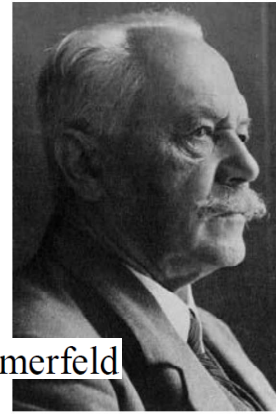


K - katoda
A - anoda
M - mřížka

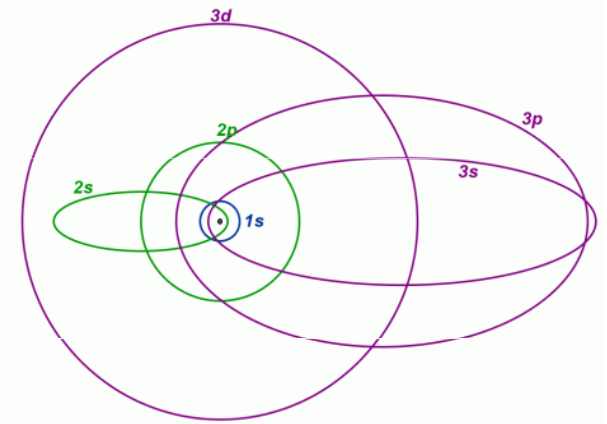


- elektrony jsou urychlovány mezi K a M
- brzdné napětí U' mezi M a A brání elektronům s $E_e < eU'$ doletět na A
- pozorovány velké poklesy anodového proudu I_A pro $U = n \cdot 4.89$ V
 $E_e < 4.89$ eV \Rightarrow srážky elektronů s atomy Hg jsou pružné, elektron doletí k A
 $E_e = 4.89$ eV \Rightarrow tato E odpovídá excitací energii elektronového obalu atomů Hg, e- z katody tudíž předá energii atomu Hg (neelastické srážky) a excituje ho

Sommerfeldův model atomu = zobecnění Bohrova modelu



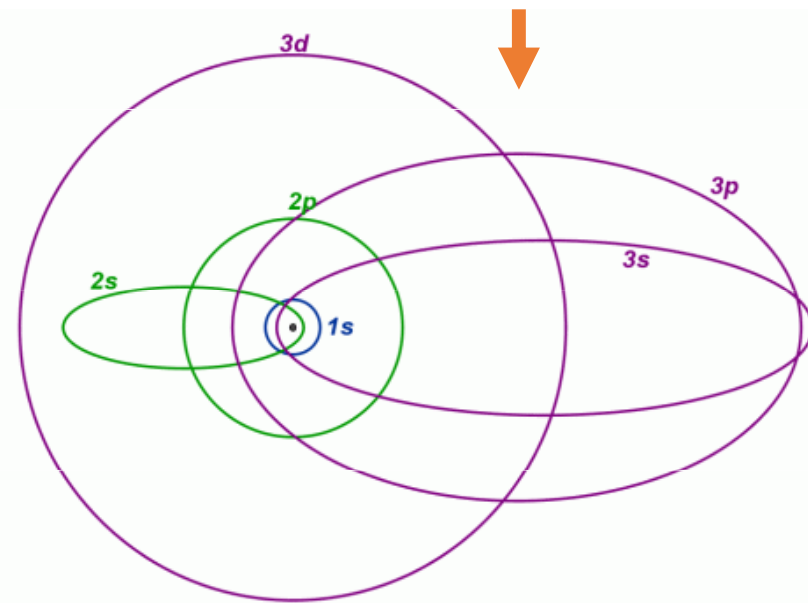
Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld



- Sommerfeld **zobecnil** původní jednoduchou Bohrovu kvantovací podmínku pro moment hybnosti elektronu **pro případ jeho pohybu po libovolné uzavřené dráze**
- Namísto jediné trajektorie e⁻ (kružnice) pro každou energii zavedl Sommerfeld **soustavu elips navzájem se lišících hodnotou vedlejšího kvantového čísla (l)**
- Hlavním kvantovým číslem je určena velká poloosa $a = n^2 r_1$ a vedlejším kvantovým číslem malá poloosa $a' = n(l + 1)r_1$.
- Pokud $n = l + 1$, přechází elipsa v kružnici – vedlejší kvantové číslo proto 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.**

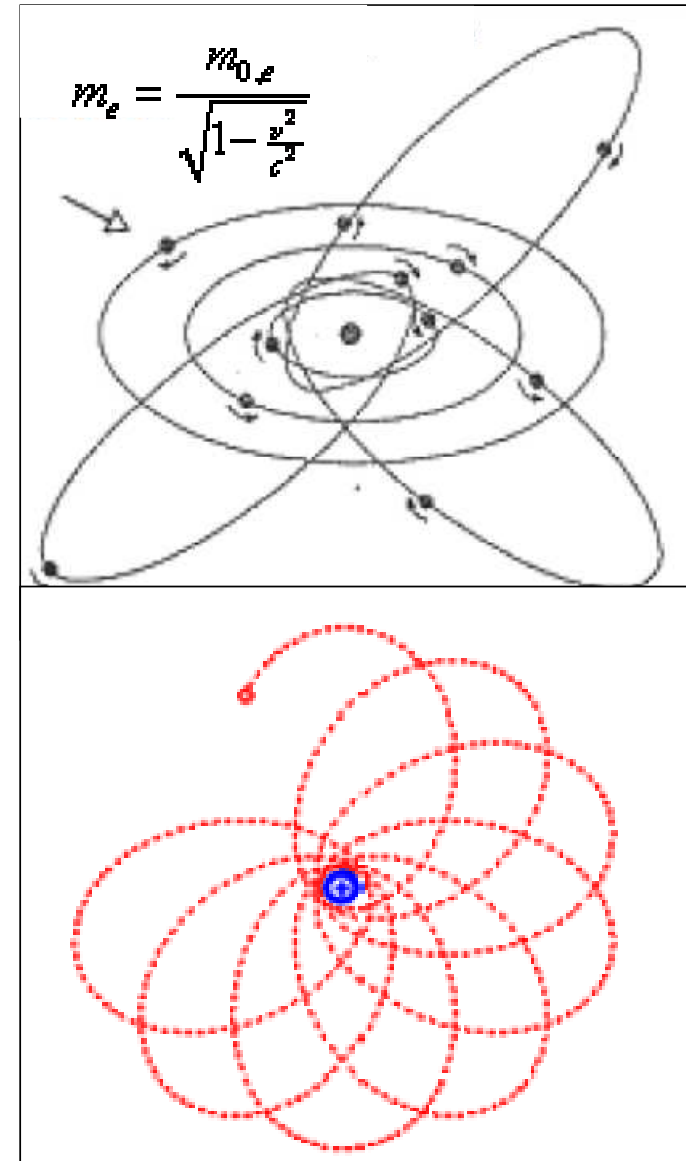
- Pro n existuje n kvantových drah, lišících se l , a tedy i tvarem dráhy e-.
- Dráhy se stejným vedlejším kvantovým číslem se pak označují písmeny podle schématu
- l : 0, 1, 2, 3, ...
písmeno: s, p, d, f, \dots
- každý e- je celkem charakterizován 4 kvantovými čísly
- počet e- se řídí Pauliho vylučovacím principem

	s $l=0$	p $l=1$	d $l=2$	f $l=3$	g $l=4$	h $l=5$
$n=1$	1s					
$n=2$	2s	2p				
$n=3$	3s	3p	3d			
$n=4$	4s	4p	4d	4f		
$n=5$	5s	5p	5d	5f	5g	
$n=6$	6s	6p	6d	6f	6g	6h



Kvantové č.	Název	Možné hodnoty	Význam
n	hlavní	1, 2, 3 ...	pořadí elektronové slupky, energetická hladina
l	vedlejší	0, 1, 2, ..., $n - 1$	tvar orbitalu (kružnice, elipsa)
m	magnetické	0, $\pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$	orientace orbitalu v prostoru
s	spin	$\pm 1/2$	"směr rotace" elektronu

- Zavedení vedlejšího kvantového čísla ale nepostačuje k vysvětlení jemné struktury spektrálních čar:
- Sommerfeld nicméně přihlédl k mění se rychlosti na eliptické dráze – v bodě nejbližším jádru je největší a v bodě nejbližším jádru je nejmenší.
- Protože se elektron po své dráze pohybuje velkou rychlostí blíží se rychlosti světla, tak Sommerfeld ve svém modelu změnil hmotnost elektronu v souladu s teorií relativity. Elektron má tedy největší hmotnost nejbliž u jádra a nejmenší hmotnost nejdál od jádra.
- Vlivem změn hmotnosti elektronu se dráha v nejbližším bodě víc zakřivuje a to vede k **přemístování celé dráhy**, která nabývá tvar růžice.
- Proto se poněkud liší energie elektronu na drahách se stejným hlavním kvantovým číslem a s odlišným vedlejším kvantovým číslem. Rozdíl energií elektronu na jednotlivých drahách vede k rozštěpení spektrálních čar.



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

- Uvedený model **dokázal objasnit jemnou strukturu spekter pouze částečně**, nedokázal např. objasnit dublety (dvojice blízkých čar), které souvisí s existencí spinu elektronu.
- Ukázalo se, že **představa pohybu elektronu s určitou hybností po určité dráze je neudržitelná**.
- Energetické spektrum získané na základě Sommerfeldova modelu zahrnuje z relativistických korekcí pouze relativistickou hmotnostní korekci.

Louis Victor Pierre Raymond vévod de Broglie – revoluční hypotéza



- vysvětlil, proč se elektrony pohybují právě na kvantových drahách
- Roku 1923 prohlásil, nejenže se světelné vlny mohou chovat jako částice, ale **také obráceně, částice se mohou chovat jako vlny**

→ zavedení pojmu **hmotné vlny (vlna místo obíhajícího elektronu)**

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

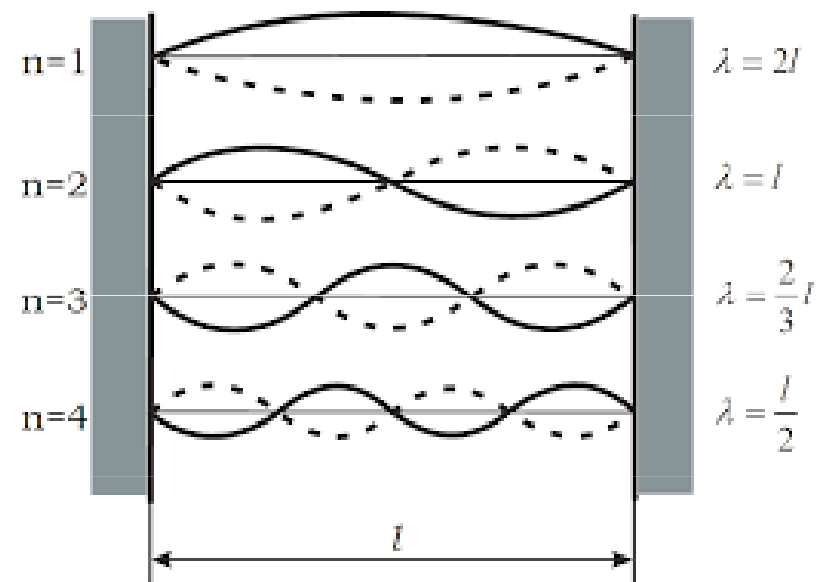
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}, \quad h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

p = hybnost částice, h = Planckova konstanta

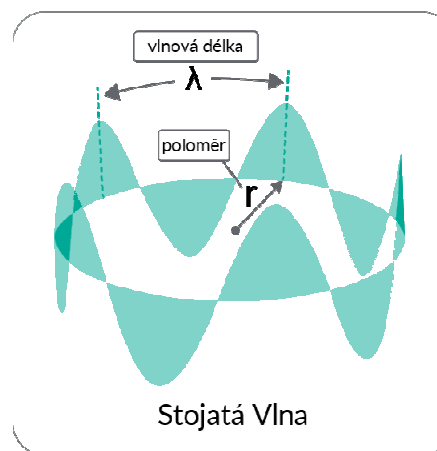
Přítomnost Planckovy konstanty říká, že hmotné vlny jsou kvantové povahy

Stojatá hmotná vlna

- **Vlna má omezený prostor** → je vázána na určité frekvence kmitání
- **nemůže tedy kmitat libovolně**, ale pouze tak, jak je určeno rozměrem a tvarem daného prostoru.
- Vlna příslušného e- v určitém atomu je **poutána elektrickou silou k jádru** a dle de Broglieho je tak omezena na nejbližší okolí kladně nabitého jádra.



n = celé kladné číslo (zde obecně, nejde o kvantové číslo n)

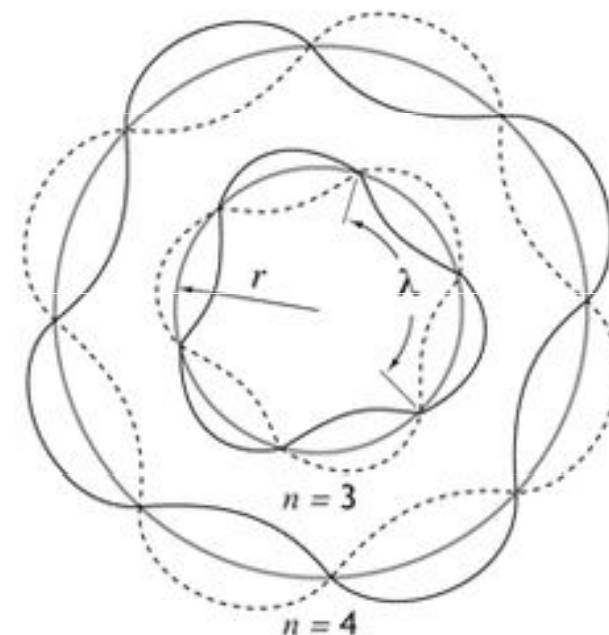


Luis de Broglie

- Aby mohla podle Brogliho hmotná vlna elektronu stabilně „obíhat“ kolem jádra po dráze o poloměru r ,
- musí se na dráhu (obvod) $2\pi r$ vejít **celý počet vlnových délek elektronu**, tj. buď jedna celá vlna λ , nebo 2λ , 3λ atd.
- Pokud by počet vlnových délek nebyl celý, došlo by k interferenci a dráha nebude stabilní.

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

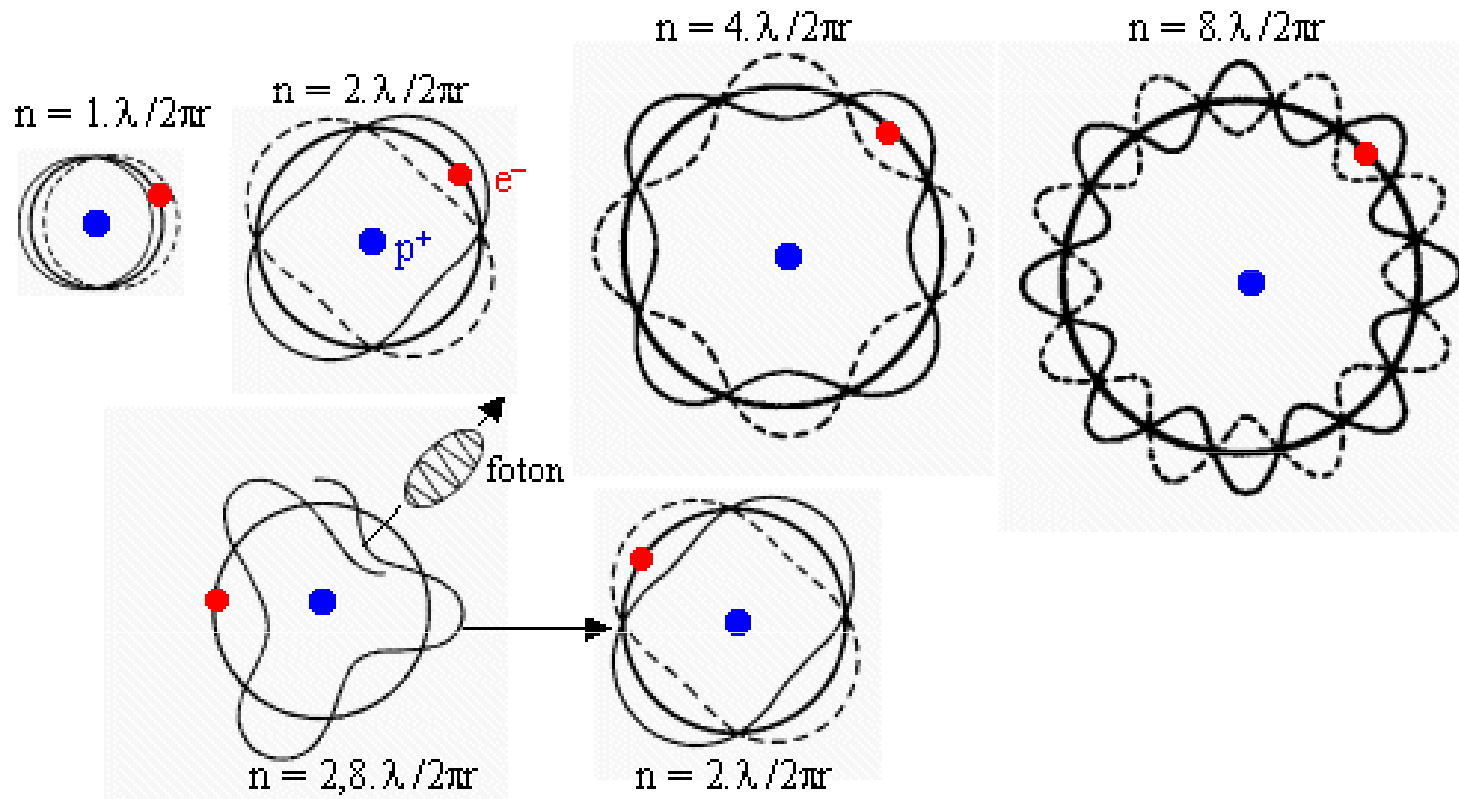
- **n = hlavní kvantové číslo**, určuje nejen pořadí „dovolené“ kvantové dráhy, ale také energii elektronu na této dráze (viz dříve)



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

- λ = wavelength
- h = Planck's constant ($6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
- p = momentum
- m = mass
- v = speed

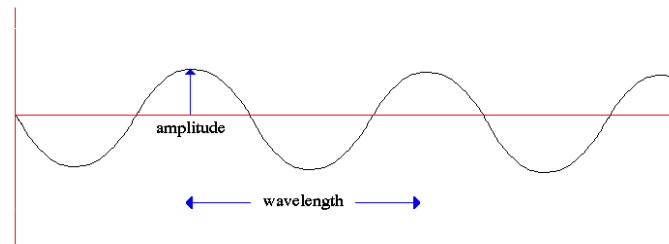
Na dráhu (obvod) $2\pi r$ se musí vejít **celý počet vlnových délek elektronu**, tj. buď jedna celá vlna λ , nebo 2λ , 3λ atd.



