

F

Y

Zika

Jaderná fyzika

➤ jádro prvku skládá ze P protonů a N neutronů ($A = P + N$)

Teoretickou hmotnost jádra vyjadřuje vztah:

$$m_{\text{teor.}} = P m_p + N m_n$$

kde m_p je hmotnost protonu
 m_n je hmotnost neutronu

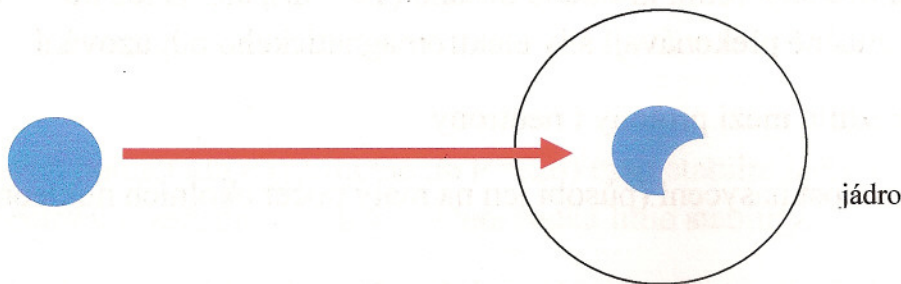
Je tedy rovna součtu hmotností všech nukleonů.

Ze všech měření však vyplývá, že skutečná hmotnost jádra je vždy menší než hmotnost nukleonů v jádře

$$m_j < m_{\text{teor.}}$$

$$m_j < P m_p + N m_n$$

Každý nukleon při vstupu do jádra ztrácí část své hmotnosti:



Rozdíl mezi teoretickou hmotností jádra a skutečnou hmotností jádra se nazývá **hmotnostní schodek** atomového jádra ΔM (v některých učebnicích **B**).

Hmotnostní schodek jádra ΔM je tedy součtem úbytků hmotností všech nukleonů uvnitř jádra. Každý nukleon transformuje část své hmotnosti ve prospěch soudržnosti jádra, na vytvoření vazebné energie jádra.

Tuto transformaci vysvětluje Einsteinův relativistický vzorec, který popisuje vzájemný vztah mezi energií a hmotností

$$E = mc^2$$

1.

(konstantou úměrnosti je kvadrát rychlosti světla, elektromag. vlny)

Projevem této energie je přitažlivá, soudržná jaderná síla, která eliminuje odpuzivé (elektrostatické) síly mezi protony. Jádru jako celek je stabilní. Jaderné síly mají ale velmi krátký dosah, řádově jen 10^{-15} m, působí tedy jen uvnitř jádra.

Mezi vazebnou energií jádra a hmotnostním úbytkem jádra potom platí vztah

$$E_v = \Delta Mc^2$$

Definice vazebné energie:

síl (k rozdělení jádra na jednotlivé Vazebná energie jádra je rovna takové vnější energii, která by se musela jádru dodat k překonání jaderných nukleonů).

Jaderné síly mají tyto vlastnosti:

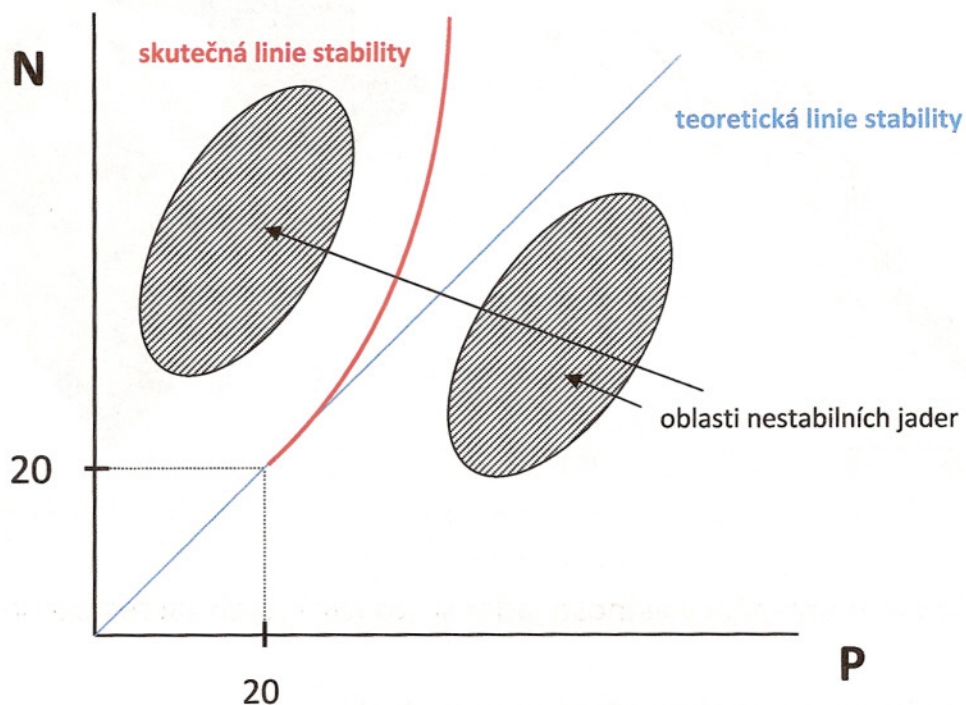
1. jsou to přitažlivé síly velmi krátkého dosahu (10^{-15} m), ale na těchto vzdálenostech značně překonávají síly elektromagnetického odpuzování
2. působí bez rozdílu mezi protony i neutrony
3. projevují vlastnost nasycení (působí jen na malý počet okolních nukleonů)

