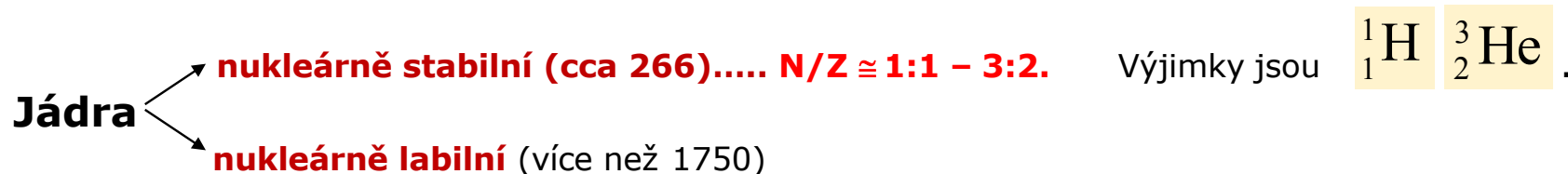




3. Radioaktivita



- 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, tj. $N/Z = 1 - 1,5$, je jádro s velkou pravděpodobností nestabilní a **je jádrem radioaktivním.**



Radioaktivita je projevem nukleární nestability jader.

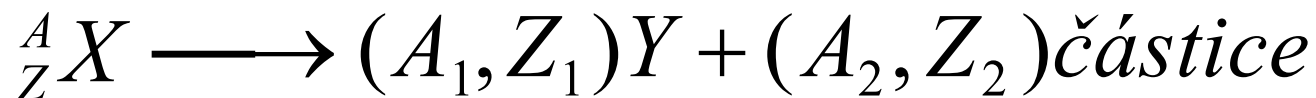
Spočívá v jejich přeměně na jiný nuklid, přičemž dochází současně k eliminaci některé z elementárních částic, ev. jejich skupin, z prostoru rozpadajícího se jádra.

Pro radioaktivní přeměnu 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

$$\mathbf{A = A_1 + A_2} \qquad \mathbf{Z = Z_1 + Z_2}$$

- při samovolné radioaktivní přeměně se **vždy** uvolňuje energie (**exoergický děj**)



mateřské

dceřinné jádro

vysokoenergetická částice

- 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

- **deexcitace jádra se projeví vyzářením fotonu γ**

- tato excitovaná jádra nejsou zpravidla stabilní a přeměňují se ihned dále



Typy přeměn

přeměna se zachováním A , Z se mění. Jde o 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 kvanta gama



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

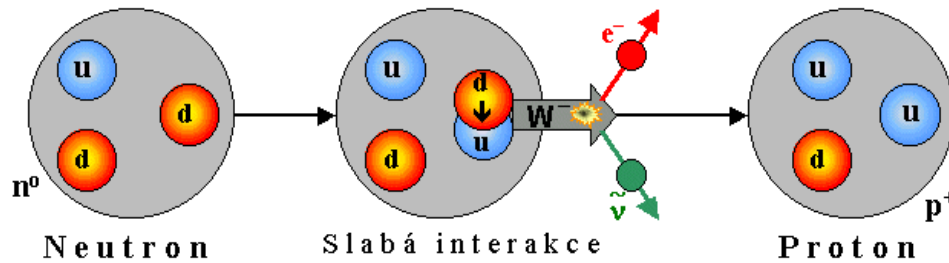
Přeměny β

(negatronová, pozitronová, elektronový záchyt)



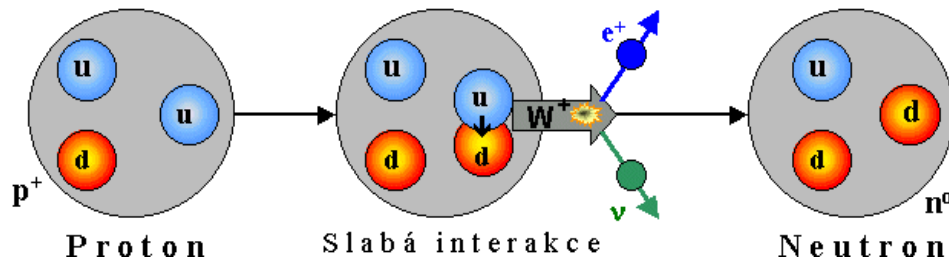
Tento typ přeměny je spojen se změnou kvarkového složení jednoho z nukleonů.