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

Luis de Broglie – hmotná vlna

Normální vlna: nemá začátek a konec



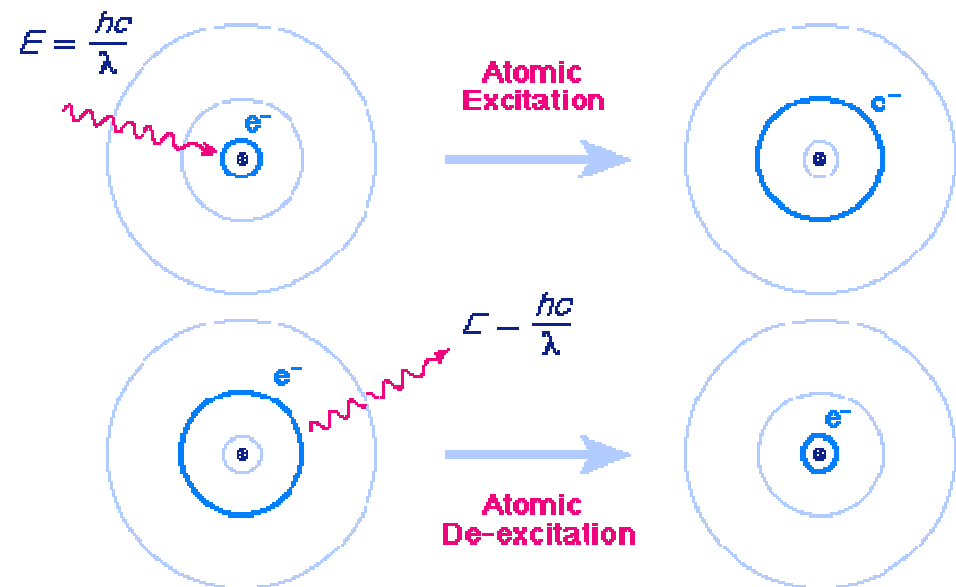
Interakcí různých vln o různé vlnové délce může nicméně vzniknout „wave packet“, viz níže:



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?

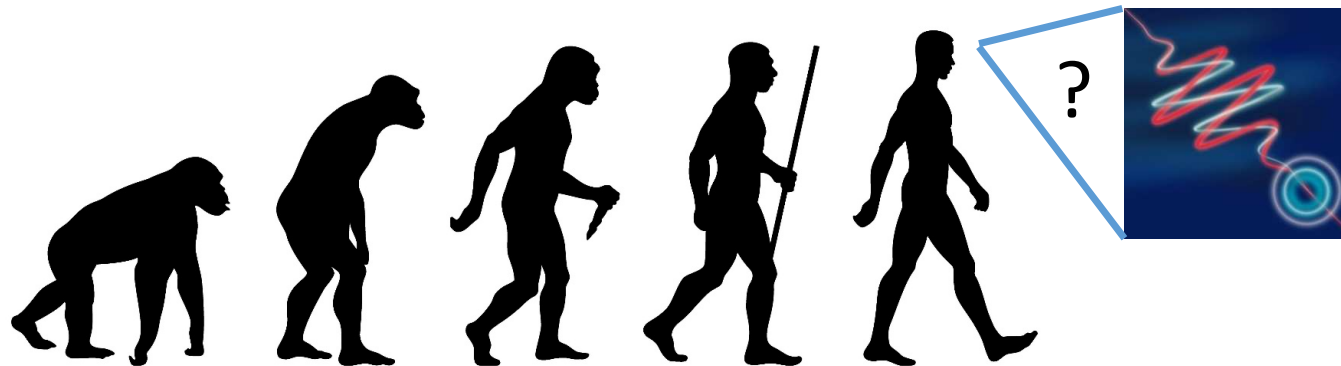
Luis de Broglie – „relativistický planetární“ model atomu

- Obíhá-li e⁻ na nejnižší kvantové dráze → je v základním stavu (nevzbuzeném)
- Přejít na vyšší energetickou dráhu je možný pouze po dodání E:
 - absorpcí 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 (matematicky) popsat
- Kvantové teorii nerozumí vůbec nikdo (Feynmann)



Záhadné vlastnosti mikrosvěta

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

- 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:

$$E = h\nu,$$

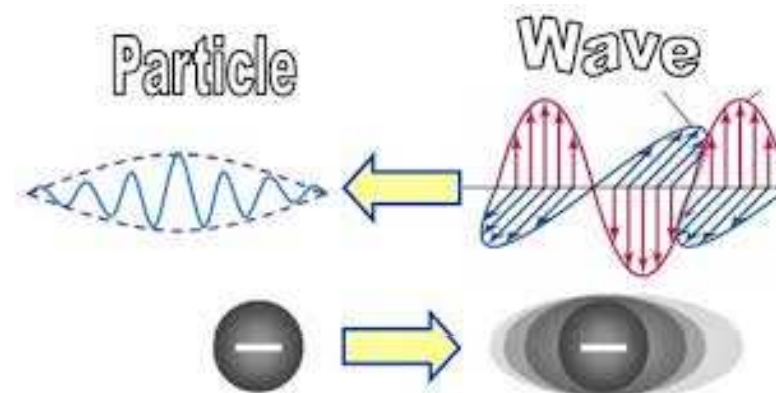
kde ν je frekvence záření a h je Planckova konstanta ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^*$)

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

I. Duální povaha elektronu

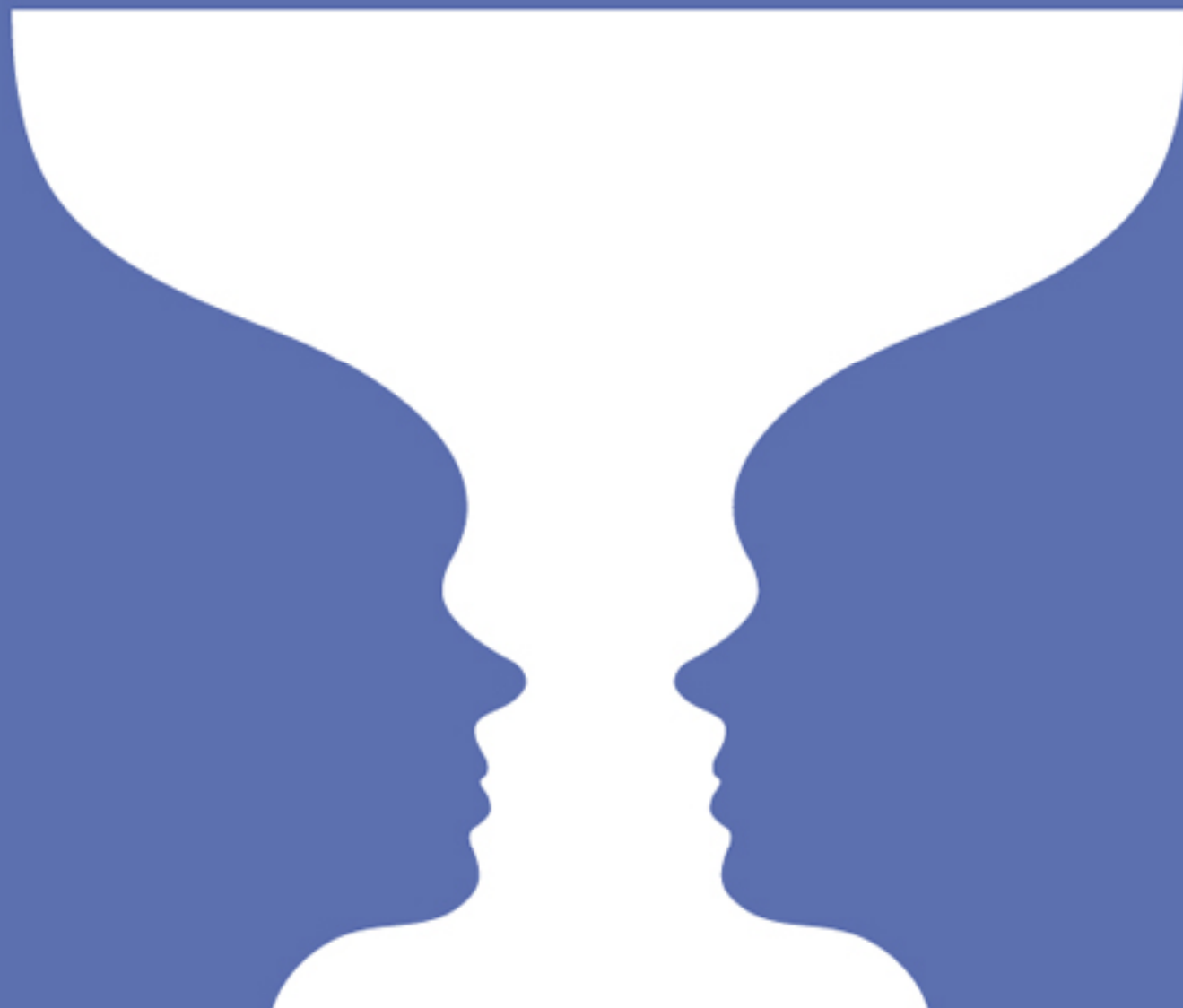
– částicově vlnový dualismus (též → fotoelektrický jev)

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



Dle: Prof. Petr Kulhánek
- MatFyz

Částicově- vlnový dualismus – příklad 1



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: Prof. Petr Kulhánek - MatFyz

Částicově- vlnový dualismus – experimenty

Experiment potvrzující vlnový charakter e-:

Interference proudu elektronů na krystalech,
štěrbínový experiment

https://www.youtube.com/watch?v=JlsPC2BW_UI.

Zajímavý článek + „vědecký“ komiks:

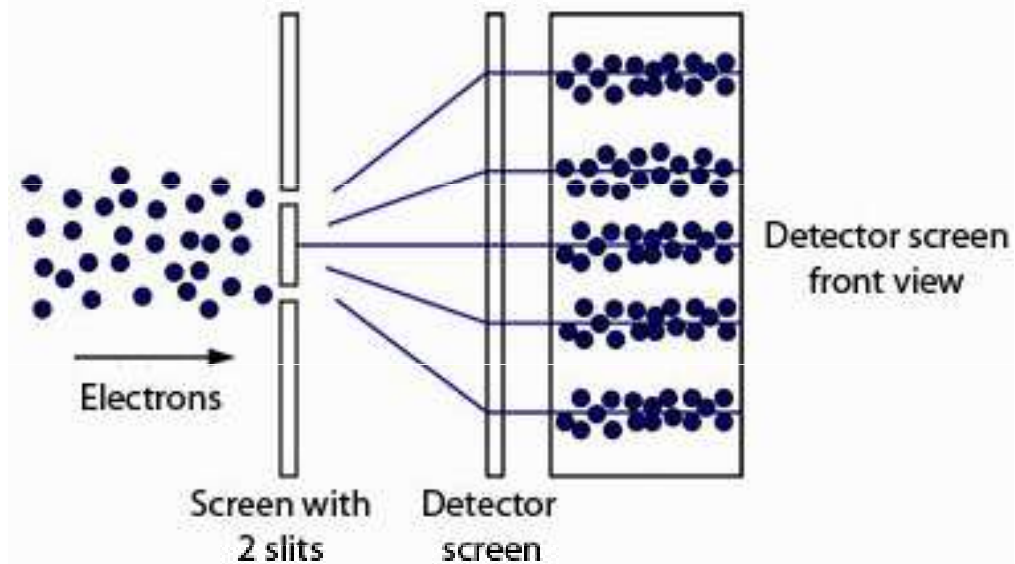
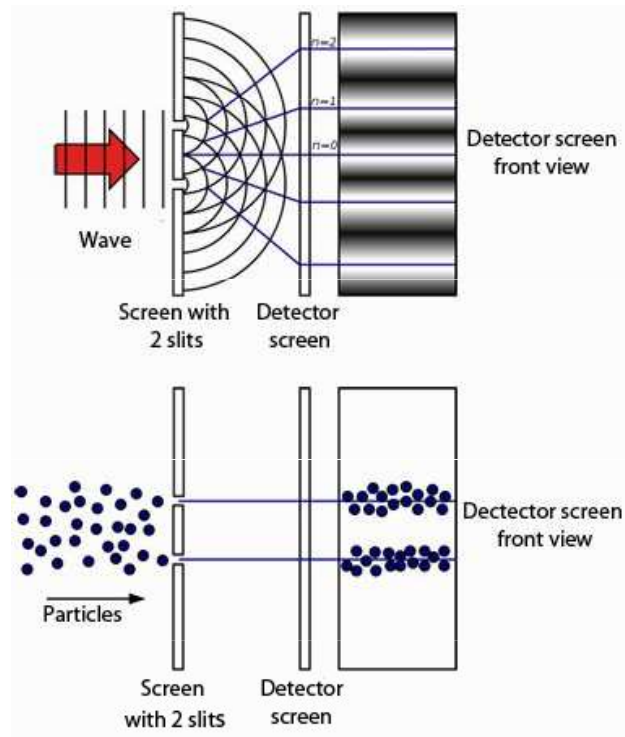
<https://nielsbohr.webnode.cz/zahada-sterbinoveho-experimentu/>

Experiment potvrzující korpuskulární charakter e-:

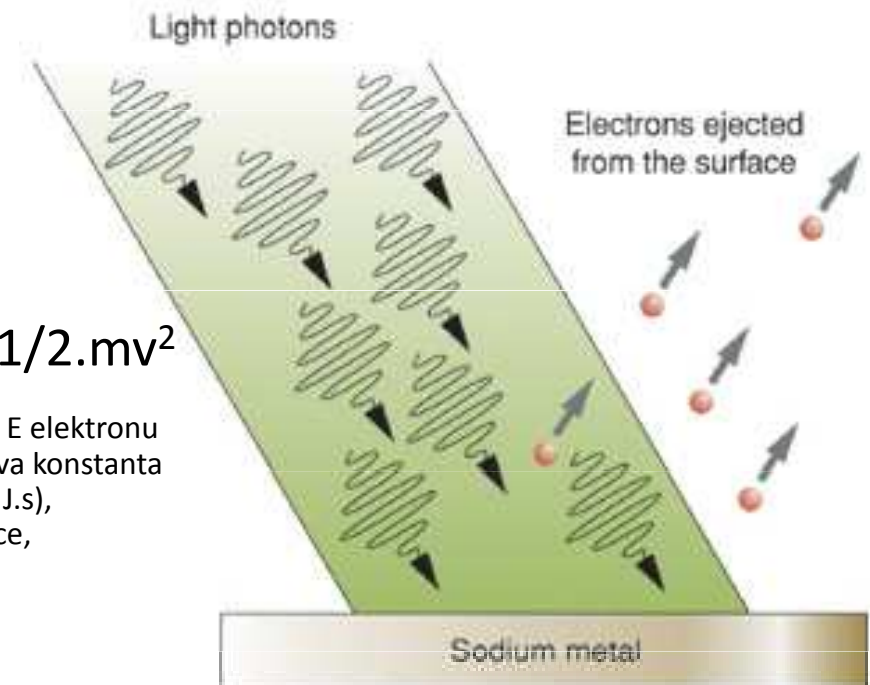
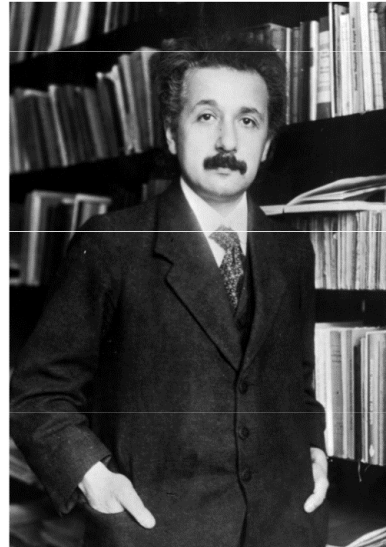
Tok elektromagnetických vln při dopadu na tuhou
podložku předává této podložce měřitelnou hybnost
(pohyb nebo **fotoelektrický jev**).

