

3. RADIOAKTIVITA

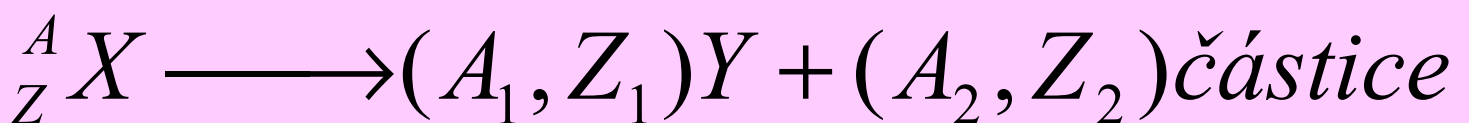
nukleárně stabilní (cca 266)..... $N/Z \cong 1:1 - 3:2$



- **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

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 \qquad \mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2$$

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

$$\mathbf{M}(\mathbf{X}) > \mathbf{M}(\mathbf{Y}) + \mathbf{M}(\text{částice})$$

- 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**

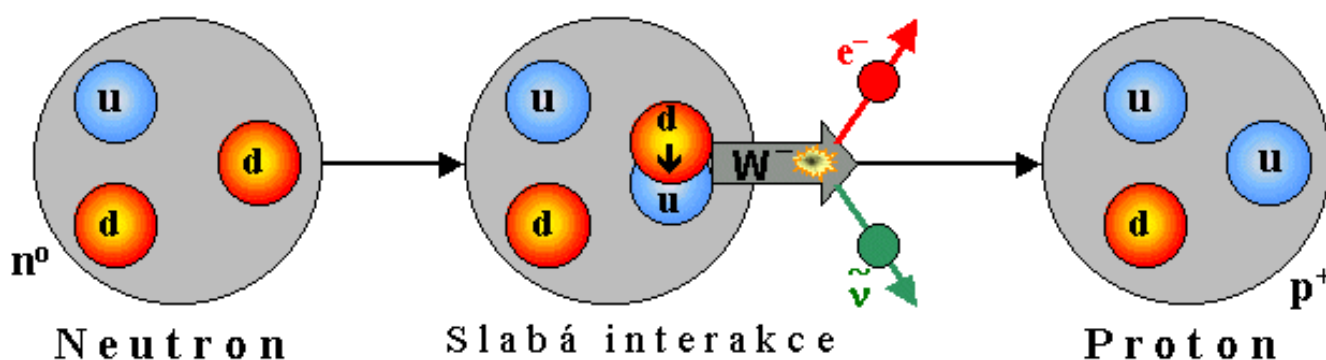
Elementární částice při radioaktivní přeměně	Symbol částice	Typ radioaktivního rozpadu
jádro ${}^4_2\text{He}$ (helion)	α	α - proces
elektron pozitron (kladný elektron)	β^- β^+	β - proces (negatronová nebo pozitronová přeměna)
foton	γ	γ - proces
neutron	n	samovolné štěpení

Přeměny β

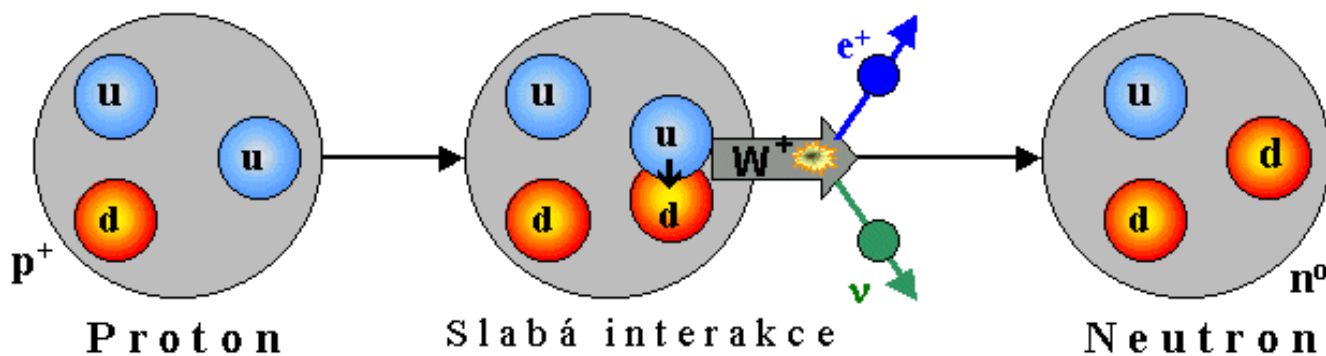
(negatronová, pozitronová, elektronový záchyt)