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



W- virtuální částice (gluon)

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, β^-

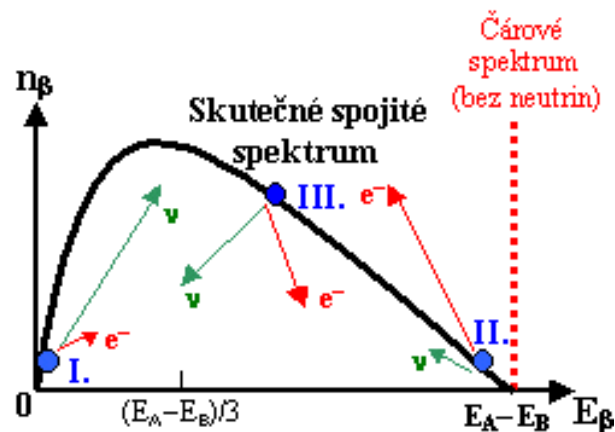
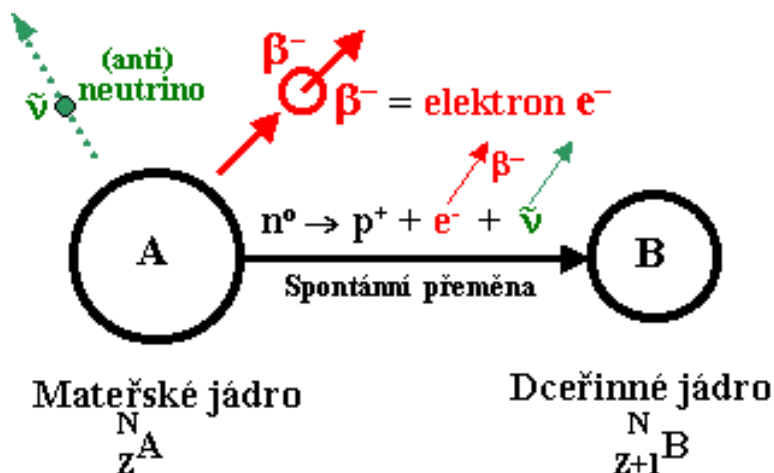
je běžným typem rozpadu nestabilních jader a setkáváme se s ní u přírodních i uměle připravených radionuklidů **s relativním nadbytkem neutronů**.



Hmotnostní podmínka pro jaderné hmotnosti zúčastněných částic:

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

Radioaktivita β^-



Jak vyplývá ze schématu přeměny β^- , má toto záření spojité spektrum a dosahuje tzv. maximální energie. Nutno si uvědomit, že při beta procesu vznikají dvě malé částice (elektron a antineutrino), které mají svou vlastní kinetickou energii – součet velikostí těchto energií odpovídá energii procesu. Je-li tedy kinetická energie antineutrina nulová, pak elektro dosahuje energie maximální.

Jádro B vzniká buď: pouze v základním stavu (přeměny ^3H , ^{14}C , ^{32}P aj. nebo 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

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

Tato tabulka uvádí vybrané nuklidy s kombinovanou přeměnou beta-gama a energie jejich záření.

