

3. RADIOAKTIVITA

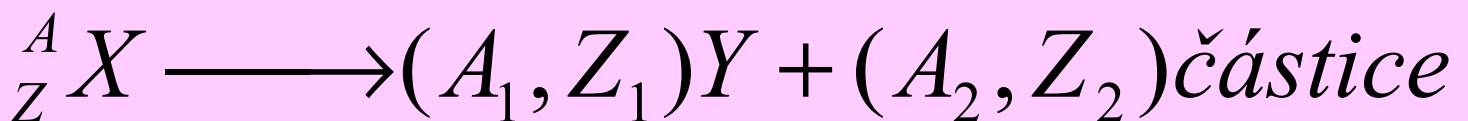
nukleárně stabilní (cca 266)..... $N/Z \cong 1:1 - 3:2$



- **Relativní zvýšení počtu neutronů má příznivý vliv na stabilitu jádra, protože se snižuje odpuzování protonů**
- **některá jádra jsou stabilní jen při jediné kombinaci N a Z (monoizotopické prvky)**
- **většina prvků je však polyizotopických \Rightarrow existuje jisté rozmezí poměru N/Z, kdy jsou jádra stabilní**

pokud je poměr N/Z mimo uvedené hranice je jádro s velkou pravděpodobností nestabilní a je jádrem radioaktivním

Radioaktivita je projevem nukleární nestability jader. Spočívá v jejich přeměně na jiný nuklid, přičemž dochází současně k eliminaci některé z elementárních částic, ev. jejich skupin, z prostoru rozpadajícího se jádra.



mateřské

dceřinné jádro

vysokoenergetická částice

Pro radioaktivní rozpad platí následující charakteristiky:

- přeměna je děj samovolný (spontánní)
- nezávisí na chemickém stavu atomu
- platí zákon zachování hmotnosti a energie
- platí zákon zachování nukleonového a atomového čísla

$$A = A_1 + A_2$$

$$Z = Z_1 + Z_2$$

- při radioaktivní přeměně se **vždy** uvolňuje energie (**exoergický děj**)
- platí tedy obecná **hmotnostní podmínka radioaktivity**:

$$M(X) > M(Y) + M(\text{částice})$$

- pokud vznikne dceřiné jádro **Y** v základním stavu, pak se přeměnová energie projeví jako kinetická energie částice a jádra Y
- je-li po rozpadu jádro **Y** v excitovaném stavu, pak část přeměnové energie zůstane v jádru Y ve formě excitační energie
- tato excitovaná jádra nejsou zpravidla stabilní a rozpadají se ihned dále.
- **Deexcitace se projeví vyzářením fotonu γ záření.**

Typy přeměn

- přeměna se zachováním A , Z se mění (**β přeměny**), jejichž podstatou jsou slabé interakce působící mezi leptonem a hadronem)
- přeměny se současnou změnou A i Z (**přeměny α , emise nukleonu nebo těžších jader, samovolné štěpení**)
- přeměny spojené s pouhou deexcitací jádra (A i Z zůstává zachováno) – **přeměny γ , vnitřní konverze**

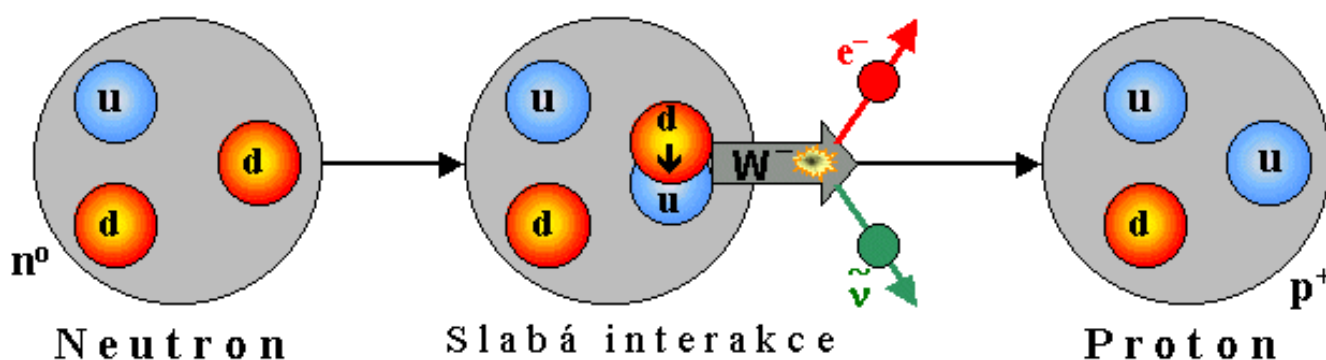
| Elementární částice při radioaktivní přeměně | Symbol částice | Typ radioaktivního rozpadu |
|--|------------------------|--|
| jádro ${}^4_2\text{He}$ (helion) | α | α - proces |
| elektron pozitron (kladný elektron) | β^- β^+ | β - proces (negatronová nebo pozitronová přeměna) |
| foton | γ | γ - proces |
| neutron | n | samovolné štěpení |