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 : $p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu$



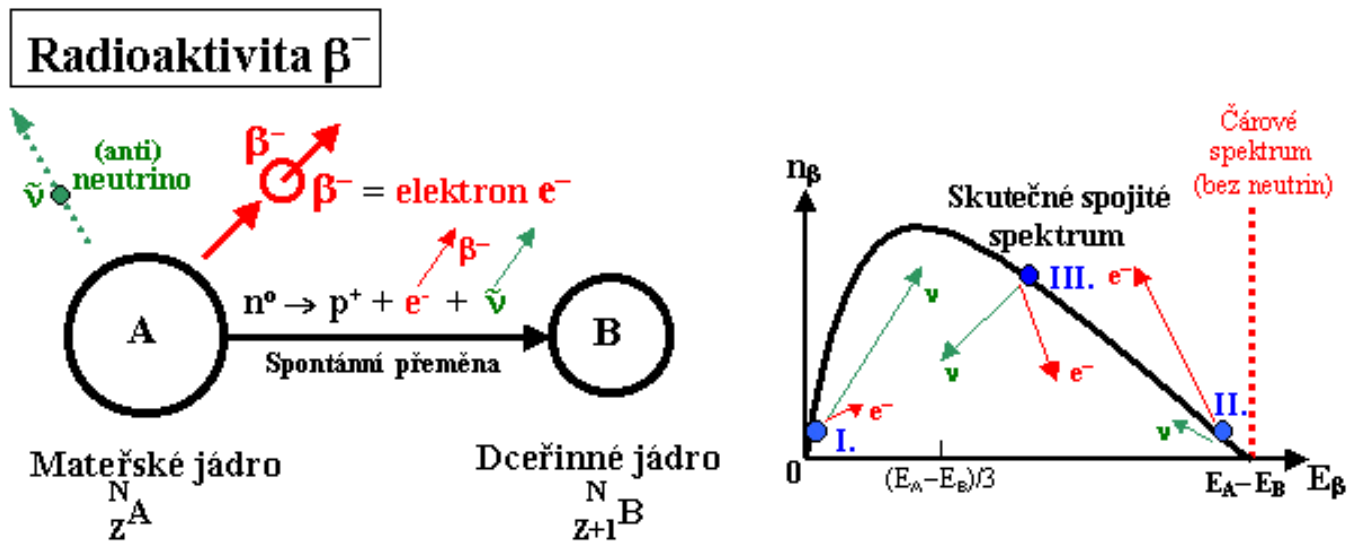
Tok vznikajících leptonů, tj. elektronů nebo pozitronů, se pak nazývá **zářením β^- , resp. **β^+** .**

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 ${}^3\text{H}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$ aj.)
- ve vzbuzeném (excitovaném) stavu



- pouze v excitovaném stavu (následuje deexcitace)

