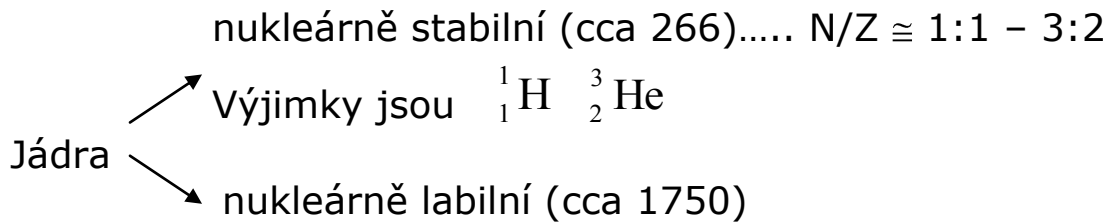


3. RADIOAKTIVITA



- 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

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

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 ; \quad \mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2$$

- 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**.

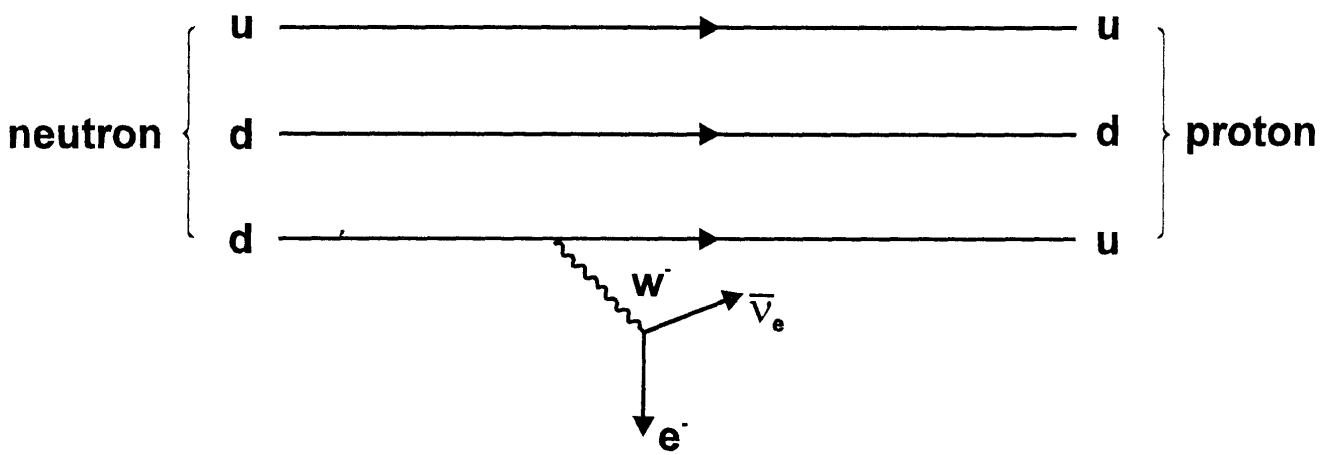
Typy radioaktivních přeměn

- přeměna se zachováním A, Z se mění (**β přeměny**, jejich 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

Tento typ přeměny je záležitostí slabých interakcí mezi leptony (elektrony v obalu) a hadrony (nukleony) a je spojena se změnou kvarkového složení jednoho z nukleonů:

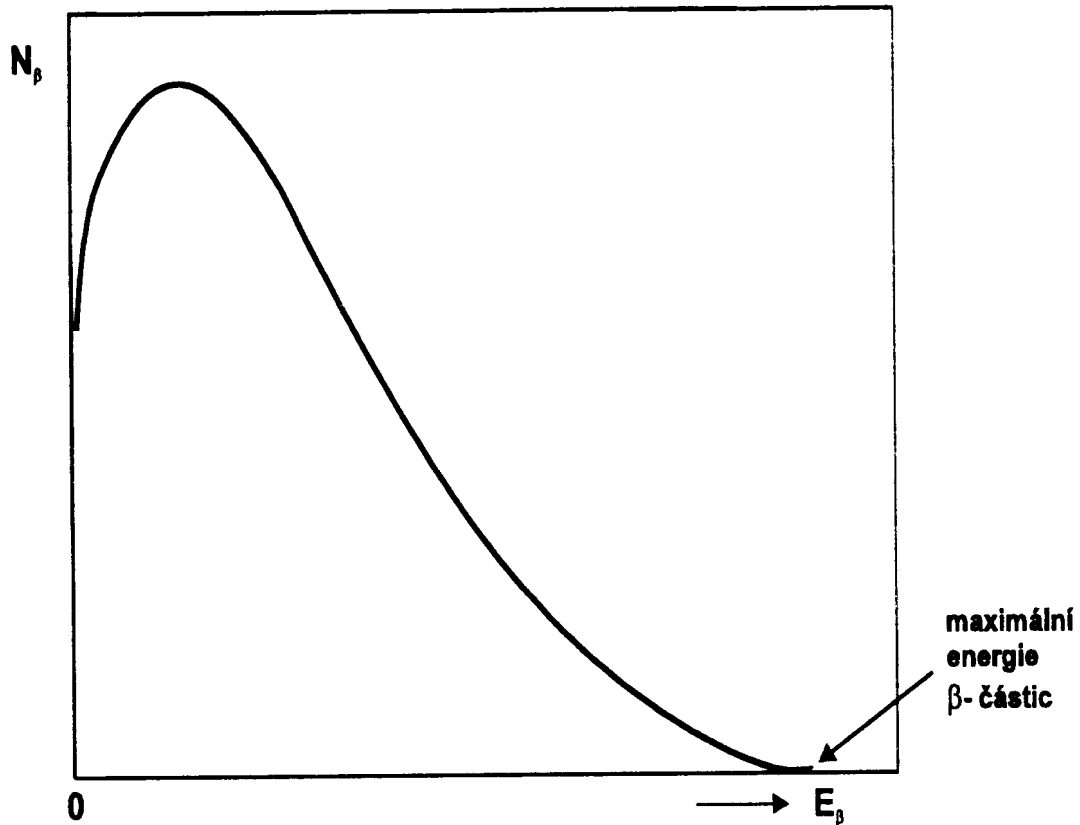


Typ interakce	Zprostředkování slabé interakce mezi nukleony	Chemická změna
přeměna β^- (negatronová přeměna)	$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$	${}^A_Z X \xrightarrow{\beta^-} {}^A_{Z+1} Y^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
přeměna β^+ (pozitronová přeměna)	$p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$	${}^A_Z X \xrightarrow{\beta^+} {}^A_{Z-1} Y^- + e^+ + \nu_e$
elektronový záchyt (EZ)	$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$	${}^A_Z X \xrightarrow{EZ} {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$

Pozn.: $\bar{\nu}_e$ - elektronové antineutrino
 ν_e - elektronové neutrino

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

- emise elektronového antineutrína u β^- , elektronového neutrína u β^+ , souvisí:
 - se zákonem zachování energie,
 - hybnosti
 - leptonového čísla
- ⇒ vznikající elektrony nemají stejnou energii – existuje celé spojité spektrum negatronů, resp. pozitronů ⇒ **záření má svou maximální energii**



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:

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

Jádro Y vzniká buď:

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



nuklid X	nuklid Y	$E_{\text{max},\beta}$ (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)

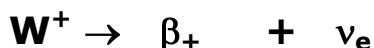
nuklid X	nuklid Y	a	b	$E_{\text{max},\beta}$ (MeV)	E_γ (MeV)
^{42}K	^{42}Ca	80	20	a: 3,5 b: 2,0	1,5
^{137}Cs	^{137}Ba	8	92	a: 1,18 b: 0,52	0,66
^{141}Ce	^{141}Pr	30	70	a: 0,58 b: 0,43	0,15

Pozitronová přeměna se vyskytuje pouze u nuklidů připravených jadernými reakcemi s relativním nadbytkem protonů

Hmotnostní podmínka pro jaderné hmotnosti:

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

je vyvolána změnou kvarkového složení protonu, kterou zprostředkovává virtuální částice W^+



Jádro Y vzniká analogicky buď:

- v základním stavu (přeměny ^{15}O , ^{17}F , ^{19}Ne aj.)
- ve vzbuzeném stavu (přeměny ^{14}O , ^{23}Mg , ^{62}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

Př.