Přeměny β

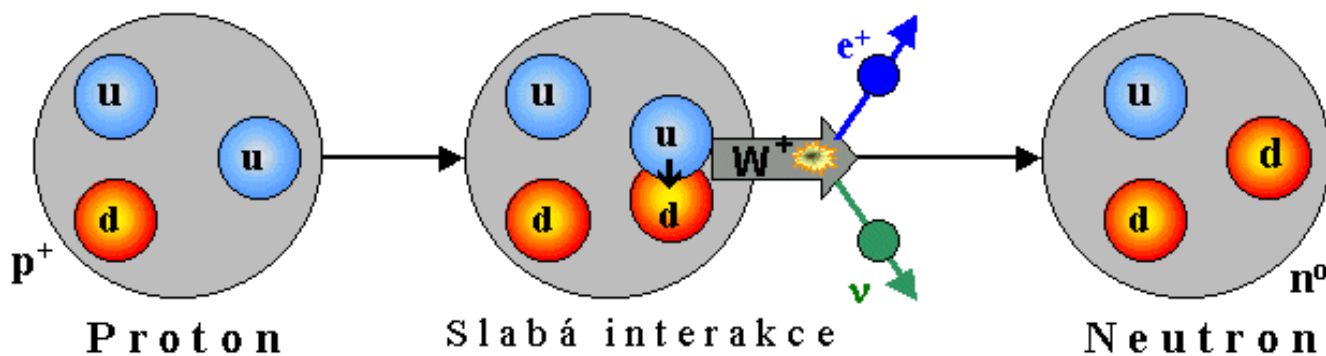
(negatronová, pozitronová, elektronový záchyt)

Tento typ přeměny je spojen se změnou kvarkového složení jednoho z nukleonů

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



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



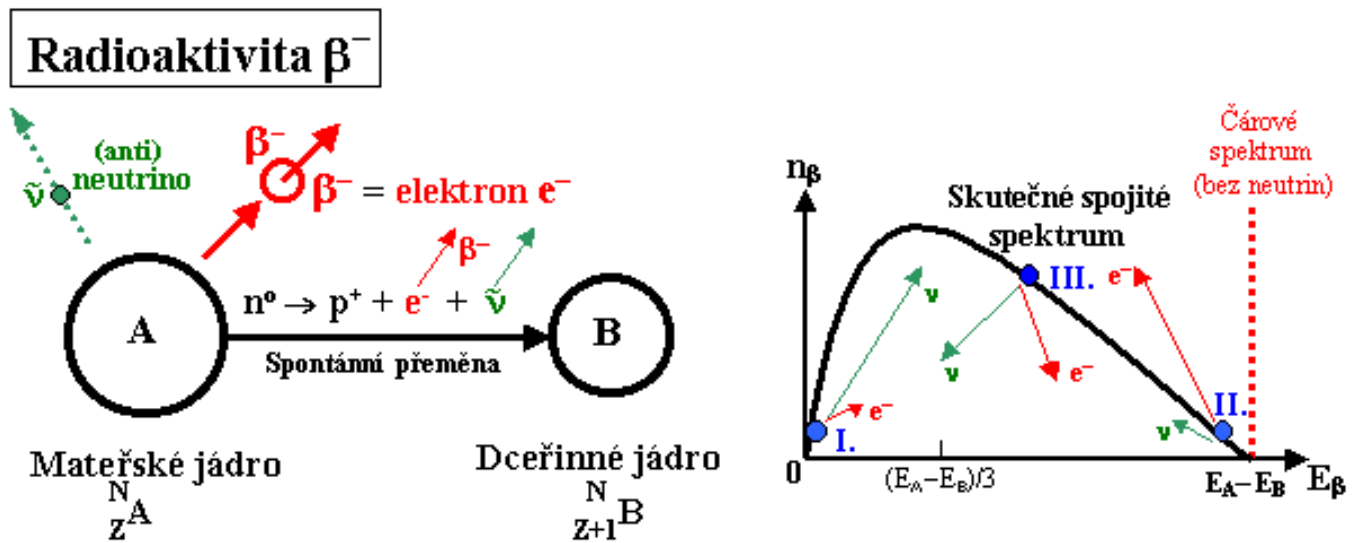
Tok vznikajících leptonů, tj. elektronů nebo pozitronů, se pak nazývá **zářením β^-** , resp. **β^+** .