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

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

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

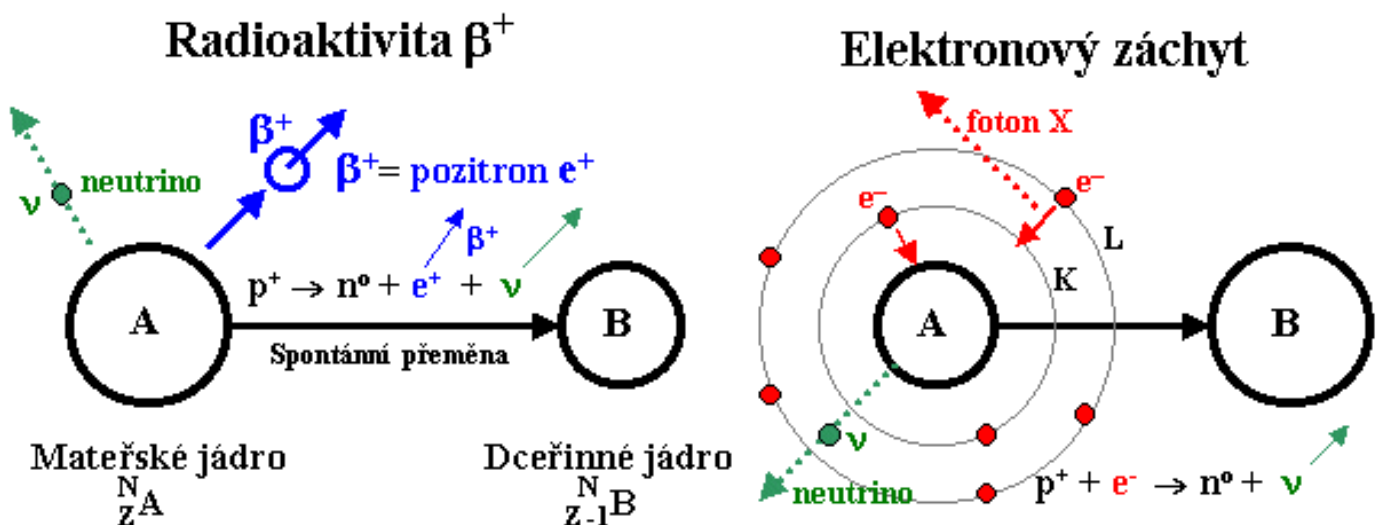
$$\beta_+: \quad M(A, Z) > M(A, Z-1) + m_e$$

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

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)	${}^A_Z\text{X} \xrightarrow{\text{EZ}} {}^A_{Z-1}\text{Y} + \nu_e$

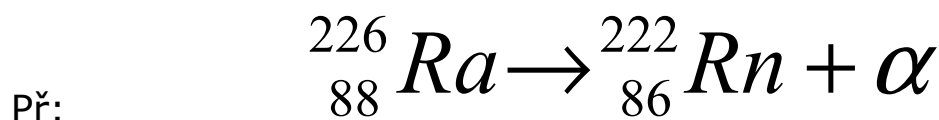
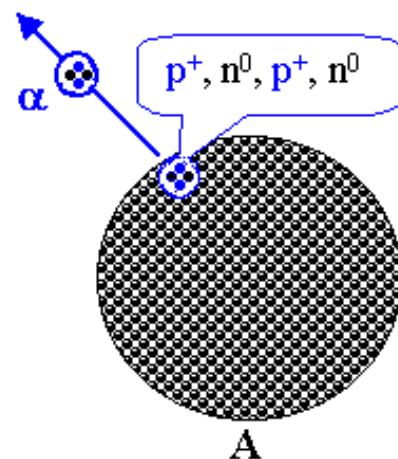
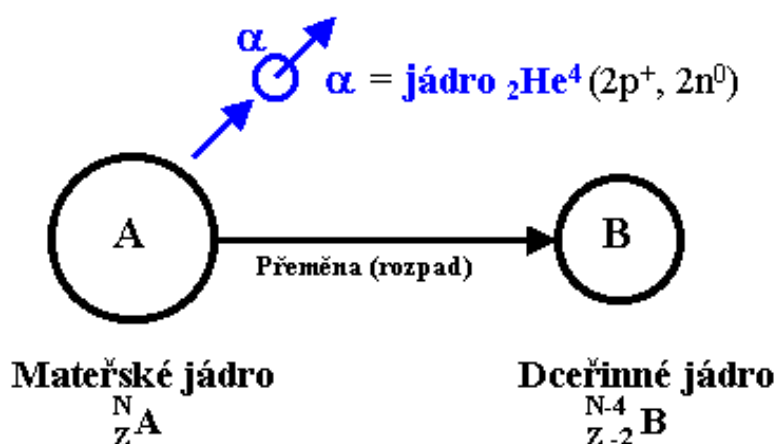
Přeměna α

