

Radionuklidové metody

- ▶ Jsou založeny na studiu přirozené, respektive uměle vzbuzené radioaktivity hornin.
- ▶ Radiometrické metody využívají přirozenou radioaktivitu hornin při vyhledávacím průzkumu a při geologickém mapování.

Radionuklidové metody

Tato prezentace byla sestavena s využitím doporučené literatury:

Gruntorád J. a kol.: Principy metod užité geofyziky

a obrázků a textů z internetové učebnice:

Ullmann V.: Jaderná a radiační fyzika

<http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika0.htm>

Primární radionuklidy

- ▶ Jádra prakticky **všech prvků** Mendělejevovy tabulky, včetně těžkých jader až po transurany vznikají při termonukleárních reakcích v nitru hvězd a při výbuchu supernovy.
- ▶ Pro další vývoj se ovšem zachovají pouze **stabilní jádra** a z radioaktivních pak ty, jejichž poločas radioaktivního rozpadu je **dostatečně dlouhý**, větší než cca 10^8 let.
- ▶ Nestabilní jádra s kratším poločasem se za miliardy let po výbuchu naší "mateřské" supernovy již stačily **rozpadnout** (přeměnit na jiná, stabilní jádra).
- ▶ Z radioaktivních jader se zachovaly tzv. **primární radionuklidy** (jako je ^{40}K , ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$), i když jejich množství je nižší než na počátku.

Radionuklidové metody

Linie stability jader končí u vizmutu ^{209}Bi s 83 protony a 126 neutrony. Všechna těžší jádra (oblast uranů a transuranů) jsou již radioaktivní.

O stabilitě a nestabilitě jader rozhoduje:

- počet protonů a neutronů

1:1 pro lehká jádra

1:1,5 pro těžká jádra

Magická čísla – celkový počet protonů nebo neutronů 2,8,20,28,50,82,126

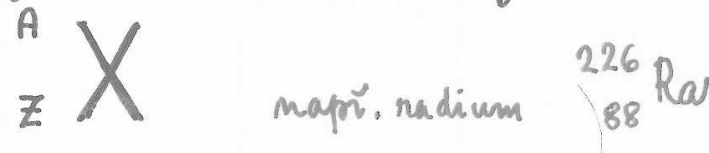
Dvojnáspně magická jádra H, He, Pb

- vazebná energie jádra.

Radionuklidové metody - využívají přeměny jader atomů, jaderného záření, působení jaderného záření na hmotu



Prvky a izotopy označujeme symbolem



kde A je hmotnostní číslo (atomic weight) dané součtem protonů a neutronů v jádře

Z je atomové číslo (atomic number) rovné počtu protonů v jádře

X je chemický symbol prvku

Izotopy prvků mají stejný počet protonů v jádře, ale různý počet neutronů.

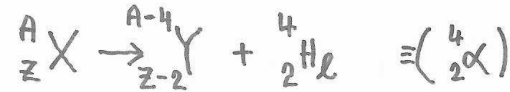
* $Z > 83$

Jádra některých prvků (izotopů) se samovolně rozpadají, přičemž proces rozpadu je doprovázen emisí částic a kvant energie \equiv radioaktivní záření

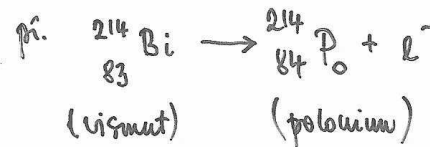
Spontánní přeměny atomových jader

Základní typy spontánních přeměn atomových jader:

PŘEMĚNA α (emise α částice)

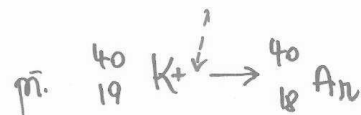
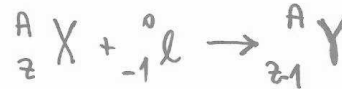


PŘEMĚNA β (emise elektronu)



" neutron v jádře se přemění na proton a elektron nijde o elektron z. el. obalu!"

ZACHYT ELEKTRONU (K - zachyt)



" zachycený elektron K slupky a proton jádra vytvoří neutron "

A = Hmotnostní číslo, součet protonů a neutronů v jádře atomu

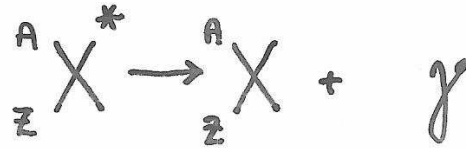
Z = Atomové číslo, počet protonů v jádře

* Antineutrino je částice zavedená kvůli symetrii s neutrinem. Antineutrino nemá náboj ani klidovou hmotu ale svoji energii a hybnost kompenzuje přeměnou β .

Přeměna β může být doprovázena emisí pozitronu a neutrina. Rovnice přeměny se změní! Pr. ${}^{64}_{29} \text{Cu} \rightarrow {}^{64}_{28} \text{Ni} + e^+ + \nu$

Spontánní přeměny atomových jader

Přeměna gama - excitované jádro* se vrací do základního stavu, při tom dojde k vyzařování γ kvanta



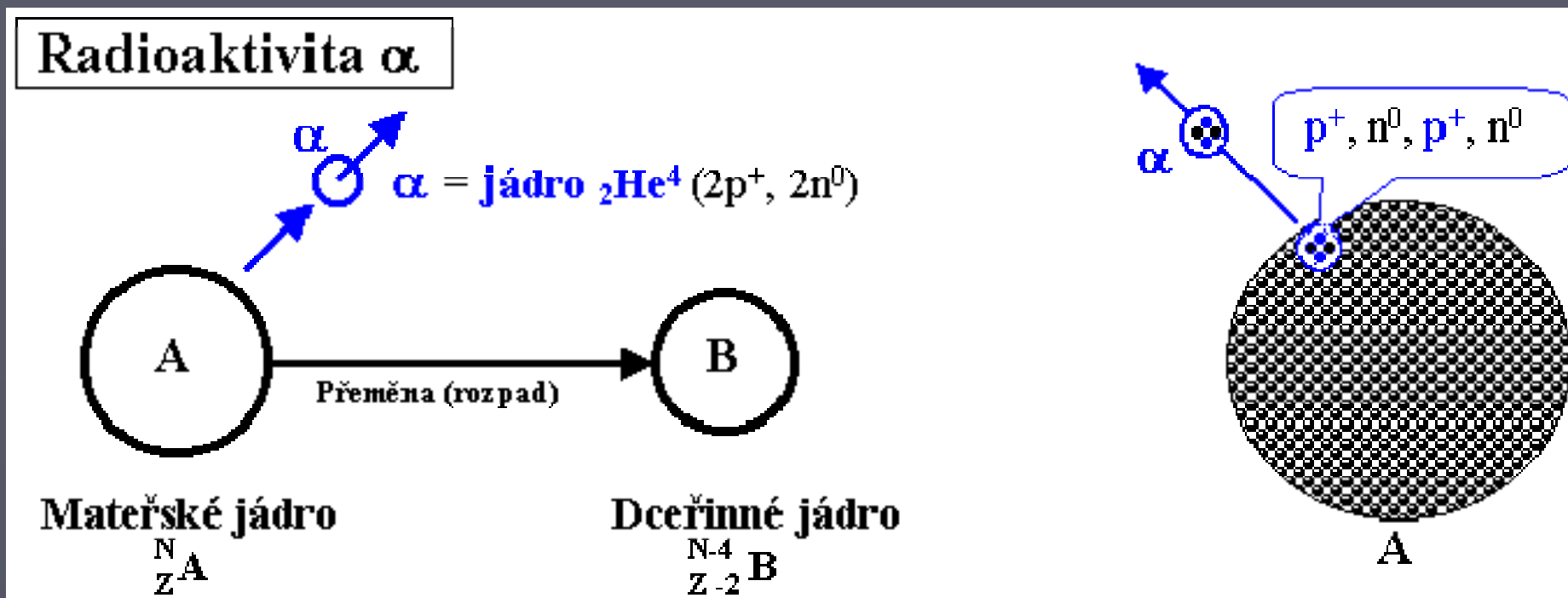
Nedochází k žádné transmutaci (nemění se Z)

Přeměna gama často doprovází přeměny α a β v rozpadových řadách

Jádro může být excitováno fotonem, bombardováním jinými částicemi nebo vzniklo v excitovaném stavu jako produkt jaderné přeměny.

Radioaktivita alfa

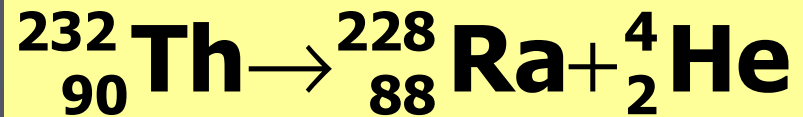
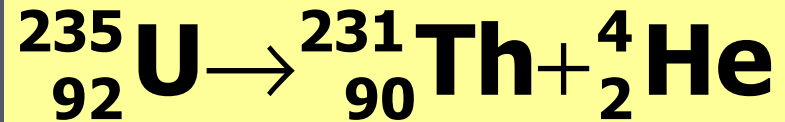
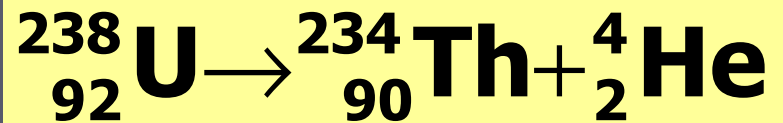
Při této jaderné přeměně se vyzařuje **částice alfa**, která je **jádrem hélia** - obsahuje tedy 2 protony a 2 neutrony.



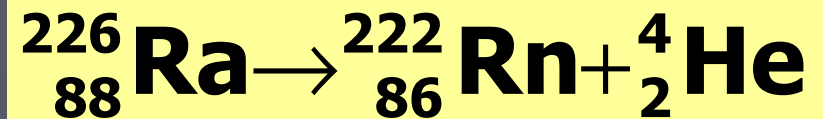
Těžké jádro s více než 210 nukleony je již tak velké, že celkové přitažlivé pole silných interakcí, díky svému krátkému dosahu, již nepůsobí dostatečně silně v periferních oblastech jádra. Nestáčí dostatečně vyrovnat vzájemné odpuzování protonů, které má dlouhý dosah (klesá se čtvercem vzdálenosti). Toho využijí některé nukleony, které se uskupí tak, že 2 protony a 2 neutrony vytvoří alfa částici, která pak tzv. **tunelovým efektem** překoná potenciálovou bariéru vazbové energie jádra a vyletí ven jakožto částice alfa.