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

Dvoušterbinový experiment



Fotoefekt



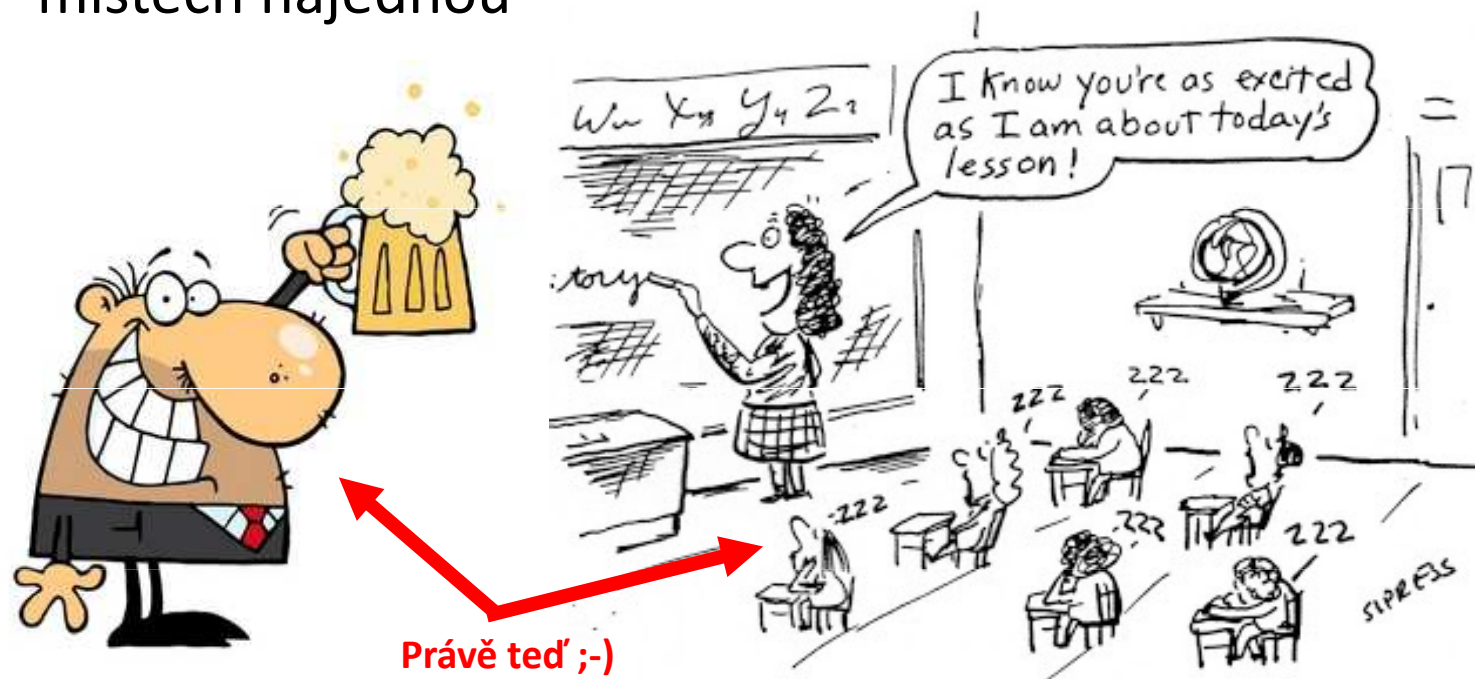
$$h \cdot f = E_v + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

E_v = vazebná E elektronu
 h je Planckova konstanta
(6.62×10^{-34} J.s),
 f je frekvence,

- Dopadající záření uvolňuje z kovu elektrony.
- Pro každý kov existuje **určitá minimální frekvence f_0 dopadajícího světla, od které počínaje dochází k fotoelektrickému jevu** (záření s frekvencí f menší než f_0 není schopno uvolnit elektrony z kovu).
- Kinetická energie vystupujících elektronů **nezávisí na intenzitě dopadajícího světla.**
- Kinetická energie elektronů uvolněných z materiálu **se zvětšuje s rostoucí frekvencí dopadajícího záření.**

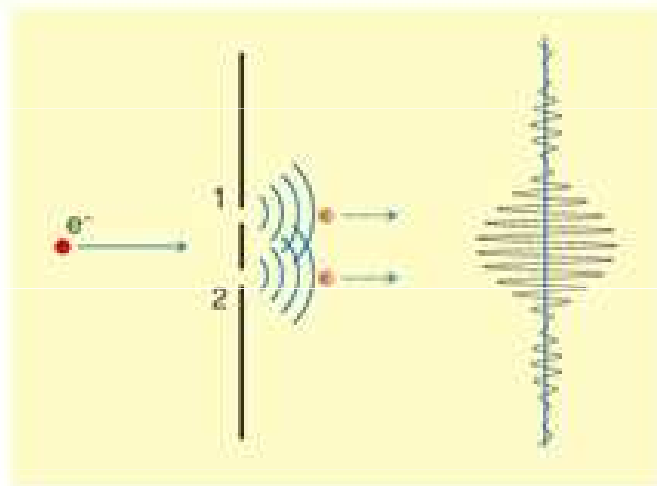
II. SUPERPOZICE STAVU:

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

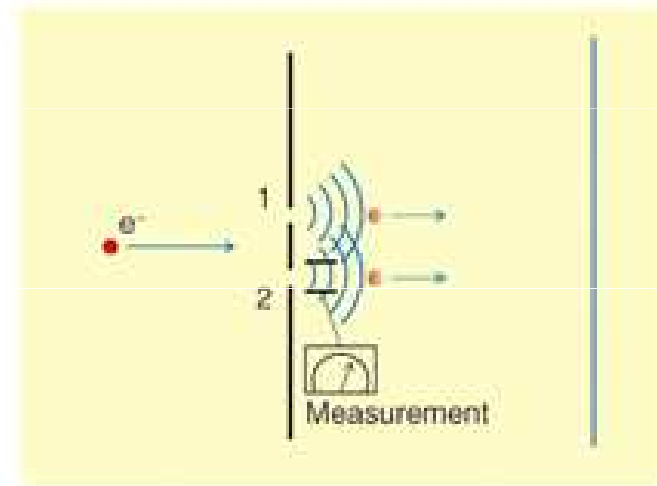


II. SUPERPOZICE STAVŮ

- 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.

Záhadné vlastnosti mikrosvěta

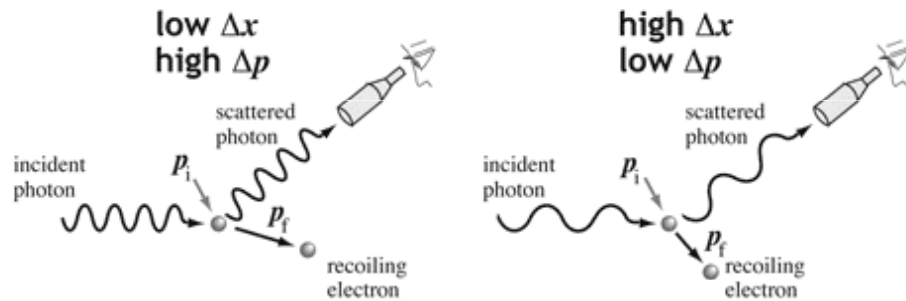
III. Heisenbergův princip neurčitosti



The Heisenberg Uncertainty Principle

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

Δx = uncertainty in position
 Δp = 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.

- *kanonicky sdružené veličiny* [poloha a hybnost atd.] můžeme současně určit pouze s určitou minimální nepřesností.

Více např. zde:

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

- **Velký otvor**, kterým pouštím světlo – prošlo hodně částic, 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 štěrбина totiž vlnu ohne – zpřesnění jednoho měření zneřesní 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.**

The "Measurement Problem"



> A low energy probe (large wave length) wouldn't know find where electron is.



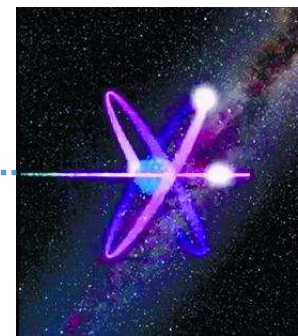
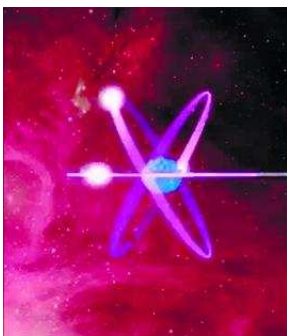
> A high energy probe (short wave length) will move it from where it was.

Způsob interakce (měření)
má zásadní vliv na výsledek



Záhadné vlastnosti mikrosvěta

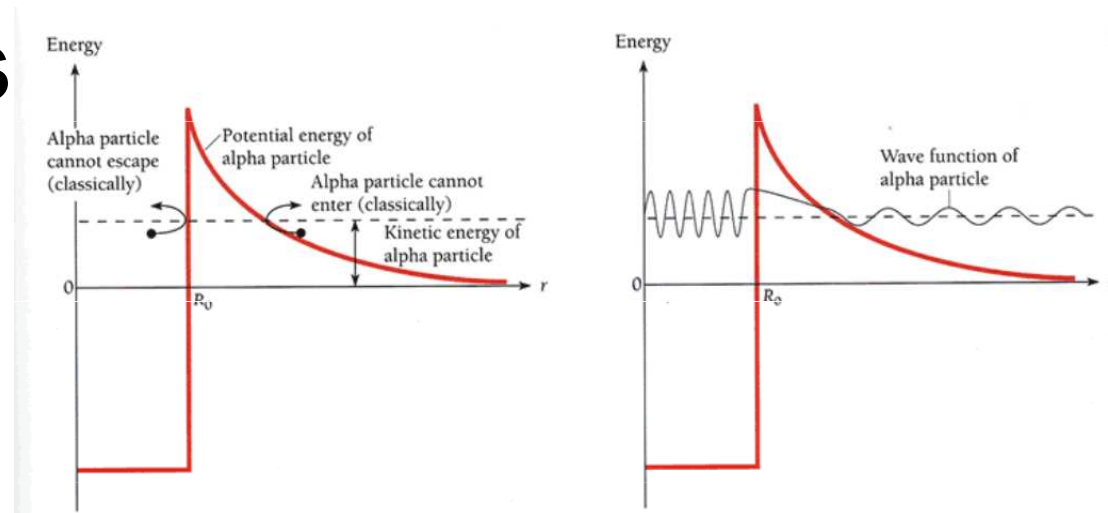
- **VI. Nedeterminismus** kvantové teorie (mikrosvěta) – Experimenty v kv. teorii nejsou opakovatelné → statistika, nelze předpovědět, jak experiment dopadne
- **V. Princip nerozlišitelnosti** – dvě stejné částice nelze rozlišit (označit)
- **VI. Kvantová provázanost** – určením stavu jedné částice je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



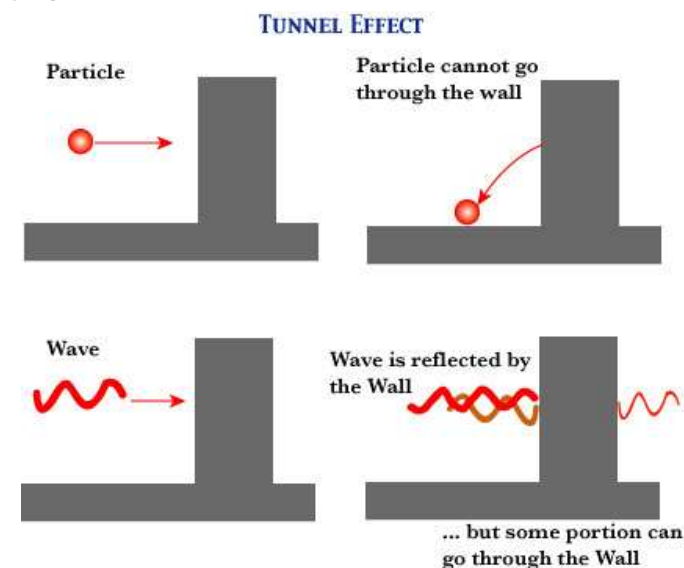
Záhadné vlastnos mikrosvěta

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

you may imagine the wall as the "wall of potential", in that any particle must have an energy, greater than a certain amount, for going through it and appearing on the other side. But even when the particle has a lower energy than that, it can go through the wall, just as a wave can appear on the other side (since its oscillation can go through the wall). Since particles as well as light have particle-wave duality, matter (with an appropriate energy) can go through the wall according to quantum mechanics. This can explain the spontaneous disintegration of radioactive substances (such as radium); even though the strong interaction within the nucleus forms a high wall of potential, alpha-disintegration can occur because of the tunnel effect.



Emise alfa částic

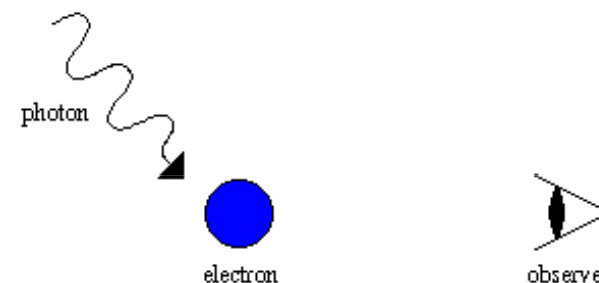


MĚŘENÍ SE STÁVÁ SOUČÁSTÍ VÝSLEDKU

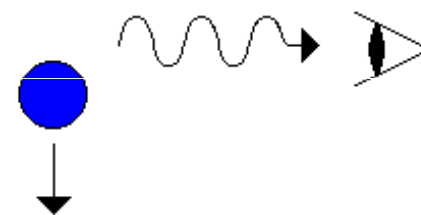
- Asi nejpodivnější: Sami se stáváme součástí experimentu
- Měříme-li stůl, měření mu neublíží. Musí na něj ale dopadat fotony, abychom ho mohli změřit – alespoň jeden foton se od stolu musí odrazit, aby bylo možné zjistit jeho polohu
- V mikrosvětě ale foton měřenému systému ublíží
- **Akt měření objekt 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

before observation



after observation

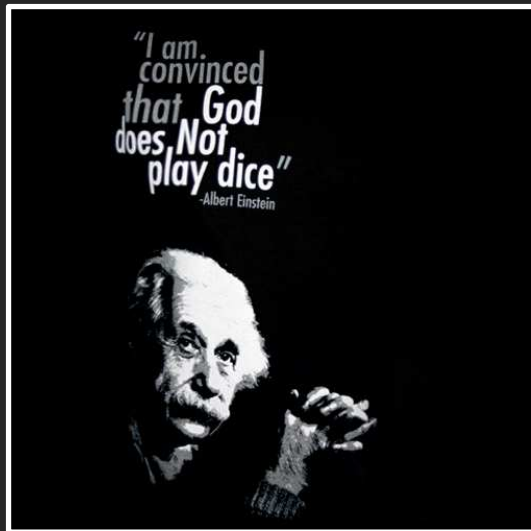


the act of observing effects the position and energy of electron

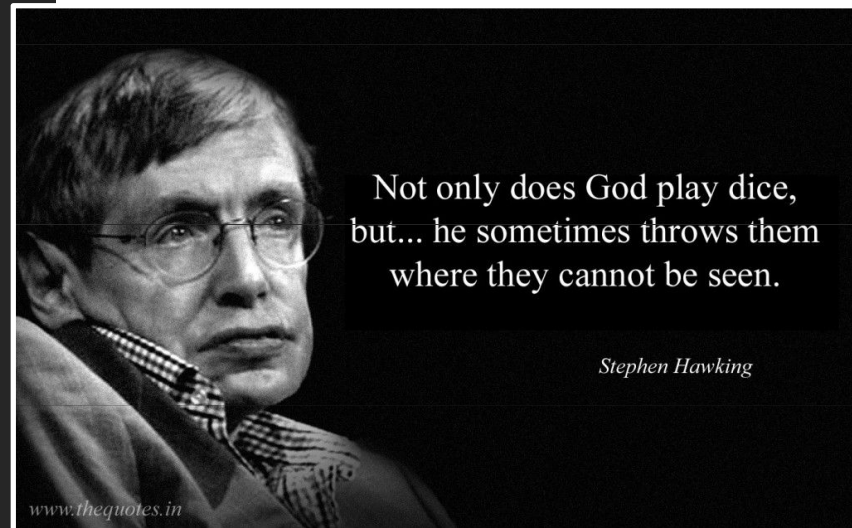
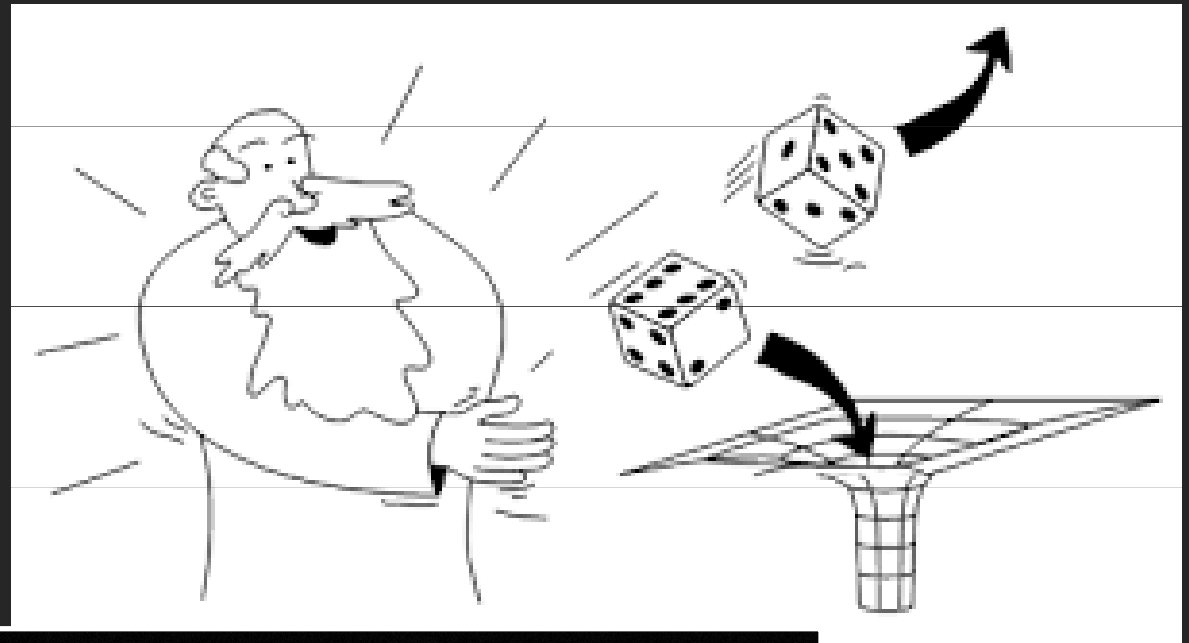
MĚŘENÍ SE STÁVÁ SOUČÁSTÍ VÝSLEDKU

- 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**



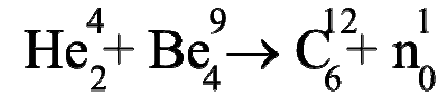


versus



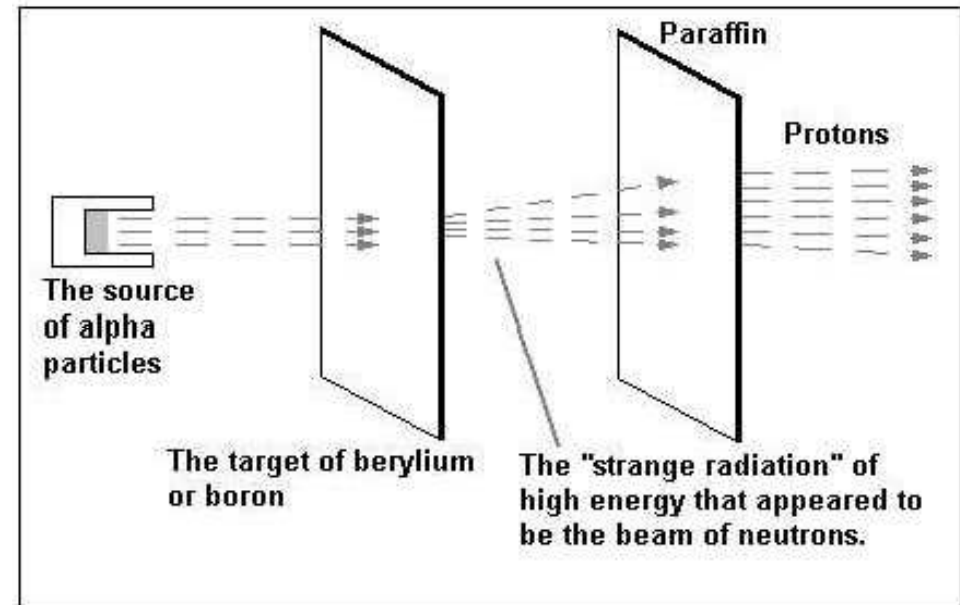
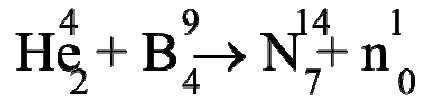
Objev neutronu

- V roce 1930 bombardovali **Walter Bothe** a **H. Becker** berylium ${}^9_4\text{Be}$ částicemi $\alpha \rightarrow$ pozorovali emisi energetického záření, které se nezahýbalo v magnetickém poli.