Vazebná energie jádra souvisí se stabilitou jádra (větší vazební energie – větší stabilita). Nestabilní jádro se samovolně rozpadá, vykazuje radioaktivitu, je zdrojem radioaktivního záření (α , β).

2.

Graf stability jader

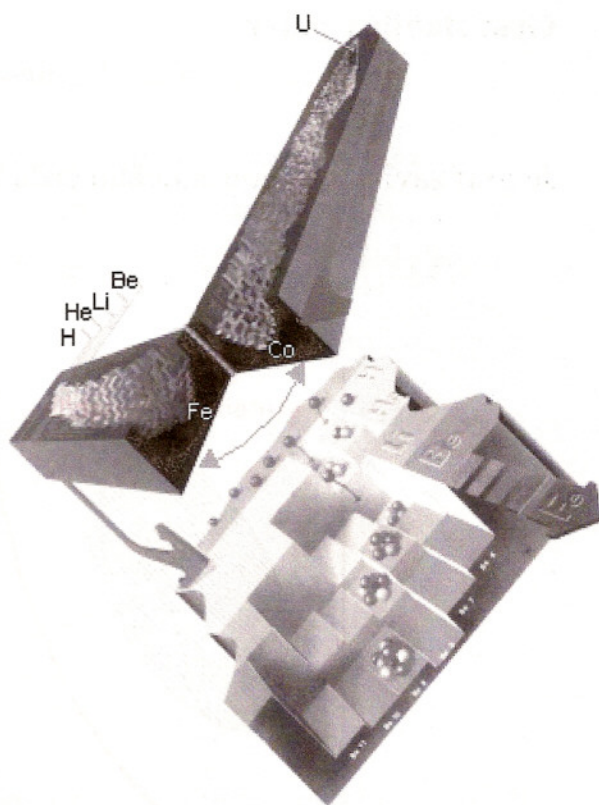
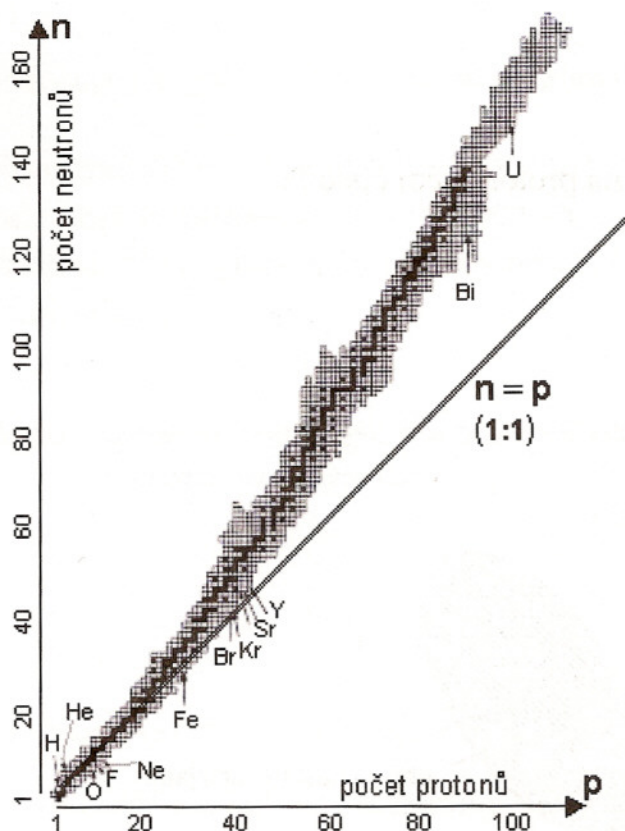
Je graf závislosti neutronového čísla N na protonovém čísle P .