Radioaktivita alfa - příklady

alfa přeměna přírodních radionuklidů



alfa přeměna radia na plyný radon

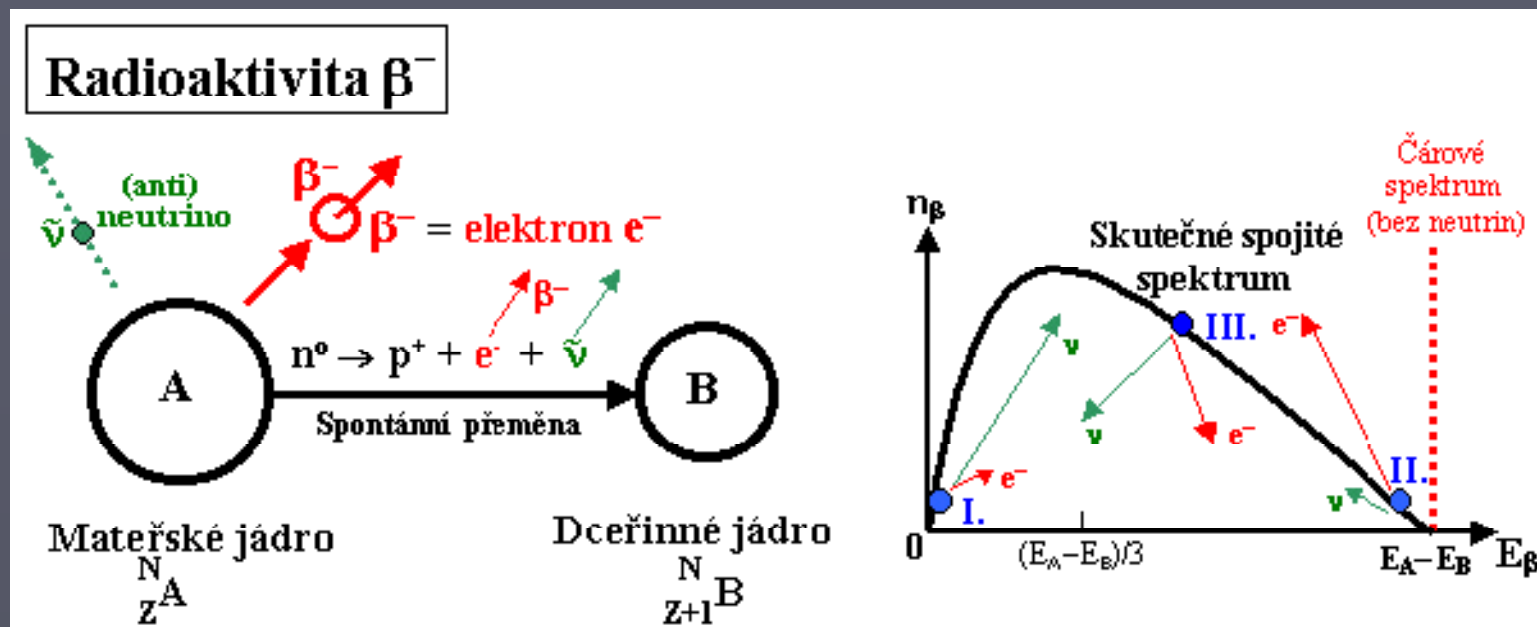


Radioaktivita beta-

Radioaktivita beta je nejčastějším a nejdůležitějším druhem radioaktivity

Existují tři druhy radioaktivity beta :

1.



Při této jaderné přeměně je z mateřského jádra vysokou rychlostí emitována **částice beta-**, což není nic jiného než obyčejný **elektron e⁻**, stejný jako je v atomovém obalu.

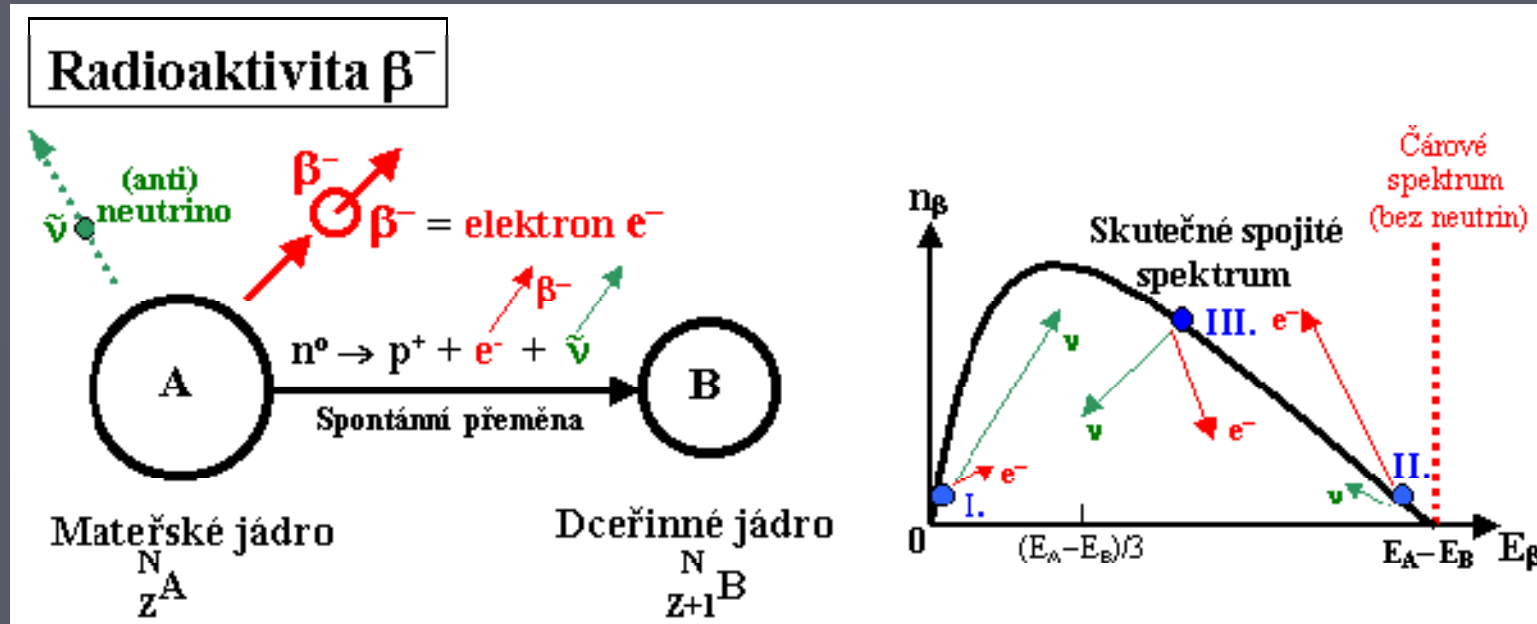
Radioaktivita beta- se vyskytuje u jader s **přebytkem neutronů**

Některý "nadbytečný" neutron se transformuje na proton.

Proton zůstává v jádře vázán silnou interakcí, zatímco elektron vyletí velkou rychlostí ven z jádra jako záření beta- (odnáší rozdíl energií mezi jádry A a B).

Radioaktivita beta-

1

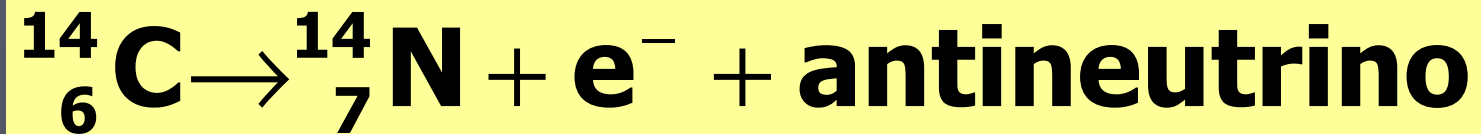
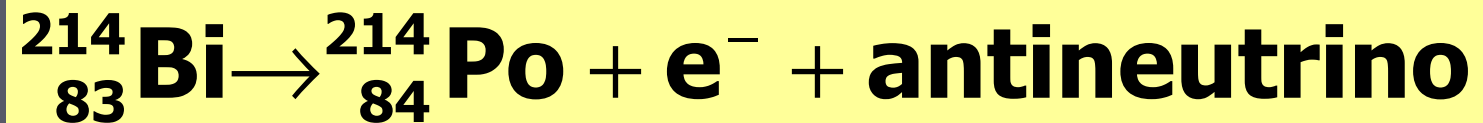


Elektron by měl odnášet rozdíl energií mezi mateřským a dceřinným jádrem, spektrum by mělo být čárové. Skutečně změřené spektrum je však spojité a u této energie končí.

Kromě elektronu vylétá z jádra současně ještě **další** velmi lehká a elektricky neutrální částice - **antineutrino**, která **odnese** patřičnou kinetickou energii, o niž se "podělí" s vylétajícím elektronem, v souladu se zákonem zachování.

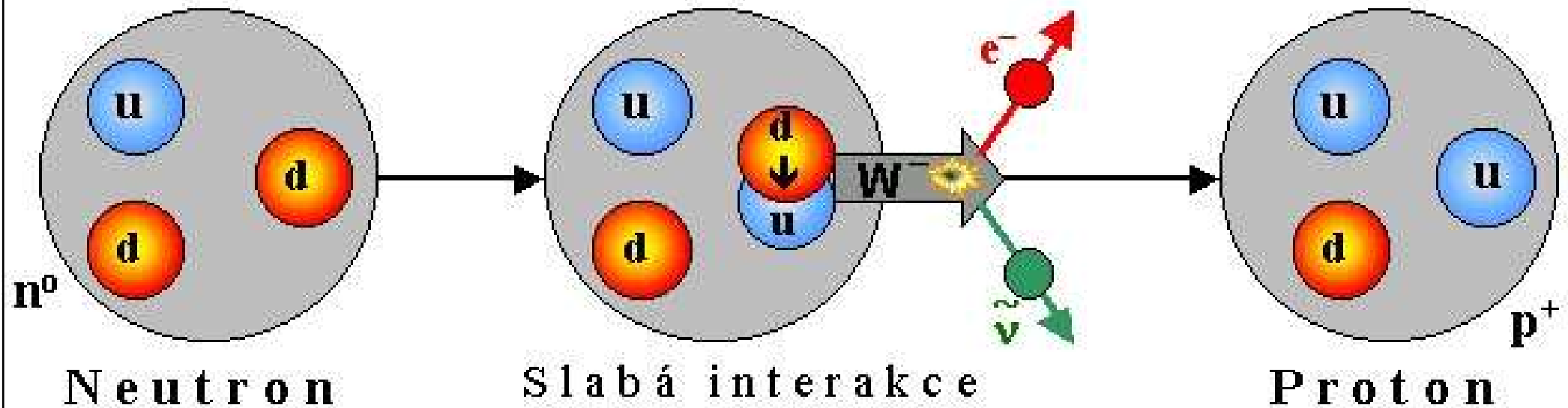
Italský fyzik Enrico Fermi připodobnil tuto podivnou částici k jakémusi malému "neutronku" (je maličká a neutrální) - italsky **neutrino**. Zde se jedná o antičástici.

Radioaktivita beta- příklady



Rozpad neutronu podle standardního modelu elementárních částic

Beta⁻ - rozpad neutronu: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$



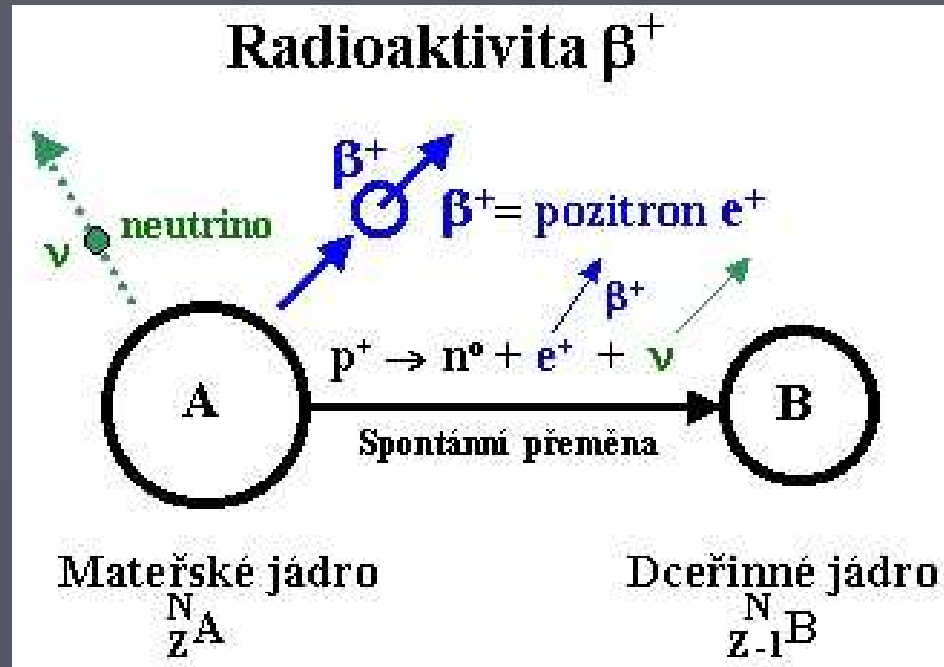
Neutron se skládá z kvarků **u-d-d**; kvark **u** má náboj $+2/3$, kvarky **d** náboj $-1/3$.

Jeden z kvarků **d** se působením pole slabých interakcí přemění na kvark **u** za zprostředkování virtuálního intermediálního bosonu **W⁻**, jež odnáší náboj -1 .

Z virtuálního bosonu **W⁻** vzápětí vznikají elektron a antineutrino, které se rozletají různými směry. Výsledkem přeměny je proton skládající se z kvarků **u-u-d**.