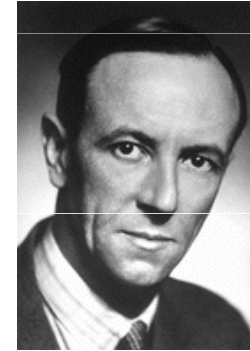
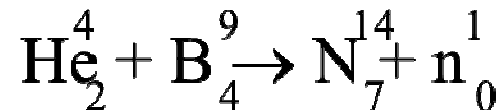
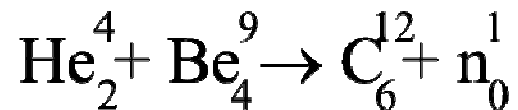
- Zprvu se domnívali, že se jedné o záření γ .
- Později manželé **Iréne a Fréderick Joliot Curieovi** zjistili, že toto záření vyráží protony z parafínu.

- **Chadwick** pochopil, že probíhají reakce (níže).
- Hmotnost neutronu určil ze znalosti hmotností ${}^{11}_5\text{B}$ a ${}^{14}_7\text{N}$.



Objev neutronu

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



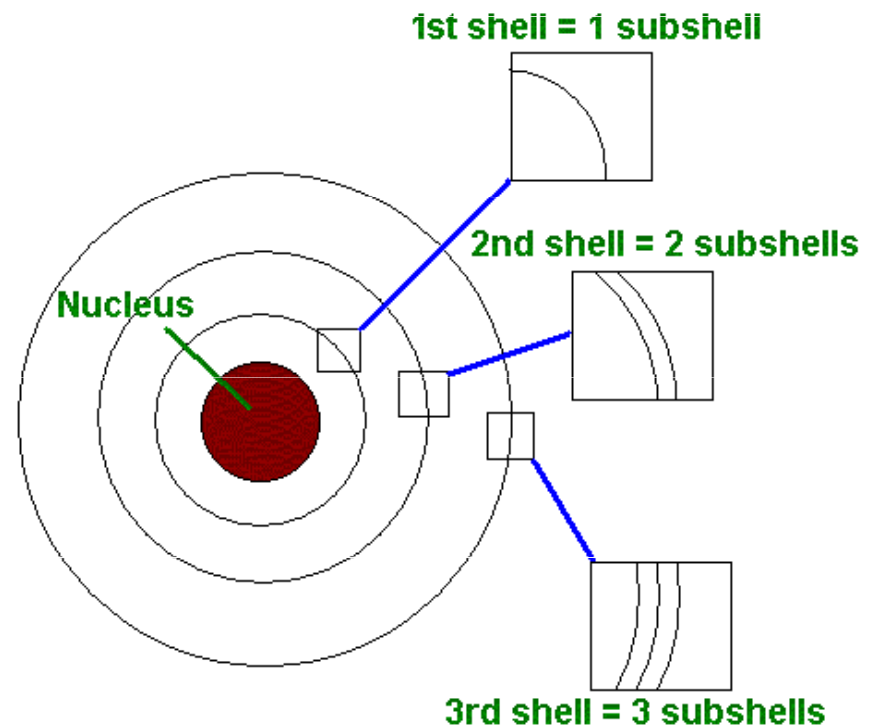
James Chadwick



Hans Falkenhagen

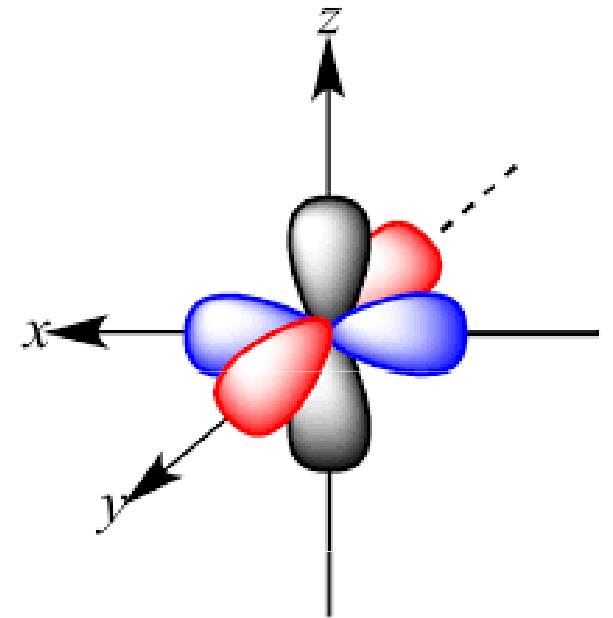
Kvantově mechanický model atomu

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



Kvantově mechanický model atomu

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



Různé přístupy k témuž...



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



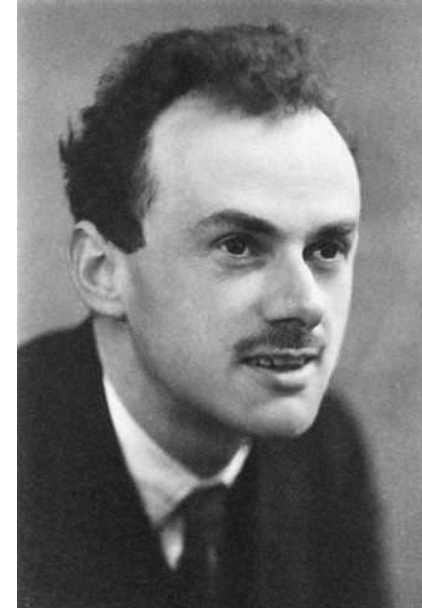
WERNER HEISENBERG
(1901-1976) German
theoretical physicist

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?

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

Schrodingerova rovnice

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

The Equations That Changed
The World - 06

Schrödinger Equation

Fundamental Equation of Quantum Mechanics



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

Diagram explaining the components of the Schrödinger Equation:

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

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

Shrnutí

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

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

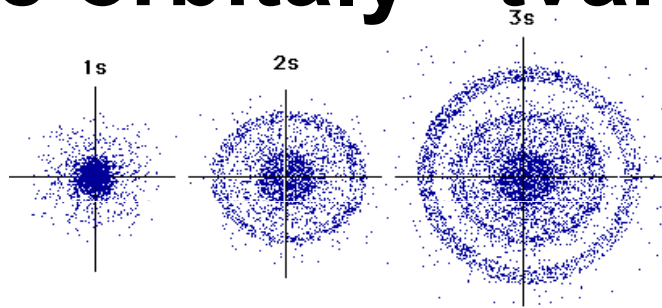
Atomové orbitaly

- obsazování - příklad

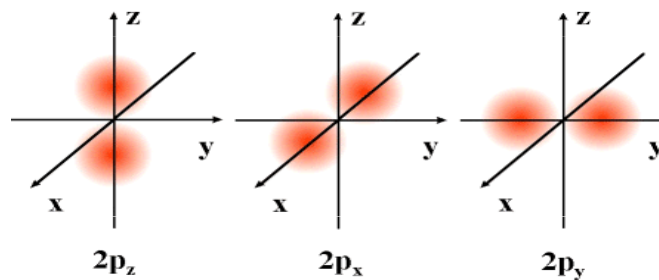
Kvantová čísla			Symbol AO	Obsazení elny	Symbol zaplněných AO	Vrstva
n	l	m _l				
1	0	0	1s	2	1s ²	K
2	0	0	2s	2	2s ²	
2	1	-1	2p	6	2p ⁶	L
2	1	0				
2	1	1				
3	0	0	3s	2	3s ²	M
3	1	-1	3p	6	3p ⁶	
3	1	0	3p			
3	1	1	3p			
3	2	-2	3d	10	3d ¹⁰	
3	2	-1	3d			
3	2	0	3d			
3	2	1	3d			
3	2	2	3d			

Atomové orbitály - tvar

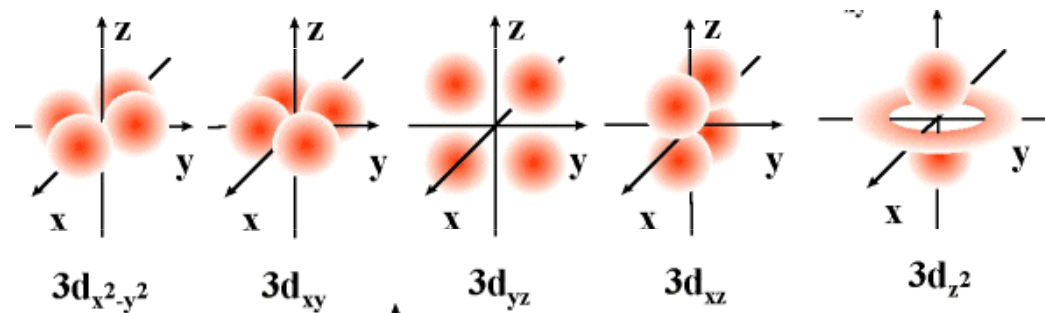
Orbitály s:



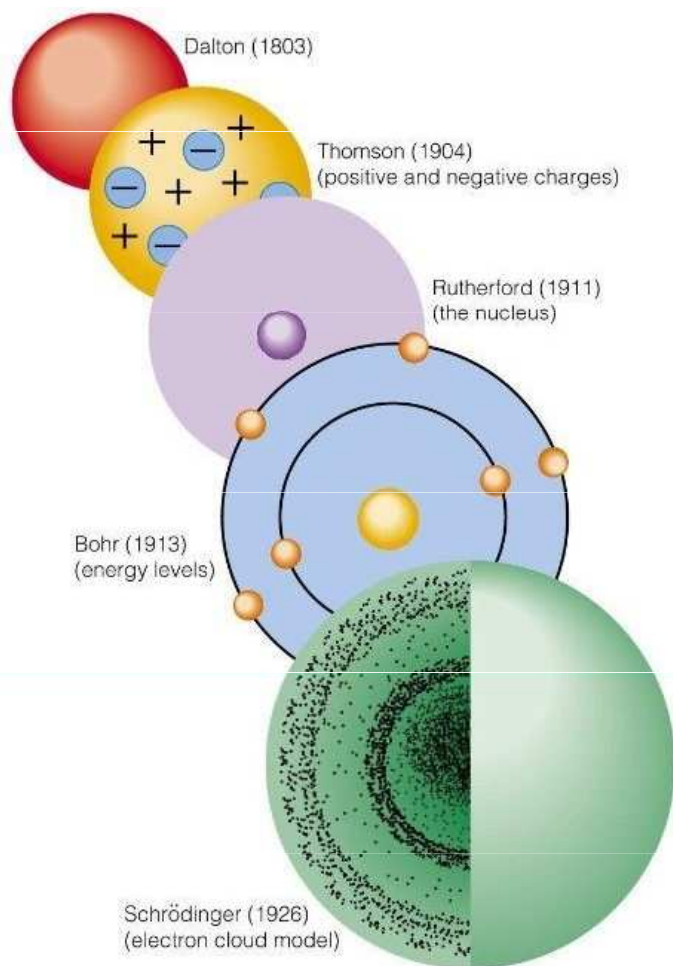
Orbitály p:



Orbitály d:



MODELY - přehled



Dalton, 1808

First to describe atoms in a modern, scientific sense

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



Thomson, 1897

Thomson's Plum Pudding Model

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

+ Protons & electrons

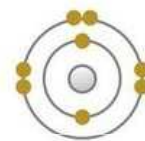


Rutherford, 1911

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

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

+ the Nucleus



Bohr, 1913

Basis for our modern atomic model

- Doesn't explain quantum mechanics

+ Electron Shells



Schrödinger, 1926

Quantum mechanics

- Why are some atoms of the same element heavier?

+ Subshells + 'Shells' are actually 'orbitals'



Chadwick, 1932

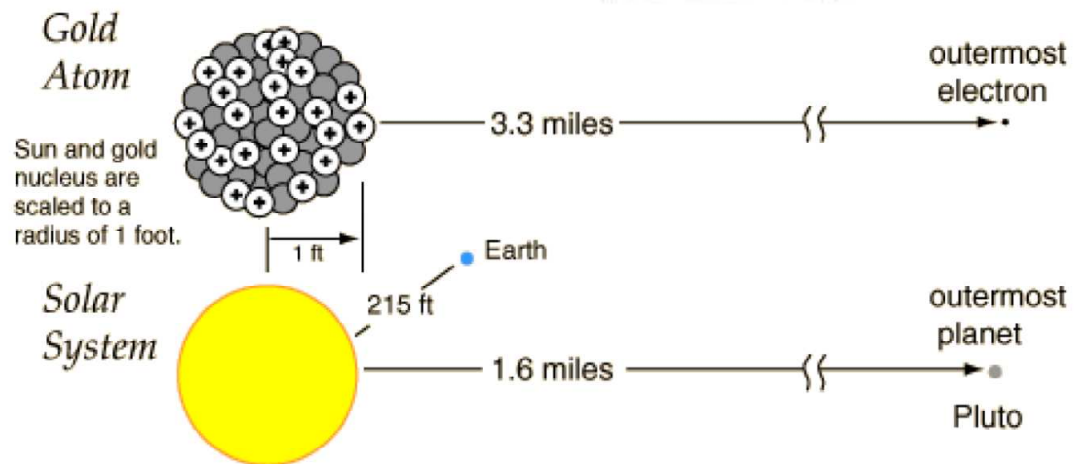
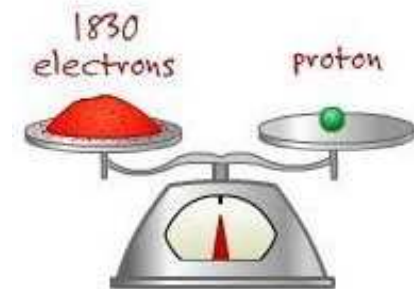
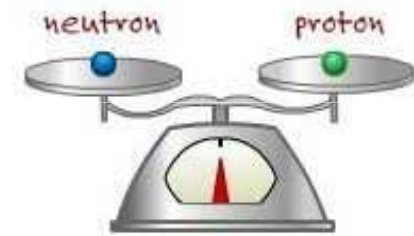
+ Neutrons!

VCEasy
VISUAL
CHEMISTRY
1.1.2a

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

• Jádro 99.9% hmotnosti atomu

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



Elementární (?) částice

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

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

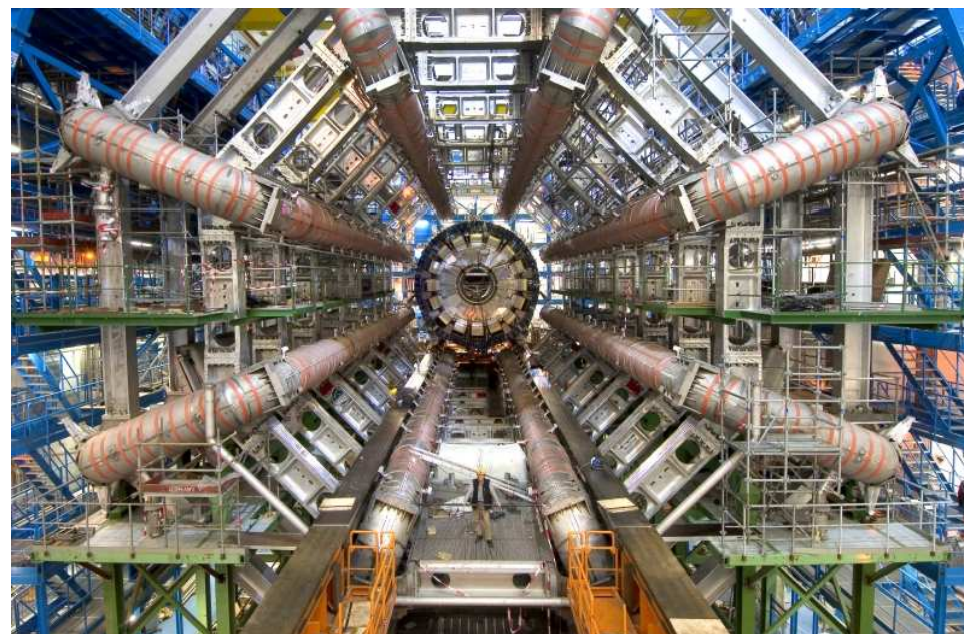
e - elementární náboj 0,000 000 000 000 000 000 160 2 C ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C)

u - atomová hmotnostní jednotka

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

ZOO ELEMENTÁRNÍCH ČÁSTIC

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



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**

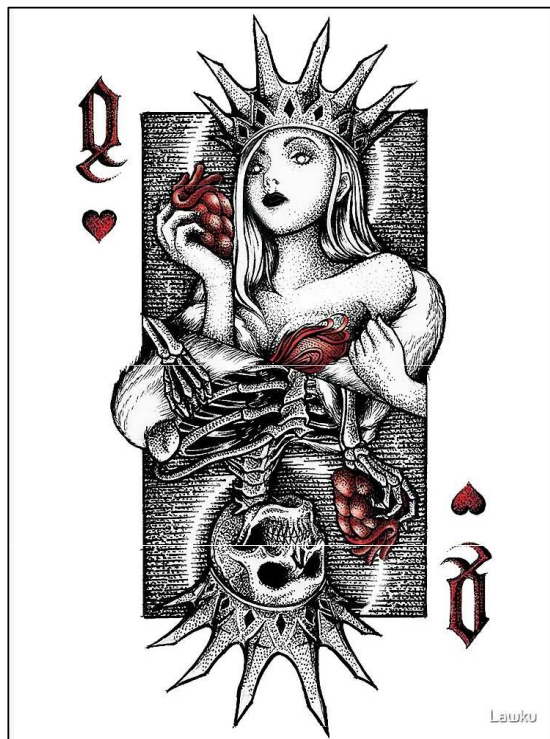


SPIN

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



180° = spin 2



360° = spin 1

- Částice s nulovým spinem se nám jeví ze všech stran stejná
- Částice se **spinem 1** se při otáčení jeví různě, a aby znova dosáhla počátečního vzhledu, musí se kolem osy otočit o **360°**
- Částice **se spinem 2** dosáhne původního vzhledu již po otočení o **180°**

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

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)

Klasifikace subnukleárních částic

Podle spinu:

fermiony pololočíslné spinové kvantové číslo

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

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

Podle klidové hmotnosti:

