

## 06 - mikrosvět a energie jader

### Projevy mikrosvěta

Pro popis jevů, které se odehrávají na úrovni atomů a částic, nelze použít běžnou fyziku. Mechanika, jak jsme se ji učili, se opírá o lidskou intuici. Částice se ale chovají "divně" a o jejich chování mluví tzv. **kvantová fyzika**. Ta je založena na velice složitých matematických konstrukcích. Říká se, že lidi, kteří ji opravdu do hloubky rozumí, by se dali spočítat na prstech.

**Typický čas:** Atomová jádra mají rozměry řádově  $10^{-15}$  metru. Fotony s rychlostí  $3 \times 10^8$  m/s uletí tuto vzdálenost asi za  $10^{-23}$ s. Právě tento čas je typickým časem dějů v atomovém jádře. Žije-li zde částice  $10^{-10}$  s, je to z hlediska makrosvěta neuvěřitelně krátký okamžik. Z hlediska elementární částice jde o celou věčnost. Částici, která žije velmi krátkou dobu (kratší než  $10^{-23}$  s) již ani nenazýváme částicí, říkáme jí rezonance.

**Částice-vlna:** V makrosvětě jsme si zvykli dělit jevy na částicové a vlnové. Bezpečně poznáme, co je těleso a co je vlnění. Objekty mikrosvěta však nejsou ani částice (tělesa), ani vlnění. Někdy nám jejich projevy připomínají vlnění, jindy částice.

**Superpozice stavů:** Na rozdíl od člověka mohou být objekty mikrosvěta ve více stavech naráz. My nemůžeme být nikdy současně v restauraci, ve škole a ještě se přitom doma v obýváku dívat na televizi. Objekt mikrosvěta může být současně ve dvou ramenech interferometru, projít dvěma štěrbinami nebo vylétnout naráz do dvou různých výšek. Superpozice stavů je v mikrosvětě zcela běžným jevem.

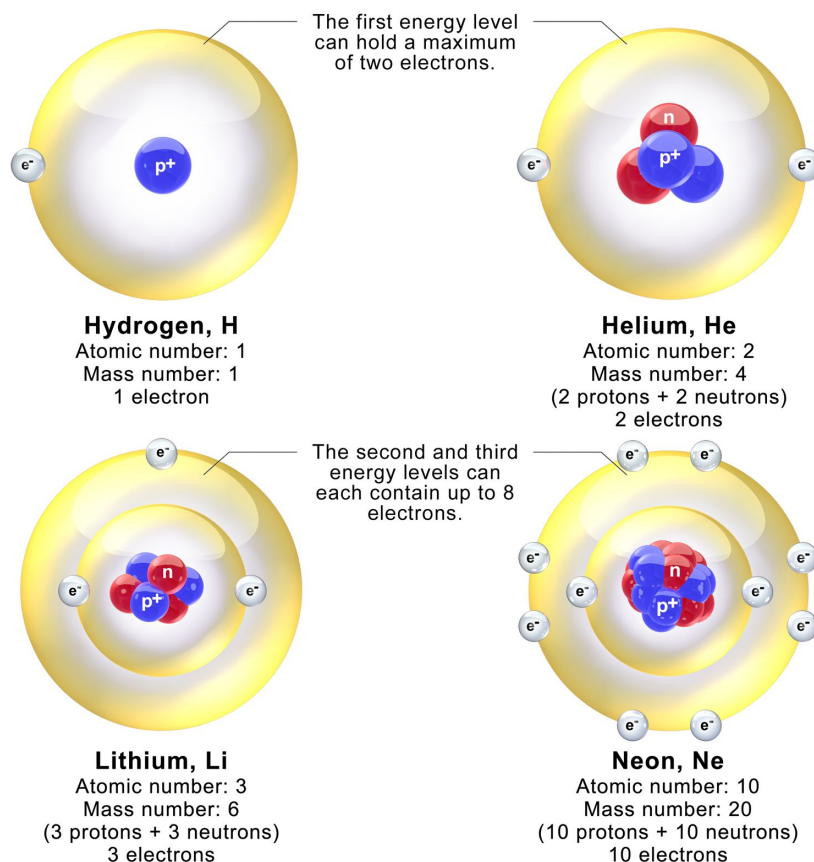
**Kvantování:** V určitých situacích nenabývají některé veličiny spojitých hodnot, ale jen diskrétních (pouze vybraných) hodnot. Týká se to zejména energie a momentu hybnosti, ale i dalších veličin. Elektron v atomárním obalu nemůže mít libovolnou energii – jeho energie se mění pouze po skocích.

**Nedeterminismus:** Při samotném aktu měření můžeme naměřit několik hodnot, Měření má statistický charakter, můžeme poznat jen pravděpodobnost výsledku při mnoha opakovaných měřeních. Dnes je již experimentálně prokázáno, že tato vlastnost mikrosvěta není dána neznalostí nějakých parametrů objektu, ale je primární vlastností mikrosvěta, se kterou musíme počítat.

**Neurčitost:** Měření polohy a hybnosti nemůže být nikdy zcela přesné. Zpřesnění měření jedné z těchto veličin vede na větší neznalost druhé z nich. Měření polohy a hybnosti se vzájemně ovlivňují.

**Chápaní síly:** Kvantová teorie nepoužívá pojem síly, jak ji známe z mechaniky. Interakci způsobují tzv. polní (intermediální, výměnné) částice. Interakce proběhne tak, že si dva objekty (například elektrony) vymění polní částici (například foton).

## Atomy



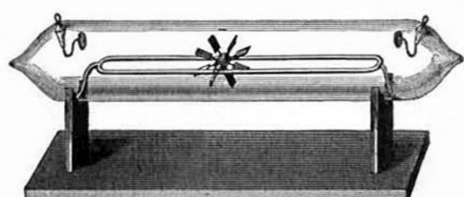
Atomy na obrázcích jsou elektricky ne.....

Kterou z částic může atom "lehce" ztratit nebo získat?