(Hodnoty a i b jsou v %)

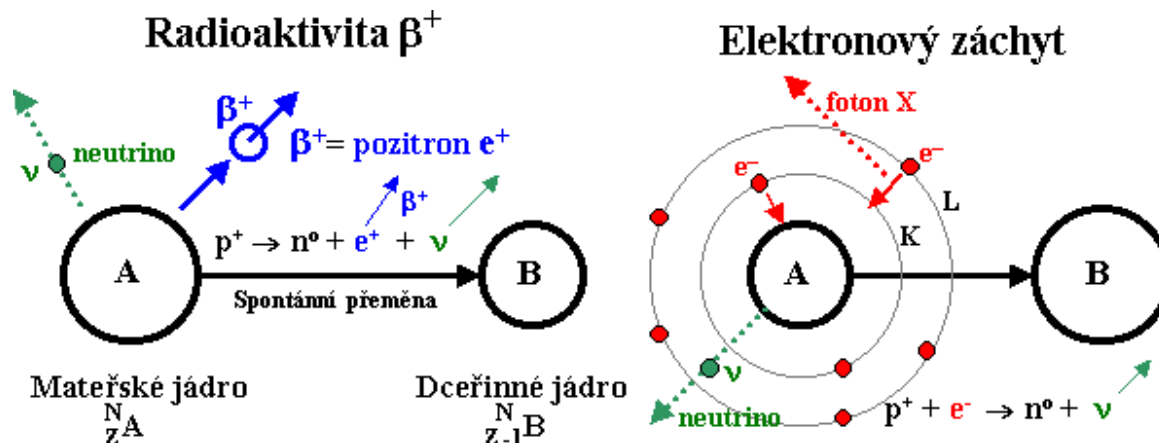
Důležité:

Maximální energie beta záření je pro danou přeměnu charakteristická a tato hodnota, pokud je určena, slouží k identifikaci přeměňujícího se radionuklidu.

Najde s jaderných tabulkách.

Pozitronová přeměna a elektronový záchyt

se vyskytují pouze u nuklidů připravených uměle 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 (EZ) 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 vznik: **charakteristického rentgenova záření a Augerovy elektrony** (vznikají při průchodu rtg záření vyššími elektronovými slupkami \Rightarrow mají **diskrétní energii**).

Příklad přeměny pozitronového zářiče ^{22}Na
(má o jeden neutron méně, než má monoizotopický ^{23}Na).



Tento „**relativní nedostatek počtu neutronů**“ = **relativní nadbytek počtu protonů**
se projeví β^+ aktivitou



Pozitron (antičástice elektronu) je poměrně nestálý ($\sim 10^{-10}$ s),

po zpomalení srážkami dochází k interakci s elektronem (**anihilační reakce**)



vznikající fotony se využívají při **měření pozitronických radioaktivních nuklidů**.

Příklad elektronového záchytu:



Dceřinné jádro lithia vzniká:

- 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

Chemické změny při přeměnách beta

Fajans - Soddyho posunová pravidla



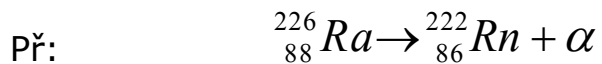
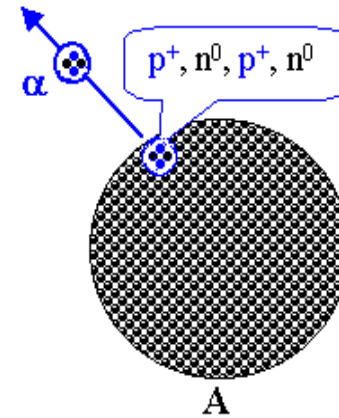
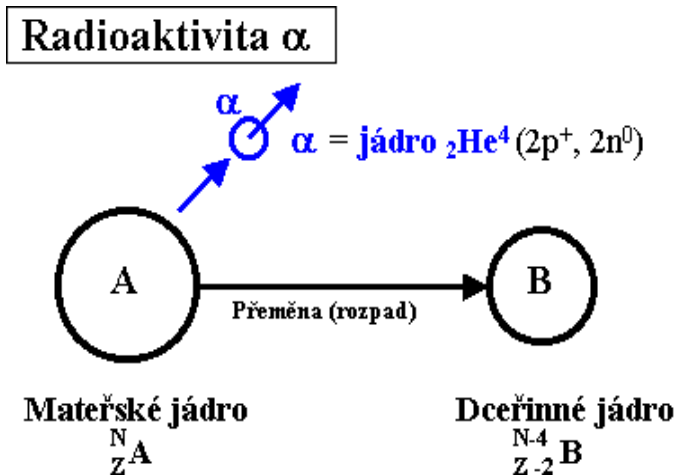
Typ interakce	Chemická změna	Posun v periodickém systému
přeměna β^-	${}^A_Z X \xrightarrow{\beta^-} {}^A_{Z+1} Y^+ + e^- + \tilde{\nu}_e$	o jedno místo doprava
přeměna β^+	${}^A_Z X \xrightarrow{\beta^+} {}^A_{Z-1} Y^- + e^+ + \nu_e$	o jedno místo doleva
elektronový záchyt (EZ)	${}^A_Z X \xrightarrow{EZ} {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$	o jedno místo doleva