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

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

poločíslné spinové číslo $1/2$

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

Př. pion, kaon

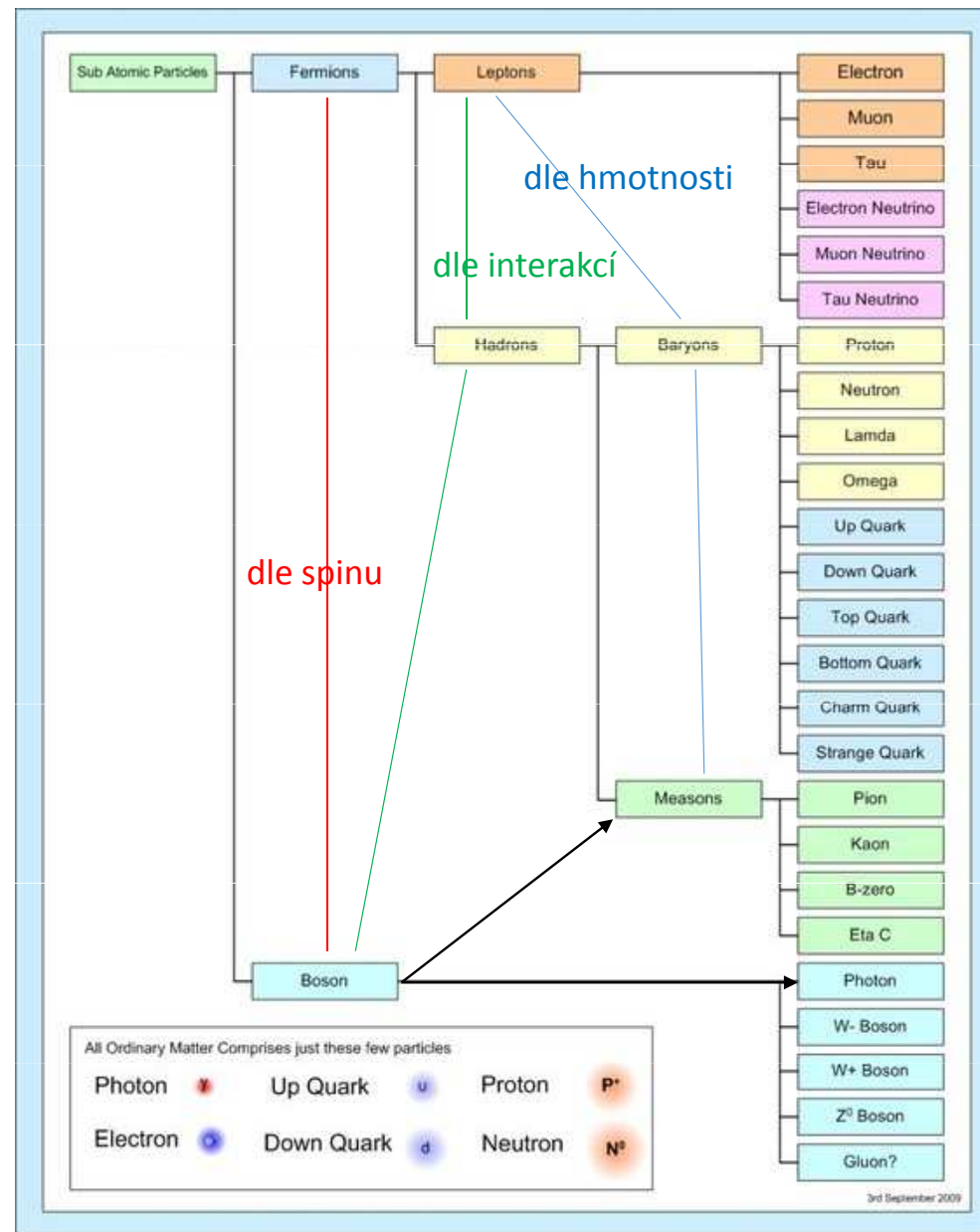
celočíselné spinové číslo 0 nebo 1

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

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

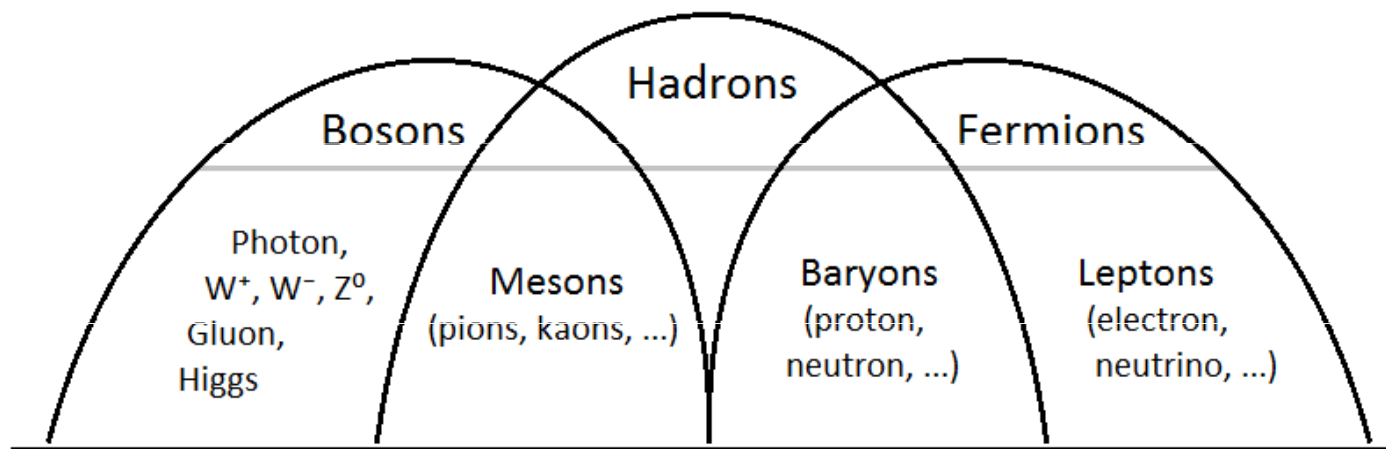
účastní se tzv.
silné interakce,
tzv. hadrony

Systematika elementárních částic



Systematika elementárních částic

-další kritéria



Částice hmoty

Fermiony (spin 1/2)

Kvarky

Leptony

První rodina	d	u	e⁻	ν_e
Druhá rodina	s	c	μ⁻	ν_μ
Třetí rodina	b	t	τ⁻	ν_τ

Částice interakcí

Bosony (celočíslný spin)

Silná interakce:



Elektromagnetická interakce:



Slabá interakce:



Higgsovo pole:



Tyto částice se rozdělují do 3 rodin:

up	down	← Quarks
e	ν _e	← Leptons
charm	strange	
m	ν _m	
top	bottom	
t	ν _t	

Podle současných poznatků:

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

LEPTONY

LEPTONY

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



LEPTONY

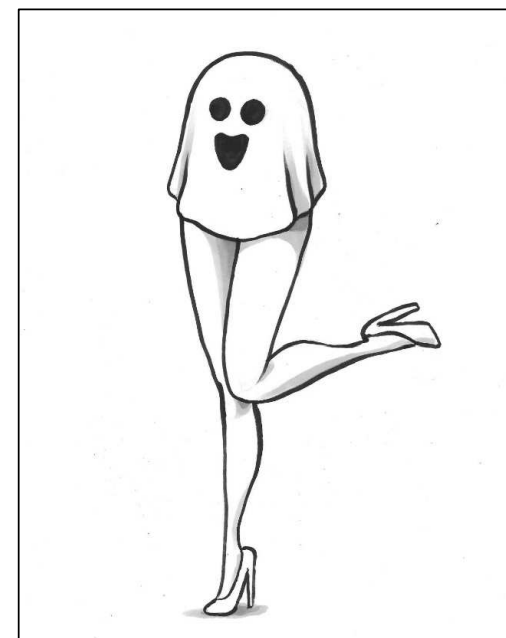
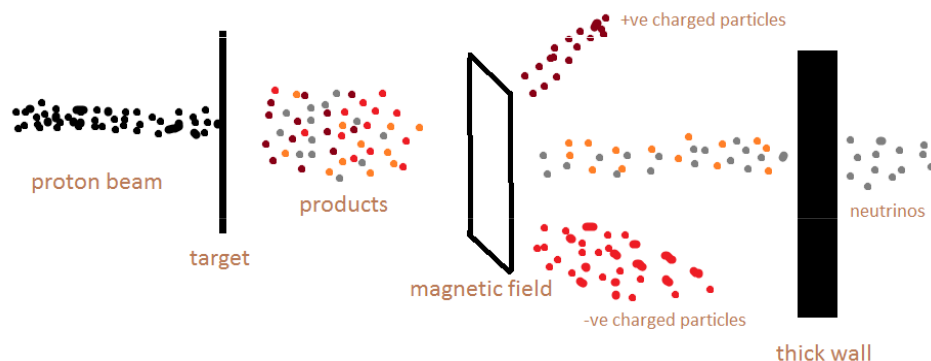
- Elektrony v atomovém obalu **nevykazují** při současných experimentech **vnitřní strukturu** (přesto je elektron součástí širší skupiny částic, kterým říkáme leptony, viz dříve).
- Všechny leptony mají i v nejvytříbenějších experimentech **bodovou strukturu až do 10^{-18} m** (tzn. nemají vnitřní strukturu).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



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



65 000 000 neutrin plochou nehtu každou sekundu (ze Slunce)

V běžné jaderné elektrárně vzniká každou sekundu přes 50 000 neutrin



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

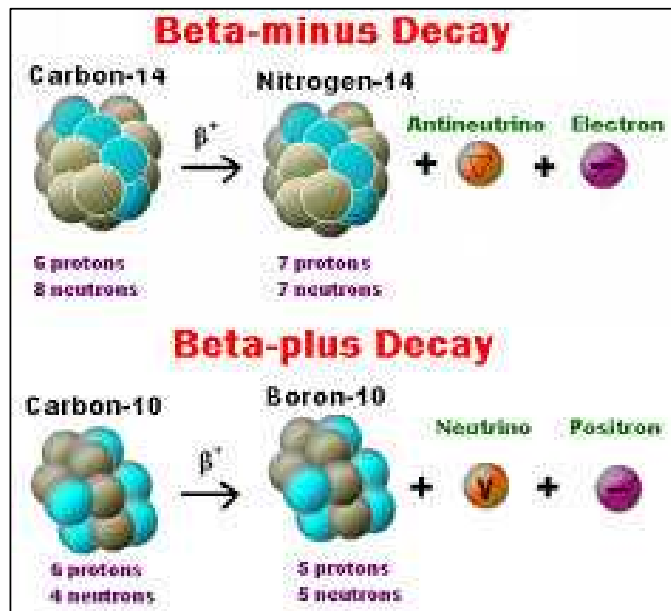
Learn Something New Every Day
LSNED.com



LEPTONY – NEUTRINA

Spolu s fotony nejhojnější částice ve vesmíru

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



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

ZÁHADA: spektra vyzařovaných beta-částic jsou **spojitá** s určitou **maximální energií**.

Vysvětlení: Energie rozpadu se rozdělí náhodně mezi **elektron a antineutrino** nebo mezi **pozitron a neutrino**.

zdroje neutrin

velký třesk

SN1987

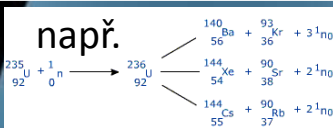
20 v's

Slunce

atmosferická neutrina

lidské tělo

jaderné reaktory



pozemská radioaktivita

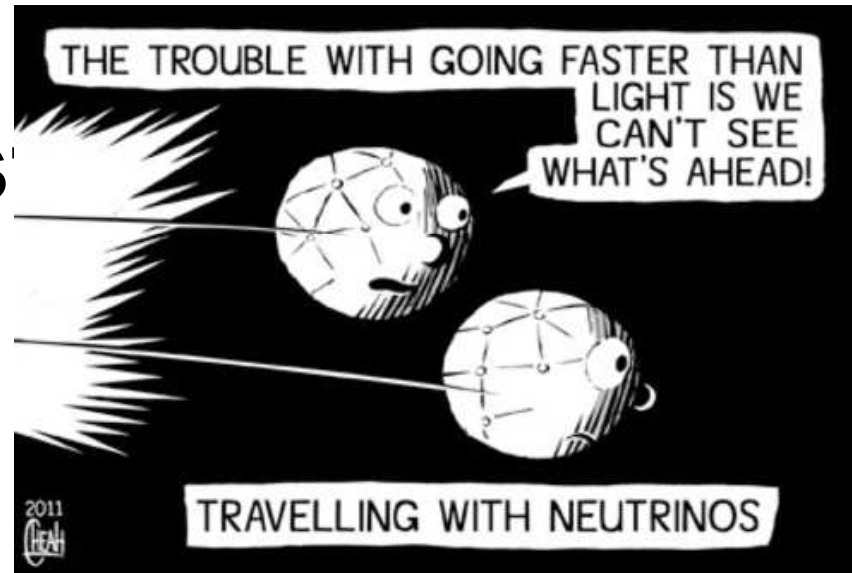
urychlovače

E_ν 0.3 – 30 GeV



1.4.2015

Zajímavosť



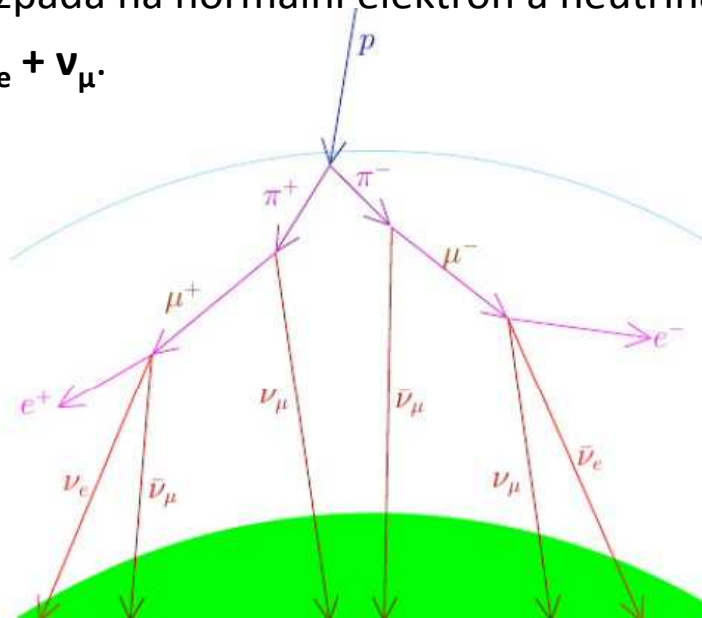
- V roce 2011 se zdálo, že neutrína létají z komplexu CERN do Gran Sasso nadsvětelnou rychlostí – na vině byl povytažený konektor optického vlákna (u experimentu Opera), které zajišťovalo komunikaci mezi podzemní a nadzemní částí laboratoře.

LEPTONY – ELEKTRONY

- **Elektron je první objevenou elementární částicí.** Nalezl ho anglický fyzik **John Joseph Thomson** (1856–1940) v roce 1897 v katodovém záření.
- Elektron hraje nesmírně důležitou roli v atomární látce. Rozdílné chování různých atomů je způsobeno rozdílnou konfigurací elektronových obalů.
- 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

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



- 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 cm² za minutu**. Tyto miony pocházejí ze sekundárních spršek kosmického záření.

TAUONY (Lepton τ): nestabilní částice s dobou života 0,3 ps. Rozpadá se na své lehčí dvojníky (e- nebo mion) a neutrino.

LEPTONY

Těžké
elektrony

Na rozdíl od e^-
jsou těžší a
nestálé

W = slabá

E = elektromagnetická

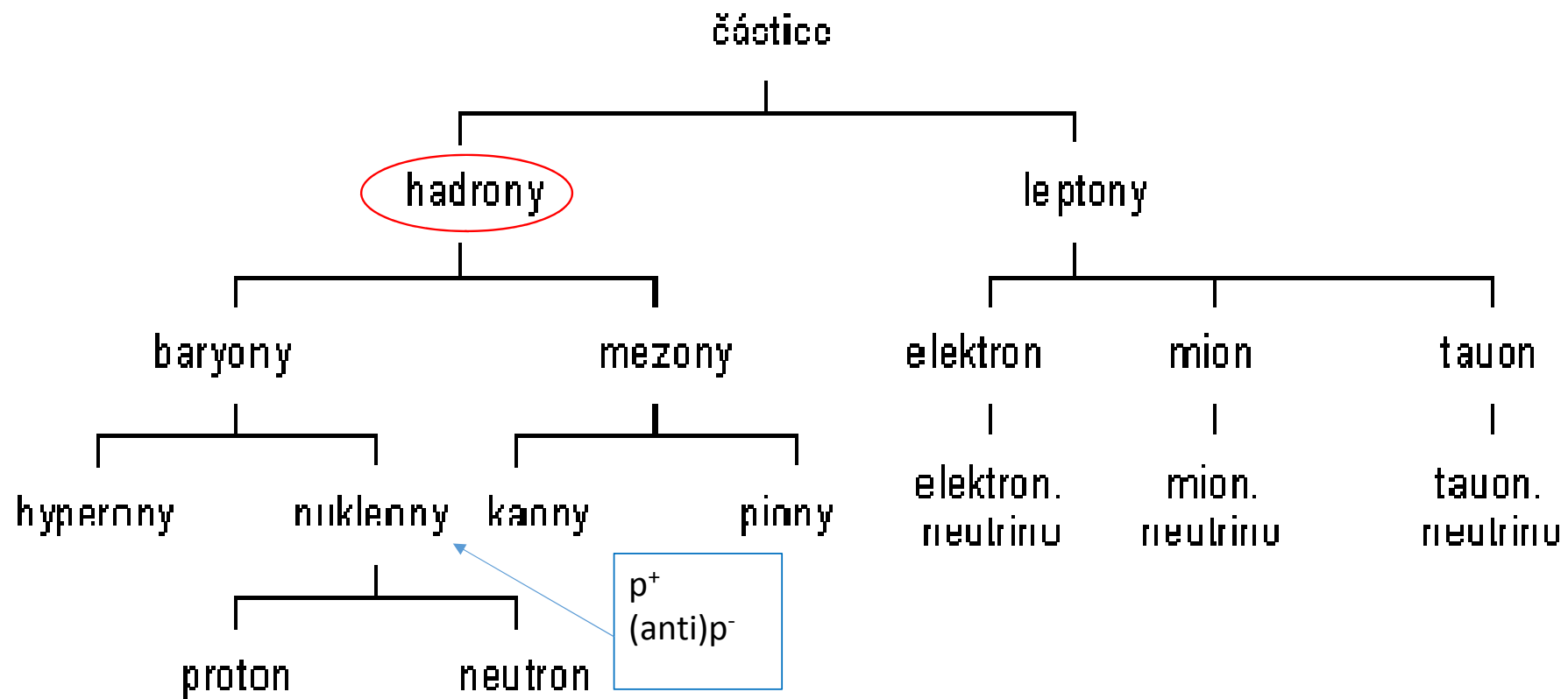
S = silná

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

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

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

HADRONY
(a KVARKY)



HADRONY (složené částice)

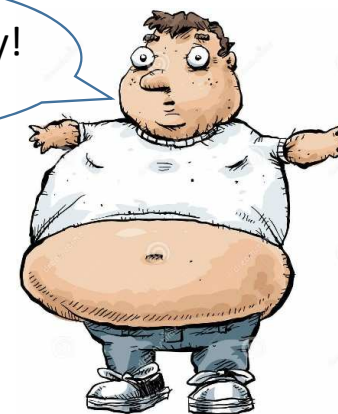
- řec. *hadros* = silný, bujarý →
- podléhají **silné interakci**
- Dnes již **nejsou považovány za (fundamentální) elementární částice**, nicméně jejich komponenty se vyskytují pouze vázané v hadronech (nikdy ne volně)
- **S výjimkou protonu a antiprotonu jsou nestabilní** ($10^{-28} - 10^{-8}$ s) → rozpad na lehčí hadrony, případně až leptony.
- Výjimkou je rozpad $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$, 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) p^+ a (lehkým) e^-**
- spin nejčastěji 0, vzácněji celočíselný (→ bosony)
- **BARYONY** – řec. *barys* = těžké částice, mají hmotnost $\geq p^+$
- spin poločíselný $\frac{1}{2}$ nebo $\frac{3}{2}$



Baryony

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

Škvarky! Škvarky!
Škvarky!