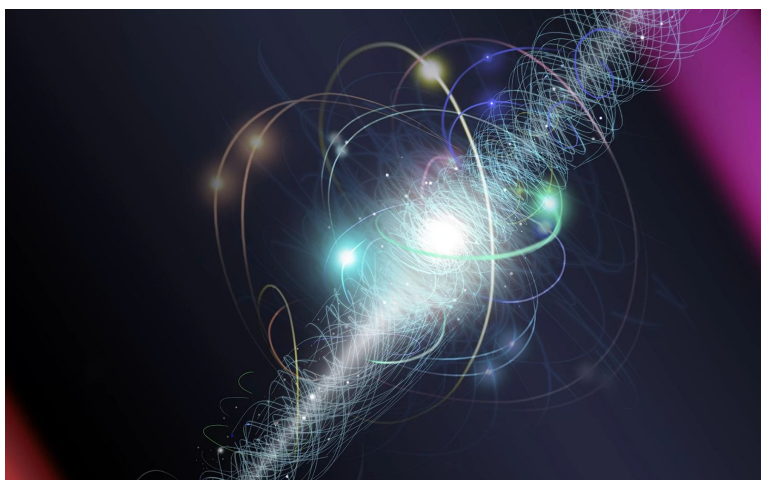
Jak říkáme atomu, ve kterém je víc kladných než záporných částic? A jak tom, který má víc záporných? Jaké mají atomy náboje?

## Elektron

**Elektron** – první objevená elementární částice. Je stabilní. Hmotnost má  $9,1 \times 10^{-31} \text{kg}$  a elektrický náboj  $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$ . Elektron objevil sir Joseph John Thomson v roce 1897. Existenci antičástice k elektronu (pozitron) teoreticky předpověděl Paul Dirac v roce 1928 a objevil Carl Anderson v roce 1932.



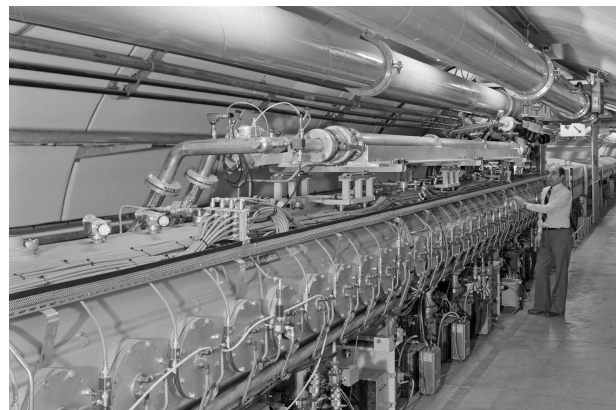
Takto vypadá jedna z



variant katodové trubice. Vychází z ní záření, začalo říkat katodové, které způsobuje interakce záporně nabitých částic (proud elektronů z katody směrem k anodě) s plynem uvnitř trubice.

**Mion** – těžký elektron, hmotnost má  $207 m_e$ . Střední doba života je přibližně  $2 \times 10^{-6}$  s. Těžký elektron se rozpadá na stabilní elektron, elektronové antineutrino a mionové neutrino. Mion se vyskytuje v sekundárních sprškách z kosmického záření. Mion byl objeven C. Andersonem v kosmickém záření za pomoci mlžné komory v roce 1936.

**Tauon** – supertěžký elektron, hmotnost má  $3\,484 m_e$ . Jde o nestabilní částici se střední dobou života  $3 \times 10^{-13}$  s. Rozpadá se na své lehčí dvojníky (elektron nebo mion) a neutrino. Byl objeven v roce 1977 Martinem Perlem. Na fotografii urychlovač SPEAR ve Stanfordském urychlovačovém centru (SLAC), kde byl objeven.



### Co je kosmické záření?

Kosmické záření je proud urychlených částic neznámého původu. Při interakci s atmosférou vzniká sprška milionů i miliard částic. Nejenergetičtější částice kosmického záření, které se dosud podařilo detekovat, mají energie až 1020 eV. Sprška z takové částice zasáhne na zemském povrchu mnoho desítek  $\text{km}^2$ . Tak energetická částice se objeví přibližně jednou za sto let. Kosmické záření je majoritním zdrojem antihmoty na naší planetě. Může vznikat v supernovách, pulzarech, aktivních galaktických jádrech, atd. Naprostá většina částic kosmického záření, okolo 88 %, jsou protony, přibližně 10 % jsou jádra hélia (alfa záření), 1 % elektrony a pozitrony a 1 % těžké prvky. Kosmické záření má naprosto nejširší spektrum energií ze všech dodnes známých jevů. Mnohé částice, které se dnes vědci pokoušejí nalézt v moderních urychlovačích, se mohou nacházet právě v kosmickém záření. Kosmické záření bylo objeveno v roce 1912 rakouským fyzikem Viktorem Hessem při balónových experimentech ve výšce až 5 500 metrů. S rostoucí výškou stoupala ionizace atmosféry, a tím byl prokázán kosmický původ záření. Za objev získal V. Hess v roce 1936 Nobelovu cenu za fyziku.

### Co je elektronvolt (eV)

Elektronvolt (eV) – jednotka energie. Jde o energii, kterou získá elektron urychlením v potenciálovém rozdílu jeden volt,  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . V jaderné fyzice se používají spíše větší násobky této jednotky, kiloelektronvolt (keV,  $10^3 \text{ eV}$ ), megaelektronvolt (MeV,  $10^6 \text{ eV}$ ), gigaelektronvolt (GeV,  $10^9 \text{ eV}$ ) nebo teraelektronvolt (TeV,  $10^{12} \text{ eV}$ ). Největší urychlovač částic (LHC) dodá každému protonu energii 7 TeV. Rozbitím jediného jádra uranu  $^{235}\text{U}$  se uvolní přibližně 215 MeV. Sloučením jednoho jádra atomu deuteria s jádrem tritia se uvolní 17,6 MeV. V obrazovkách barevných televizorů jsou elektrony urychlovány vysokým napětím kolem 32 tisíc voltů (32kV), takže elektrony získávají kinetickou energii 32 keV.