Negatronová přeměna

je běžným typem rozpadu nestabilních jader a setkáváme se s ní u přírodních i uměle připravených radionuklidů **s relativním nadbytkem neutronů**.

Hmotnostní podmínka pro jaderné hmotnosti zúčastněných částic:

$$M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e$$



Jádro B vzniká buď:

- **v základním stavu** (přeměny ^3H , ^{14}C , ^{32}P aj.
- **ve vzbuzeném (excitovaném) stavu**



- **pouze v excitovaném stavu** (následuje deexcitace)

| nuklid A | nuklid B | $E_{\max,\beta}$ (MeV) | E_γ (MeV) |
|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|
| ^{60}Co | ^{60}Ni | 0,31 | 1,17; 1,33 |
| ^{109}Pd | ^{109}Ag | 1,03 | 0,088–0,643 |
| ^{129}I | ^{129}Xe | 0,15 | 0,040 |

- **v základním (a) i vzbuzeném stavu (b)**

| nuklid A | nuklid B | a | b | $E_{\max,\beta}$ (MeV) | E_γ (MeV) |
|-------------------|-------------------|----|----|---------------------------|---------------------|
| ^{42}K | ^{42}Ca | 80 | 20 | a: 3,5 b: 2,0 | 1,5 |
| ^{137}Cs | ^{137}Ba | 8 | 92 | a: 1,18 b: 0,52 | 0,66 |
| ^{141}Ce | ^{141}Pr | 30 | 70 | a: 0,58 b: 0,43 | 0,15 |

Pozitronová přeměna a elektronový záchyt

se vyskytují pouze u nuklidů připravených jadernými reakcemi
s relativním nadbytkem protonů

Hmotnostní podmínka pro jaderné hmotnosti:

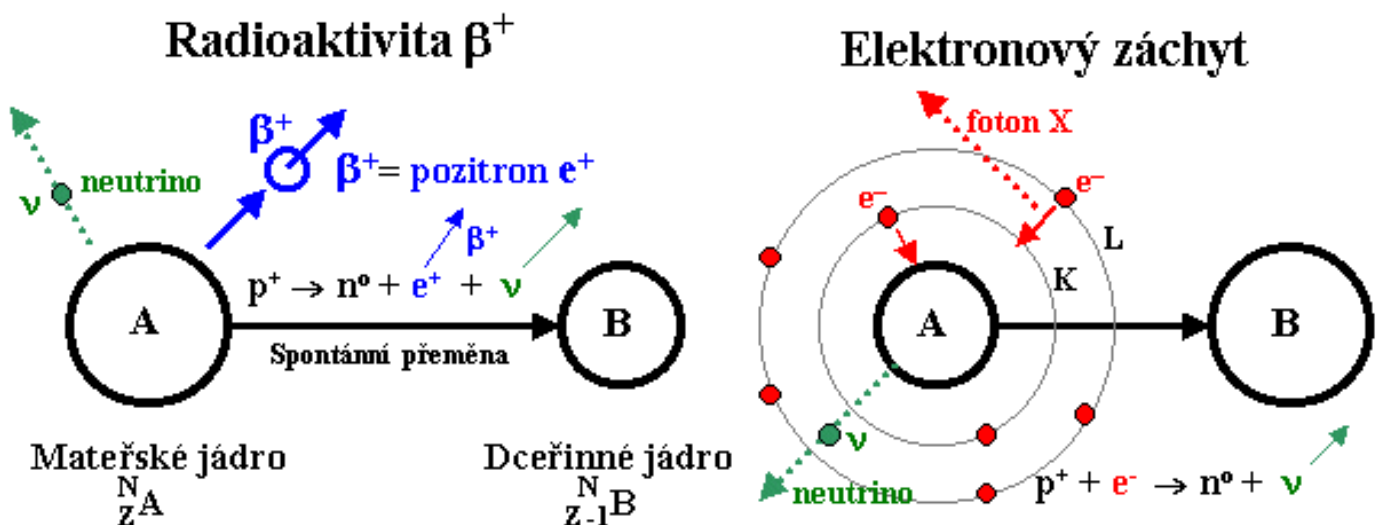
$$\beta_+: \quad M(A, Z) > M(A, Z-1) + m_e$$

$$\text{EZ:} \quad M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1)$$

Elektronový záchyt představuje zvláštní typ přeměny β , kdy se jádro zbavuje nadbytku protonů v jádře - proton jádra zachytí obalový elektron (ze slupky K nebo L) a přemění se na neutron

Při EZ pozorujeme současně:

- **charakteristické rentgenovo záření**,
- **Augerovy elektrony** (vznikají při průchodu rtg. záření vyššími elektronovými slupkami \Rightarrow mají **diskrétní energii**)



Příklad rozpadu pozitronového zářiče:



Příklad elektronového záchytu:



Jádro B vzniká analogicky buď:

- v základním stavu (přeměny ${}^{15}\text{O}$, ${}^{17}\text{F}$, ${}^{19}\text{Ne}$ aj.)
- ve vzbuzeném stavu (přeměny ${}^{14}\text{O}$, ${}^{23}\text{Mg}$, ${}^{62}\text{Cu}$)
- v základním i vzbuzeném stavu
- pozitronickou přeměnu zpravidla provází také elektronový záchyt

Pozitron (antičástice elektronu) je poměrně nestálý ($\sim 10^{-10}\text{s}$), po zpomalení srážkami dochází k interakci s elektronem (**anihilační reakce**)



vznikající fotony se využívají při měření pozitronických radioaktivních nuklidů

Chemické změny při přeměnách beta – Fajans- Soddyho posunová pravidla

| Typ interakce | Chemická změna |
|-------------------------|---|
| přeměna β^{-} | ${}^A_Z\text{X} \xrightarrow{\beta^{-}} {}^A_{Z+1}\text{Y}^{+} + e^{-} + \bar{\nu}_e$ |
| přeměna β^{+} | ${}^A_Z\text{X} \xrightarrow{\beta^{+}} {}^A_{Z-1}\text{Y}^{-} + e^{+} + \nu_e$ |
| elektronový záchyt (EZ) | ${}^A_Z\text{X} \xrightarrow{\text{EZ}} {}^A_{Z-1}\text{Y} + \nu_e$ |

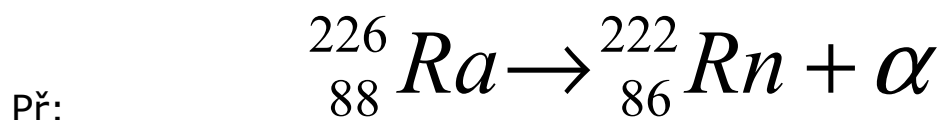
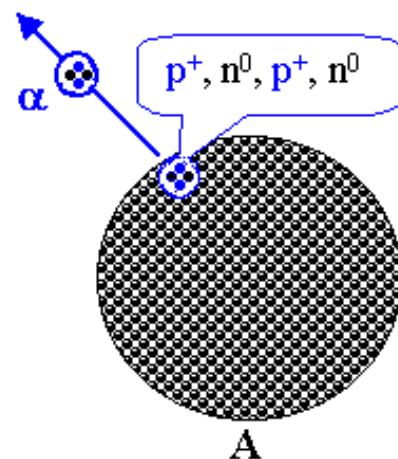
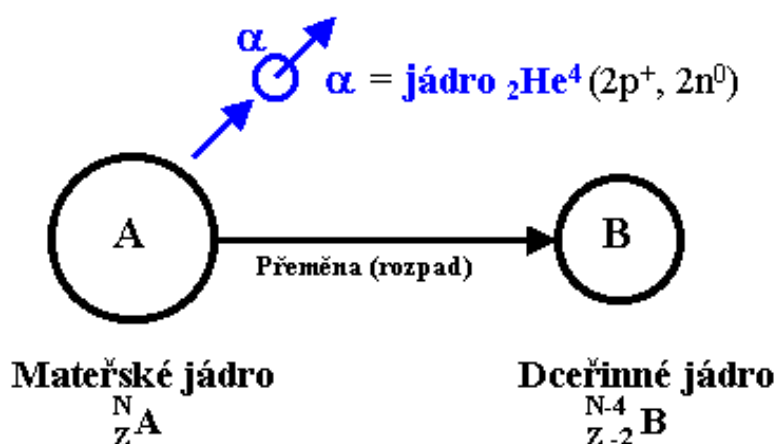
Přeměna α

Přeměna α je typická pro těžká přirozená i umělá jádra, kde je silné odpuzování protonů v jádrech.