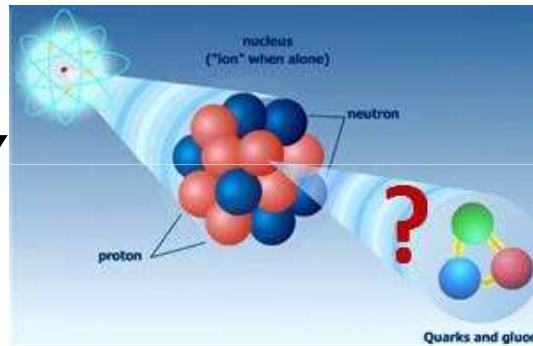
BARYONY

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

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

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

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** a Murray **Gell-Mann** (1964) – **Nc1964**
- **Nejprve šlo jen o matematický model.** Experimentální podpora : 1967. Poslední z předpovězených kvarků byl **experimentálně potvrzen v roce 1994.**

Three quarks for Muster Mark

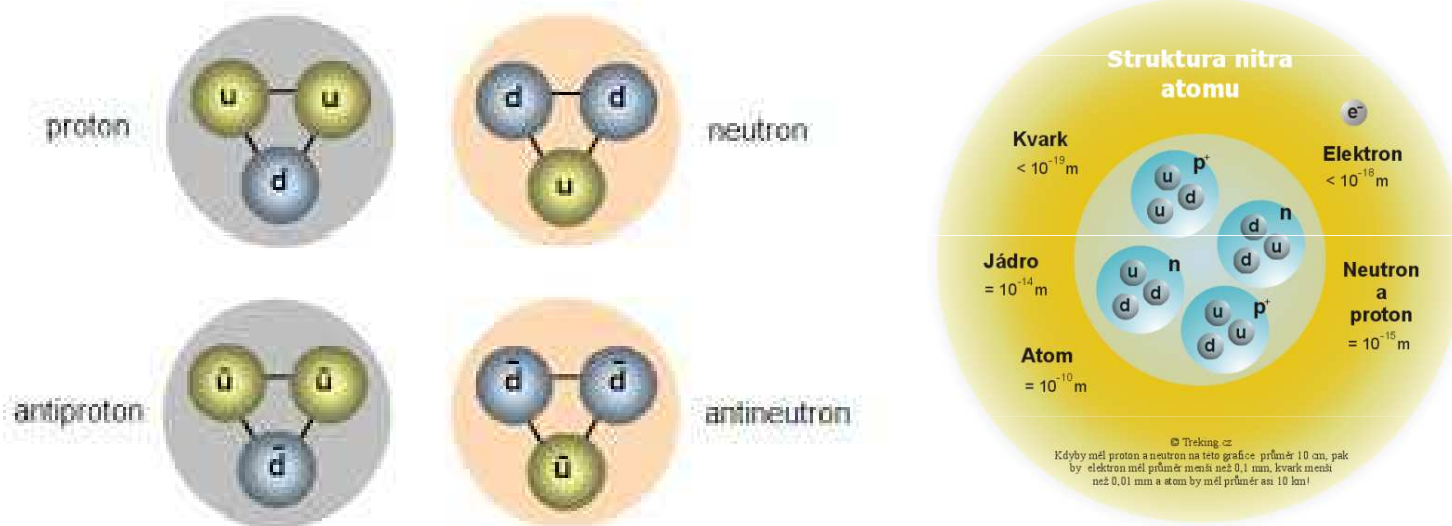


Původ slova KVARK: Slovo kvark našel Gell-Mann v románu Jamese Joyce "Finneganovo probuzení". Hlavnímu hrdinovi se zdá sen, ve kterém racci letící za plující lodí křičí: "**Tři kvarky pro doktora Marka**". V celém románu se toto podivné slovo již znovu nikde neobjeví.

KVARKY

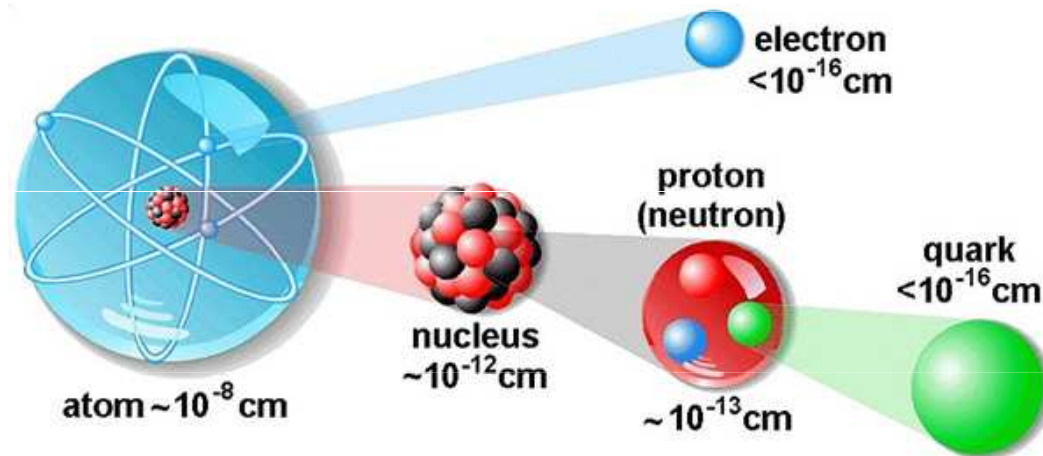
- Téměř všechno kolem sebe (i sebe samé), všechny atomy a molekuly našeho světa, planety, Slunce, můžeme postavit
- ze dvou leptonů (e^- a elektronového neutrina (ν_e))
- a ze dvou kvarků (**up (u)**, **down (d)**).
- Fundamentální částice první generace

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



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

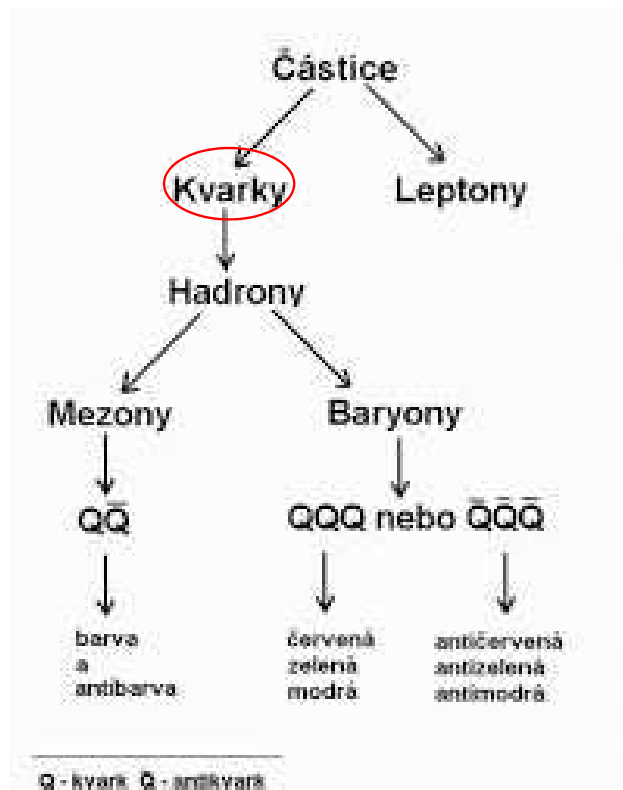


Beauty (bottom)



Truth (*in vino veritas*) (Top)

KVARKY

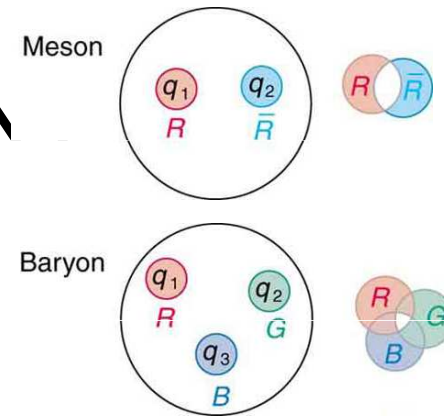


Kvarky mají některé podivné vlastnosti:

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



	Proton	Neutron	π^+	π^-
Spin	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$	$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$
Charge	$+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$	$+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$	$+\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$	$-\frac{2}{3} - \frac{1}{3} = -1$

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



KVARKY

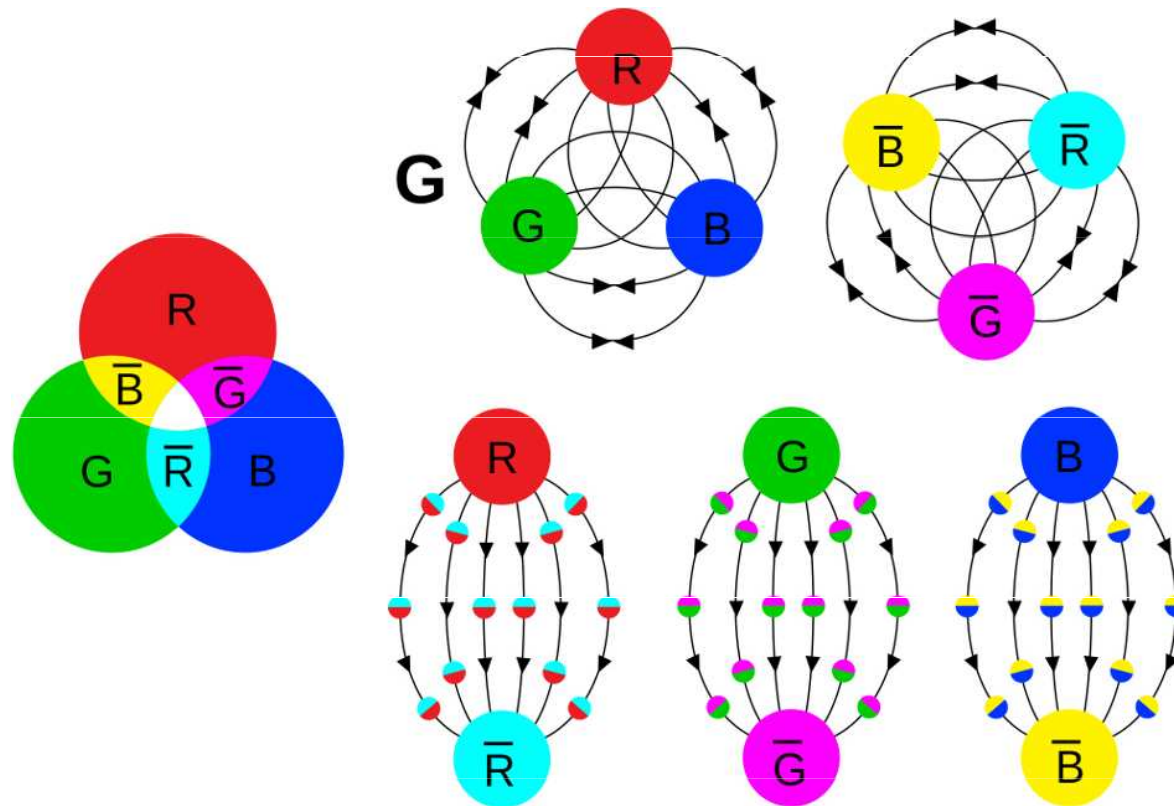
- Příčinou soudržnosti kvarků je **SILNÁ JADERNÁ INTERAKCE (SJI)**
- Je to nejsilnější síla vůbec,
- přičemž je asi **100x silnější** než interakce elektromagnetická (proto mohou protony koexistovat v jádře i přes jejich stejný náboj)
- dosah SJI je extrémně malý, prakticky nepřesahuje hranice jádra
- 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

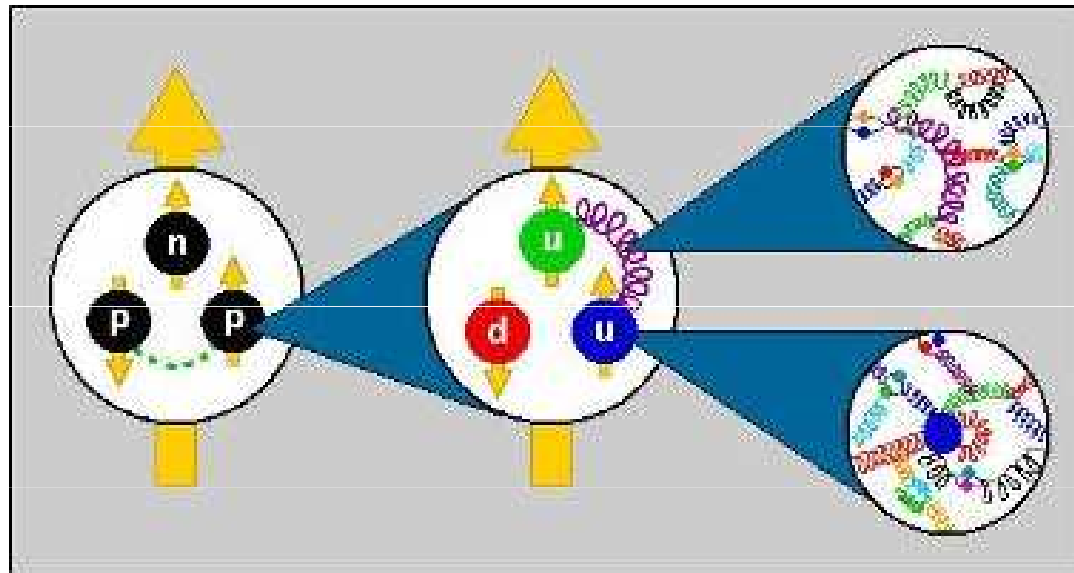


(ANTI)KVARKY - interakce



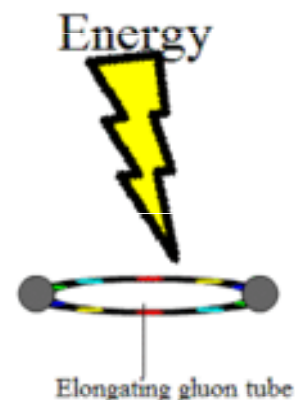
KVARKY – SILNÁ INTERAKCE

- 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)



https://en.wikipedia.org/wiki/Color_confinement

EXOTICKÉ ATOMY a ANTIATOMY

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

© 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

Muon

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

$q\bar{q}$

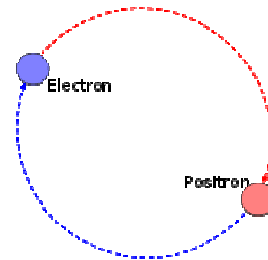
jádra

atomy

hmota

hvězdy

svět



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

antikvarky

antileptony

pozitron, antimion, antitauon

antihadrony

antibaryony

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

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

antimezony

$q\bar{q}$

antijádra

antiatomy

antihmota

antihvězdy ???

antisvět ???