### Co je spin

Spin je kvantová vlastnost elementárních částic, jejíž ekvivalent klasická fyzika nezná. Jde o vnitřní moment hybnosti částice v tom smyslu, že spiny částic přispívají k celkovému momentu hybnosti soustavy. Jeho

Velikost je pro každou částici přesně daná, nelze ji nijak měnit. Může nabývat celých nebo polocelých násobků (Planckovy konstanty) např. 0, 1/2, 1, 3/2, ...

## Proton

Proton je subatomární částice s kladným elementárním elektrickým nábojem tj.  $1,602 \times 10^{-19}$  C a klidovou hmotností odpovídající přibližně hmotnosti 1836 elektronů. Je považován za stabilní (byť některé teorie předpovídají možnost rozpadu s poločasem rozpadu mezi  $10^{31}$  a  $10^{39}$  roků).

Proton objevil Ernest Rutherford v r. 1918. Pozoroval, že částice alfa vystřelované do plynného dusíku, se v jeho scintilačním detektoru jeví stejně jako jádra vodíku. Rutherford určil, že zdrojem jader vodíku musí být dusík, a proto musí obsahovat jádra vodíku. Myslel si, že jádra vodíku, o nichž věděl, že mají atomové číslo 1, jsou elementární částice. Proto je pojmenoval proton, dle řeckého *protos*, první.

Proton řadíme mezi baryony, jedná se tedy o částici složenou. Proton se skládá ze dvou kvarků **u** a jednoho kvarku **d** vázaných silnou interakcí (zprostředkovanou gluony).

## Neutron

Neutron je subatomární částice bez elektrického náboje (neutrální částice). Atomy lišící se jen počtem neutronů se nazývají izotopy. Neutrony se z atomu uvolňují při jaderných reakcích, volné neutrony způsobují řetězení štěpné reakce a jejich samostatný proud se nazývá neutronové záření.

Jeho hmotnost je o něco málo větší než protonu - přibližně 1839 elektronů. Mimo atomové jádro je neutron nestabilní se střední dobou života zhruba 14.7 minuty (rozpadá se na proton, elektron a elektronové antineutrino).

Experimentální důkaz neutronu včetně vysvětlení podal James Chadwick v roce 1932 (žák Ernesta Rutherforda).

Neutron je také řazen mezi baryony, je složen z jednoho kvarku **u** a dvou kvarků **d**.

## WTF kvarky? Baryony? Leptony? Aneb dělení částic.

### Dělení částic do rodů

#### Leptony

K leptonům patří **elektron** a jeho **neutrino** ve třech generačních provedeních a samozřejmě **jejich antičástice**. U leptonů nepozorujeme v rámci současných experimentálních možností (tj. do  $10^{-18}$  m) žádnou vnitřní strukturu, jeví se jako skutečně elementární částice. Všechny leptony podléhají slabé interakci, elektrony navíc interakci elektromagnetické.

#### Kvarky

Částice, ze kterých jsou tvořeny těžké částice s vnitřní strukturou (například proton, neutron). Veškeré částice složené z kvarků označujeme jako **hadrony**. Částicím složeným ze tří kvarků říkáme **baryony**, částicím

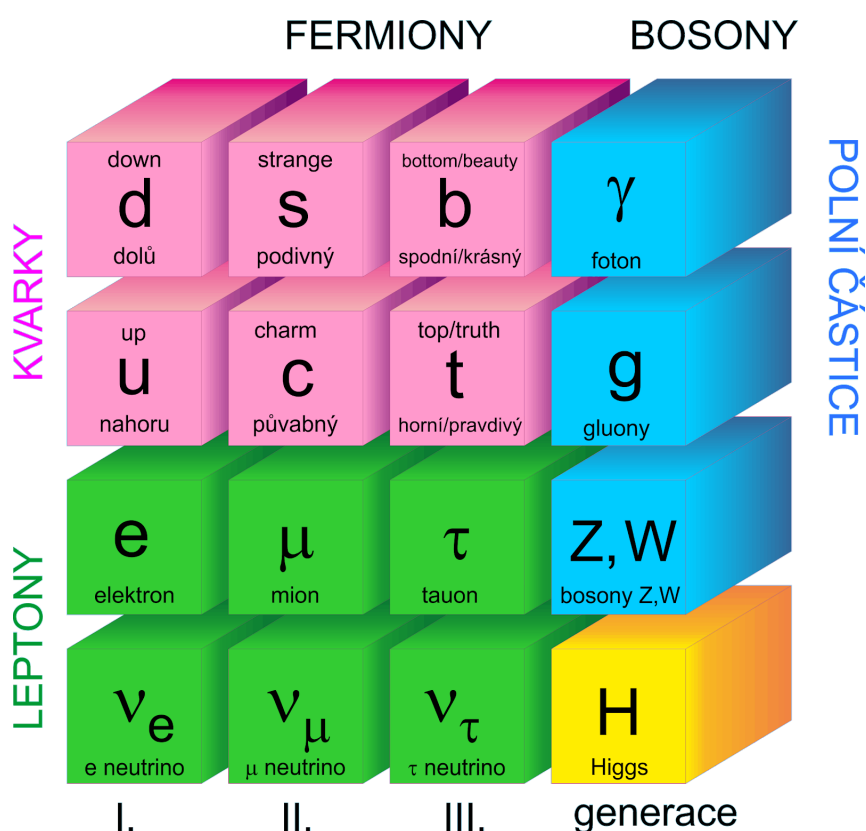
složeným z kvarku a antikvarku **mezony**. Opět existují ve třech generacích, podléhají interakci silné, slabé i elektromagnetické.

### Polní částice

Částice zprostředkující interakce. Nacházejí se mezi dvěma objekty mikrosvěta, proto jim také říkáme mezipůsobící, výměnné nebo intermediální částice. Pro elektromagnetickou interakci jde o **foton**, pro slabou interakci o částice  **$W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$**  pro silnou interakci existuje 8 **gluonů**. Pro gravitační interakci máme zatím hypotetický **graviton** (kvantová teorie gravitace dosud neexistuje).