Při malých hodnotách P (přibližně do $P = 20$) mají stabilní jádra přibližně stejný počet protonů i neutronů - na grafu teoretická linie stability.

S rostoucí hodnotou P v jádře převažují neutrony - na grafu skutečná linie stability jádra. To pomáhá kompenzovat odpuzivé síly mezi protony. Neutrony přispívají pouze k vazebné energii, jaderným silám, k odpuzivým ne.

Nejtěžší známý stabilní nuklid je ${}_{83}\text{Bi}$.



Pro přehledné znázornění vlastností jader se používá jejich zakreslení do mapy nuklidů:

Vlevo: Jednoduchá dvojrozměrná mapa nuklidů.

Vpravo: Trojrozměrná mapa včetně vazbových energií.

Nestabilní, radioaktivní jádro vyzařováním α a β záření se postupně přesouvá na linii stability. Přitom se původní, mateřský prvek postupně přeměňuje, transmutuje v jiné prvky. Jedná se o **přirozenou transmutaci prvků**.

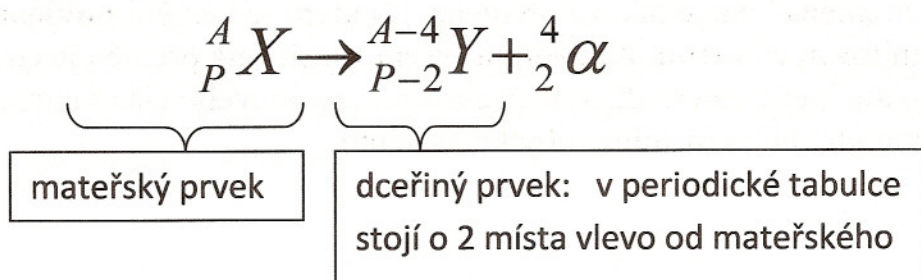
4.

Přirozená transmutace prvků

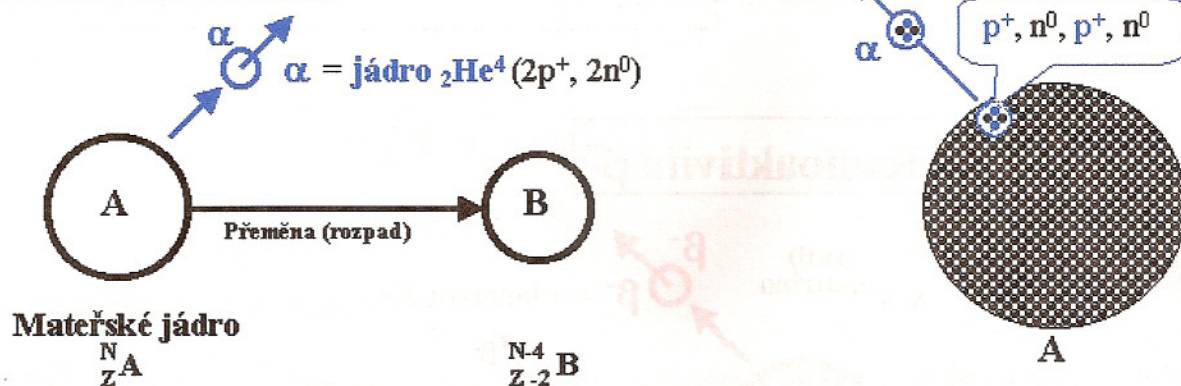
1. α rozpad jádra

Jádro je α zářič

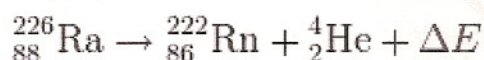
Radioaktivní přeměna alfa představuje přeměnu prvku doprovázenou emisí částice alfa a uvolněním energie ΔE (ve formě kinetické energie) odpovídající hmotnostnímu úbytku systému:



Radioaktivita α



Příklad:



Alfa částice je totožná s jádrem helia, jsou nositelem dvou kladných nábojů.