Radioaktivita beta+

Druhým druhem radioaktivity beta je **radioaktivita β^+**



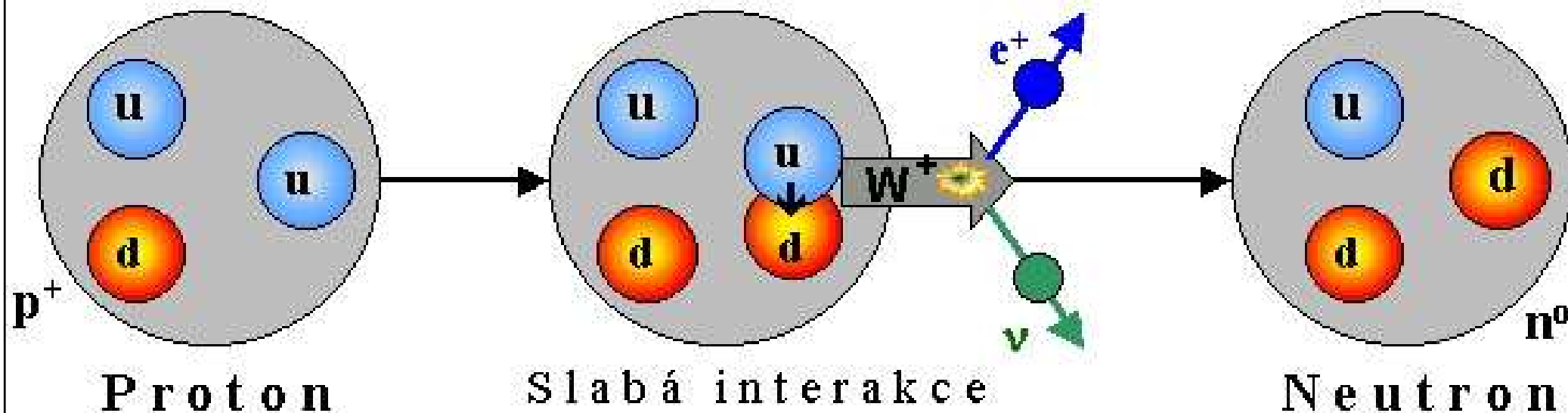
Při této jaderné přeměně je jádrem emitován pozitron (částice β^+) což je antičástice k elektronu.

Radioaktivita β^+ se vyskytuje u radionuklidů v nichž protony převládají nad neutrony (tzv. neutron-deficitní jádra).

Některý z "nadbytečných" protonů se transformuje na neutron. Neutron zůstává v jádře vázán silnou interakcí, zatímco pozitron vyletí velkou rychlostí ven z jádra jako částice β^+ .

Přeměna protonu podle standardního modelu elementárních částic

Beta⁺ - přeměna protonu : $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu$

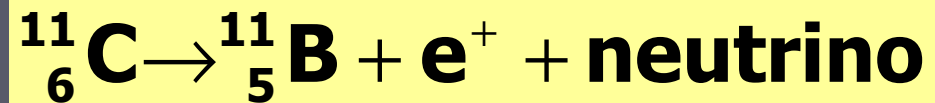


Proton se skládá z kvarků **u-u-d**; kvarky **u** mají náboj +2/3, kvark **d** náboj -1/3.

Při přeměně β^+ se proton vlivem transmutace kvarku **u** na kvark **d** za zprostředkování intermediálního bosonu W^+ přemění na neutron, pozitron e^+ a neutrino.

Radioaktivita beta+ příklady

Pozitronová přeměna uhlíku na bór



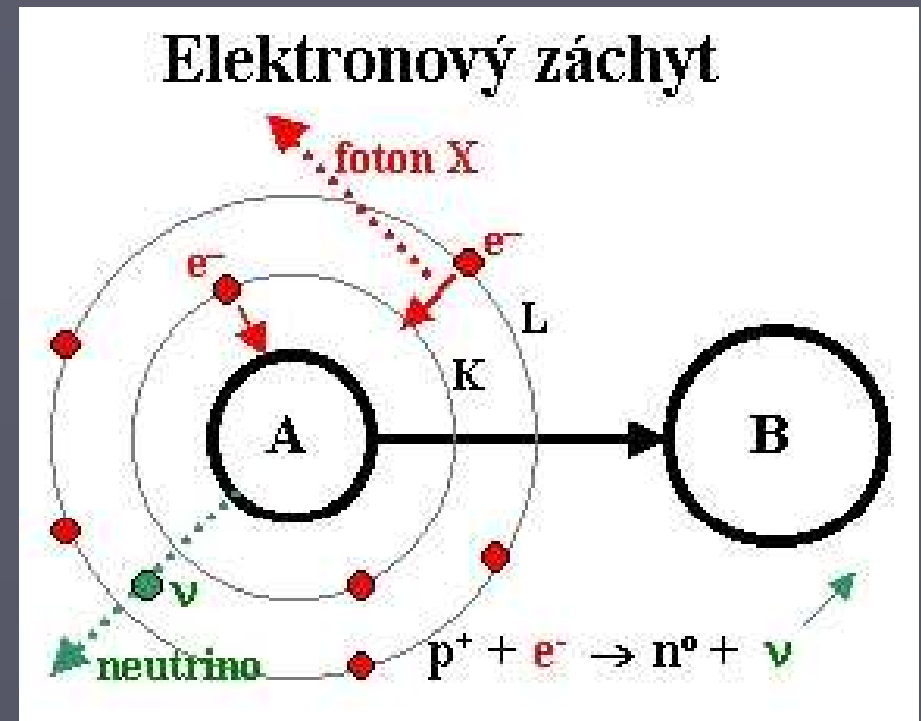
Pozitronová přeměna fluóru na kyslík



Radioaktivita beta - elektronový záchyt

Třetím druhem radioaktivity beta je **elektronový záchyt**.

Elektronový záchyt je vlastně "konkurenčním" procesem k rozpadu β^+ .



"Přebytečný" proton se transformuje na neutron tak, že k tomu využije zachycený **elektron z K slupky** elektronového obalu atomu. Na uprázdněné místo po elektronu na slupce K okamžitě přeskočí elektron z vyšší slupky (L) za vyzáření **charakteristického X-záření**.

Při elektronovém záchytu (EC - Electron Capture), se žádné korpuskulární záření z jádra nevysílá (pomineme-li nezachytitelná neutrino), energie se rozdělí na energii neutrino a vazbovou energii elektronu.

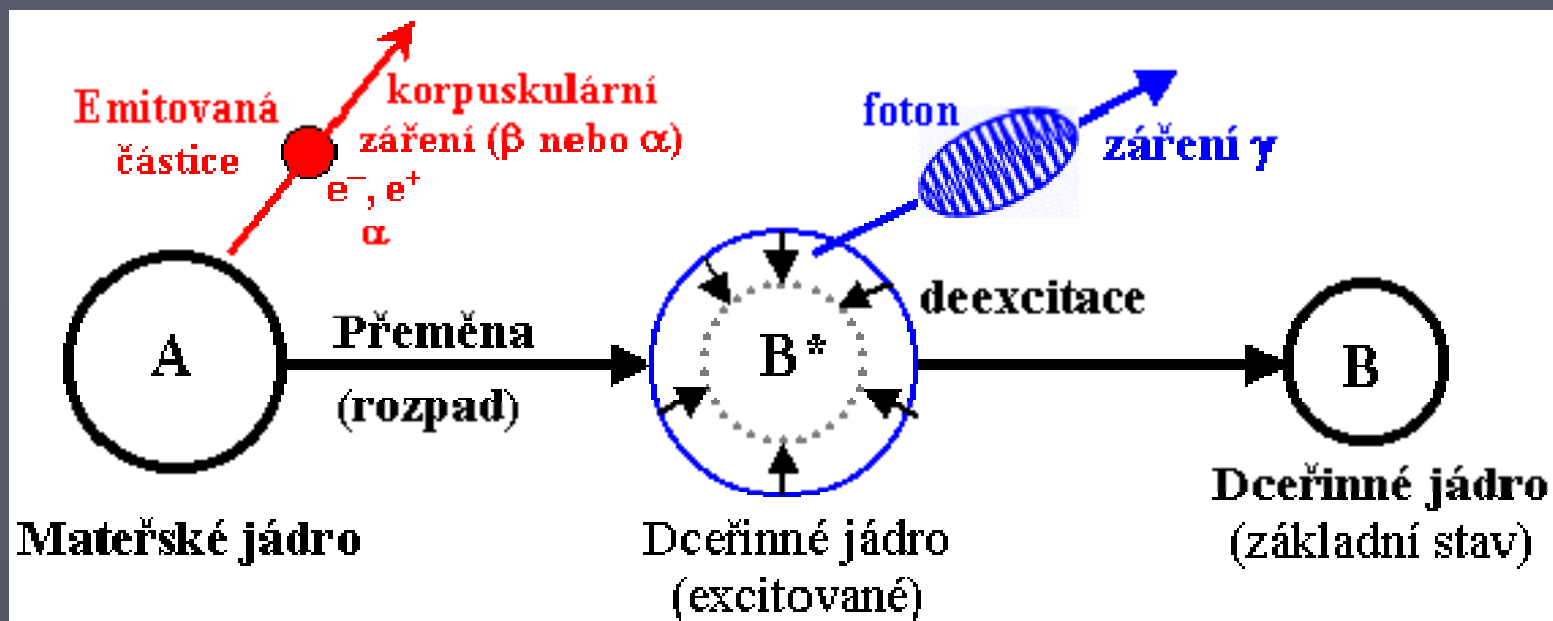
Radioaktivita beta - elektronový záchyt - příklad

Asi 11% draslíku ^{40}K se rozpadá elektronovým záchytem



Radioaktivita gama

Všimněme si chování dceřinného jádra bezprostředně po radioaktivní přeměně

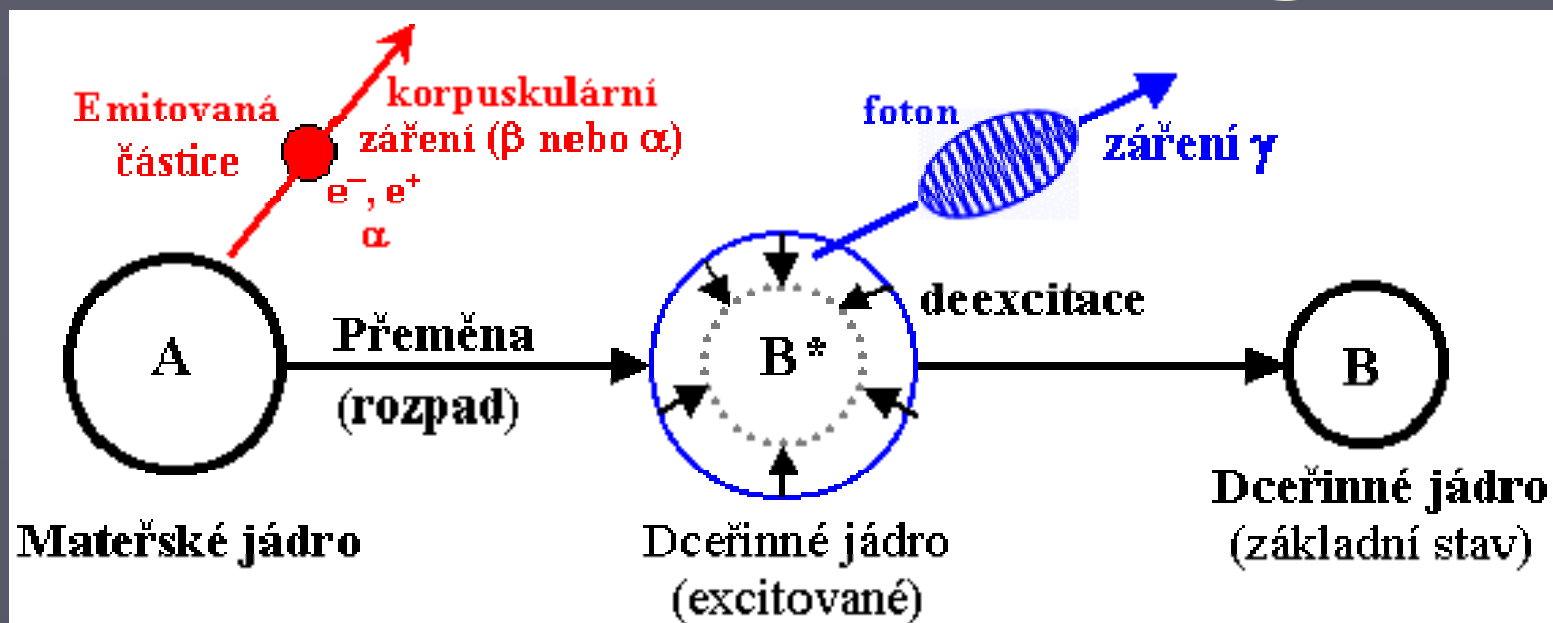


Dceřinné jádro B po radioaktivní přeměně vzniká většinou v energeticky excitovaném stavu B* tzn., že nukleony jsou od sebe více vzdálené.