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

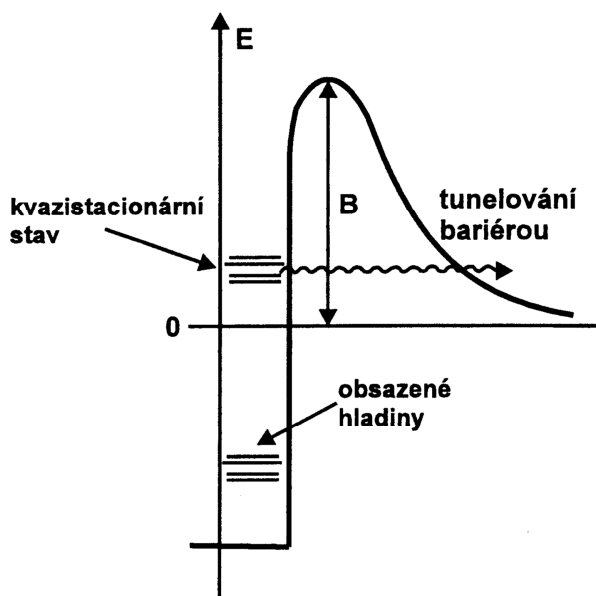


Opět platí **Fajans- Soddyho posunové pravidlo** (při rozpadu alfa vzniká dceřinný nuklid, který se v periodickém systému nachází o dvě místa vlevo od mateřského nuklidu)

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:

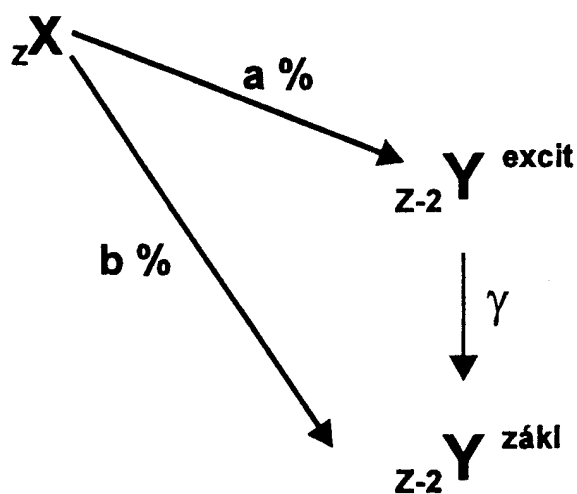
^{226}Ra	výška potenciálové bariéry (MeV)	energie α (MeV)
	23	4,8

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 **kvazistacionárním stavu** nízkou energii, leží hluboko v potenciálové jámě a tunelový efekt nemůže nastat.

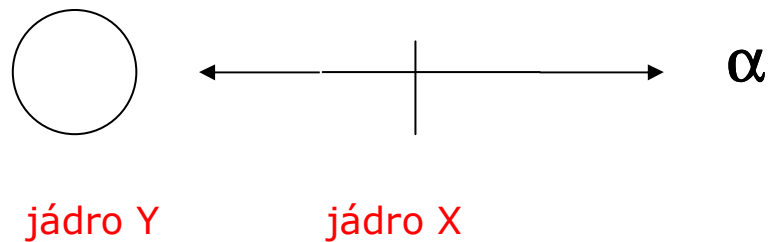
Přeměna α může probíhat za vzniku dceřiného jádra v základním (b) nebo vzbuzeném stavu (a)



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:

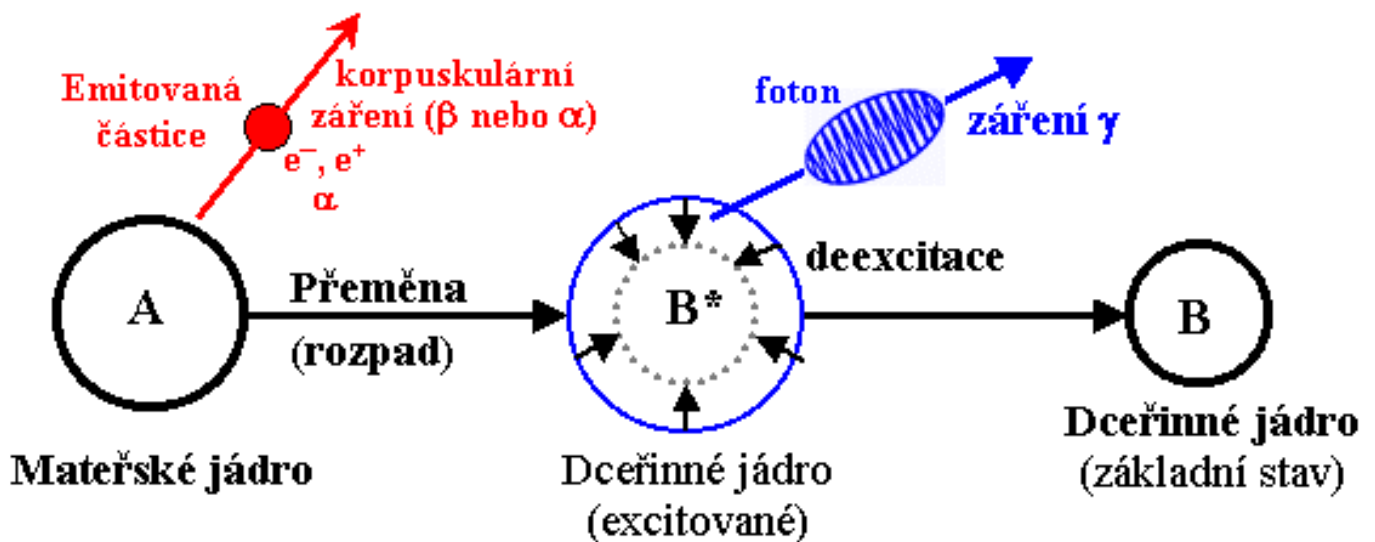
$$E_Y = \frac{m_\alpha + Q_\alpha}{m_Y + m_\alpha}$$