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

- Hmotnostní podmínka pro jaderné hmotnosti:

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

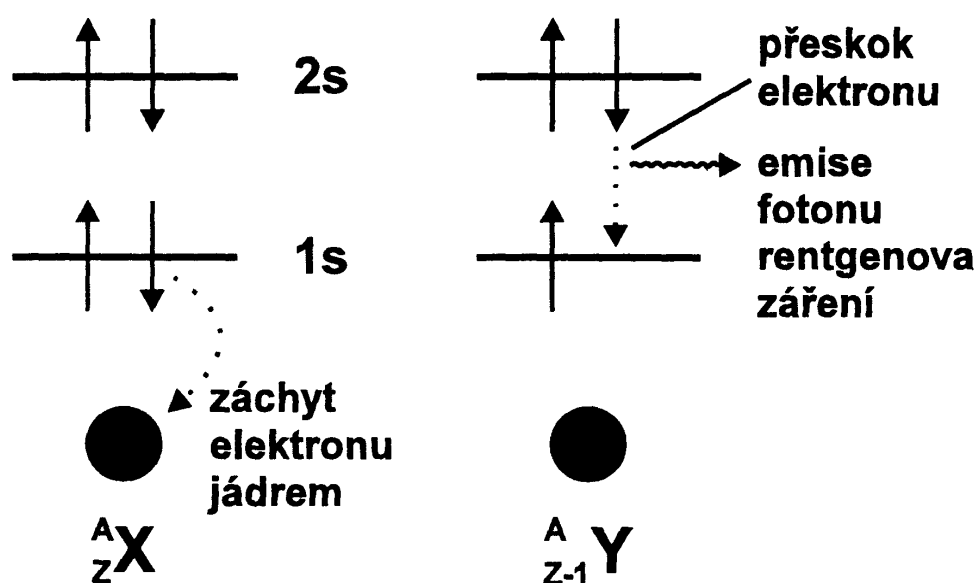
- je vyvolána změnou kvarkového složení protonu, kterou zprostředkovává virtuální částice W^-

Př.



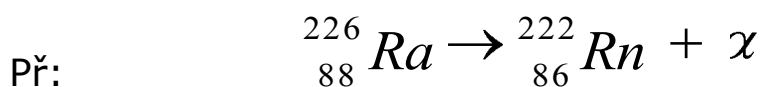
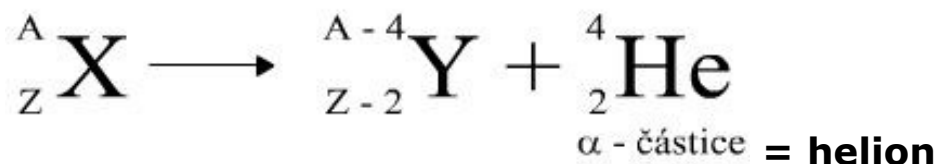
Neutrino nelze běžnými detektory zachytit \Rightarrow registruje se podle následných dějů:

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



Přeměna α

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



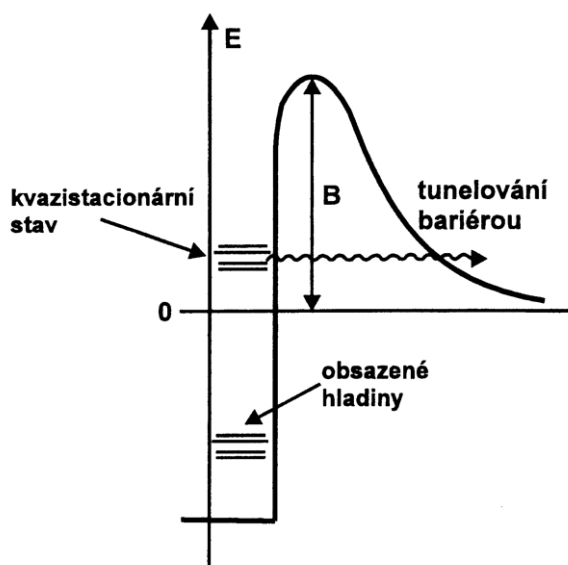
Hmotnostní podmínka pro jádra:

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

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:

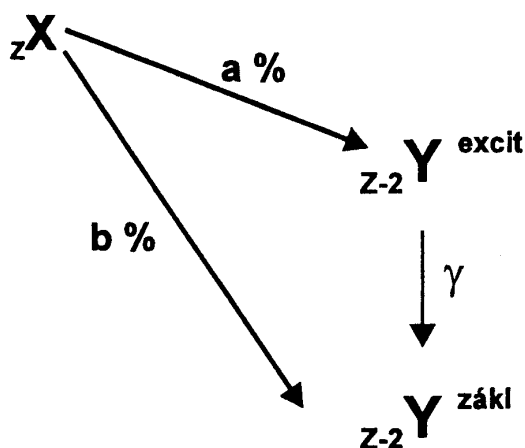
^{226}Ra	výška potenciálové bariéry (MeV)	energie α (MeV)
	23	4,8

Pozn.

