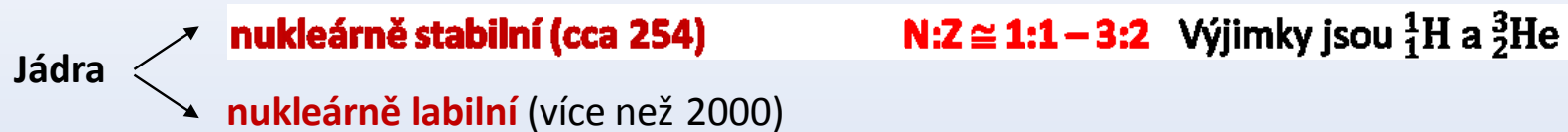


3. Radioaktivita



- 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.

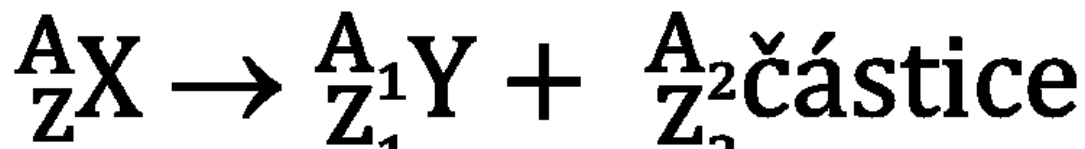
Pro radioaktivní přeměnu platí následující charakteristiky:

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

$$A = A_1 + A_2$$

$$Z = Z_1 + Z_2$$

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



mateřské jádro

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 zůstala v jádru Y ve formě excitační energie,
- tato excitovaná jádra nejsou stabilní a dále se přeměňují,
- **deexcitace jádra** probíhá většinou vyzářením **fotonu** γ .

Typy přeměn

přeměna se zachováním A, Z se mění. Jde o β přeměny, jejichž podstatou jsou slabé interakce působící mezi leptonem a hadronem

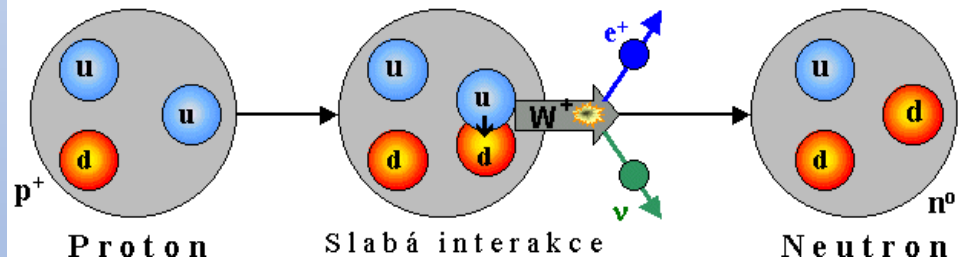
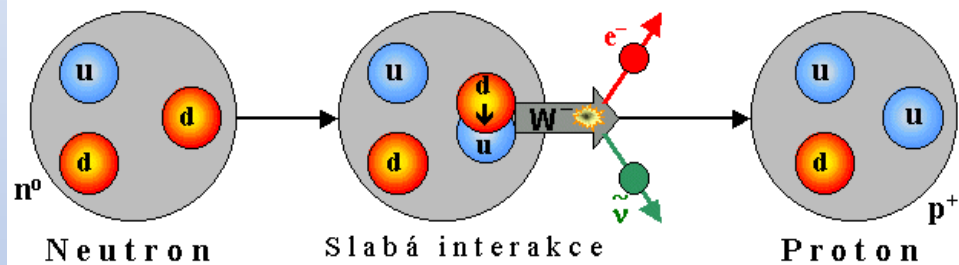
přeměny se současnou změnou A i Z (přeměny α , emise nukleonu nebo těžších jader, samovolné štěpení)

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 pozitron (antielektron)	β_- β_+	β - proces (negatronová nebo pozitronová přeměna)
foton	γ	γ - proces
neutron	n	samovolné štěpení

(negatronová, pozitronová, elektronový záchyt)

100



Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	0	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	± 1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS