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.**

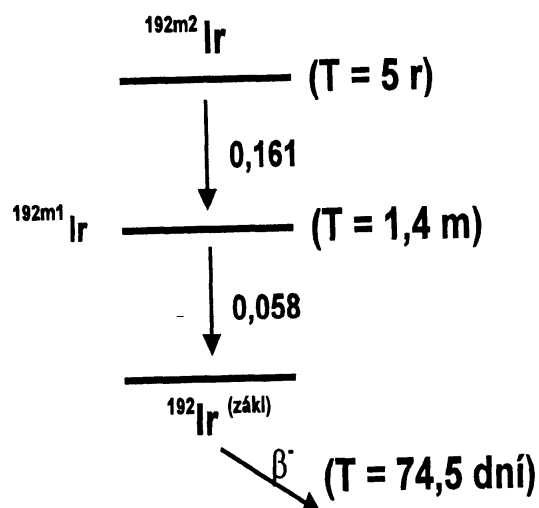
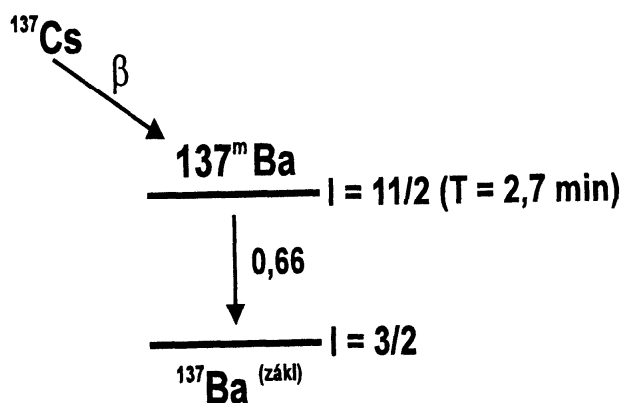
Přeměna γ + vnitřní konverze