Přeměna α

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

Hmotnostní podmínka pro jádra: $M(A, Z) > M(A-4, Z-2) + m_\alpha$



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

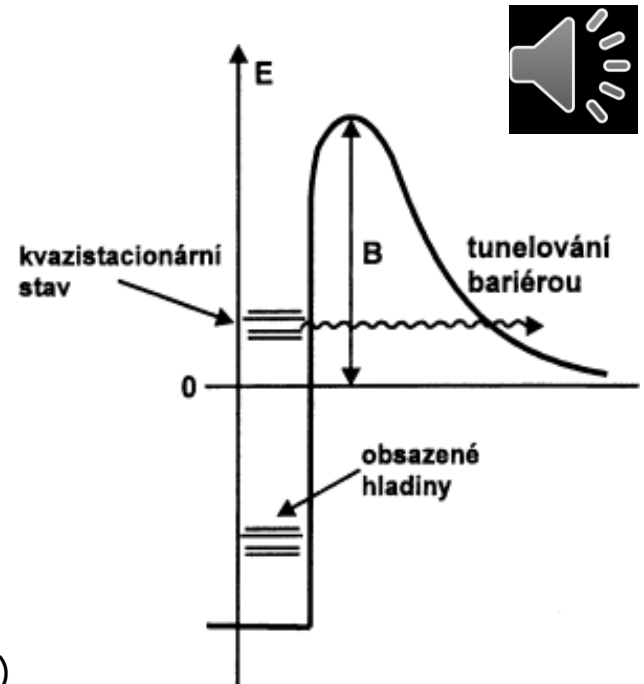


Vznikající částice α

- má relativně nízkou hmotnost
 - a dostatečně velkou vazebnou energii (stabilní částice)
- ⇒ Její tvorba **je energeticky výhodnější jako jiný shluk nukleonů**,
- proces emise α se děje tzv. **tunelovým efektem**.

Důkaz tunelového efektu:

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



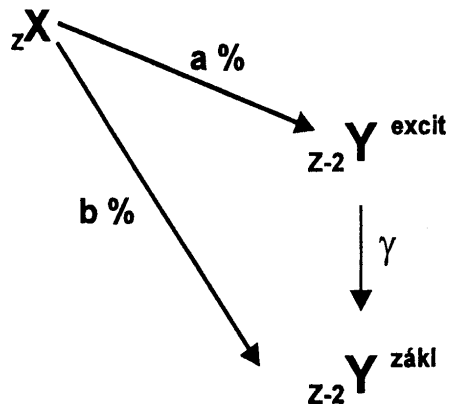
Poznámka

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 (a) nebo vzbuzeném stavu (b)