LEPTONS

SCALAR BOSONS

**GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS**

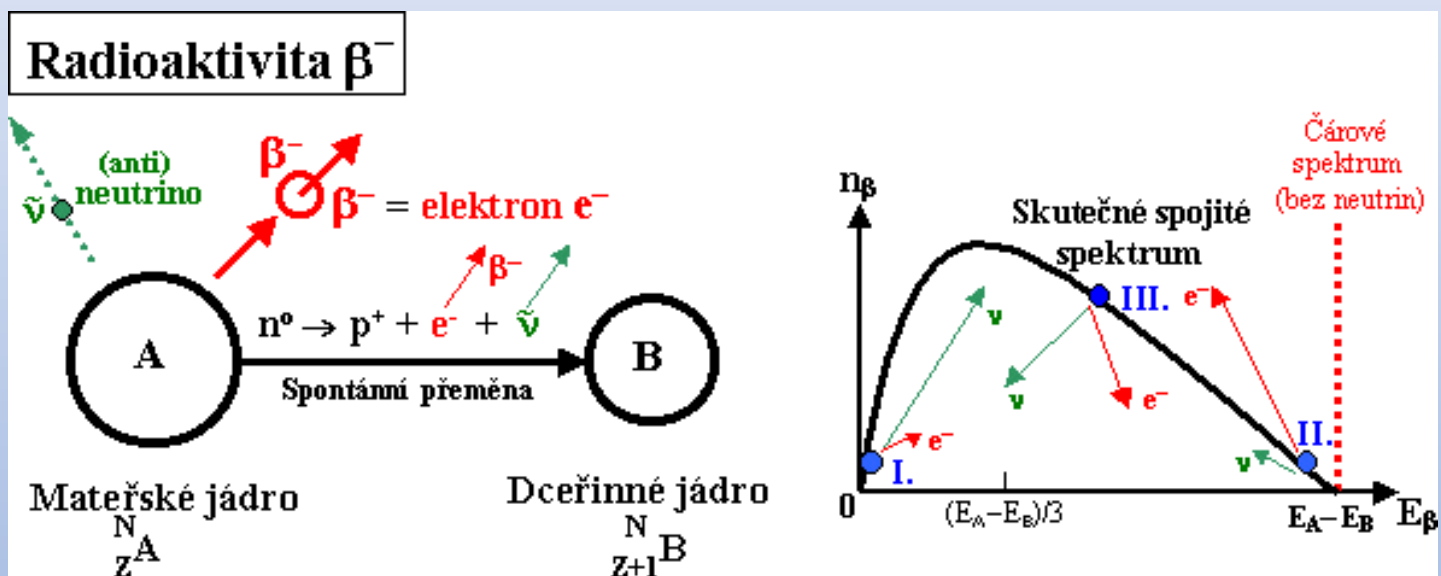
zářením β_- , resp. β_+ .

Negatronová přeměna, β_-

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

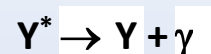
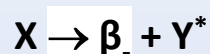
Hmotnostní podmínka pro jaderné hmotnosti zúčastněných částic:

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



Jak vyplývá ze schématu přeměny β_- , má toto záření spojitě 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 elektron dosahuje energie maximální.

Jádru 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	$E_{\max,\beta}$ (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

(Hodnoty a i b jsou v %)

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

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

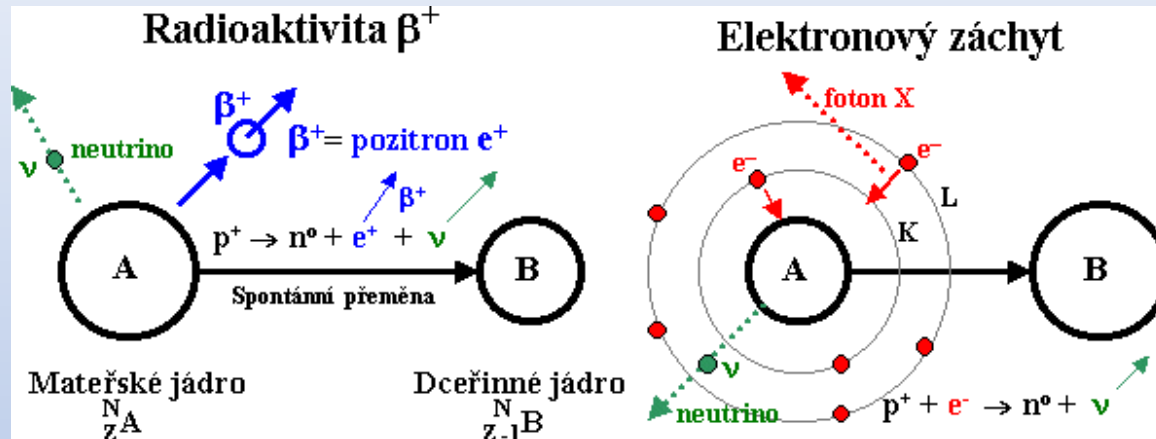
Důležité:

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

Najdete ji v jaderných tabulkách či příslušných databázích.

Pozitronová přeměna β_+ a elektronový záchyt EZ

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



Hmotnostní podmínka pro jaderné hmotnosti:

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

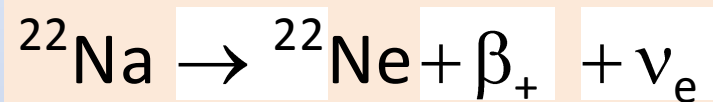
$$\text{EZ}: \quad M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1)$$

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.

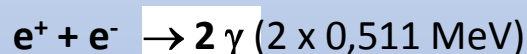
Při EZ pozorujeme současně vznik: **charakteristického rentgenova záření a Augerovy elektrony** (vznikají při průchodu rtg záření vyššími elektronovými slupkami $\Rightarrow$ mají **diskrétní energii**).

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

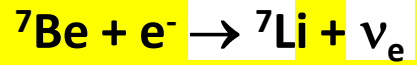


Pozitron (antičástice elektronu) je poměrně nestálý ($\sim 10^{-10}$ s), po zpomalení srážkami dochází k interakci s elektronem (**anihilační reakce**)



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

Příklad elektronového záchytu:



Dceřinné jádro 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.

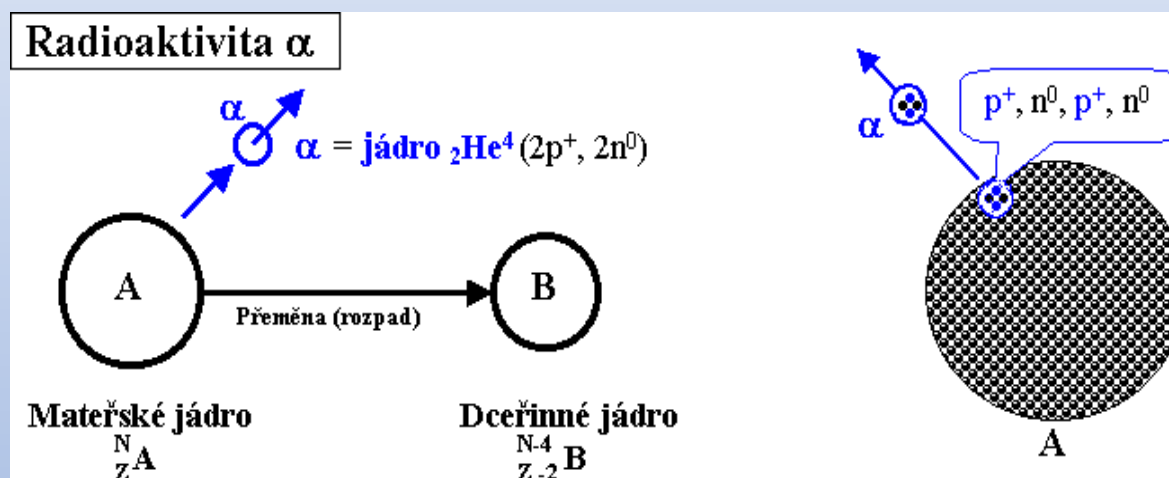
Chemické změny při přeměnách β
Fajans - Soddyho posunová pravidla

Typ interakce	Chemická změna	Posun v periodickém systému
přeměna β_-	${}_Z^AX \xrightarrow{\beta^-} {}_{Z+1}^AY^+ + e^- + \tilde{\nu}_e$	o jedno místo doprava
přeměna β_+	${}_Z^AX \xrightarrow{\beta^+} {}_{Z-1}^AY^- + e^+ + \nu_e$	o jedno místo doleva
elektronový záchyt (EZ)	${}_Z^AX \xrightarrow{EZ} {}_{Z-1}^AY + \nu_e$	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: $M(A, Z) > M(A-4, Z-2) + m_{\alpha}$