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.

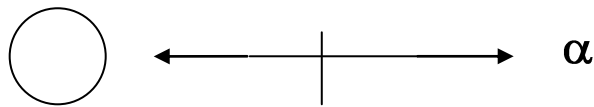
Přeměna α může probíhat za vzniku dceřiného jádra ve základním (b) nebo vzbuzeném stavu (a)



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



jádro Y

jádro X

Odrazová energie:

$$E_Y = \frac{m_\alpha + 2Q_\alpha}{m_Y + n_\alpha}$$

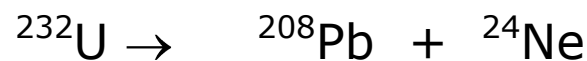
Odrazová energie představuje cca **2%** celkové přeměnové energie (desítky keV)

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

Emise těžkých jader

- vzácný typ přeměny
- musí být splněna hmotnostní podmínka

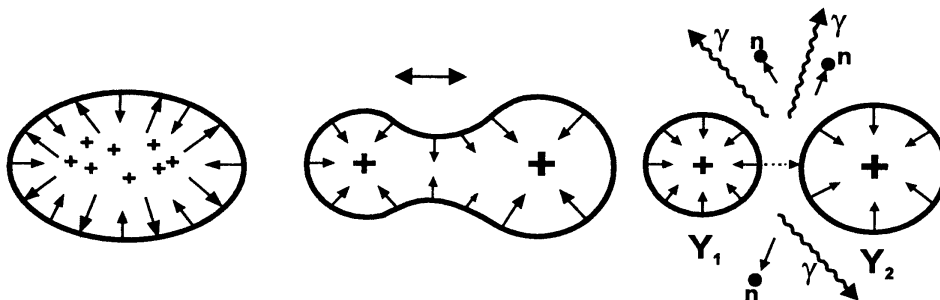
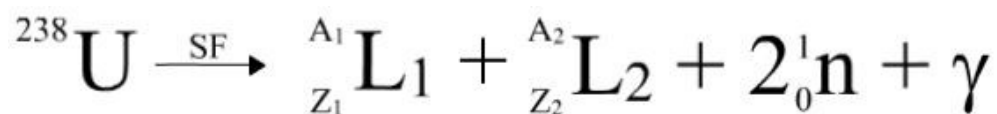
Příklady:



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)

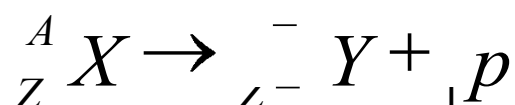
S rostoucím parametrem štěpení klesá poločas rozpadu
 samovolného štěpení nuklidu:

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

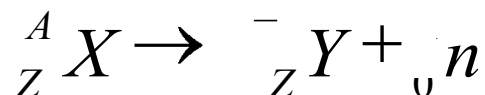
Emise nukleonů

- jev, kdy se z mateřského jádra uvolňuje

proton



neutron

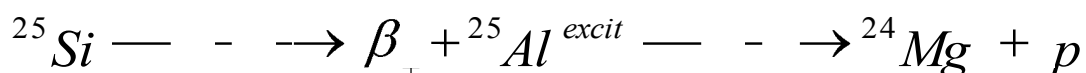


- vzácný typ rozpadu, neboť zpravidla není splněna hmotnostní podmínka (jádro X je v základním energetickém stavu)
- nastává při extrémním relativním nadbytku protonů nebo neutronů (vazebná energie nukleonů je malá)



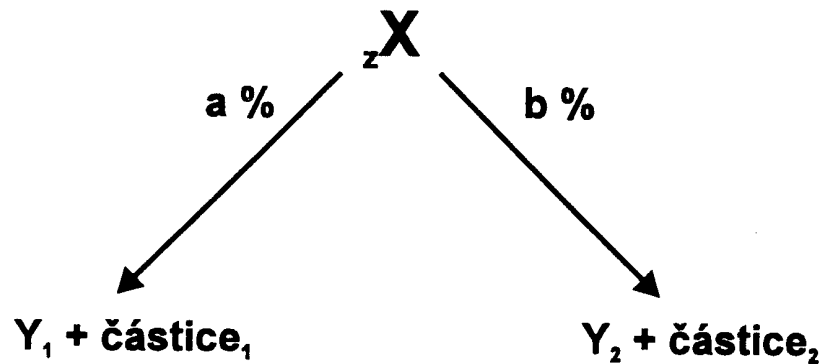
Pozn. *stabilní nuklidy lutecia mají A=175 a 176*