### Higgsovy částice

Částice, které v teoriích způsobují narušení symetrie elektroslabé interakce a nenulovou hmotnost polních bosonů  $W^+$ ,  $W^-$  a  $Z^0$  slabé interakce. Obdobný mechanismus funguje i pro další částice. Higgsův boson byl nalezen v roce 2012 jako poslední částice standardního modelu v částicové laboratoři CERN.



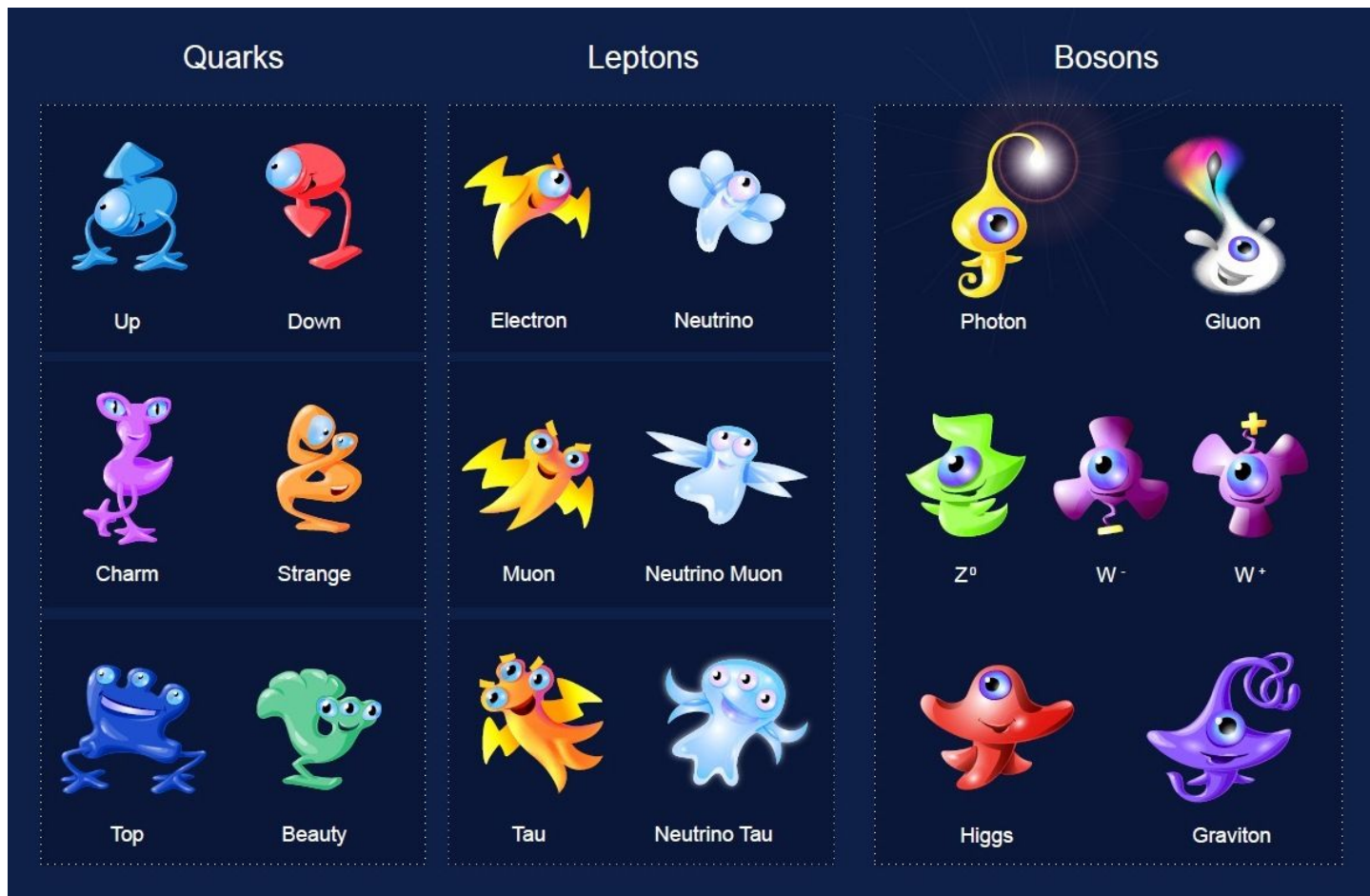
### Dělení částic podle statistického chování

#### Fermiony

Mají **poločíselný spin**. Z elementárních částic k nim patří všechny leptony (elektrony a neutrina) a kvarky, tedy veškeré částice látky. K fermionům také patří částice složené ze tří kvarků (tzv. baryony – například neutron, proton a další). Splňují Pauliho vylučovací princip.

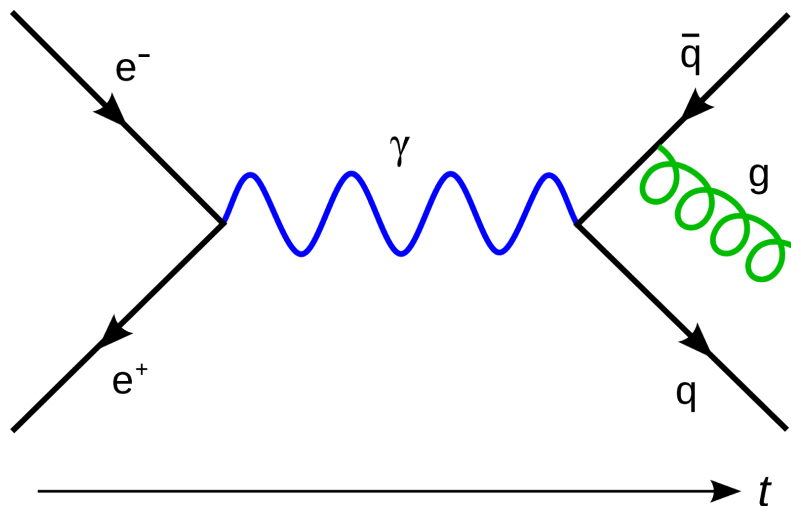
#### Bosony

Mají **celočíselný spin**. Z elementárních částic k nim patří všechny polní částice, tj. foton,  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , gluony. Ze složených částic k nim patří částice složené tak, že výsledný spin je 0 (skalární částice) nebo 1 (vektorové částice). Nejčastěji jde o mezony složené z kvarku a antikvarku. Nesplňují Pauliho vylučovací princip.