Záření gama je vysokoenergetické elektromagnetické záření vznikající deexcitací vzbuzených hladin atomového jádra.

U radioaktivity se jedná o deexcitaci vzbuzených hladin dceřinného jádra vzniklého po radioaktivní přeměně.

Radioaktivita gama

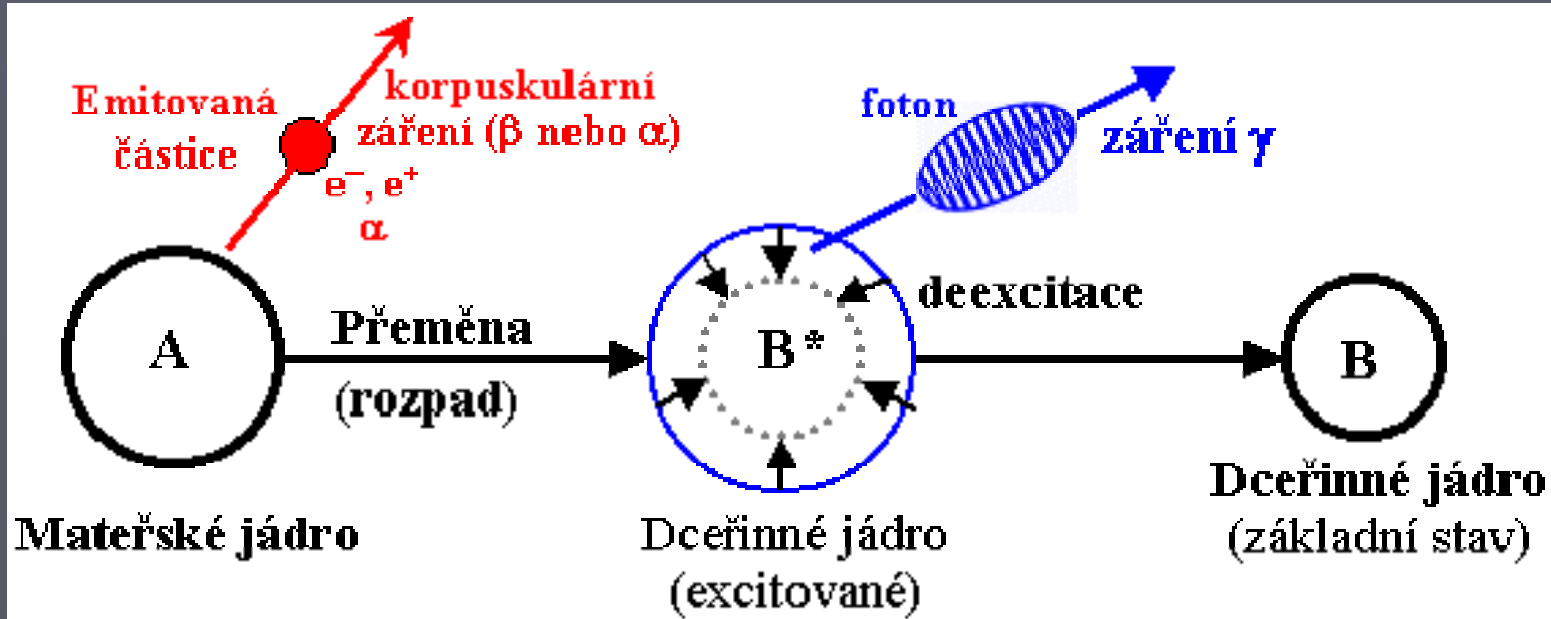


Ze uvedeného schématu plynou dvě důležité skutečnosti:

1. Záření gama je **časově následující** po emisi korpulárního záření při vlastní jaderné přeměně.
2. Většina radionuklidů jsou **zářiče smíšené** - buď alfa+gama nebo beta+gama. Čisté zářiče gama v přírodě neexistují!

Energetické hladiny atomového jádra jsou kvantované, takže **spektrum záření gama je čárové.**

Radioaktivita gama - příklad



Typickým příkladem je β - rozpad kobaltu ^{60}Co . Při vlastním β - rozpadu nejprve jádro kobaltu emituje beta částici - elektron a elektronové antineutrino, čímž se přemění na jádro niklu ^{60}Ni v excitovaném stavu:



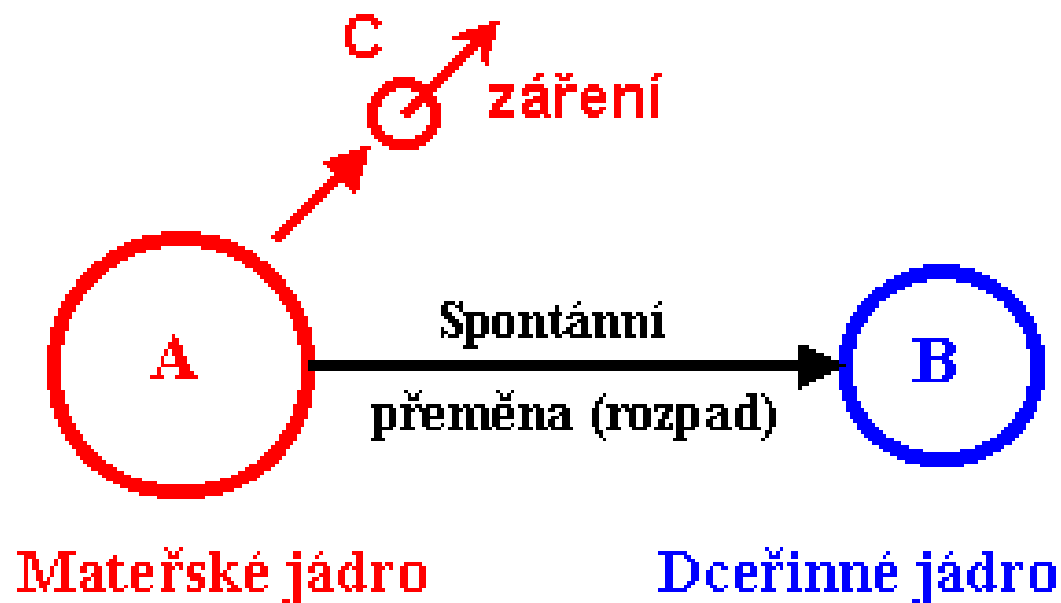
Toto nově vzniklé excitované jádro se potom zbaví přebytečné energie vyzářením kvanta gama:



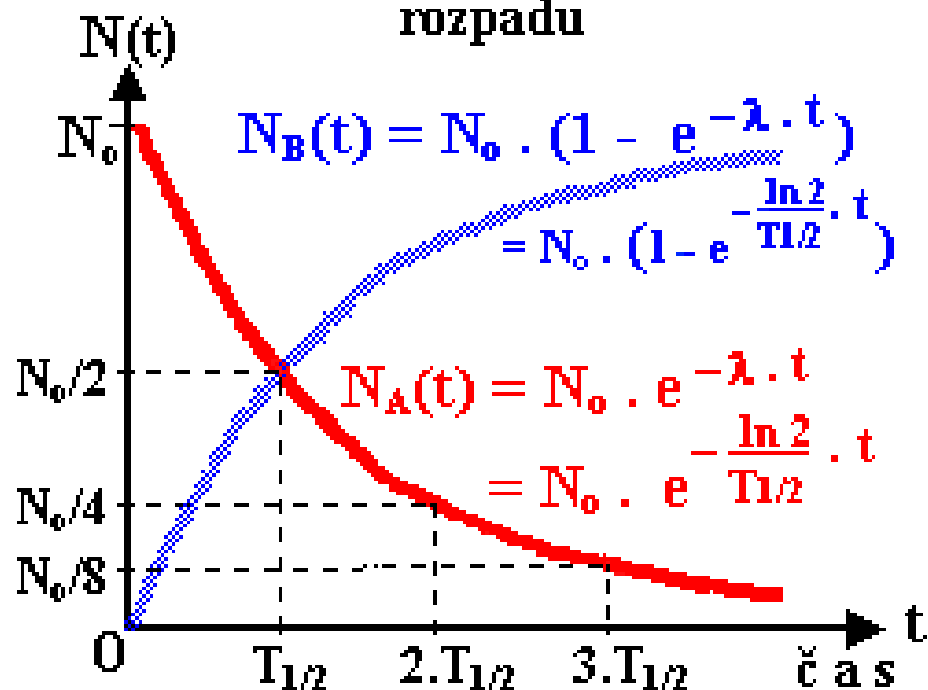
Dceřinný $^{60}\text{Ni}^*$ má dvě excitované hladiny, takže vyzářená kvanta gama zde mají energii buď 1173 keV nebo 1332 keV.

Zákon radioaktivního rozpadu

Radioaktivita



Exponenciální zákon radioaktivního rozpadu

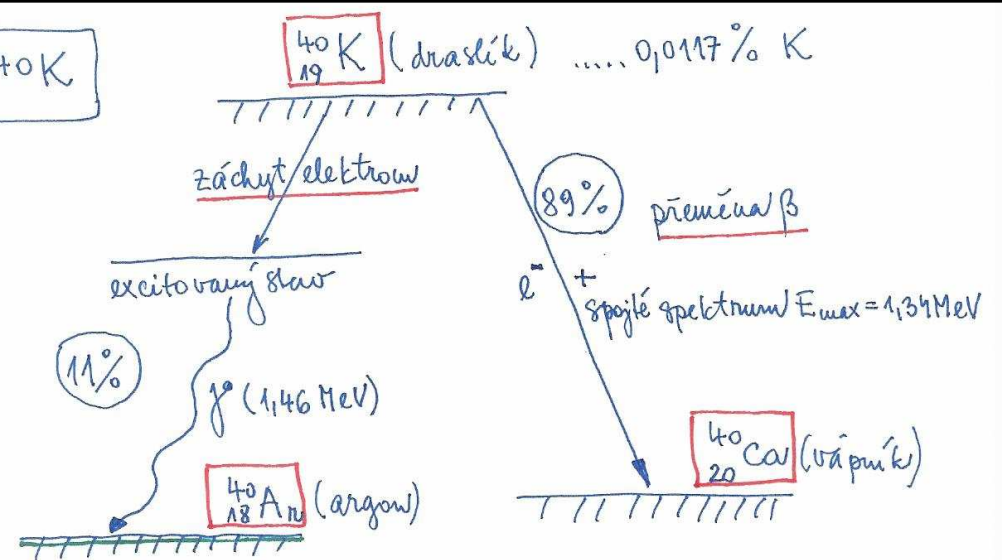


Zákon radioaktivního rozpadu

Zákon radioaktivního rozpadu je statistické povahy. Neříká nám, kdy dojde k přeměně jednotlivých jader, ale udává čas potřebný k rozpadu jisté části jader N analyzovaném vzorku.