Hmotnostní podmínka pro jádra:

$$M(A, Z) > M(A-4, Z-2) + m_{\alpha}$$

Radioaktivita α

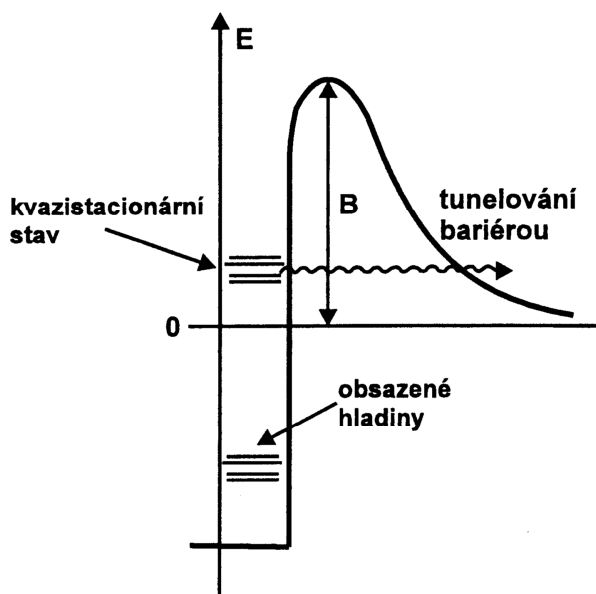


Opět platí **Fajans- Soddyho posunové pravidlo** (při rozpadu alfa vzniká dceřinný nuklid, který se v periodickém systému nachází o dvě místa vlevo od mateřského nuklidu)

Vznikající částice α :

- má vysokou střední vazebnou energii (stabilní částice)
- relativně nízkou hmotnost

⇒ **je energeticky výhodnější jako jiný shluk nukleonů**, proces emise se děje tzv. **tunelovým efektem**



Důkaz tunelového efektu:

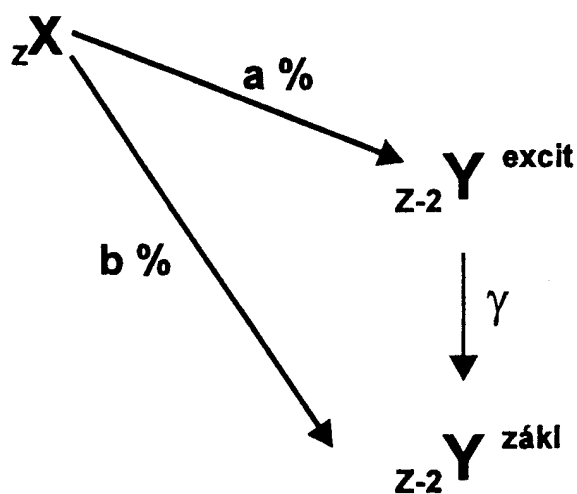
| ^{226}Ra | výška potenciálové bariéry (MeV) | energie α (MeV) |
|-------------------|----------------------------------|------------------------|
| | 23 | 4,8 |

Poznámka

Hmotnostní podmínku pro přeměnu α splňují i jiná jádra s $A > 140$, ale radioaktivita se nepozoruje (výjimky ^{153}Dy , ^{150}Gd)

Důvod: částice α má v příslušném **kvazistacionálním stavu** nízkou energii, leží hluboko v potenciálové jámě a tunelový efekt nemůže nastat.

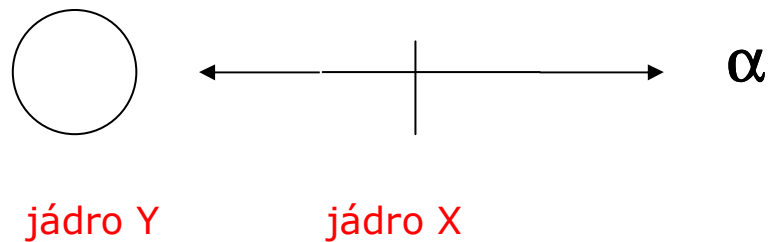
Přeměna α může probíhat za vzniku dceřiného jádra v základním (b) nebo vzbuzeném stavu (a)



| nuklid X | nuklid Y | a (%) | b (%) | E_α (MeV) | E_γ (MeV) |
|---------------------|---------------------|------------|-------|---------------------|---------------------|
| ${}^{210}\text{Po}$ | ${}^{206}\text{Pb}$ | ~ 100 | 0,001 | a: 5,30 b: 4,50 | 0,8 |
| ${}^{226}\text{Ra}$ | ${}^{222}\text{Rn}$ | 94,3 | 5,7 | a: 4,77 b: 4,59 | 0,18 |
| ${}^{232}\text{Th}$ | ${}^{228}\text{Ra}$ | 80 | 20 | a: 3,98 b: 3,90 | 0,08 |
| ${}^{238}\text{U}$ | ${}^{234}\text{Th}$ | 77 | 23 | a: 4,24 b: 4,19 | 0,05 |

Často se pozoruje emise více skupin α částic \Rightarrow musí existovat více excitovaných stavů dceřiných jader.