<https://cds.cern.ch/record/1473657> - částice podle *André-Pierre Olivier*

Feynmanovy diagramy



Zkuste najít: elektron, pozitron, kvark, antikvark, gluon a foton.

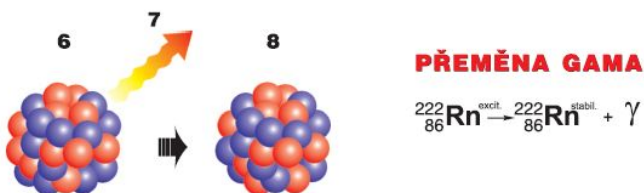
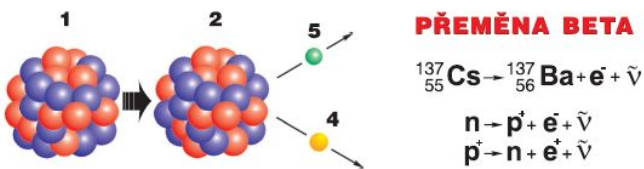
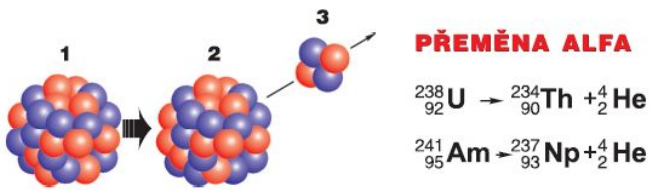
## Radioaktivita a záření

**Záludná otázka:** Má radioaktivita přímou souvislost s rádiem? A nepřímou?

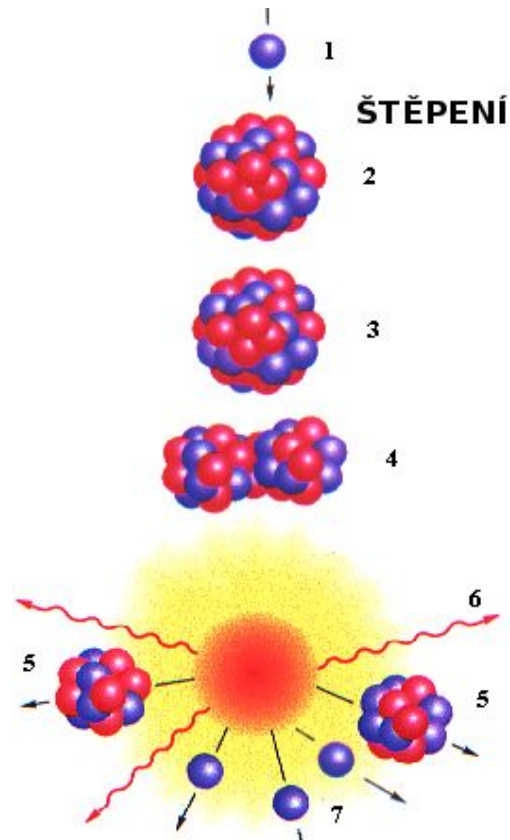
Radioaktivitou nazýváme jev, kdy některá atomová jádra (ať už přirozeně nestabilní, nebo v důsledku vnějšího působení) prochází přeměnou, v níž se mění počet protonů či neutronů v jádře a uvolňují se z něj částice.



Čtyři základní typy radioaktivity podle uvolněných částic:



- |                     |                                 |                             |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| 1. MATEŘSKÉ JÁDRO   | 4. ELEKTRON ( $\beta^-$ )       | 7. $\gamma$ ZÁŘENÍ (fotony) |
| 2. DCEŘINÉ JÁDRO    | 5. ANTINEUTRINO ( $\bar{\nu}$ ) | 8. STABILIZOVANÉ JÁDRO      |
| 3. $\alpha$ ČÁSTICE | 6. EXCITOVANÉ JÁDRO             |                             |



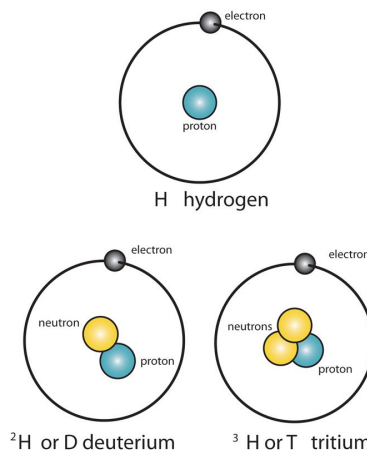
K **alfa** přeměně dochází u velmi těžkých jader, která jsou prostě příliš těžká, aby držela pohromadě. Při této přeměně se jednoduše utrhne svazek dvou protonů a dvou neutronů (tedy vlastně jádro helia) a uletí.

**Beta** proměna nastává u jader, které mají v nepoměru počty protonů a neutronů (a nemusí být ani kdovíjak těžká). V závislosti na tom, kterých je nadbytek, se buď jeden proton promění v neutron nebo naopak, a z jádra vyletí elektron (nebo jeho anti-bráška pozitron) a neutrino.

**Gamma** proměna nemění počty částic v jádře, ale jejich vzájemné uspořádání ("sesednou si"). Z jádra při ní vyletí vysokoenergetický foton (který ale není vidět, naopak pronikne ze všech radioaktivních produktů nejlouběji). Dlužno říci, že k nějaké nerovnováze dojde obvykle i u ostatních jaderných reakcí, a proto jak beta, tak alfa proměna bývají doprovázeny další gama přeměnou.