Příklad: ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha$

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

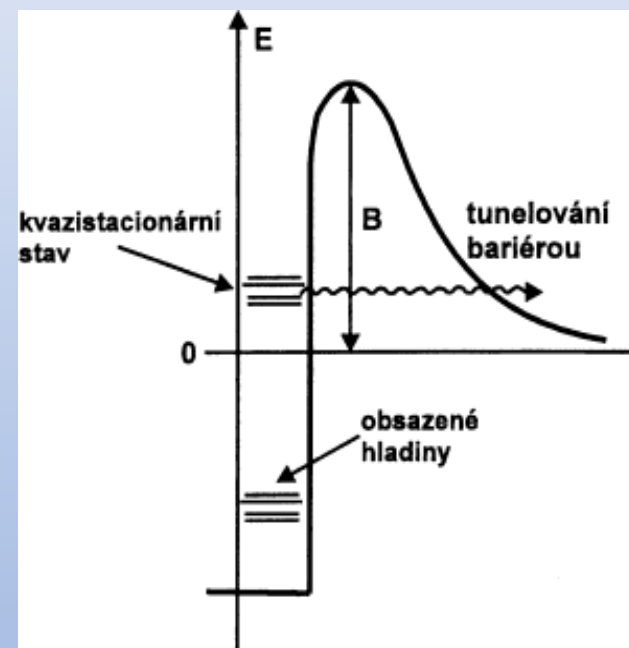
- má relativně nízkou hmotnost,
- a dostatečně velkou vazebnou energii (stabilní částice).

⇒ 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

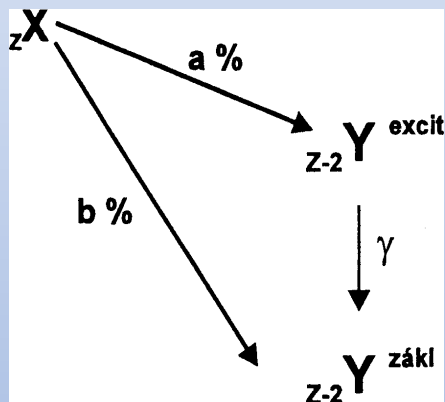


Poznámka

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)
${}^{210}\text{Po}$	${}^{206}\text{Pb}$	~ 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 tzv. odrazu.**



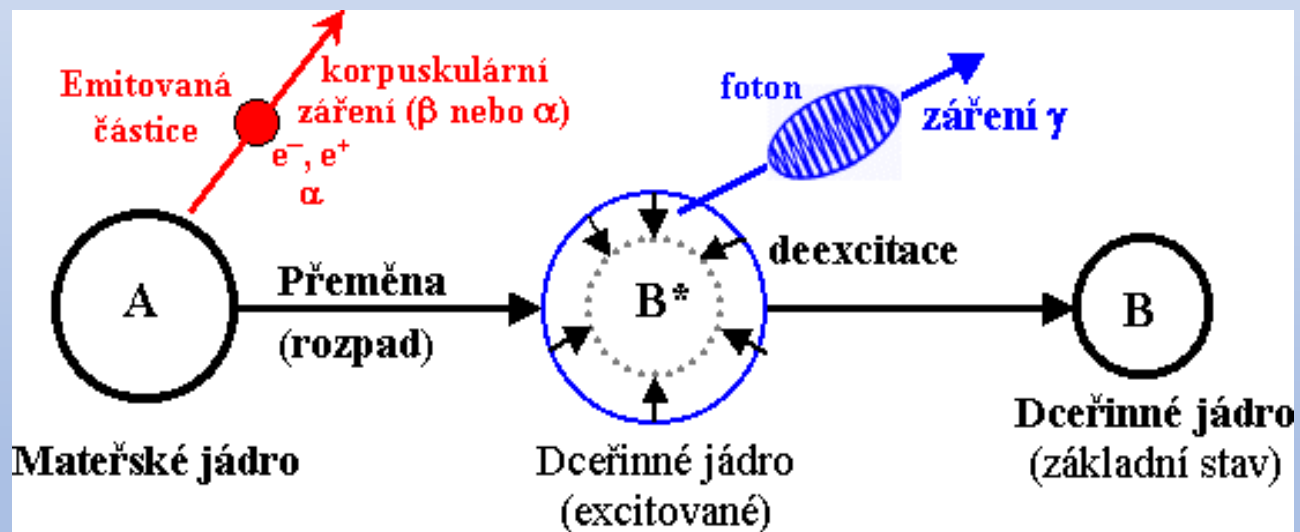
$$E_Y = Q_\alpha \frac{m_\alpha}{m_Y + m_\alpha} \quad \text{kde } Q_\alpha = 931,5 (m_X - m_Y - m_\alpha)$$