Platnost zákona zachování hybnosti při emisi alfa částice – dochází k odrazu



Odrazová energie:

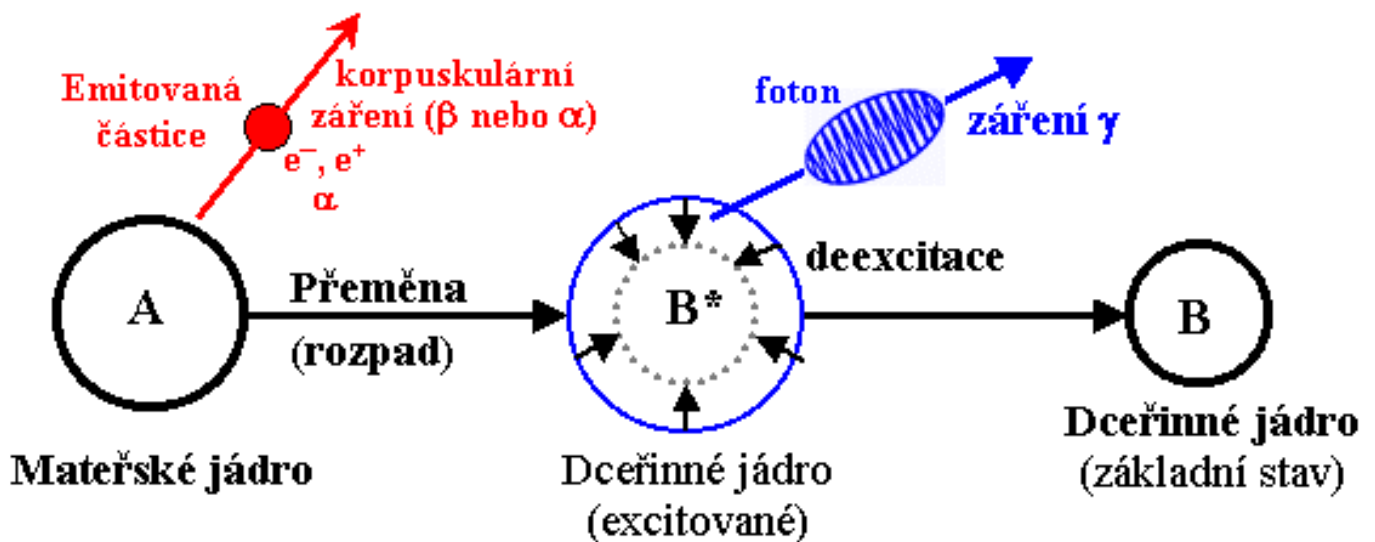
$$E_Y = \frac{m_\alpha + Q_\alpha}{m_Y + m_\alpha}$$

představuje cca **2%** celkové přeměnové energie (desítky keV)

⇒ při odrazu dochází k excitaci elektronů a dceřiné jádro vzniká ve vysoce ionizovaném stavu a **zpřetrhání chemických vazeb.**

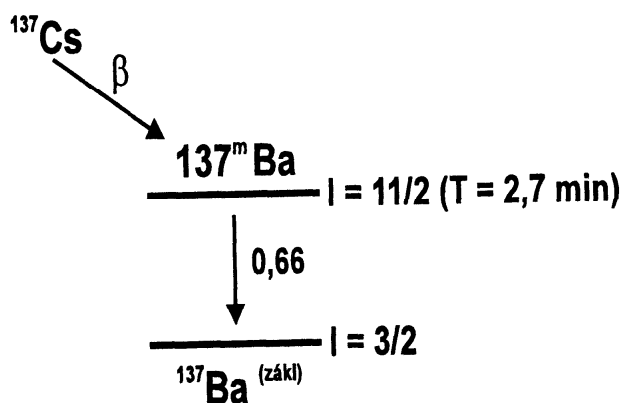
Přeměna γ + vnitřní konverze

- Zářením 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.

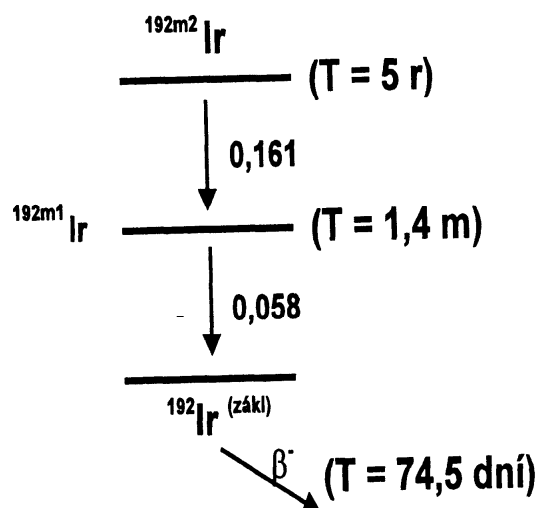


- **deexcitace** probíhá vyzářením jednoho nebo více fotonů elektromagnetického záření
- emise fotonů je dějem mezi diskrétními energetickými stavy o určité energii \Rightarrow **spektrum γ je čárové**
- emise fotonu je vždy provázena změnou jaderného spinu (foton má spin =1)
- deexcitace může nastat postupnou emisí několika fotonů
- přechody $|\Delta I| = 1$ nebo 2 jsou nejpravděpodobnější (**dovolené přechody**)