- 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 ${}^{235}\text{U}$ a ${}^{239}\text{Pu}$ (cca 0,65% celkových neutronů – nutno s nimi počítat při řízení reaktoru)

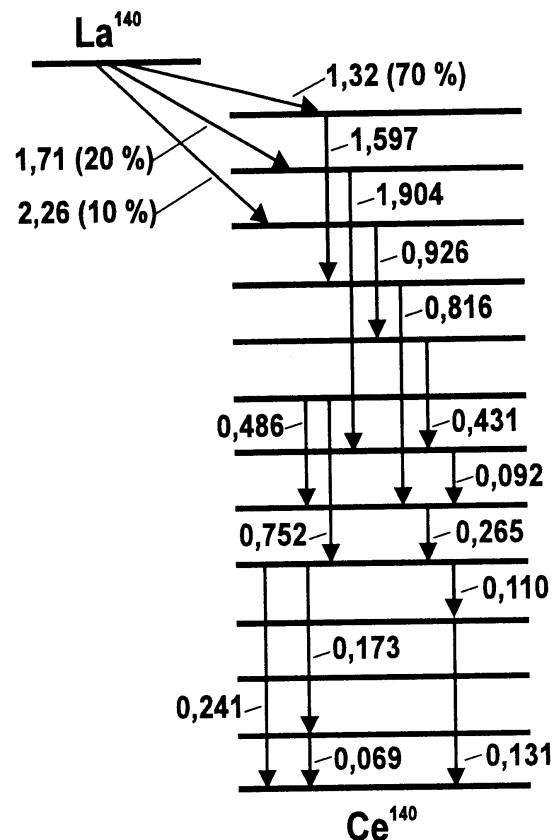
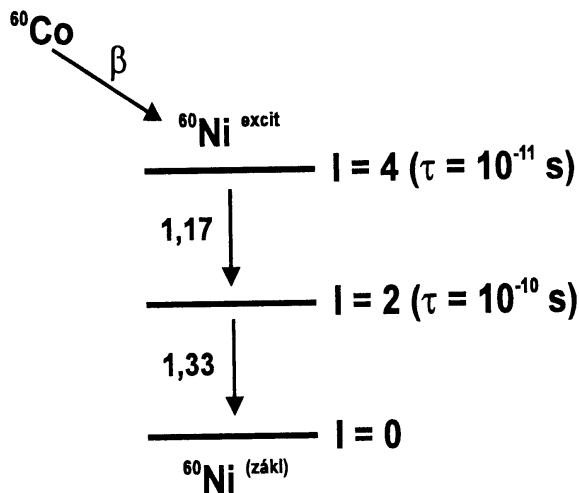
Větvené přeměny



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

Typy větvených přeměn:

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

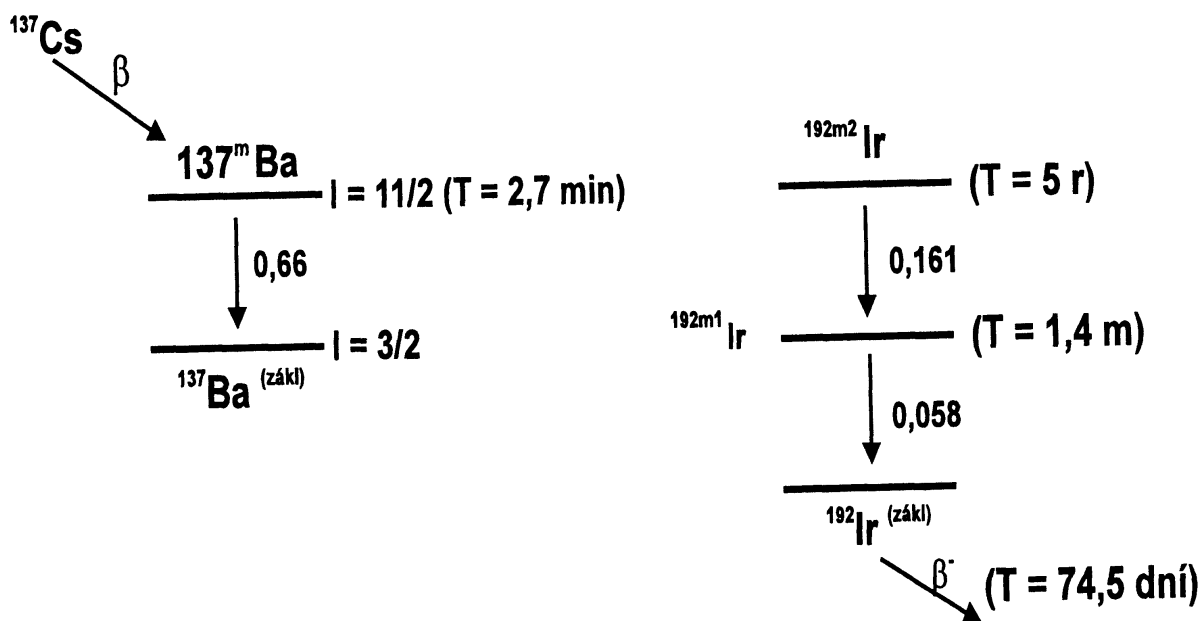


Přeměna γ + vnitřní konverze

- vyskytuje se často u excitovaných jader
- **deexcitace** probíhá vyzářením jednoho nebo více fotonů elektromagnetického záření
- emise fotonů je dějem mezi diskretními energetickými stavy o určité energii \Rightarrow spektrum γ je čárové
- emise fotonu je vždy provázena změnou jaderného spinu (foton má spin = 1)
- přechody $|\Delta I| = 1$ nebo 2 jsou nejpravděpodobnější (**dovolené přechody**) doba života excitovaných stavů je cca 10^{-16} - 10^{-10} s, resp. 10^{-11} - 10^{-4} s pro $|\Delta I| = 2$

okamžitá emise γ záření

- deexcitace může nastat postupnou emisí několika fotonů
- přechody, kde $|\Delta I| > 2$, jsou méně pravděpodobné – jsou tzv. **zakázané**
- ⇒ **emise fotonů se projeví delším poločasem deexcitace**



10^{-3} s až roky) – zpožděná emise γ záření (vznik jaderných izomerů)

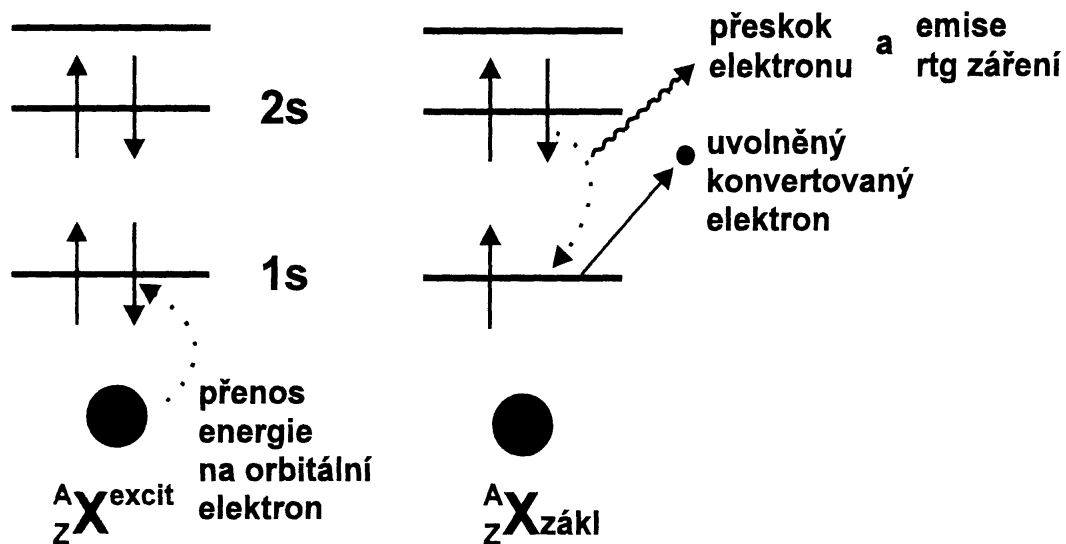
- emise γ záření je velmi významná – umožňuje měření aktivity nuklidů, slouží k jejich identifikaci

- zdroje γ záření

^{60}Co , ^{137}Cs , $^{192\text{m}}\text{Ir}$

Vnitřní konverze

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



- proces je umožněn překryvem vlnových funkcí orbitálního elektronu a excitovaného jádra
- uvolňují se tzv. **konvertovaný elektron** (má diskretní 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)