Odrazová energie: představuje cca **2 %** celkové přeměnové energie.

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

Přeměna γ

Záření gama je vysokoenergetické elektromagnetické záření vznikající deexcitací vzbuzených hladin po radioaktivní přeměně.



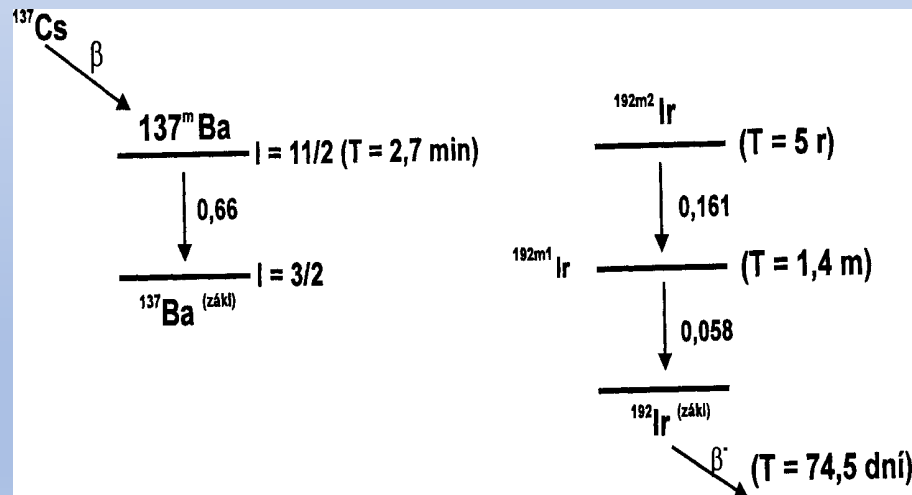
- **deexcitace vzbuzeného jádra** probíhá vyzářením jednoho nebo více fotonů elektromagnetického záření najednou nebo postupně,
- emise fotonů je dějem mezi diskrétními energetickými stavy o určité energii
 $\Rightarrow$ **spektrum fotonů γ je čárové**,
- emise fotonu je vždy provázena změnou jaderného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

Je-li změna jaderného spinu $|\Delta I| = 1$ nebo 2 (jsou nejpravděpodobnější), pak jde o 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 $|\Delta I| = 2$.

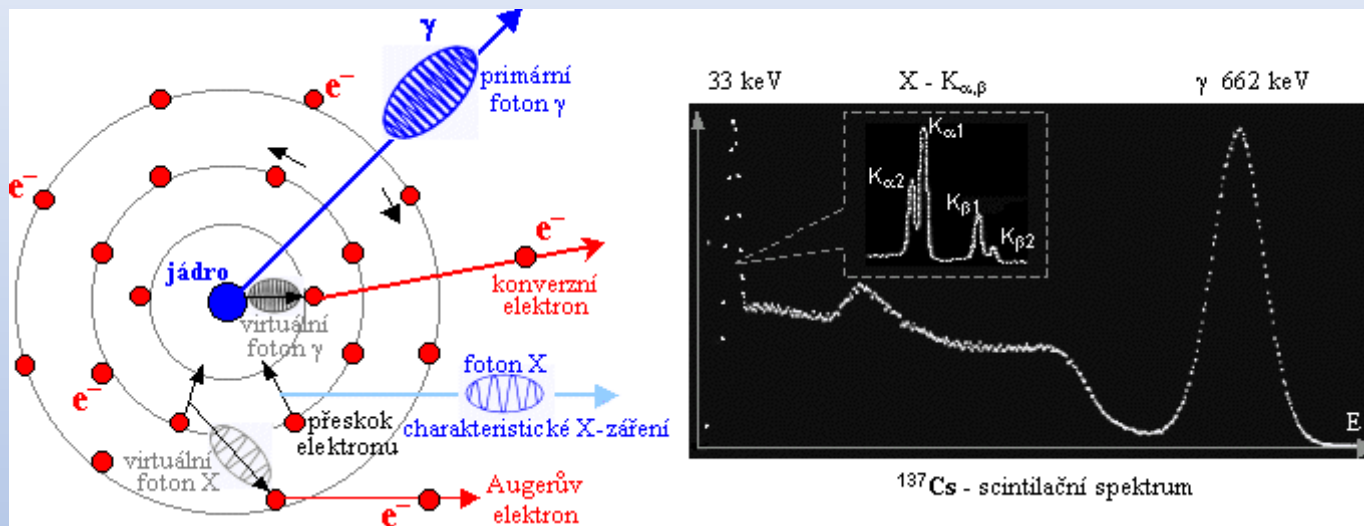
Zpožděná emise γ záření pro $|\Delta I| > 2$ vede ke **vzniku jaderných izomerů** $T_{1/2} = 10^{-3}$ až roky.