- přechody, kde $|\Delta I| > 2$, jsou méně pravděpodobné – jsou tzv. **zakázané přechody**
- **zpožděná emise γ záření (vznik jaderných izomerů)**



Okamžitá emise gama
 $10^{-16} - 10^{-10} \text{ s}$ pro $|\Delta I| = 1$
 $10^{-11} - 10^{-4} \text{ s}$ pro $|\Delta I| = 2$

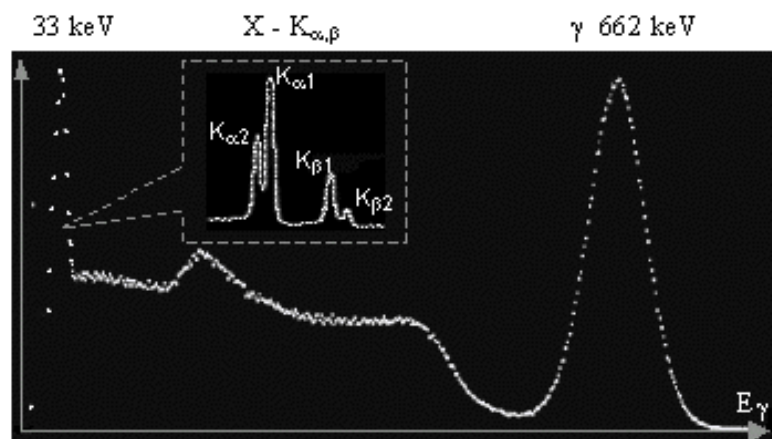
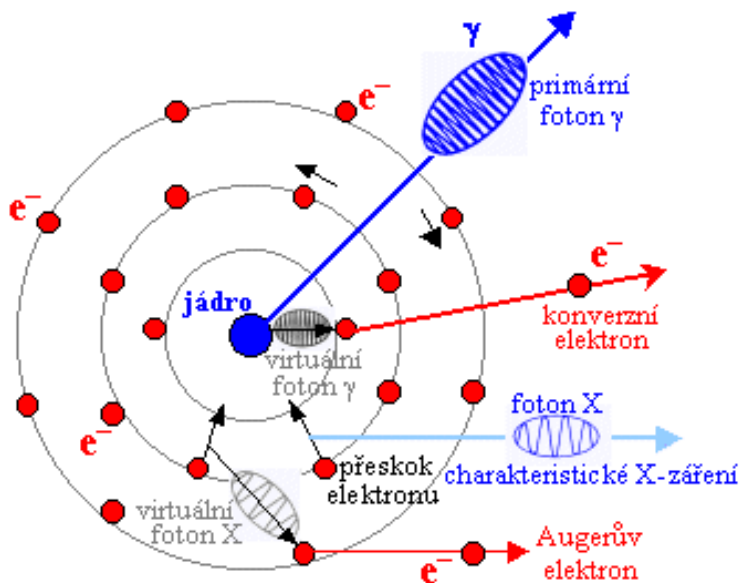


Jaderná izomerie
 $T_{1/2} = 10^{-3} \text{ s}$ až roky

- **emise γ záření je velmi významná – umožňuje měření aktivity nuklidů, slouží k jejich identifikaci**

Vnitřní konverze

- je alternativním způsobem deexcitace jádra (nezářivý přenos energie na orbitální elektron)



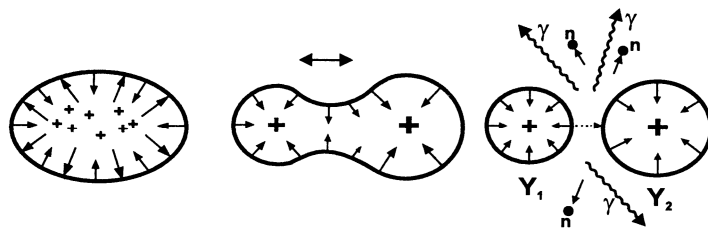
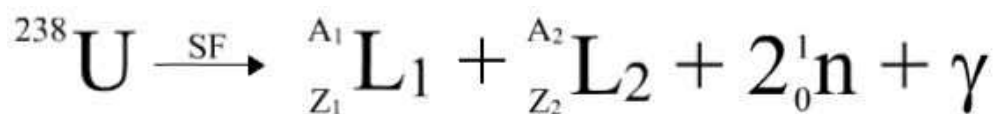
¹³⁷Cs - scintilační spektrum