Ta úplně nejtěžší jádra (např. uranu nebo ještě těžších prvků) se někdy můžou úplně roztrhnout na dvě zhruba podobně veliké části a spoustu částí menších. Tomuto procesu říkáme **štěpení** - někdy nastává sám (tomu říkáme **spontánní štěpení**), jindy se mu musí pomoci (nejčastěji ostřelováním neutrony pak mu říkáme indukované štěpení). Přesně tento jev se využívá v jaderných elektrárnách (a bohužel i atomových bombách).

Poznámka: Jádra jednoho konkrétního prvku mají vždy stejný počet protonů. Mohou ovšem obsahovat různý počet neutronů. Těmito variantám podle počtu neutronů říkáme **izotopy** nebo **nuklidy**. Označují se číslem odpovídajícím celkovému počtu nukleonů v jádře (protonů + neutronů). Některé prvky mají právě jeden stabilní (v přírodě se vyskytující) izotop (např. fluor 19, hliník 27, ...), jiné jich mají více (např. vodík 1 a 2, kyslík 16, 17 a 18, ...), některé vůbec žádný. Kromě toho ale lze ostřelováním částicemi vytvořit mnohé další obvykle dosti nestabilní nuklidy.



Nejtěžší prvky (všechny těžší než bismut s protonovým číslem 83) nemají žádný stabilní izotop, a tak i když se rozpadnou, ani dceřiné jádro není stabilní. Jádro tak prochází jedním rozpadem za druhým v takzvaných **rozpadových řadách**, dokud jejich konečným produktem nebude nějaký z izotopů olova (nebo thalia). Zásoby nestabilních nuklidů v přírodě (zejména thoria a radioaktivního draslíku 40) pocházejí z hvězd - od vzniku Země jich dost ubylo, ale protože mají dlouhé poločasy rozpadu (i v miliardách let), pořád jich je dost.

Úkol: Najděte v Mendělejevově periodické tabulce prvků radon, polonium, thorium, uran a plutonium. Jak se jmenují dva relativně lehké, přesto nestabilní prvky?

1 H 1,0079																	2 He 4,0026
3 Li 6,941	4 Be 9,0122											5 B 10,811	6 C 12,011	7 N 14,007	8 O 15,999	9 F 18,998	10 Ne 20,18
11 Na 22,990	12 Mg 24,305											13 Al 26,982	14 Si 28,086	15 P 30,974	16 S 32,066	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948
19 K 39,098	20 Ca 40,078	21 Sc 44,956	22 Ti 47,867	23 V 50,942	24 Cr 51,996	25 Mn 54,938	26 Fe 55,845	27 Co 58,933	28 Ni 58,693	29 Cu 63,546	30 Zn 65,39	31 Ga 69,723	32 Ge 72,61	33 As 74,922	34 Se 78,96	35 Br 79,904	36 Kr 83,80
37 Rb 85,468	38 Sr 87,62	39 Y 88,906	40 Zr 91,224	41 Nb 92,906	42 Mo 95,94	43 Tc (98)	44 Ru 101,07	45 Rh 102,91	46 Pd 106,42	47 Ag 107,87	48 Cd 112,41	49 In 114,82	50 Sn 118,71	51 Sb 121,76	52 Te 127,60	53 I 126,90	54 Xe 131,29
55 Cs 132,91	56 Ba 137,33	57 - 71 * **	72 Hf 178,49	73 Ta 180,95	74 W 183,84	75 Re 186,21	76 Os 190,23	77 Ir 192,22	78 Pt 195,08	79 Au 196,97	80 Hg 200,59	81 Tl 204,38	82 Pb 207,2	83 Bi 208,98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
87 Fr (223)	88 Ra (226)																
57 La 138,91	58 Ce 140,12	59 Pr 140,91	60 Nd 144,24	61 Pm (145)	62 Sm 150,36	63 Eu 151,96	64 Gd 157,25	65 Tb 158,93	66 Dy 162,50	67 Ho 164,93	68 Er 167,26	69 Tm 168,93	70 Yb 173,04	71 Lu 174,97			
89 Ac (227)	90 Th 232,04	91 Pa (231)	92 U 238,03	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)			



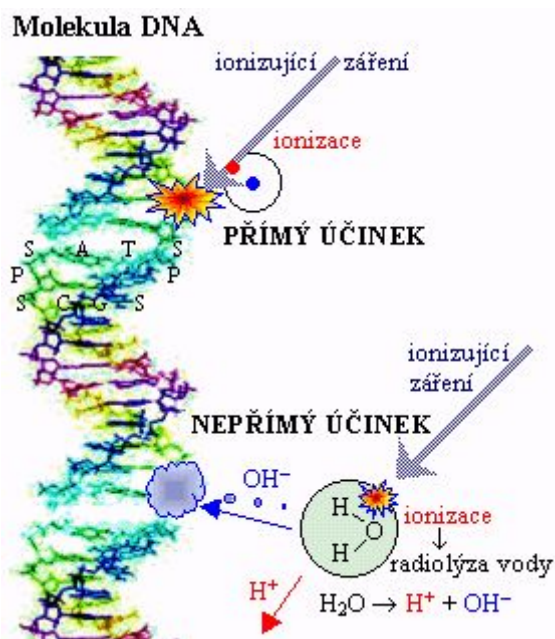
Při radioaktivitě se nerozpadne celá zásoba daného izotopu najednou, ale ubývá postupně. Rychlost, jakou se toto děje, měříme pomocí tzv. **poločasu rozpadu**. Tato veličina vyjadřuje, za jak dlouho se rozpadne přesně polovina nějakého množství daného izotopu. Za dobu odpovídající dvěma poločasům rozpadu už zbude jen čtvrtina původního množství, po třech poločasech jen osmina, a tak dále. Nutno poznamenat, že poločas rozpadu se může velice různit (od  $10^{-23}$  sekundy až po dobu mnohonásobně převyšující stáří vesmíru).

Úkol: Na začátku mám 16 000 000 atomů izotopu  $^{15}\text{O}$ , kyslíku, který má jen šest neutronů v jádře. Tento nuklid prochází beta přeměnou s poločasem rozpadu skoro přesně 2 minuty. Dokážete spočítat:

- Kolik atomů tohoto nuklidu mi zbude po 2 minutách? A po 4 minutách?
- Za jak dlouho asi mi zbude 1 milion atomů?
- Za jak dlouho mi zbude 1 tisíc atomů?
- Za jak dlouho mi zbude přesně jeden atom?
- A co se stane pak?