I antičástice patří do běžného světa

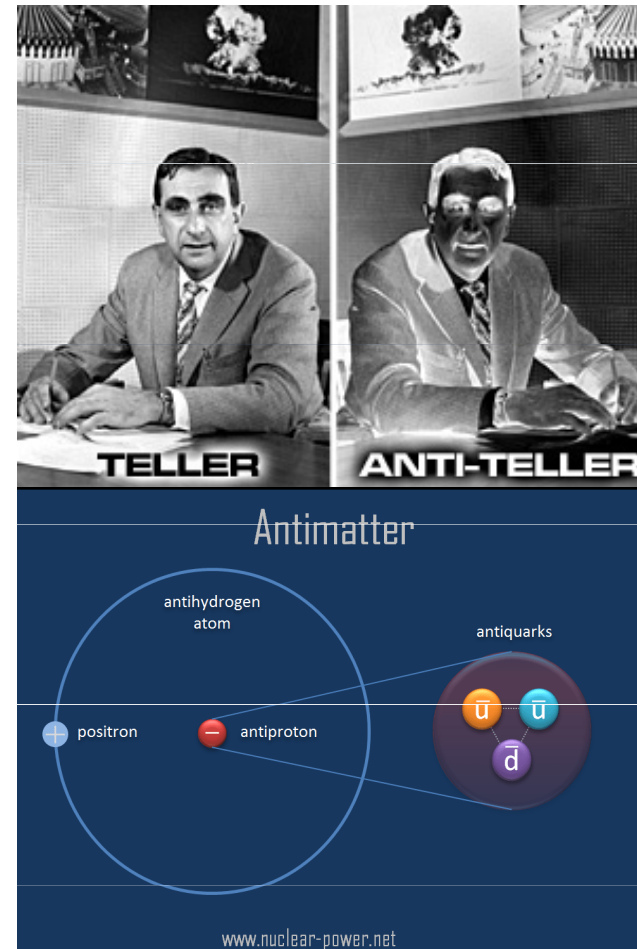
Antičástice

- **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. jinou vlastností
- Charakteristickou vlastností antičástic je jejich intenzivní reakce s příslušnou částicí – obě během reakce zanikají a přeměňují se na lehčí částice, případně fotony



Antičástice

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



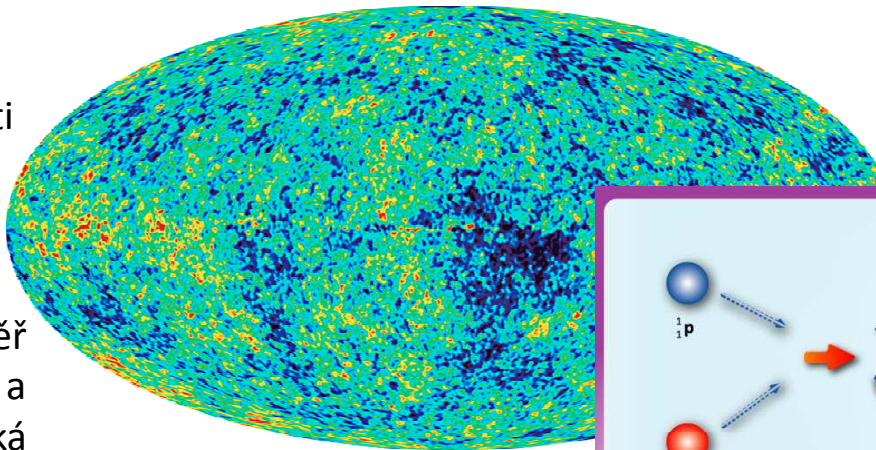
ANIHILACE

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

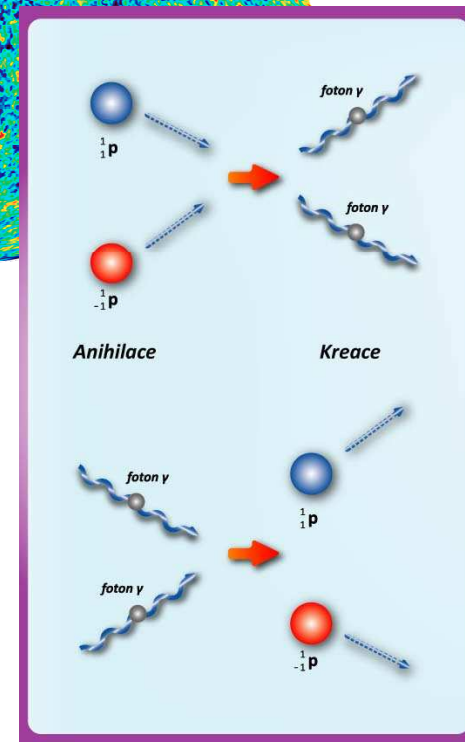
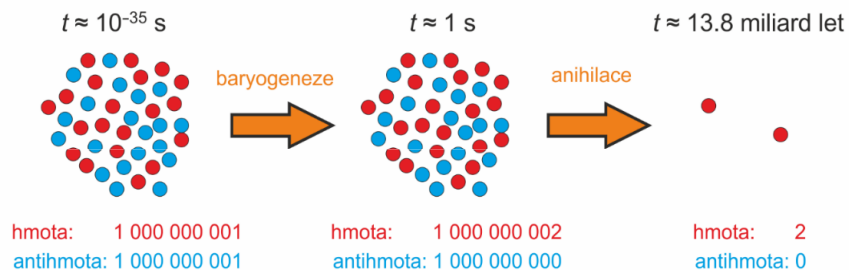
$$E = mc^2$$

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

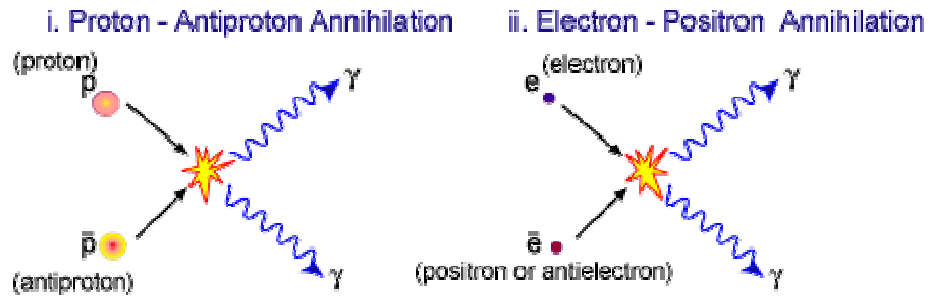
Počátek vesmíru → téměř shodné množství hmoty a antihmoty → obrovská anihilace (vzniká **reliktní záření**) – malý přebytek hmoty zůstává



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

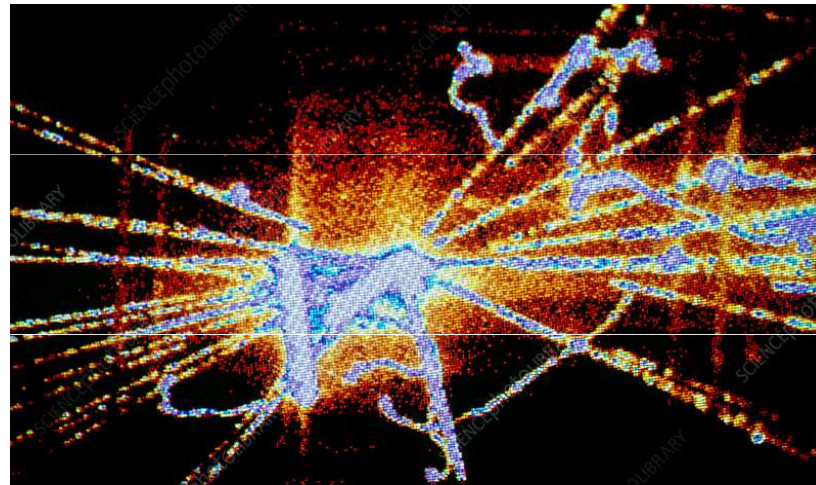
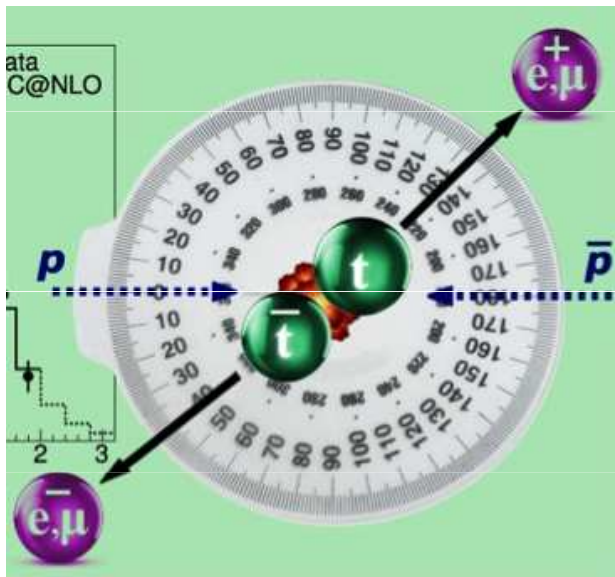


ANIHILACE



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

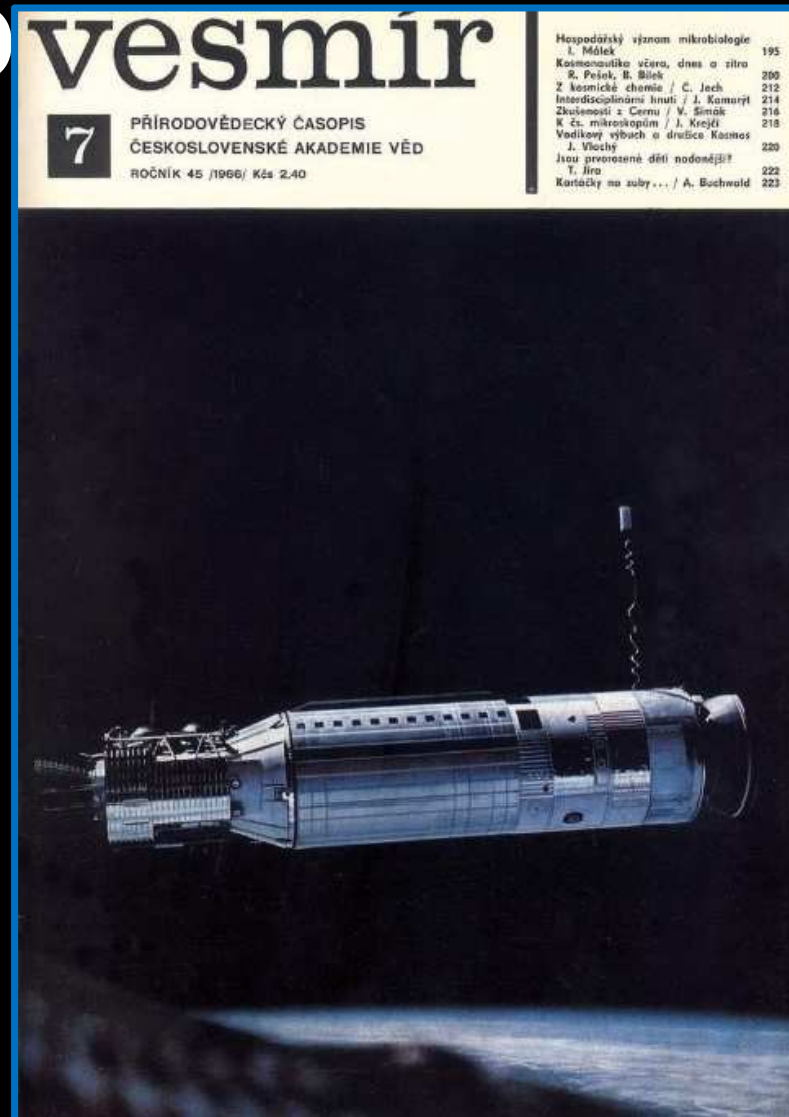
- $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$
- (veškerá hmota-klidová energie na kinetickou energii)
- **Anihilace (anti)p a (anti)n⁰** → rozpad na mezony
 - mezony → rozpad na miony + neutrina
 - miony → rozpad na e⁻ + neutrina
 - e⁻ reagují s e⁺ → fotony γ + neutrina
 - (ta mají malinkatou hmotnost)



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

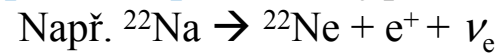
- Vznik **anti-deuteronu**. Je to prvé „anti-jádro“ (tedy jádro atomu antihmoty, složené z více elementárních částic, i když zatím jen ze dvou), jehož existence byla fyzikálně prokázána.
- Je složeno z **antiprotonu** a **antineutronu** a představuje anti-jádro těžkého vodíku, tedy anti-deuteria.
- Tento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

Umělé zdroje :

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

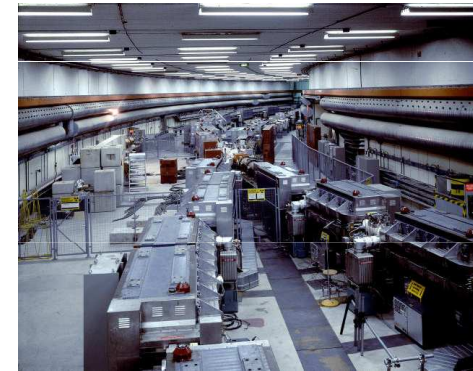
Jak antihmotu skladovat?

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

akumulační prstenec ISR v CERNu (Ženeva)



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

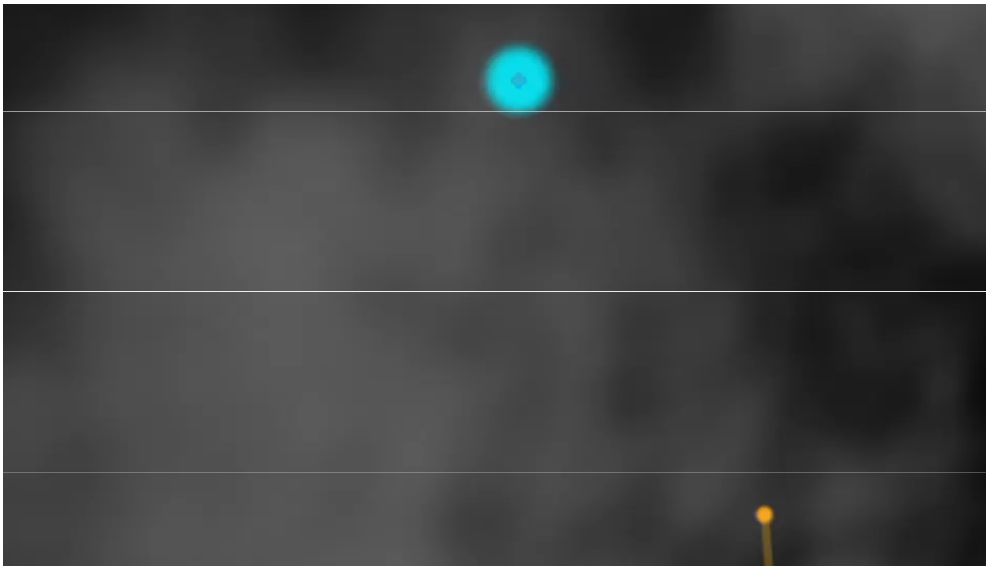
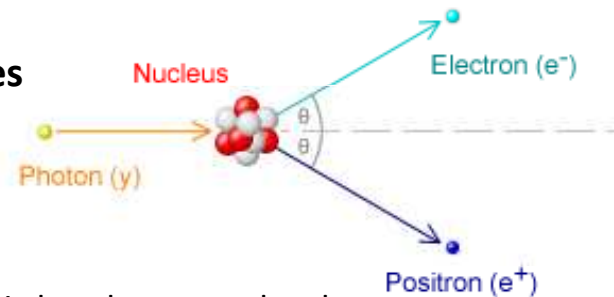


BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

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

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

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



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

How thunderstorms launch particle beams into space



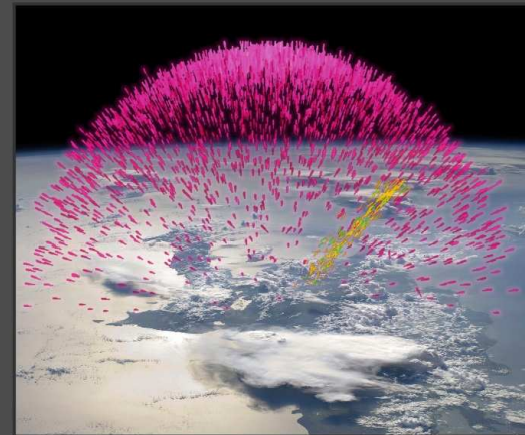
1. Electric fields near the top of the storm create an upward-moving avalanche of **electrons**. When their paths are deflected by molecules in the air, these electrons emit **gamma rays**, the highest-energy form of light.

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.



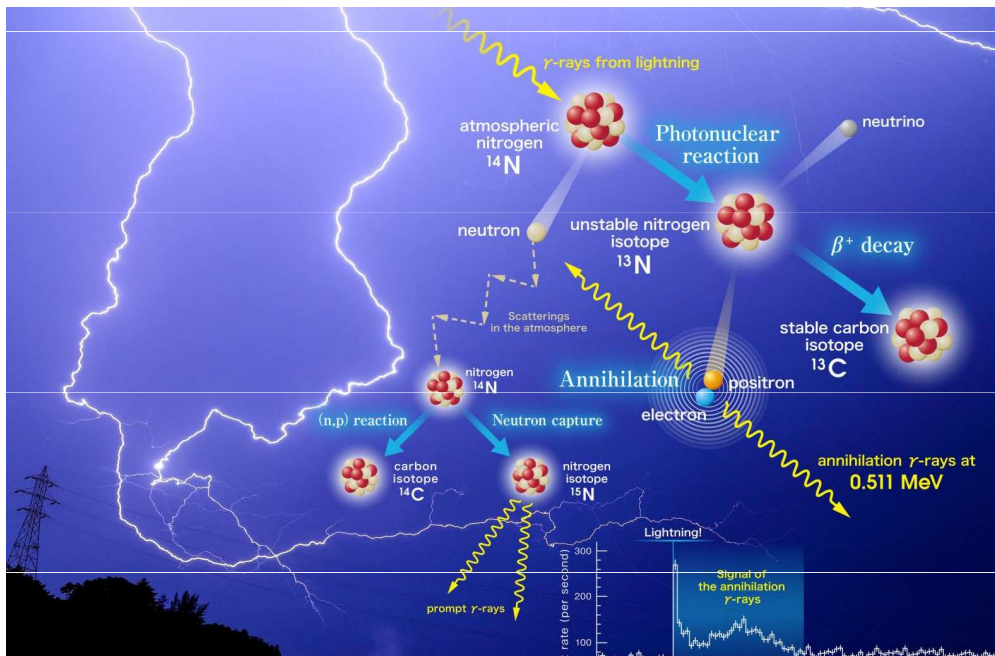
3. Here the TGF is 1.98 milliseconds old, and its electron/positron beam is reaching altitudes where it may intercept spacecraft, such as NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope.

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.