Rozpad draslíku ^{40}K

Rozpad ^{40}K



$$\frac{d^{40}\text{K}}{dt} = \lambda_{\beta} \cdot ^{40}\text{K} \quad \text{pro přeměnu } \beta$$

$$\frac{d^{40}\text{K}}{dt} = \lambda_{ze} \cdot ^{40}\text{K} \quad \text{pro záchyt k elektronu}$$

Celkový rozpad draslíku ^{40}K

$$\frac{d^{40}\text{K}}{dt} = \underbrace{(\lambda_{\beta} + \lambda_{ze})}_{\lambda} \cdot ^{40}\text{K}$$

$$\lambda = \lambda_{\beta} + \lambda_{ze} = 4,962 \times 10^{-10} + 0,581 \times 10^{-10} = 5,543 \cdot 10^{-10} \text{ rok}^{-1}$$

$$T_{^{40}\text{K}} = 1,25 \cdot 10^9 \text{ roku}$$

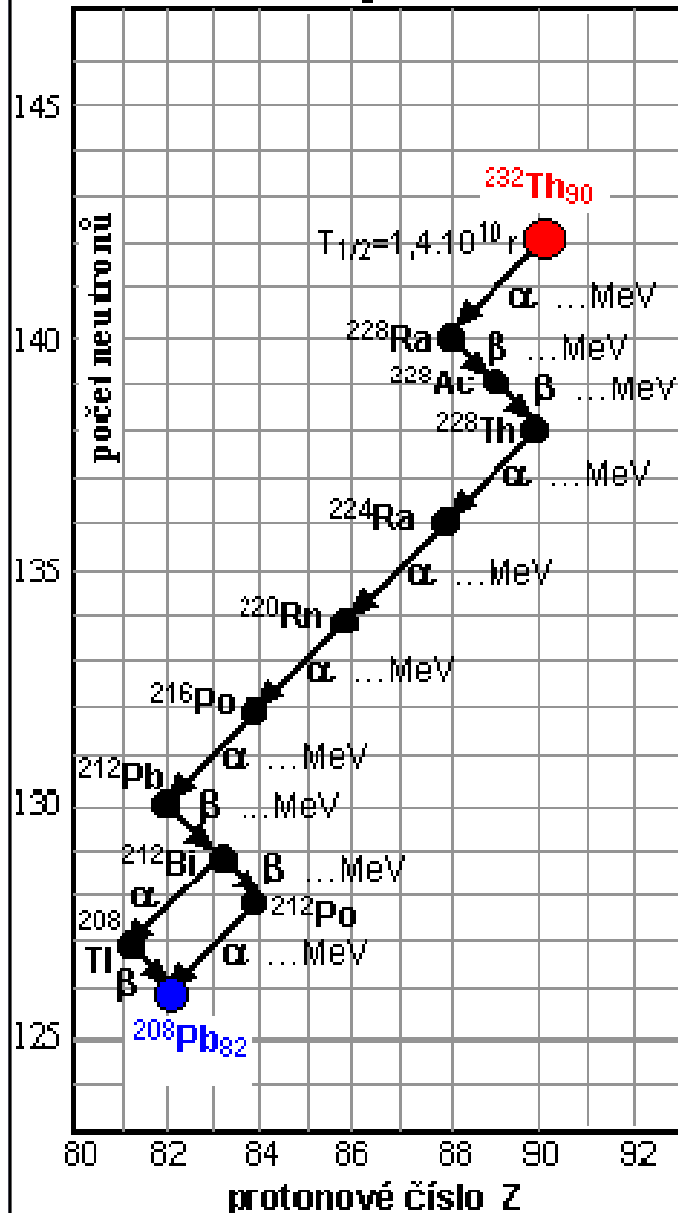
Přírodní radioaktivní rozpadové řady

- ▶ V přírodě existují tři radioaktivní rozpadové řady:
- ▶ rozpadová řada **thoria** ^{232}Th
- ▶ rozpadová řada **uranu** ^{238}U
- ▶ rozpadová řada **uranu** ^{235}U (tento druh uranu se ve starší literatuře někdy nazýval *aktinouran* a rozpadová řada *aktiniová*).

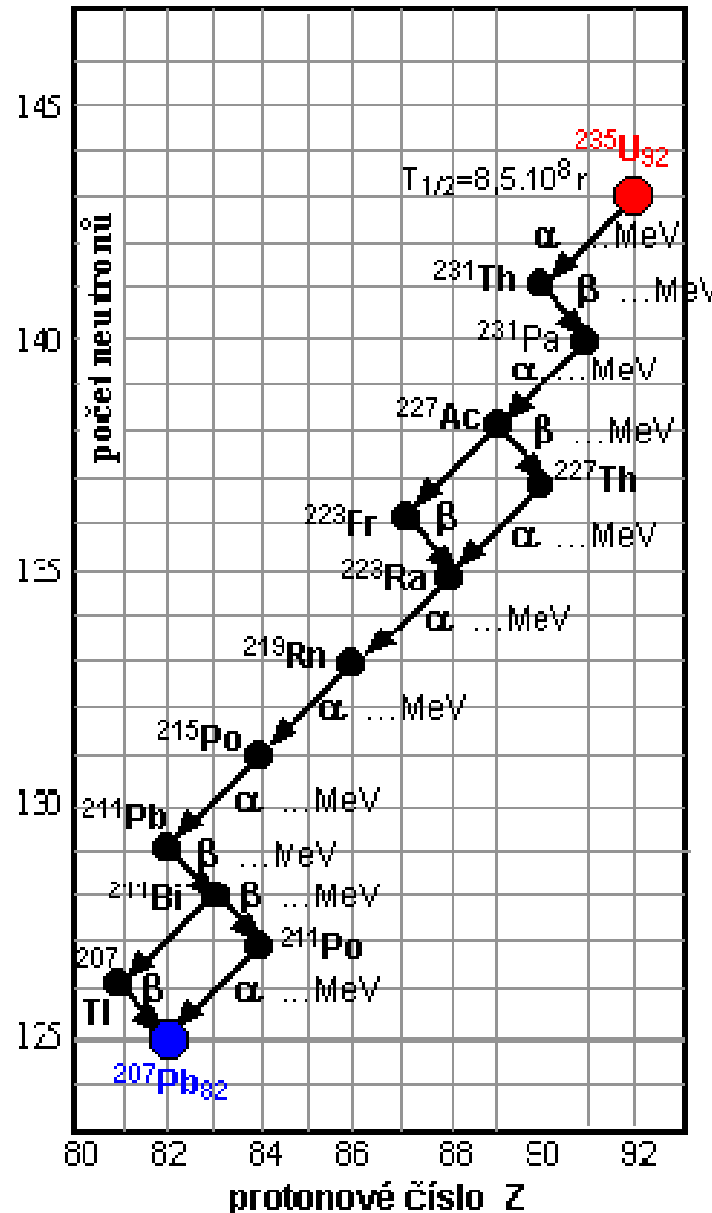
- ▶ mateřské nuklidy mají velmi dlouhé poločasy rozpadu
- ▶ rozpadové řady tvoří isotopy těžkých prvků vykazující většinou radioaktivitu alfa menší část beta-
- ▶ zhruba v polovině řady se vyskytují isotopy plynného **radonu**
- ▶ přírodní rozpadové řady končí stabilními isotopy **olova**

Přirozené rozpadové řady ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U

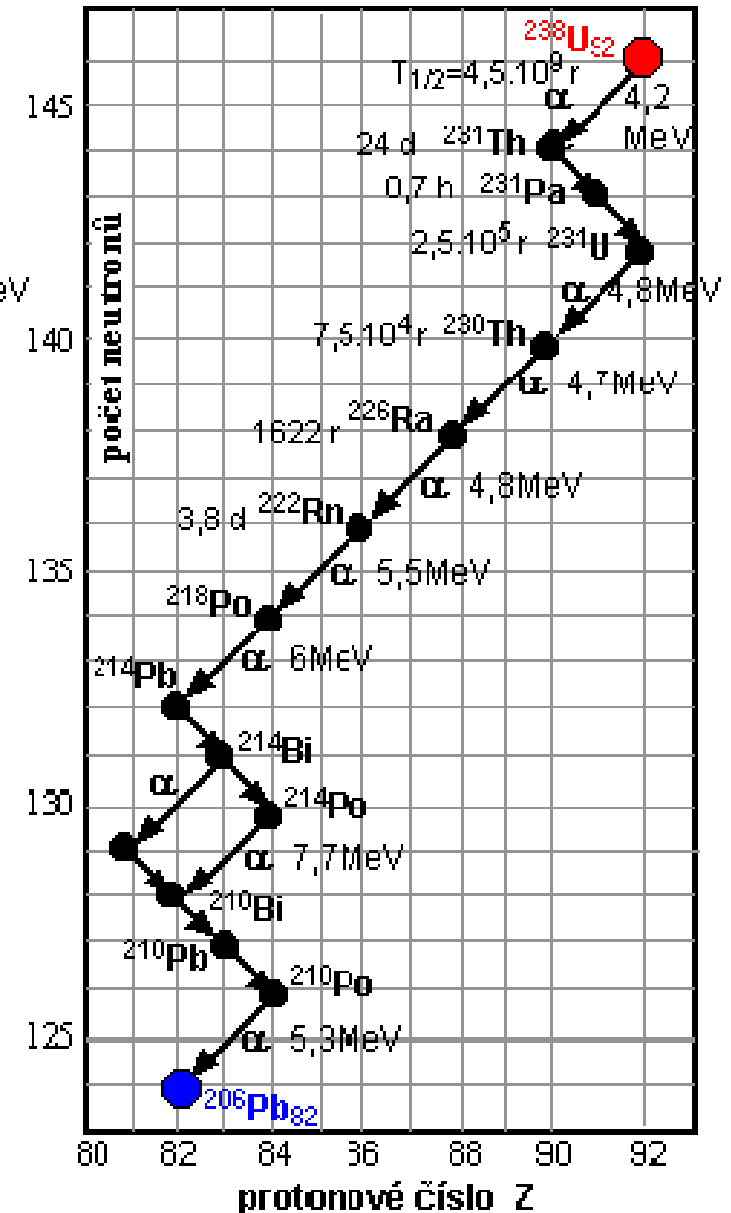
Thoriová rozpadová řada



Uranová řada ^{235}U



Uranová řada ^{238}U



Radioaktivní rovnováha

Znamená, že je udržován konstantní poměr aktivity mateřského a dceřiných radionuklidů. Podmínkou je velký poločas rozpadu primárního radionuklidu.

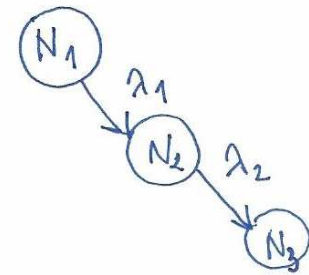
Aktivita preparátu, který obsahuje N radioakt. jader je:

$$A(\text{Bq}) = N \cdot \lambda = N \cdot \ln 2 / T$$

Uvažujeme dva členy nespojité řady:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$