- 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)**



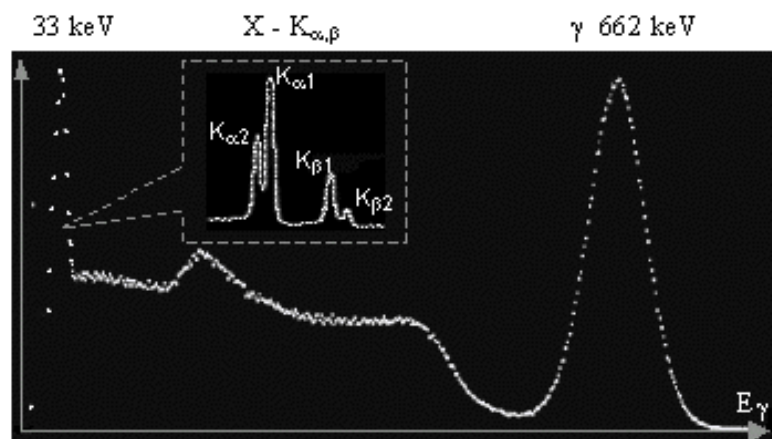
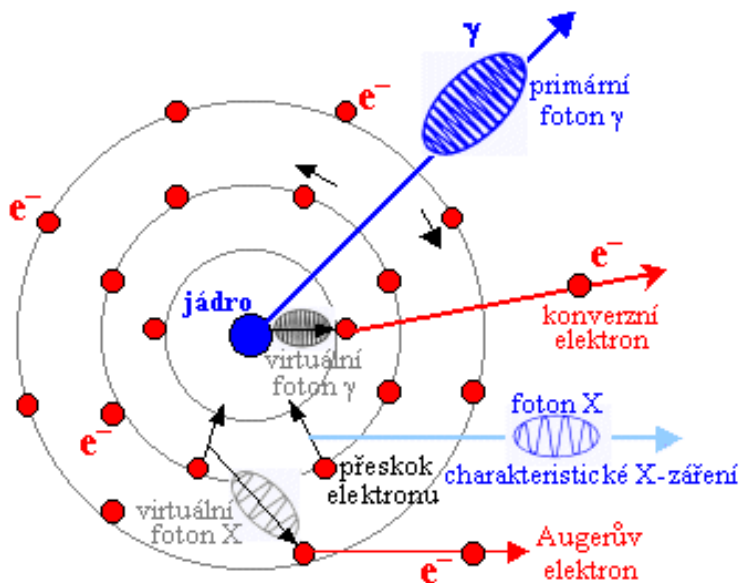
Okamžitá emise gama
 $10^{-16} - 10^{-10} \text{ s}$ pro $|\Delta I| = 1$
 $10^{-11} - 10^{-4} \text{ s}$ pro $|\Delta I| = 2$

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)



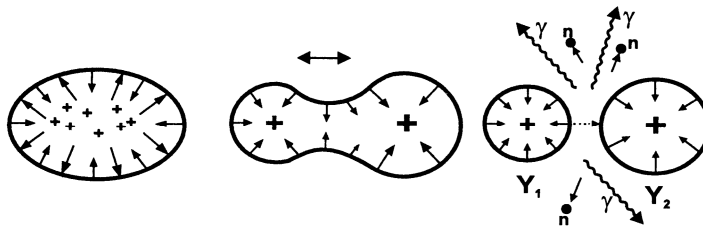
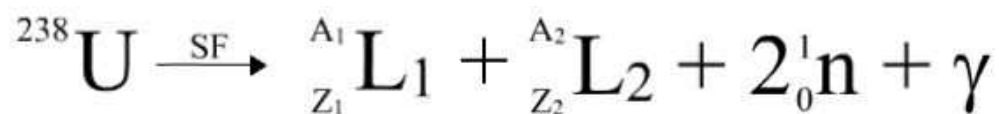
¹³⁷Cs - scintilační spektrum

- 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)

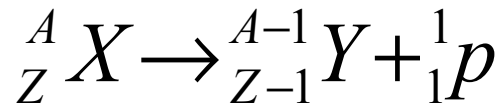
S rostoucím parametrem štěpení klesá poločas rozpadu samovolného štěpení nuklidu:

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

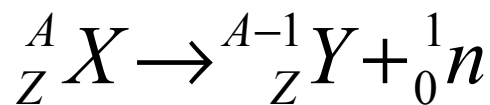
Emise nukleonů

- jev, kdy se z mateřského jádra uvolňuje

proton



neutron

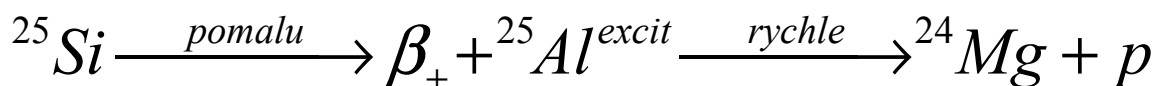


- vzácný typ rozpadu, neboť zpravidla není splněna hmotnostní podmínka (jádro X je v základním energetickém stavu)
- nastává při extrémním relativním nadbytku protonů nebo neutronů (vazebná energie nukleonů je malá)



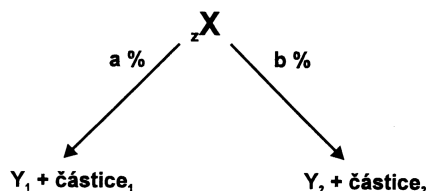
Pozn. stabilní nuklidy lutecia mají $A=175$ a 176

- 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