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),
- je-li $\Delta I = 0$ pak VK je jediný možný proces, protože **emise není v tomto případě možná**,

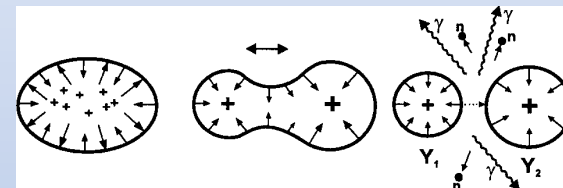
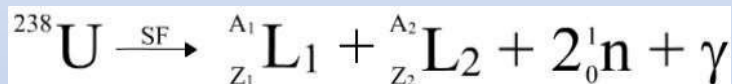


- proces je umožněn překryvem vlnových funkcí orbitálního elektronu a excitovaného jádra,
- ale uvolňuje se tzv. **konverzní elektron** (má diskrétní energii),
- po uvolnění konvertovaného elektronu se vakance v elektronovém orbitalu zaplňuje elektronem z vyšší hladiny a dochází ke **vzniku charakteristického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

Samovolné štěpení (*SF – spontaneous fission*)

se vyskytuje u jader:

- s vysokým počtem protonů,
- s elipsoidním tvarem jádra, které se zaškrť 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

$T_{1/2}$ celkový

4,468 GY

6561 Y

18,11 Y

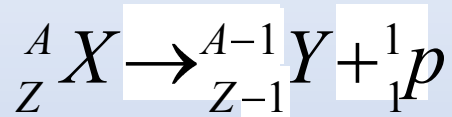
2,647 Y

3,240 h

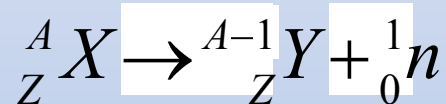
Emise nukleonů

jev, kdy se z mateřského jádra uvolňuje:

proton



neutron



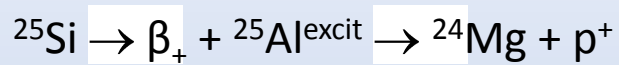
- vzácný typ rozpadu, neboť zpravidla není splněna hmotnostní podmínka (jádro X je v základním energetickém stavu),
- nastává při extrémním relativním nadbytku protonů nebo neutronů (vazebná energie nukleonů je malá),



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,

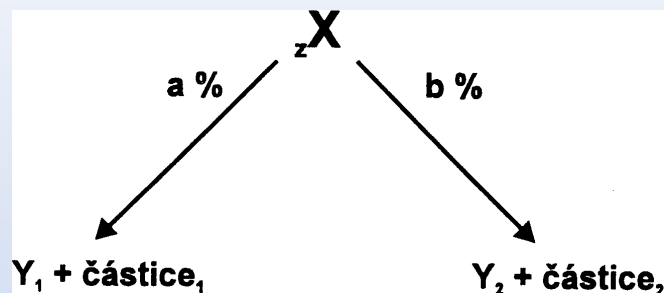
- následně vzniklé nukleony se nazývají jako **zpožděné**.



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