Radioaktivní rovnováha:

$$0 = \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

obecně tedy $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n$

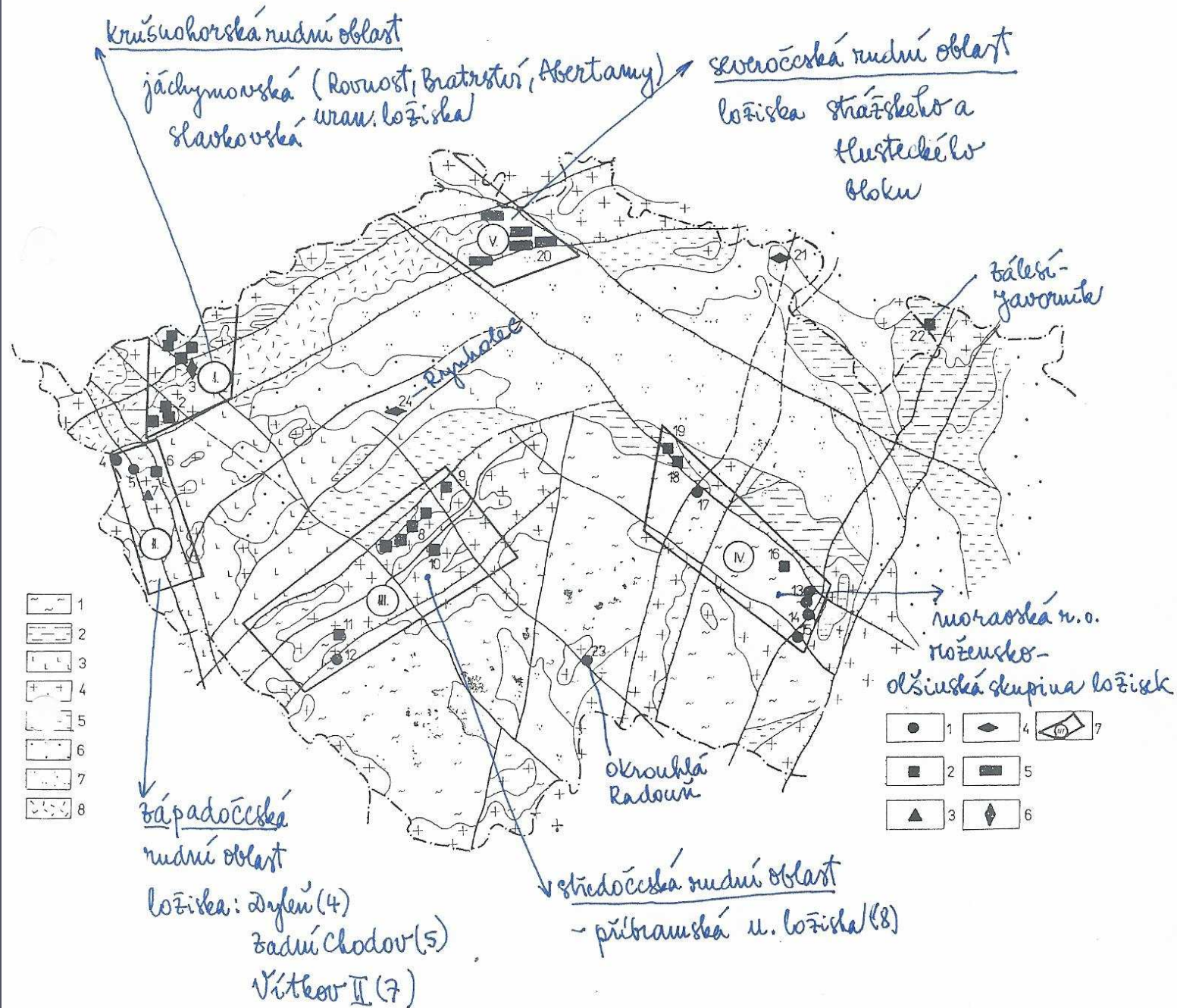
Př: Určíme poměr ^{238}U a ^{226}Ra za stanné rovnováhy [radium]

$$\lambda_U \cdot N_U = \lambda_{\text{Ra}} \cdot N_{\text{Ra}}$$

$$\frac{N_U}{N_{\text{Ra}}} = \frac{\lambda_{\text{Ra}}}{\lambda_U} = \frac{T_U}{T_{\text{Ra}}} = \frac{4.51 \cdot 10^9 \text{ a}}{1.622 \cdot 10^3 \text{ a}} = \frac{1}{3.6 \cdot 10^{-7}}$$

Uranové rudní oblasti a ložiska

Uranové rudní oblasti a ložiska



Vybraná data z historie těžby uranu

1858 - Jáchymov zahájí těžbu uranu pro sklářský průmysl

1896 - Henri Becquerel - objev radioaktivity uranu

1898 - manželé Pierre a Marie Curieovi z jáchymovského
řískali radium a polonium

1945 - národní podnik Jáchymovské doly/
koncem ČS. uranový průmysl se sídlem v Příbrami

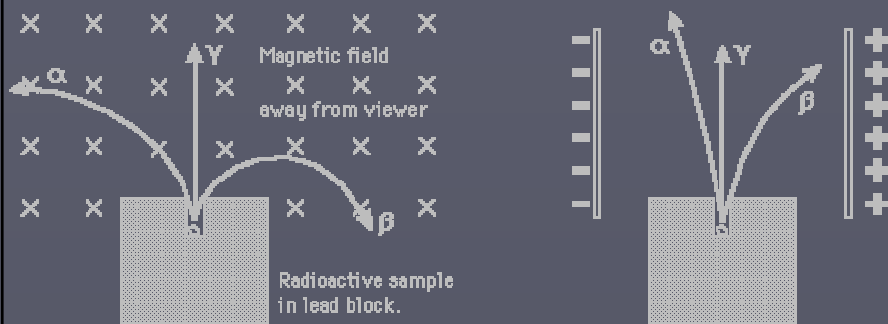
1946 - ložiska Horní Slavkov

1947 - ložiska v Příbrami

⋮

1963 - Haur na Jezeře

Jaderné záření



Jaderné záření

α ... záření alfa proud kladně nabitých částic, (heliová j) dva protony + dva neutrony

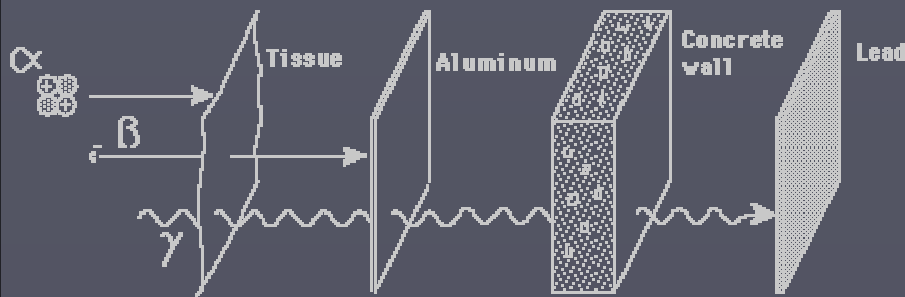
- počáteční rychlost $\sim 10^4$ km/s
- doběh ve vzduchu $\sim 10^{-2}$ m
- doběh v pevné látce $\sim 10^{-2}$ mm

Vysoká ionizační schopnost (až 10^4 páru na 10 mm dráhy)
Energie α částic je diskrétní a pro každý radionuklid charakteristická

β ... záření beta proud záporně nabitých elektronů

- pro 1 MeV
- rychlost $\sim 94\%$ rychlosti světla
 - doběh ve vzduchu ~ 4 m
 - ve vodě ~ 4 mm
 - v Al $\sim 2,4$ mm

Spektrum energie β částic je spojité, zdroje jsou charakterizovány maximální energií. Pohlcení β záření lze popsat exponenciální závislostí



γ ... záření je elektromagnetické povahy šíří se rychlostí světla a většinou doprovází záření α a β .

- doběh ve vzduchu ~ 700 m
- ve horninách ~ 1 km

(\bullet Pb ~ 5 cm)

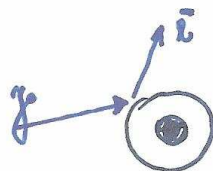
Má čárové spektrum, které nese informaci o energetických hladinách jádra.

γ kvanta emitují deexcitovaná jádra, která jsou v okamžiku vzniku v excitovaném stavu.

Jaderné záření a jeho interakce s hmotou

Interakce γ záření s hmotou

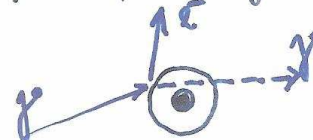
1) Fotoefekt:



γ kvantum předá celou svou energii atomu, dojde k vyražení elektronu z vnitřní elektronové slupky. Ten získá kinetickou energii $E_k = h\nu - I$
kde ν je frekvence γ záření
 h je Planckova konstanta
 I je ionizační energie slupky.

Fotoefekt je doprovázen charakteristickým rtg zářením

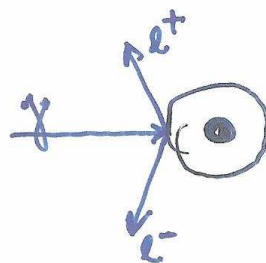
2) Comptonův jev: γ kvantum se "sráží" s elektronem,



čímž dojde k odchýlení γ kvanta a zmenšení jeho energie (větší se vlnová délka). Pod jiným úhlem je vyvrženo elektron

(Elektron získá maximální energii, pokud se γ kvantum odrazí do protisměru)

3) Tvoření páru elektron-positron



γ kvantum se přemění na dvě elementární částice elektron a pozitron. Proces je realizovatelný pokud je energie γ kvanta větší než součet klidových energií elektronu a pozitronu:

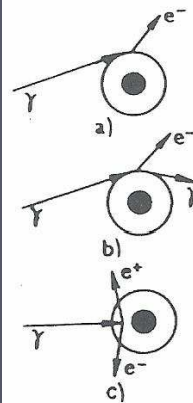
$$h \cdot \nu \geq 2 \cdot m_0 \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

↳ hmotnost elektronu rychlost světla

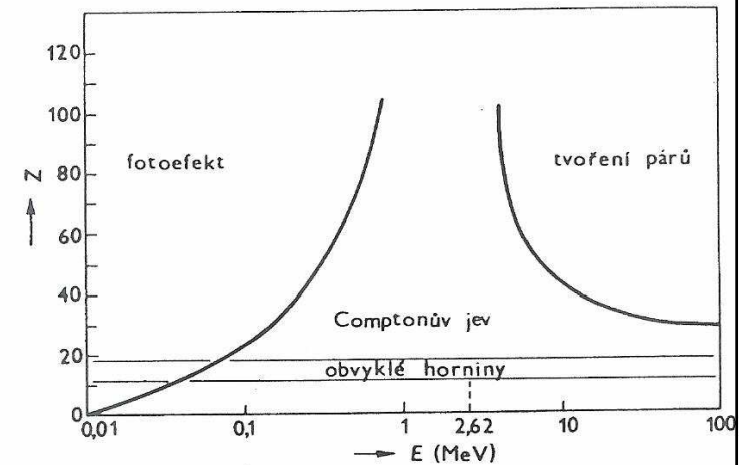
Jaderné záření a jeho interakce s hmotou

Energie záření přirozených rozpadových řad

Řada	α (MeV)	β (MeV)	γ (MeV)
^{238}U	4,169 až 5,301	do 3,200	do 2,446
^{235}U	4,372 až 7,423	do 1,440	do 0,890
^{232}Th	3,993 až 8,785	do 2,387	do 2,615



Obr. 117. Schéma fotoefektu (a), Comptonova rozptylu (b) a tvoření párů elektron – pozitron (c)



Obr. 118. Oblasti dominantní interakce záření γ -fotoefektem, Comptonovým jevem a tvořením párů elektron – pozitron
 Z – protonové číslo; E – energie záření

Tabulka 21
Označení neutronů podle jejich energie

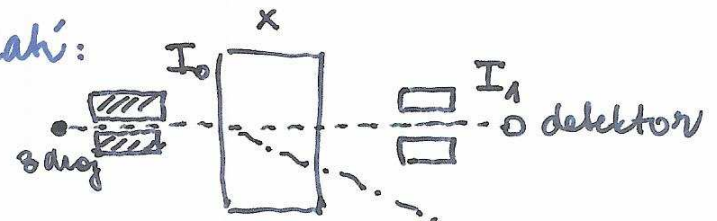
Název	Energie (eV)	Název	Energie (MeV)
chladné	} pomalé <0,002 0,002 až 0,5 0,5 až 1 000	rychlé	0,5 až 10
tepelné		vysokých energií	10 až 50
rezonanční		velmi vysokých energií	> 50
středních energií	(1 až 500) · 10 ³		

Jaderné záření a jeho interakce s hmotou

Následkem interakce γ záření s hmotou dochází k zeslabení intenzity γ záření.