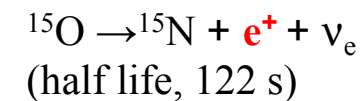
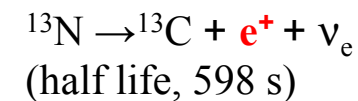
BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

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

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



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



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

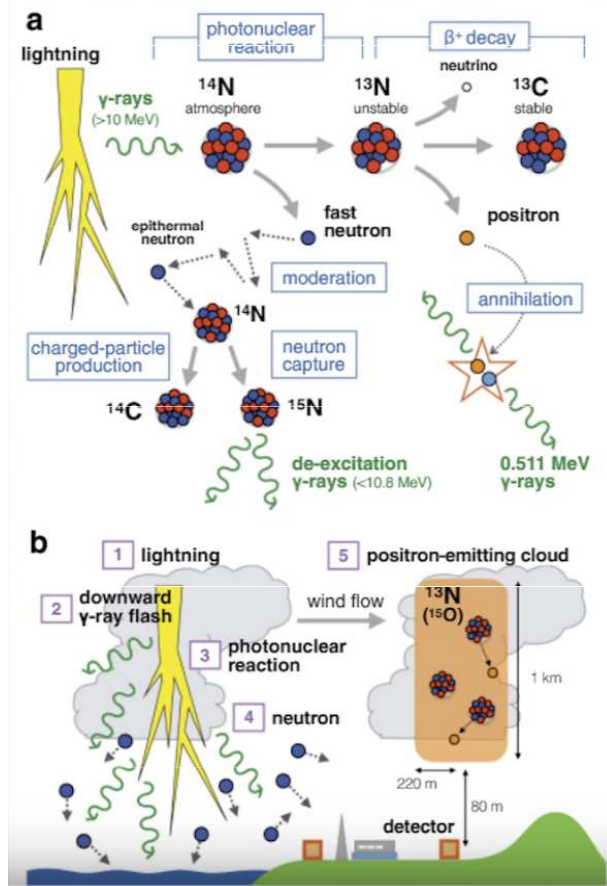
$^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{15}\text{N} + \gamma$

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

BLESKY JAKO ZDROJ POZITRONŮ

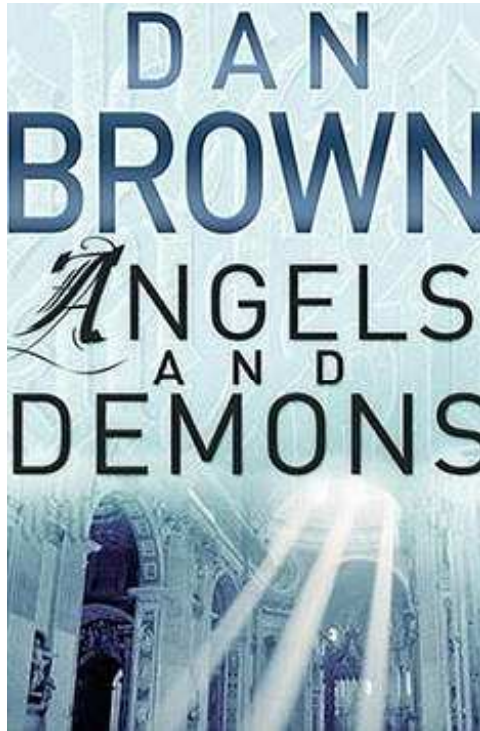
Teruaki Enoto et al., *Nature*, November 2017 | voL 551

(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}N or ^{15}O travels a few metres in the atmosphere, **annihilates** quickly in meeting an ambient electron
- ... and radiates **two 0.511-MeV photons**, the atmospheric mean free path of which is about 89 m

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](#) = 4.184×10^{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](#)).

$$E=mc^2$$

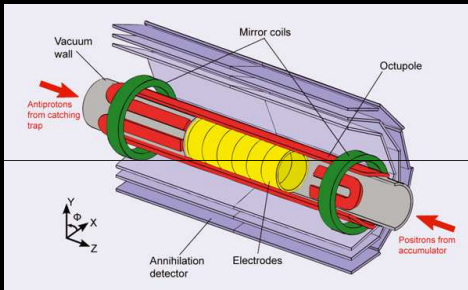
Energy

Matter

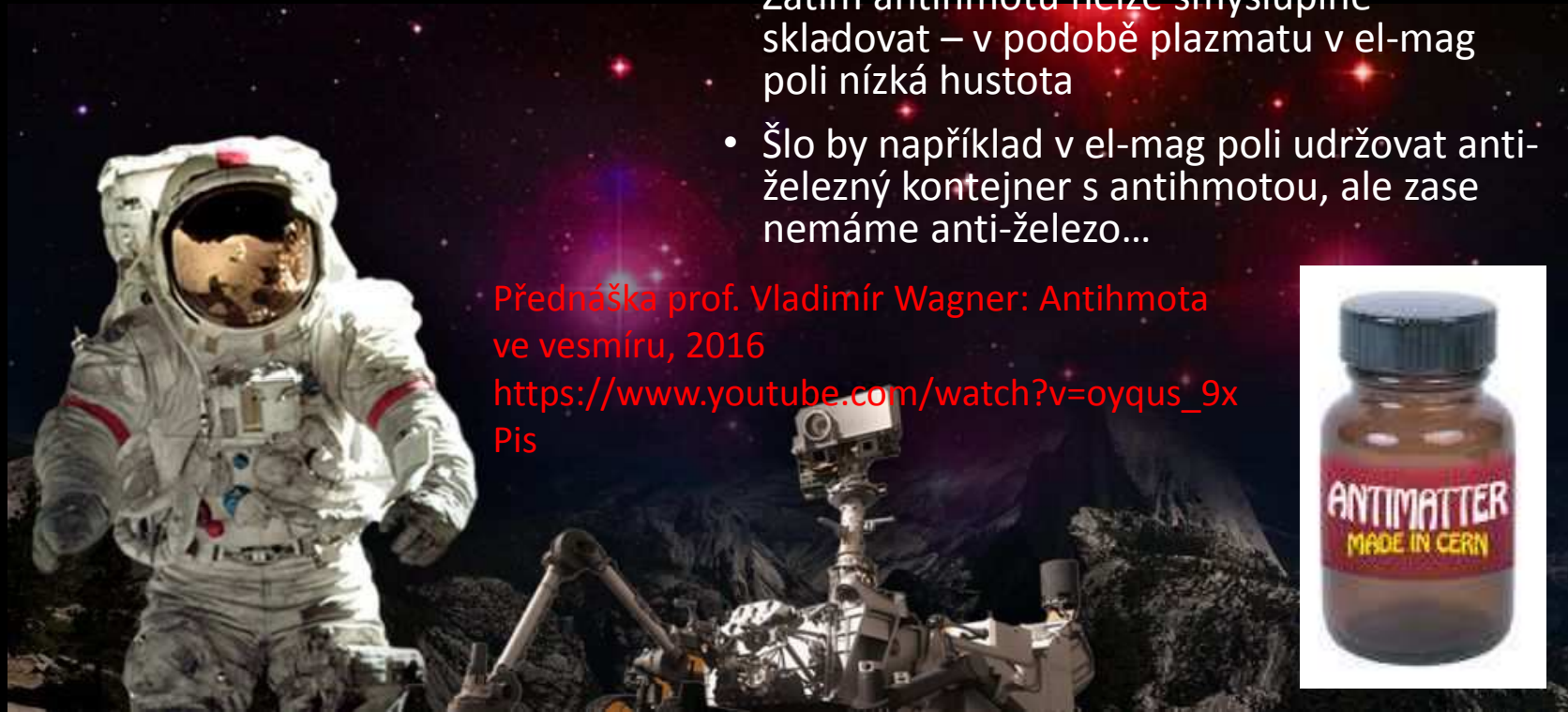
Antimatter

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...

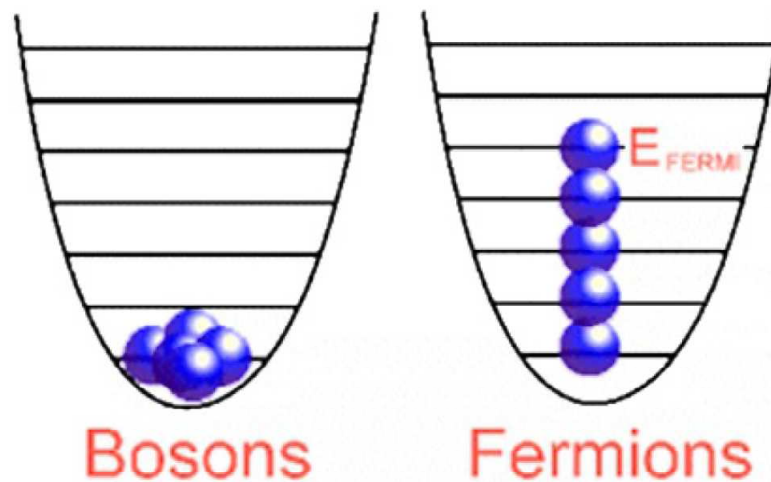


Přednáška prof. Vladimír Wagner: Antihmota ve vesmíru, 2016
https://www.youtube.com/watch?v=oyqus_9xPis



BOSONY („částice interakcí“)




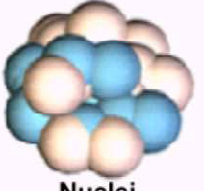
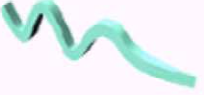
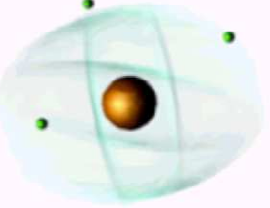


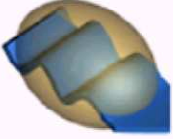
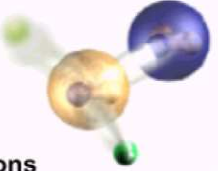
- Jako bosony jsou označovány částice, které **zprostředkovávají interakce**.
- Všechny bosony mají **celočíselný spin** a jsou pravým opakem fermionů, nespolečenských částic řídících se Pauliho vylučovacím principem (tzn. velice **rády obsazují společný kvantový stav**)
- Existenci bosonů předpověděli 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 tedy modely elementárních částic).



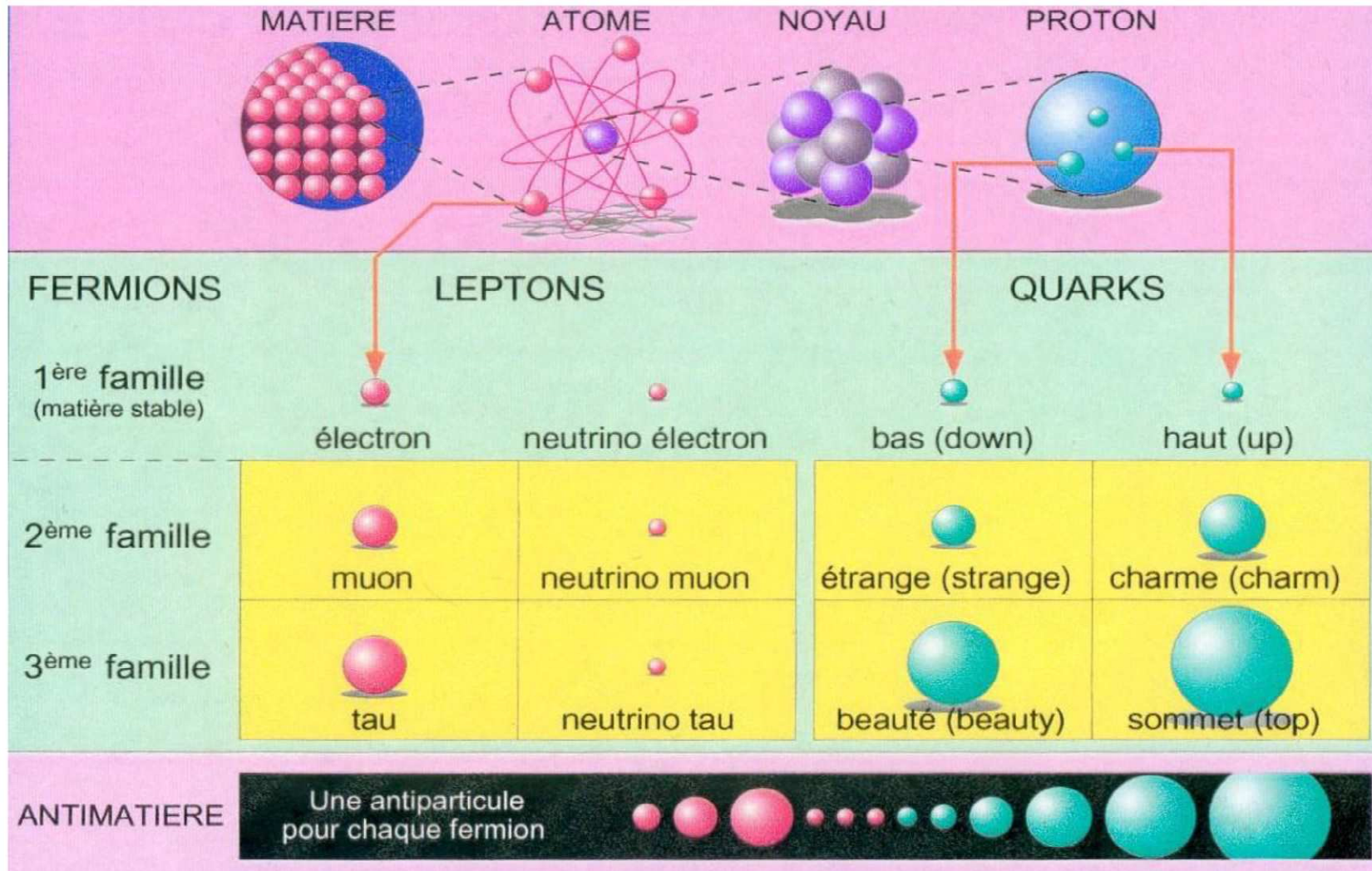
- **Gravitační síla ?** (zatím není známa polní částice)
- **Elektromagnetická síla:** protony a elektrony (elektricky nabité částice), udržuje e- v elektronovém obalu)
- **Silná jaderná síla:** drží protony a neutrony v jádře (částice s barevným nábojem) a tvoří tak atomové jádro (elektrárny, a-bomby)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

jméno částice	značení částice	hmotnost (GeV)	spin (h)	el. náboj (e)	interakce	rok objevu	objevitel
foton	γ	0	1	0	E	(1923)	(A. <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

<p>Strong</p> <p>Gluons (8)</p>  <p>Quarks</p>  <p>Mesons Baryons</p>  <p>Nuclei</p> 	<p>Electromagnetic</p> <p>Photon</p>  <p>Atoms Light Chemistry Electronics</p> 
<p>Gravitational</p> <p>Graviton ?</p>  <p>Solar system Galaxies Black holes</p> 	<p>Weak</p> <p>Bosons (W,Z)</p>  <p>Neutron decay Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun</p> 

Částice + antičástice - SUBNITÍ



Standard Model of Elementary Particles

		Fermions			Bosons
mass →		2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge →		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →		u up	c charm	t top	γ photon
	Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		d down	s strange	b bottom	g gluon
	Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
		0	0	0	0
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		ν_e muon neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ muon neutrino	Z⁰ Z boson
		0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
		-1	-1	-1	± 1
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
		e electron	μ muon	τ tau	W[±] 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
ν_e	(e -neutrino)	0	1/2	< 4eV	Non	Oui	Non
μ	(muon)	-1	1/2	105.658..	Oui	Oui	Non
ν_μ	(μ -neutrino)	0	1/2	<0.170	Non	Oui	Non
τ	(tau)	-1	1/2	1777.05	Oui	Oui	Non
ν_τ	(τ -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“



TO MUCH TO BE

FUNDAMENTAL

PARTICLES ??

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

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

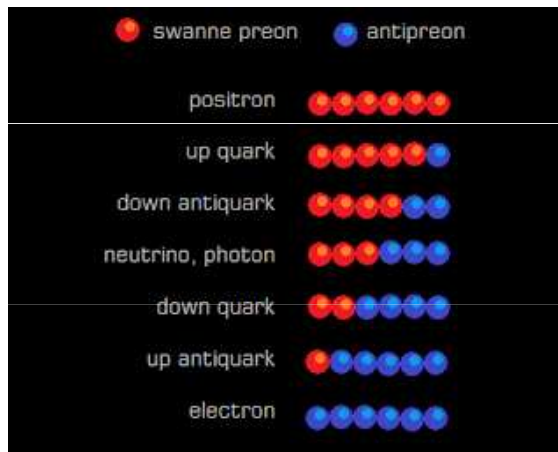
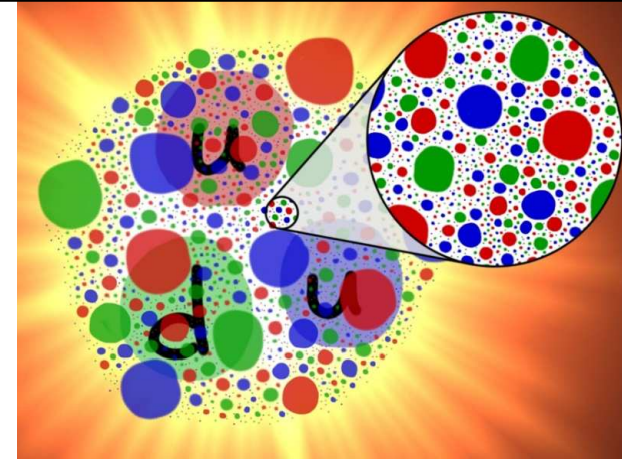
**Je to vada?
Je naděje je
z něčeho spočítst?**

Otevřené problémy:

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

KVARKY A LEPTONY – Fundamentální částice?

- **Kvarky a leptony** se jeví jako bodové částice až na měřítko 10^{-18} m.
- Přesto mohou mít kvarky a leptony společnou vnitřní strukturu, 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).



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.

1895	Wilhelm Conrad Röntgen objevil paprsky X (rentgenové záření).	
1896	Antoine Henri Becquerel objevil radioaktivní záření uranových solí (přírodní radioaktivita).	Původní laboratoř M.a P.Curieových
	Rentgenové záření se začalo využívat v medicině .	Jeden z prvních Lawrenceových cyklotronů
1898	Marie a Pierre Curieovi objevili nové radioaktivní prvky (polonium, rádium)	Zkušební výbuch atomové pumy
1899	Ernest Rutherford objevil dva typy záření - alfa a beta .	
1905	Albert Einstein formuloval speciální teorii a našel příslost mezi hmotou a energií.	Areál JE Dukovany
1911	Ernest Rutherford dokázal, že atom má kladné jádro .	
1913	Niels Bohr vytvořil na základě kvantové teorie model stavby atomu vodíku.	
1926	Geiger a Müller zkonstruovali detektor ionizujícího záření (Geiger-Müllerova trubice).	
1931	Ernest Lawrence zkonstruoval první kruhový urychlovač částic - cyklotron . Z teorie, kterou vytvořil P. A. M. Dirac, vyplývala existence antičástic (např. pozitron).	
1932	James Chadwick objevil neutron .	
1934	Hidei Yukawa vypracoval teorii výměnných jaderných sil .	
	Irena a Frederic Joliot-Curieovi objevili umělou radioaktivitu .	
1938	Otto Hahn se spolupracovníky rozštěpil jádro uranu. Irene a Frederic Joliot-Curie se zabývali možností vyvolání řetězové štěpné reakce .	
1942	V USA byly zahájeny práce na zkonstruování atomové pumy (projekt Manhattan). 2. prosince uvedl E. Fermi do provozu první jaderný reaktor .	
1945	Použití prvních atomových bomb (Hirošima, Nagasaki)	
1952	Pokusný výbuch první vodíkové (termonukleární) pumy.	
1954	První jaderná elektrárna začala dodávat elektřinu do veřejné sítě (Obninsk u Moskvy).	
1964	Murray Gell-Mann a George Zweig přišli s teorií, podle níž jsou těžké částice složeny z kvarků nebo antikvarků.	
1985	Jaderná elektrárna Dukovany zahájila provoz.	
1986	Těžká havárie jaderného reaktoru ve 4. bloku černobylské jaderné elektrárny (Ukrajina).	
2002	První blok jaderné elektrárny Temelín byl uveden do zkušebního provozu.	