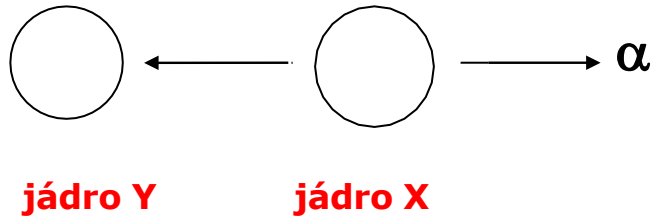


nuklid X	nuklid Y	a (%)	b (%)	E_α (MeV)	E_γ (MeV)
^{210}Po	^{206}Pb	~ 100	0,001	a: 5,30 b: 4,50	0,8
^{226}Ra	^{222}Rn	94,3	5,7	a: 4,77 b: 4,59	0,18
^{232}Th	^{228}Ra	80	20	a: 3,98 b: 3,90	0,08
^{238}U	^{234}Th	77	23	a: 4,24 b: 4,19	0,05

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 tzv. odrazu



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

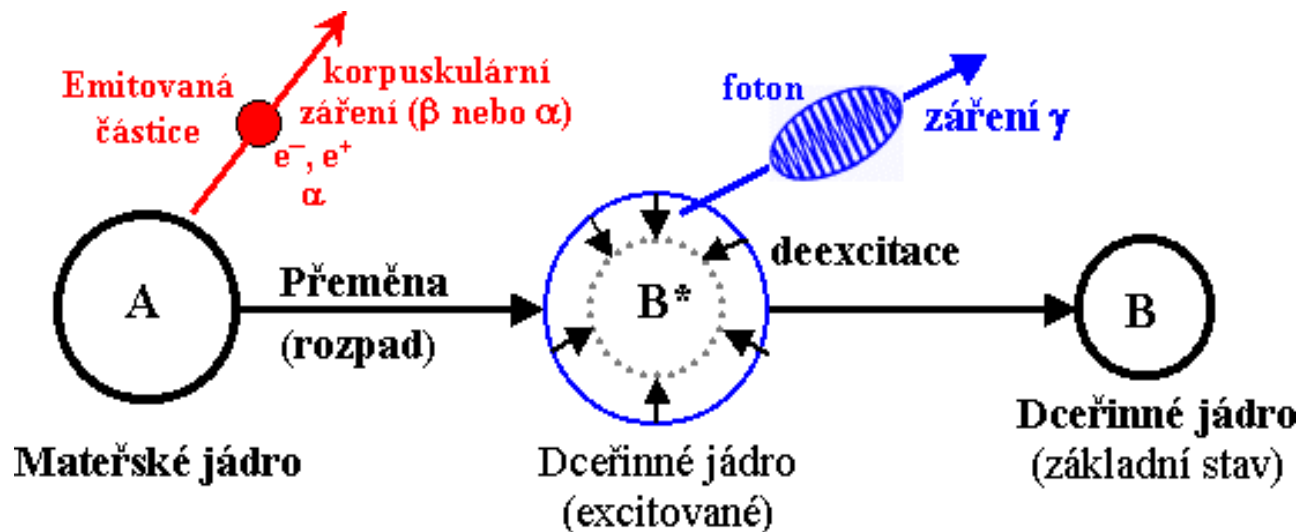
Odrazová energie: představuje cca **2 %** celkové přeměnové energie (desítky keV)

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

Přeměna γ



- Záření gama je vysokoenergetické elektromagnetické záření vznikající deexcitací vzbuzených hladin mateřského atomového jádra
- U dceřinného jádra se jedná o deexcitaci vzbuzených hladin vzniklých po radioaktivní přeměně.