Pro tlz. úzký svazek platí:

$$I_1 = I_0 e^{-\mu x}$$



kde μ je lineární součinitel zeslabení [m^{-1}]

μ závisí na energii záření, hustotě ρ a protonovém čísle absorbující látky.

$$\left[\mu = \begin{matrix} \epsilon_{\text{fotoefekt}} \\ \vdots \\ \epsilon_{\text{Compton. jv}} \\ \vdots \\ \epsilon_{\text{páry el. - poz.}} \end{matrix} + \right]$$

---> tlz. makroskopický účinný průřez

Radiometrické datování

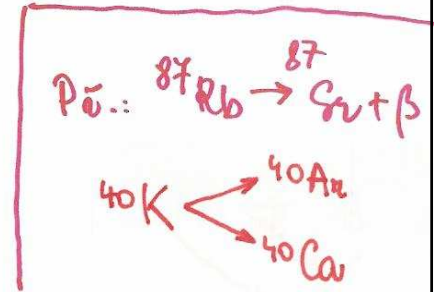
Radiometrické datování

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

pro počet D dceřiných atomů platí:

$$D = N_0 - N_t = N_t (e^{\lambda t} - 1)$$

odtud:
$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{D}{N_t} \right)$$



t z poměru mateřských (N_t) a dceřiných jader (D) můžeme při znalosti λ vypočítat čas (např. od doby krystalizace)

Radiouhlíkové datování:

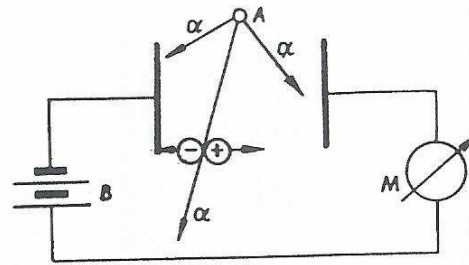
$$\frac{^{14}\text{C} \text{ (ve fosilním materiálu)}}{^{14}\text{C} \text{ (v podobném živém materiálu)}} = e^{-\lambda t}$$

$$T = 5700 \text{ roků} \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

Radioaktivní izotop uhlíku ^{14}C vzniká v atmosféře ($1,6 \text{ km}$) při bombardování ^{14}N kosmickým zářením.

Uhlík ^{14}C je přijímán rostlinami a živými organismy, jeho výměna = přenos se zastavuje smrtí organismu.

Scintilační detektor



Obr. 120. Měření radioaktivity ionizační komorou
A – zdroj záření; B – baterie; M – měřidlo

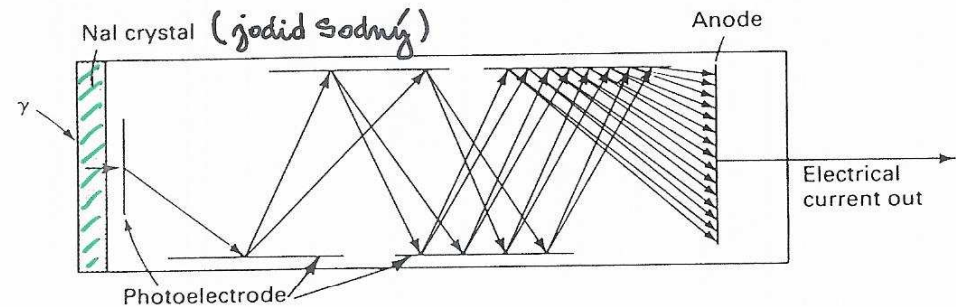


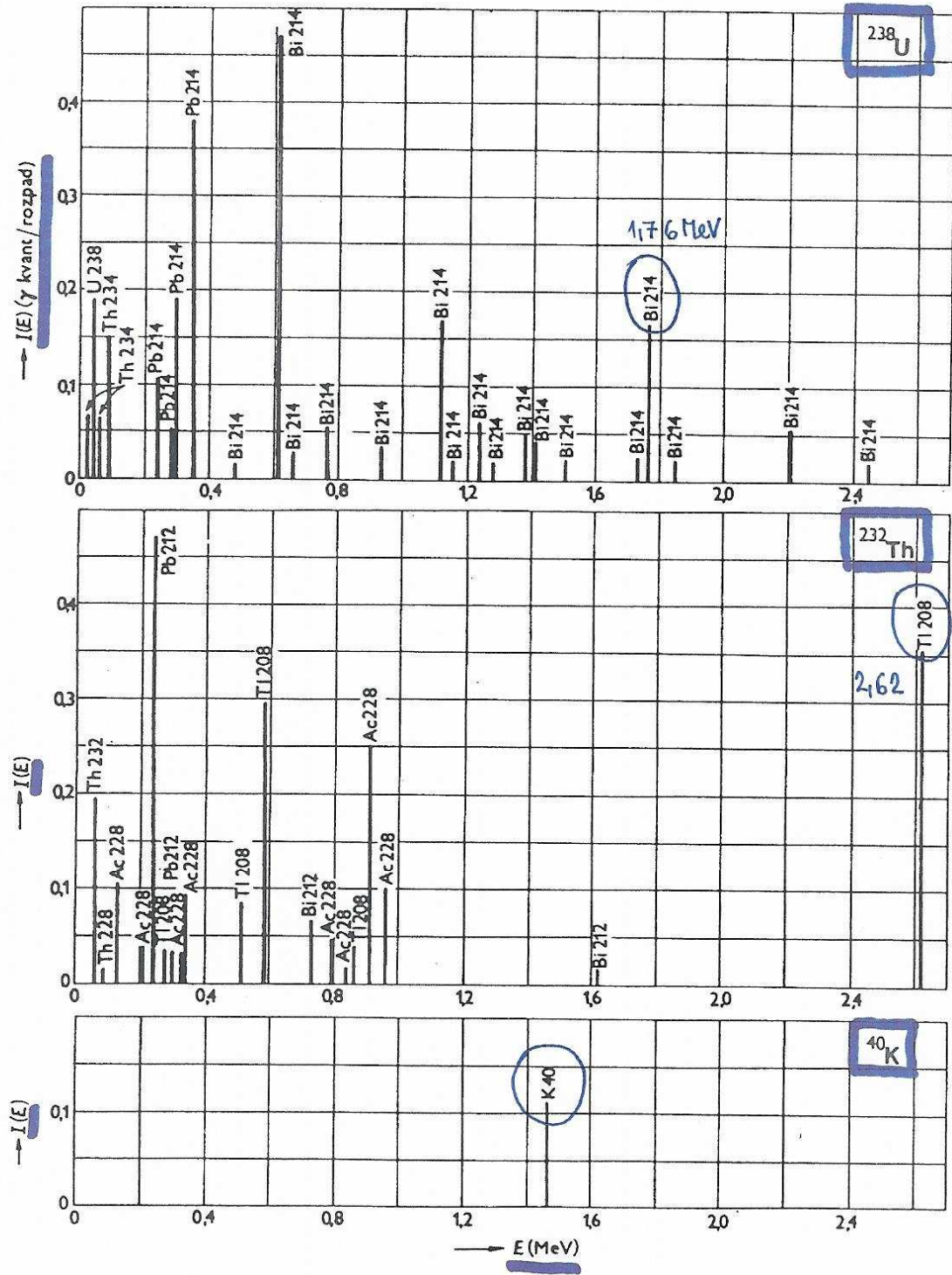
Figure 7.4 Schematic of a scintillation counter. An incident gamma ray on the scintillation crystal of NaI causes the crystal to emit a photon, which then causes the photoelectrode to emit electrons. The number of electrons is multiplied as each strikes a series of electrodes, finally being collected by an anode where the consequent current is proportional to the energy of the incident gamma ray.

- • Dopad radioakt. záření do scintilační látky vyvolá emisi fotonu (= scintilace)
- • Tyto fotony dopadají na katodu fotoúsoňce, odkud jsou emitovány elektrony
- • Počet elektronů se násobí sekundární emisí na pomocných elektrodách
- • Na anodě detekujeme napěťový puls, jehož amplituda je úměrná energii detekovaných částic.

Gama spektrometry



Spektra energií záření gama rozpadových řad uranu a draslíku



Obr. 143. Spektra energií záření γ rozpadových řad ^{238}U , ^{232}Th a draslíku ^{40}K (podle P. M. Kogana et al., 1969)

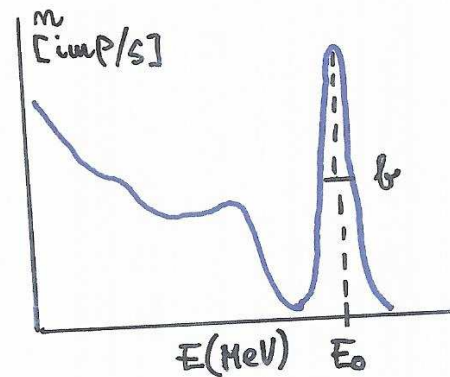
Účinnost detektoru

Účinnost detektoru: je poměr počtu impulsů na výstupu ke počtu částic dopadlých do objemu detektoru

V scintilačních detektorech je účinnost pro malé energie blízká ke 100%.

Energiová rozlišovací schopnost:

poměr šířky píku monoenergetického záření v jeho poloviční amplitudě k energii záření



$$RS = \frac{\Delta}{E_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Spektrum monoenergetického zdroje

(^{137}Cs , $E_0 = 0,662 \text{ MeV}$)

Rozlišovací schopnost pro NaI při energii 0,662 MeV je cca 7 až 10%.

Aktivita radioaktivního zdroje

1 Becquerel: 1Bq = 1 rozpad / 1 sekundu

Aktivita zářiče je definována jako počet jader, která se přemění za jednotku času

Vedlejší jednotka:

1 Curie: 1Ci = aktivita zářiče ve kterém dochází ke $3,7 \cdot 10^{10}$ radioaktivním přeměnám za sekundu (1Ci = 37 GBq).

Je to ekvivalentní aktivitě 1g radia 226, který manželé Marie a Piere Curie vyseparovali z několika tun uranové rudy.

Celkový energetický výkon $P(W)$ zářiče o aktivitě $A(Bq)$ je $P = A \cdot \Delta E$, kde $\Delta E(J)$ je energie uvolněná při jednom rozpadu. Část energetického výkonu zářiče se mění na teplo, zbytek odnáší ionizující záření.

Jednotky radioaktivity

Jednotky radioaktivity v oboru geofyziky

Radioaktivita hornin se měří hlavní detekcí γ záření.
Hodnoty pole úhrnné aktivity γ & uvádějí v jednotkách expozičního příkonu:

$$\dot{X} [\text{A/kg}] = \frac{X}{t}$$

kte X [Coulomb/kg] je expozice, tj. ozařování γ kvanty, které v 1kg vzduchu volně ionty jednoho znaménka s nábojem 1 Coulomb

t [s] čas

[včetně jednotka expozice je
rentgen* $1R = 2,6 \cdot 10^4 \text{ C/kg}$]

Koncentraci radioaktivních prvků v horninách stanovíme měřením úhrnné aktivity γ , kde vyjádřit smluvními jednotkami geologického měření

$$1 \text{Uu} \sim 1 \text{ppm U} \quad [10^{-6} \text{ g/g}]$$

1R je expozice, která vyvolá v 1m³ vzduchu (0°C, 760mmHg) ionizaci 1Coulombu ($2,08 \cdot 10^9$ páru iontů)
Přůměrná expozice pro člověka je 300mR/týden

Jednotky radioaktivity

Míra účinků ionizujícího záření na látku je dána absorbovanou dávkou D [$\text{Gy} = \text{gray}$]

$$\left[D = \frac{\Delta W}{\Delta m} \dots \begin{array}{l} \text{energie záření} \\ \text{hmota} \end{array} \quad 1 \text{Gy} = \frac{1 \text{J}}{1 \text{kg}} \right]$$

Biologické účinky záření vyjadřuje jakostní faktor Q závislý na energii částic $Q \in (1 \div 20)$
záření $\gamma, \beta, \text{ntg}$ \leftarrow \rightarrow pro záření α

Výsledná hodnota účinků záření, které byl organismus vystaven se učí jako dávkový ekvivalent záření H

$$H = D \cdot Q \quad [\text{Sv} = \text{sievert}]$$

Limitní dávkový ekvivalent pro člověka:

$$H = 10^{-3} \text{ Sv za týden} \quad \text{ tj. } 1 \text{ mSv / týden}$$

$$H = 50 \cdot 10^{-3} \text{ Sv za rok} \quad \text{ tj. } 50 \text{ mSv / rok}$$

Vypočít dávkového ekvivalentu záření γ pokud máme expozici přičemž X a čas t :

$$1) X = \dot{X} t \quad [\text{C/kg}] \quad \text{expozice}$$

$$2) D = 37,09 \cdot X \quad [\text{Gy}] \quad \text{dávkou}$$

$$3) H = D \cdot Q \quad [\text{Sv}] \quad \text{dáv. ekv.}$$

Radiometrické metody průzkumu

Radiometrické metody průzkumu

Radioaktivitu hornin určujeme měřením záření γ . Na úhrně aktivitě γ se K, U, Th podílí nádobě stejnými díly.