## Účinky ionizujícího záření

Radioaktivita není vidět! Přesto může být nebezpečná i smrtící. Lidská intuice vzhledem k záření selhává - a tak je jen těžké si představit, kdy hrozí velké riziko a kdy o nic nejde. Pomůže fyzika: měření ionizujícího záření a znalost bezpečných limitů.



Když částice prochází nějakým prostředím (např. lidským tělem), postupně zpomaluje a vytrhává elektrony z obalu atomů. Její počáteční pohybová (kinetická) energie se spotřebovává na překonání sil, které elektrony v atomu drží.

V druhé fázi atomy s chybějícím elektronem (tedy ionty!) putují prostředím a dále narušují molekuly - rozbíjejí je na volné radikály - nebezpečně reaktivní chemické částice. V případě lidské buňky jsou postiženy zejména molekuly vody (které představují většinu hmoty).

K opravdovému průšvihů dochází ve chvíli, kdy některý z radikálů nebo iontů zinteraguje s šroubovicí DNA. Může se stát hned několik věcí (velmi zjednodušeně):

- Přetržení jednoho vlákna dvojšroubovice. To většinou buňka umí opravit.

- Přetržení obou vláken současně nebo postupně blízko sebe. To je většinou nevratné.
- Poškození (nebo následná oprava), při kterém se změní některá z bází. To je mutace.

Buňka s rozbitou DNA se nemůže množit a umírá. Zmutovaná buňka může a nemusí být životaschopná - z dlouhodobého hlediska ale může být nebezpečná.

Z hlediska biologických účinků tak rozlišujeme dva druhy:

- Časné účinky jsou důsledkem toho, že tělo potřebuje (jeho různé části různě často) neustále buňky obnovovat, přitom je jich v dané chvíli nedostatek. Také odumřelé buňky ve větším množství představují pro tělo zátěž. V důsledky toho mohou selhat orgány (zejména krevní oběh a střeva).
- Pozdní účinky souvisí s mutacemi. Ty se obvykle hned neprojeví. Ale po několika letech či desítkách let mohou zvýšit riziko rakoviny - byť se nedá říci, jestli za každý konkrétní případ může ozáření nebo ne, protože mutace vznikají spontánně či vlivem chemických látek. Statisticky ovšem efekt vidět je. Dodnes není vědecky prokázáno, jestli je z dlouhodobého hlediska zdravější být "ozářen málo" nebo nebyť ozářen vůbec.

## Měření účinku

Měření záření a jeho účinku je problematické. Pro nás jsou zajímavé následující veličiny:

**Aktivita** = počet jaderných přeměn za jednotku času. Jednotkou je becquerel (Bq). *[pro zajímavost: ve vašem těle dojde přibližně k 5000 radioaktivním přeměnám za sekundu]*

**Dávka** = množství energie předané jednotce hmotnosti prostředí. Jednotkou je gray (Gy).

**Dávkový ekvivalent** = zohledňuje to, že různé druhy záření mají při shodné dávce různý vliv na živou tkáň. Jinak ale vychází z dávky. Jednotkou je sievert (Sv).

Z krátkodobého hlediska znamená dávkový ekvivalent 1 Sv závažnou nemoc z ozáření, 10 Sv víceméně jistou smrt. Z dlouhodobého hlediska ekvivalent 1 Sv průměrný člověk nenasbírá ani za celý život, roční úhrny dávek se pohybují v jednotkách milisievertů (a zákony ani neumožňují legální způsob, jak nasbírat víc).

## Zdroje a použití záření

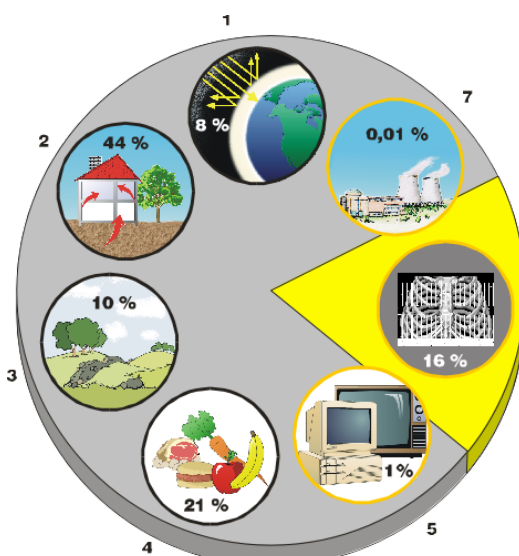
Ač se to nezdá, záření je všude kolem nás - ať už původu přirozeného, nebo v důsledku lidské činnosti.

Mezi přírodní zdroje patří hlavně:

- Kosmické záření (čím vyšší nadmořská výška, tím více)
- Záření z hornin
- Plynný radon v budovách (vdechovaný)
- Radioaktivní prvky přirozeně obsažené v jídle

Mezi umělé zdroje patří zejména:

- Medicína - vyšetření rentgenem, CT, ale i terapeutické ozáření
- Televize (netýká se LCD)

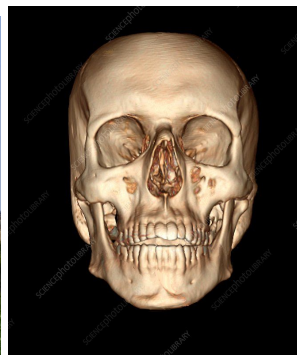
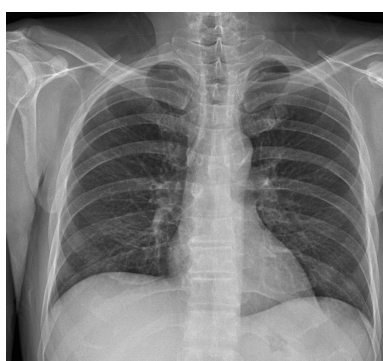