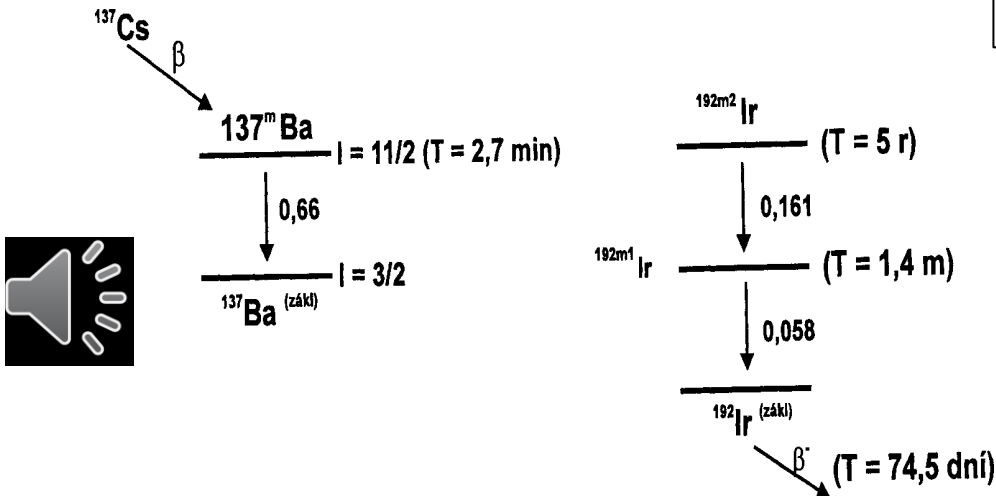
- **deexcitace vzbuzeného jádra** probíhá vyzařením jednoho nebo více fotonů elektromagnetického záření najednou nebo postupně
- emise fotonů je dějem mezi diskrétními energetickými stavy o určité energii
⇒ **spektrum fotonů γ je čárové**
- emise fotonu je vždy provázena změnou jaderného spinu I (foton má spin 1)

Je-li změna jaderného spinu $|\Delta I| = 1$ nebo 2 (jsou nejpravděpodobnější), pak jde přechody s okamžitou emisí kvanta gama (tzv. **dovolené přechody**)
Zakázané přechody jsou ty, kde $|\Delta I| > 2$, jsou méně pravděpodobné.

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

Zpožděná emise γ záření nastává po základné přeměně podstaně později a vede ke **vzniku jaderných izomerů**)

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

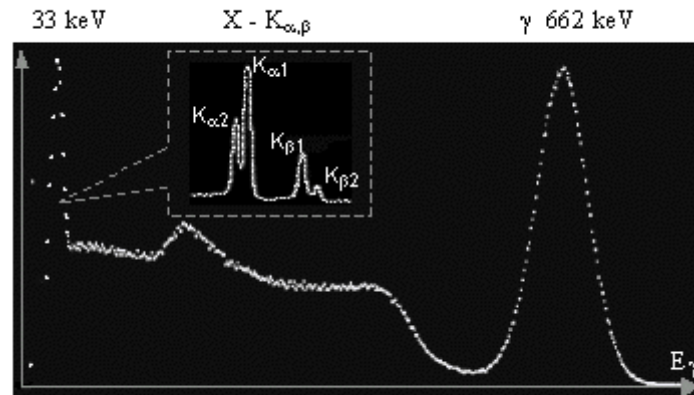
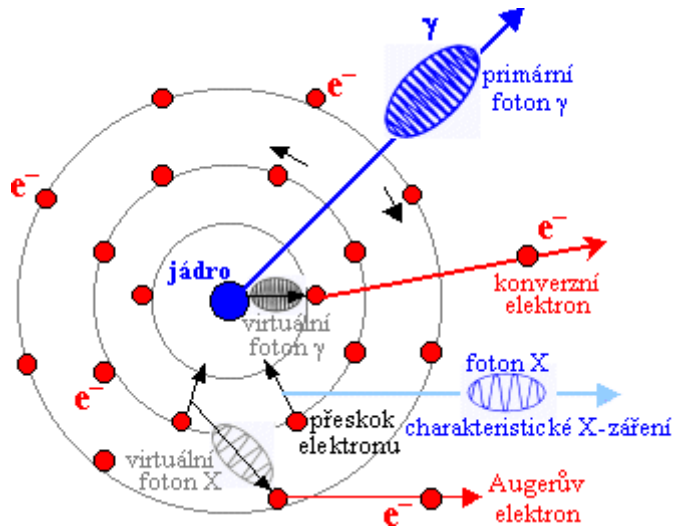