Měřením radioaktivity lze: nahlížet radioaktivní suroviny
mapovat geologické struktury
určovat poruchové linie

Radioaktivita hornin je určena obsahem U, Th a K.

Izotopy radioaktivního spadu se koncentrují ve srchné vrstvě mocné 15cm.

^{238}U a ^{235}U mají tak velké poločasy rozpadu, že podmiňují vznik trvalé radioaktivní rovnováhy. Uran je ale mobilní prvek, takže bývá v přírodních podmínkách porušena rovnováha ^{238}U a ^{226}Ra .

Rozpadem přirozených radioaktivních prvků se uvolňuje teplo.

Tepelná produkce: U $9,7 \cdot 10^{-8} \text{ W/g}$
Th $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ W/g}$
K $3,6 \cdot 10^{-12} \text{ W/g}$

Předpokládá se, že toto tzv. radiogenní teplo, kruží v současné době veškeré tepelné hrátě země.

(Hlavní zdroj tepla je sluneční záření, jeho velká část je však odražena do prostoru a dle společována při fytozemních reakcích)

Radiometrické metody průzkumu

Z radioaktivních prvků má největší význam uran, neboť jeho štěpný izotop ^{235}U slouží jako jaderné palivo

Koncentrace uranu na ložiskách se pohybuje od **200 do 15 000 ppm**

tj. 0,02 až 1,5 %

Pro vyhledávání ložisek mají značný význam **aureoly**, které vznikají kolem radioaktivních rudních těles

- **Mechanické aureoly** vznikají mechanickým rozrušením rudního tělesa a následným pohybem úlomků
- **Solné aureoly** vznikají v důsledku rozpouštění uranových minerálů a přenosu uranu vodami
- **Plynné aureoly** vznikají šířením emanací z rudního tělesa, jejich rozsah závisí na atmosférickém tlaku, srážkách, větru i teplotě.

Koncentrace radioaktivních prvků v zemské kůře

Nejdůležitějšími prvky, které určují gama aktivitu hornin, jsou U, Th a K.

Diferencovaně k ní přispívají izotopy radioaktivního spadu, které se koncentrují v přepovrchové vrstvě hornin o mocnosti cca 15 cm

URAN : v zemské kůře přítomen v koncentraci 2-4 ppw
v horninách je zejména v akcesorických minerálech
titanitu, apatitu, zirkonu, monazitu...

V přírodě směsí izotopů uranu jsou zastoupeny:

- a) ^{238}U 99,3% ($T = 4,5 \cdot 10^9 \text{ a}$)
- b) ^{235}U 0,7% ($T = 7 \cdot 10^8 \text{ a}$)
- c) ^{234}U 0,006% ($T = 2,5 \cdot 10^5 \text{ a}$)

1 gram U a produkty rozpadu emituje
33 400 γ kvant / sekundu !

THORIUM : průměrná koncentrace v kůře : 8-12 ppw
tvorí kyslíkaté sloučeniny, podobné jako U.
Th je geochemicky stabilní, forma polylonu
je mechanický transport
 $T = 1,4 \cdot 10^{10}$ roků

1 gram Th emituje 17 400 γ kvant / sekundu.

DRASLÍK : průměrná koncentrace 2,5%. největší obsah
mají draselné žilce, biotit, muskovit ...
K je polystabilní, $T = 1,4 \cdot 10^9 \text{ a}$

1 gram K emituje 3,3 γ kvant / sekundu

Radioaktivita hornin

Radioaktivita **magmatických hornin** má tendenci růstu s rostoucí kyselostí hornin

Vysokou radioaktivitou se vyznačují magmatity finálních fází magmatogenních cyklů

Vysokou radioaktivitu mívají syenity, fonolity, žula a granodiority

Extrémně nízkou radioaktivitu mívají ultrabazika a bazika

Tabulka 24

K, U, Th v magmatických horninách

Horniny	% SiO ₂	% K	ppm U	ppm Th	Th/U
kyselé	60 až 75	3,34	3,5	18,0	5,1
střední	52 až 60	2,31	1,8	7,0	4,0
bazické	40 až 52	0,83	0,5	3,0	6,0
ultrabazické	< 40	0,03	0,003	0,005	1,7

Tabulka 25

K, U, Th v horninách sedimentárních

Hornina	% K	ppm U	ppm Th	Th/U
břidlice, jily	3,2	4,0	11,0	2,8
pískovec	1,2	3,0	10,0	3,3
vápence	0,3	1,4	1,8	1,3

Tabulka 26

Radioaktivita hornin Českého masívu (hodnoty v ppm eU)

Hornina	Q	Hornina	Q
žula	13,0	droba	7,9
pegmatit	7,5	jíl	8,8
aplit	9,0	jílovec	11,8
granodiorit	14,1	břidlice	8,9
syenit	28,0	slín a slínovec	4,3
fonolit	19,0	vápenec	1,7
diorit	3,4	silicity	3,4
paleoandezit	5,6	fylit	8,0
gabro	2,0	svor	7,8
staropaleozoické bazaltoidy	5,3	pararula	8,1
mladopaleozoické bazaltoidy	4,7	kvarcit	3,2
neoidní bazaltoidy	5,0	krystalický vápenec	1,9
tuf	4,1	ortorula	9,0
slepenec	4,1	granulit	4,2
písek	3,3	amfibolit	1,7
pískovec	6,5	serpentinit	0,5
křemenec	2,8	chloritická břidlice	2,2
arkóza	6,5	migmatit	9,0

Radioaktivita hornin

Radioaktivita **sedimentárních hornin** závisí na usazovaném materiálu

Nejvyšší radioaktivitou se vyznačují jíly, jílovce, fosfáty, draselné soli a bituminósní sedimenty

K málo aktivním patří vápenec, sádrovec, kamenná sůl

Radioaktivita **metamorfovaných hornin** odpovídá převážně vlastnostem výchozího materiálu

Vyšší radioaktivitu mají některé typy ortorul a horniny injikované

Extrémně nízká aktivita charakterizuje amfibolity a serpentinity.

Tabulka 24

K, U, Th v magmatických horninách

Horniny	% SiO ₂	% K	ppm U	ppm Th	Th/U
kyselé	60 až 75	3,34	3,5	18,0	5,1
střední	52 až 60	2,31	1,8	7,0	4,0
bazické	40 až 52	0,83	0,5	3,0	6,0
ultrabazické	< 40	0,03	0,003	0,005	1,7

Tabulka 25

K, U, Th v horninách sedimentárních

Hornina	% K	ppm U	ppm Th	Th/U
břidlice, jíly	3,2	4,0	11,0	2,8
pískovce	1,2	3,0	10,0	3,3
vápence	0,3	1,4	1,8	1,3

Tabulka 26

Radioaktivita hornin Českého masívu (hodnoty v ppm eU)

Hornina	Q	Hornina	Q
žula	13,0	droba	7,9
pegmatit	7,5	žil	8,8
aplit	9,0	jílovec	11,8
granodiorit	14,1	břidlice	8,9
syenit	28,0	slín a slínovec	4,3
fonolit	19,0	vápenec	1,7
diorit	3,4	silicity	3,4
paleoandezit	5,6	fylit	8,0
gabro	2,0	svor	7,8
staropaleozoické bazaltoidy	5,3	pararula	8,1
mladopaleozoické bazaltoidy	4,7	kvarcit	3,2
neoidní bazaltoidy	5,0	krystalický vápenec	1,9
tuf	4,1	ortorula	9,0
slepenec	4,1	granulit	4,2
písek	3,3	amfibolit	1,7
pískovec	6,5	serpentinit	0,5
křemenec	2,8	chloritická břidlice	2,2
arkóza	6,5	migmatit	9,0

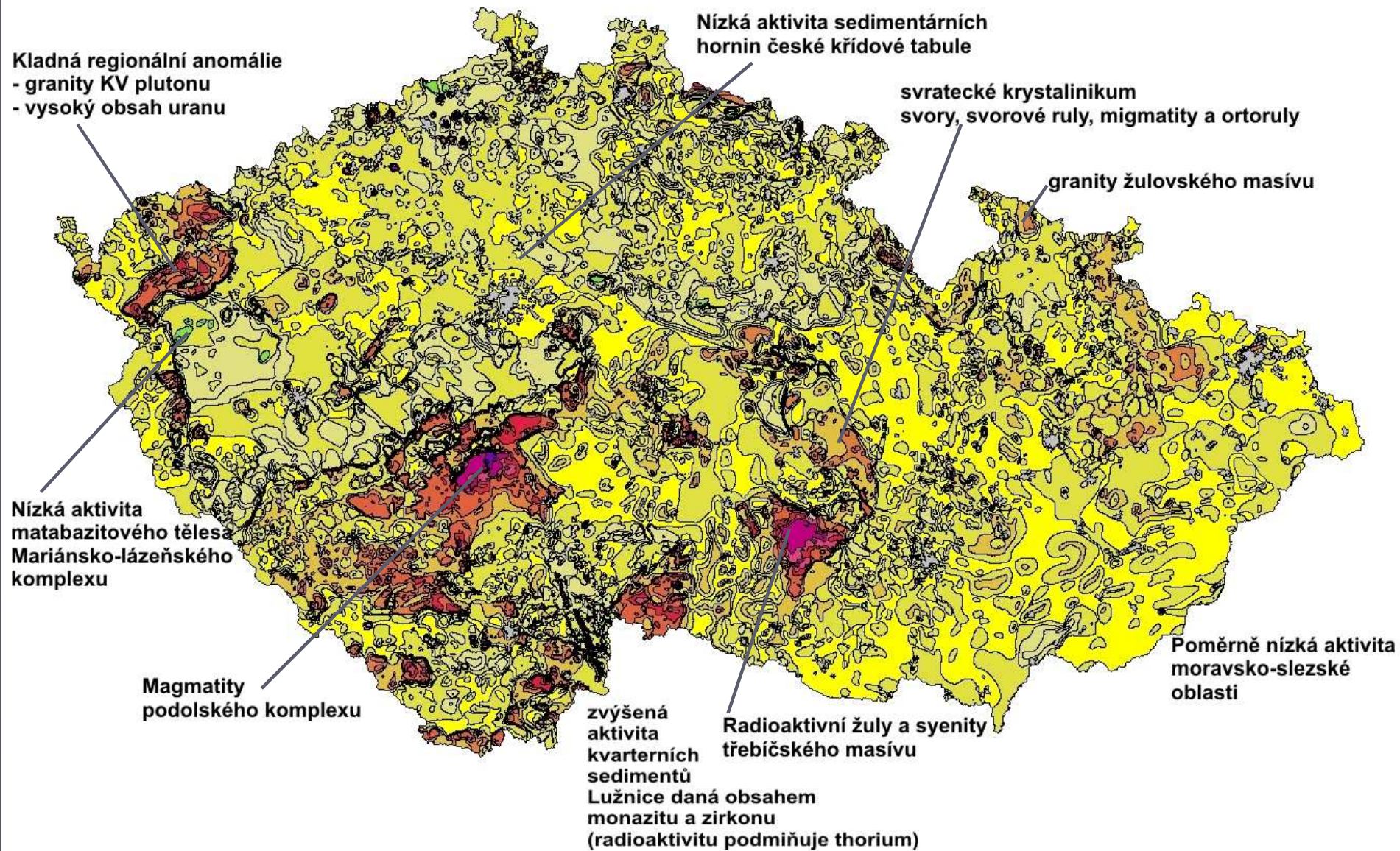
Radioaktivita hornin

V humidních oblastech je uran z povrchových vrstev vyluhován, v aridních oblastech bývají naopak povrchové vrstvy uranem obohaceny

Radioaktivita půdního vzduchu je způsobena přítomností emanací vznikajících rozpadem uranu a thoria v horninách

Koncentrace radonu v půdním vzduchu odpovídá hodnotám od 0 do 200 Bq/l

Radiometrická mapa ČR (Manová, Matolín, 1995)



Měření pole radioaktivity

Terevní radiometrické měření

Měření pole radioaktivity obsahuje několik složek :

- a) radioaktivitu hornin
 - b) kosmické záření
 - c) pozadí přístroje
 - d) radioaktivní spad
 - e) vzdušný radon
-] ter. přirozené pozadí