- proces je umožněn překryvem vlnových funkcí orbitálního elektronu a excitovaného jádra
- uvolňují se tzv. **konvertovaný elektron** (má diskrétní energii)
- po uvolnění konvertovaného elektronu se vakance v elektronovém orbitalu zaplňuje elektronem z vyšší hladiny a dochází ke **vzniku charakteristického rtg. záření**, příp. i **Augerova elektronu** (jako u EZ)

Samovolné štěpení

se vyskytuje u jader:

- s vysokým počtem protonů
- s elipsoidním tvarem jádra
- musí platit hmotnostní podmínka
- vznikají přitom **2 tzv. trosky a zpravidla 2-3 neutrony**
- jde zpravidla o konkurenční reakci k procesu α



Zavádí se tzv. **parametr štěpení Z^2/A**
(vychází z kapkového modelu jádra – jde o poměr energie odpuzování a energie povrchové)

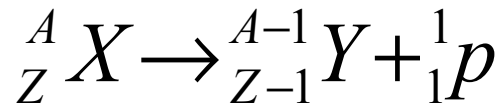
S rostoucím parametrem štěpení klesá poločas rozpadu samovolného štěpení nuklidu:

| nuklid | Z^2/A | poločas (roků) |
|---------------------------|---------|---------------------|
| ${}^{238}_{92}\text{U}$ | 35,56 | $1,0 \cdot 10^{16}$ |
| ${}^{240}_{94}\text{Pu}$ | 36,82 | $1,2 \cdot 10^{11}$ |
| ${}^{244}_{96}\text{Cm}$ | 37,77 | $1,4 \cdot 10^7$ |
| ${}^{252}_{98}\text{Cf}$ | 38,11 | 66 |
| ${}^{254}_{100}\text{Fm}$ | 39,37 | 0,67 |

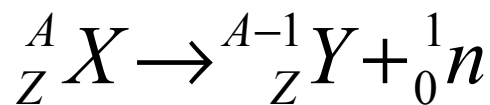
Emise nukleonů

- jev, kdy se z mateřského jádra uvolňuje

proton



neutron

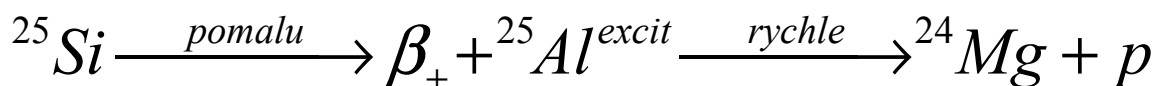


- vzácný typ rozpadu, neboť zpravidla není splněna hmotnostní podmínka (jádro X je v základním energetickém stavu)
- nastává při extrémním relativním nadbytku protonů nebo neutronů (vazebná energie nukleonů je malá)



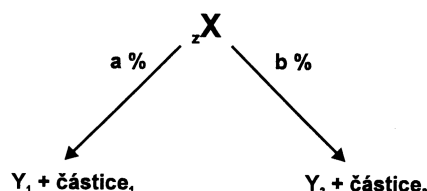
Pozn. stabilní nuklidy lutecia mají $A=175$ a 176

- emise nukleonů se pozoruje u vysoce excitovaných stavů jader s nadbytkem protonů nebo neutronů, kdy emisi nukleonu předchází přeměna β , která je relativně pomalá.
- Následně vzniklé nukleony se nazývají jako **zpožděné**.



- excitovaná jádra s velkým nadbytkem neutronů a emitující zpožděné neutrony jsou mezi štěpnými produkty u ^{235}U a ^{239}Pu (cca 0,65% celkových neutronů – nutno s nimi počítat při řízení reaktoru)

Větvené přeměny



- hmotnostní podmínka přeměny umožňuje dva či více typů přeměny
- každá přeměna má svou pravděpodobnost a energii

| | | |
|---|-------------------------------|--|
| 1 | α/β^- | u těžkých nuklidů |
| 2 | α /samovolné štěpení | u těžkých jader, přeměna je méně pravděpodobná jako přeměna α . Úbytek radionuklidu je řízen poločasem α přeměny – je kratší. |
| 3 | α /elektronový záchyt | u těžkých jader |
| 4 | β^+ /elektronový záchyt | u lehčích radionuklidů s nadbytkem protonů |
| 5 | β^- /elektronový záchyt | vzácný případ |

Přeměnová schemata a Fajans-Soddyho posunová pravidla