Emise γ záření je velmi významná – umožňuje měření aktivity nuklidů, slouží k jejich identifikaci



Vnitřní konverze kvanta gama

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



¹³⁷Cs - scintilační spektrum

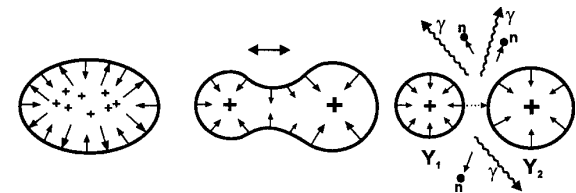
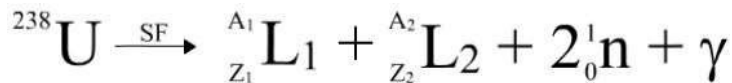


- proces je umožněn překryvem vlnových funkcí orbitálního elektronu a excitovaného jádra
- uvolňuje se tzv. **konverzní elektron** (má diskrétní energii)
- po uvolnění konvertovaného elektronu se vakance v elektronovém orbitalu zaplňuje elektronem z vyšší hladiny a dochází ke **vzniku charakteristického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

Samovolné štěpení (SF – spontaneous fission)

se vyskytuje u jader:

- s vysokým počtem protonů
- s elipsoidním tvarem jádra, které se zaškrťí a rozdělí
- 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 nukleonů v jádře a energie povrchové, která naopak drží jádro pohromadě).

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

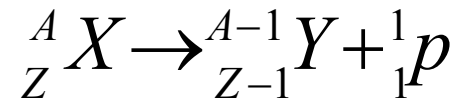


Emise nukleonů

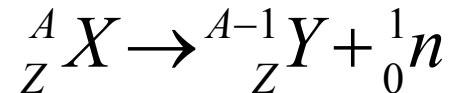


jev, kdy se z mateřského jádra uvolňuje

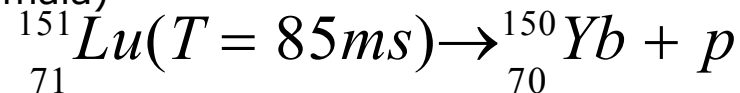
proton



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)

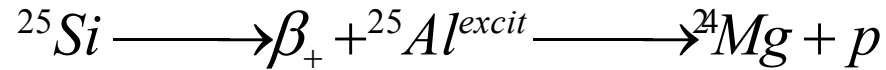


Pozn. *stabilní nuklidy lutecia mají A=175 a 176*

- emise nukleonů se pozoruje u vysoce excitovaných stavů jader s nadbytkem protonů nebo neutronů, kdy emisi nukleonu předchází přeměna β , která je relativně pomalá.



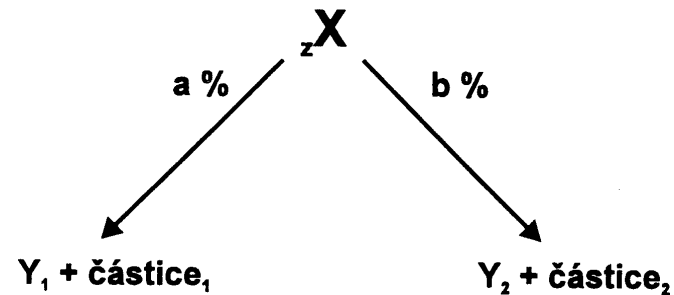
- následně vzniklé nukleony se nazývají jako **zpožděné**.



Poznámka:

- 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



- probíhají najednou v různém zastoupení
- hmotnostní podmínka přeměny umožňuje dva či více typů přeměny
- každá dílčí přeměna má svou pravděpodobnost a energii

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

Přeměnová schemata a Fajans-Soddyho posunová pravidla