- Radioaktivní spad v důsledku jaderných havárií (Černobyl, Fukušima) a testů atomových zbraní (spíše dříve)

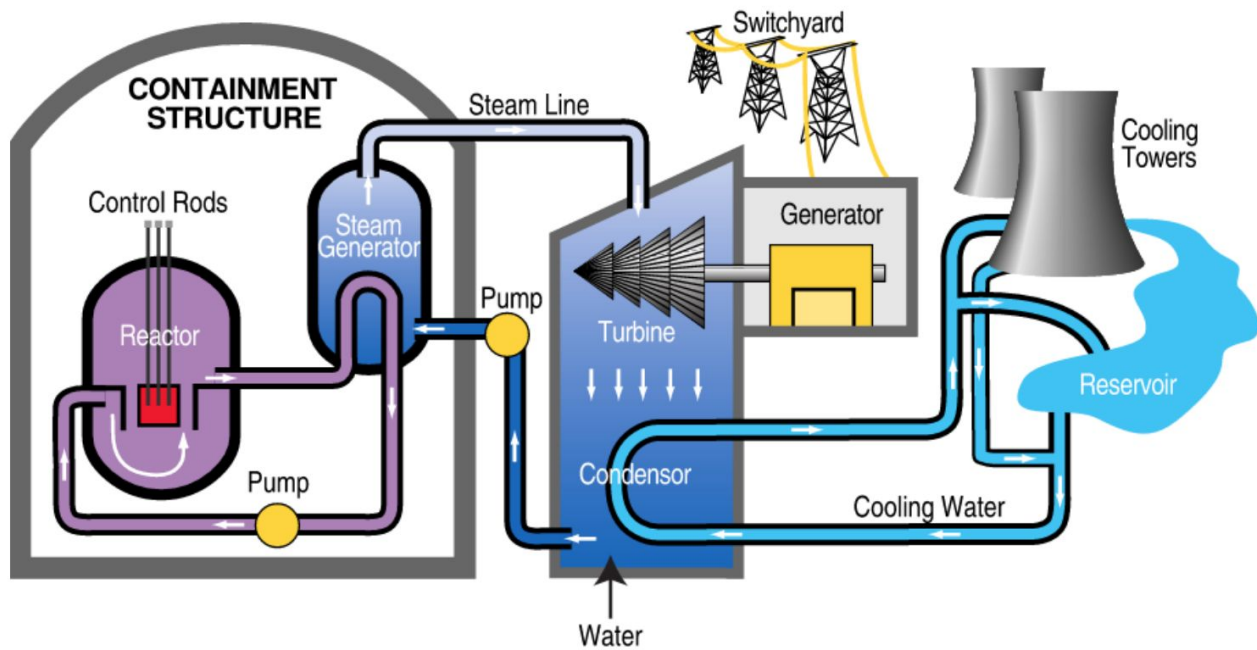
Létání letadlem nás přivádí do velmi vysokých výšek a vystavuje nás větším dávkám kosmického záření.

## Využití záření

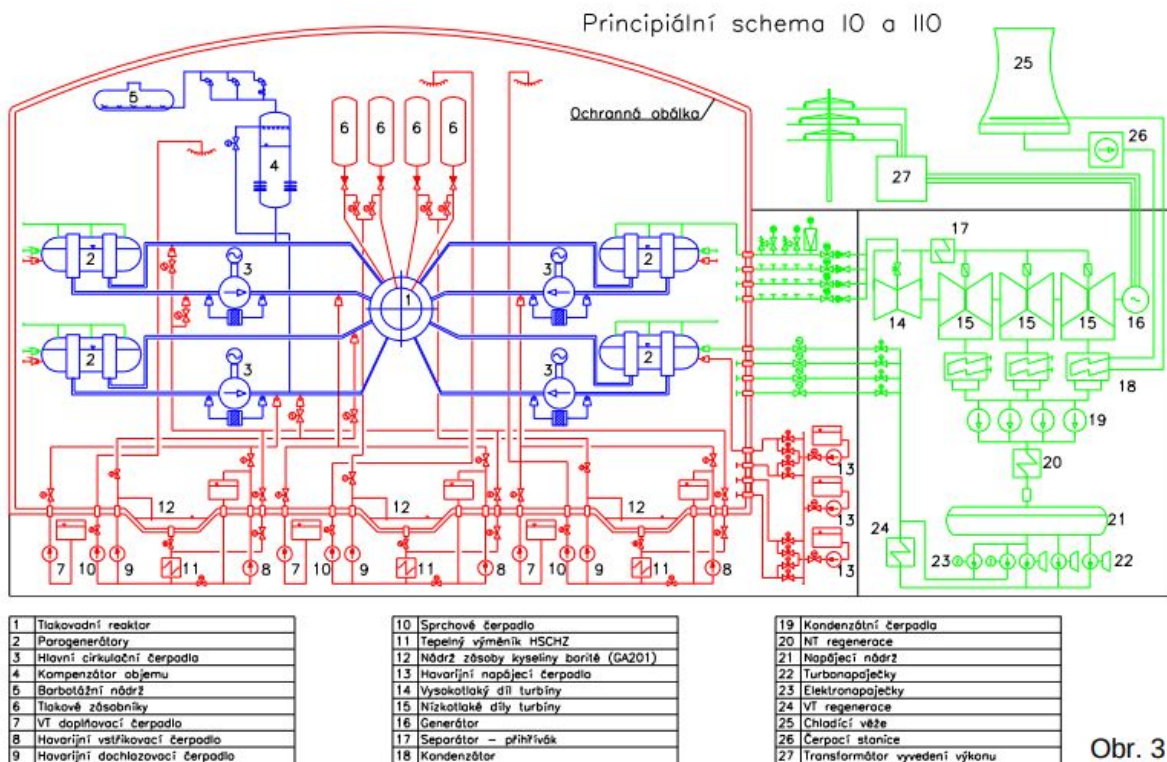
Otázka: Poznáte, co je na kterém obrázku?



# Jaderné elektrárny



Obr. 1.2.1-2 Technologické schéma JE Temelín



Obr. 3