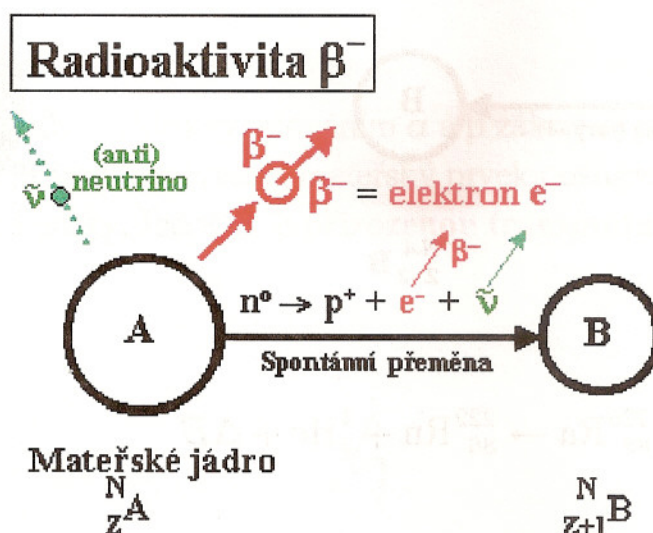
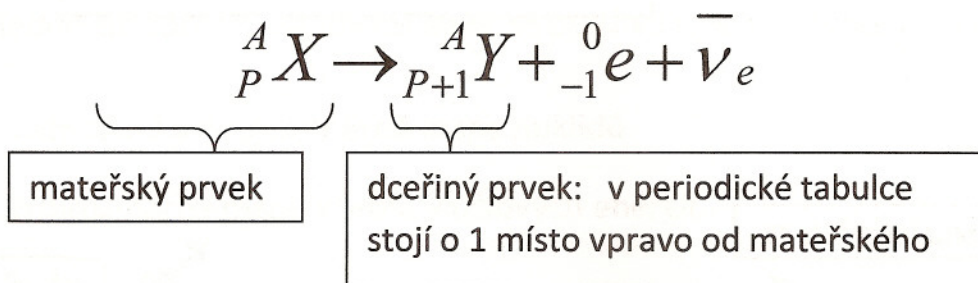
Alfa částice se pohybují poměrně pomalu a mají malou pronikavost, ale zato mají silné ionizační účinky na okolí.

Vzhledem k velikosti částic alfa záření jde o nejslabší druh **jaderného záření**, který může být odstíněn i listem papíru.

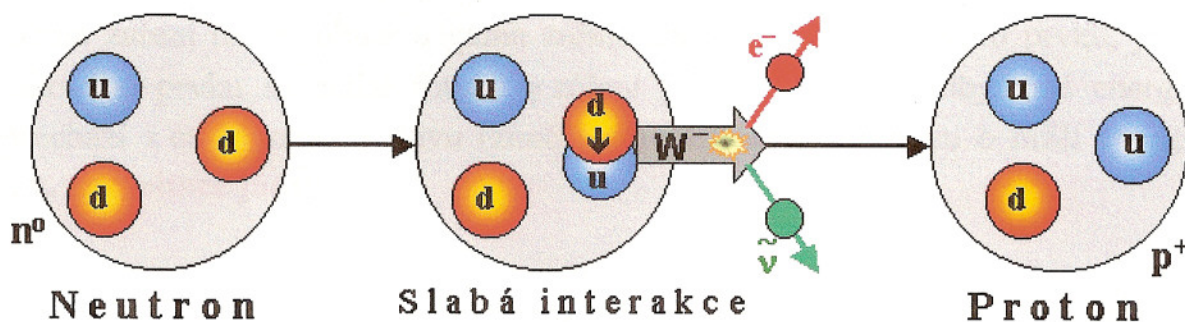
2. β rozpad jádra

Jádro je β zářič

Radioaktivní přeměna beta je taková přeměna, při které se nemění **nukleonové číslo A** a je emitován **elektron**. Základním rysem všech beta přeměn je emise elektronového **antineutrina** (z důvodu zachování leptonového čísla) a uvolnění energie odpovídající hmotnostnímu úbytku systému.



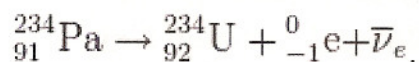
Beta⁻ - rozpad neutronu : $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$



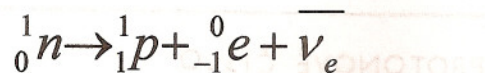
Schematické znázornění mechanismu β^- -rozpadu neutronu v rámci standardního modelu elementárních částic.

Nyní se v rámci standardního modelu elementárních částic mechanismus rozpadu beta vysvětluje **transmutací kvarků**. Neutron n^0 (s nulovým elektrickým nábojem) se skládá z kvarků **u-d-d**; kvark **u** má náboj $+2/3$, kvarky **d** náboj $-1/3$. Jeden z kvarků **d** se přemění na kvark **u** za zprostředkování virtuálního intermediálního bosonu W^- , jež odnáší náboj -1 . Z virtuálního bosonu W^- vzápětí vznikají elektron e^- a antineutrino $\bar{\nu}$, které se rozlétají různými směry. Výsledkem přeměny je proton p^+ skládající se z kvarků **u-u-d**.

Příklad:



Účast elektronu při jaderných přeměnách poukazuje na skutečnost, že nukleony nejsou fundamentální částicemi. Při přeměně beta se totiž uvnitř jádra rozpadá neutron:

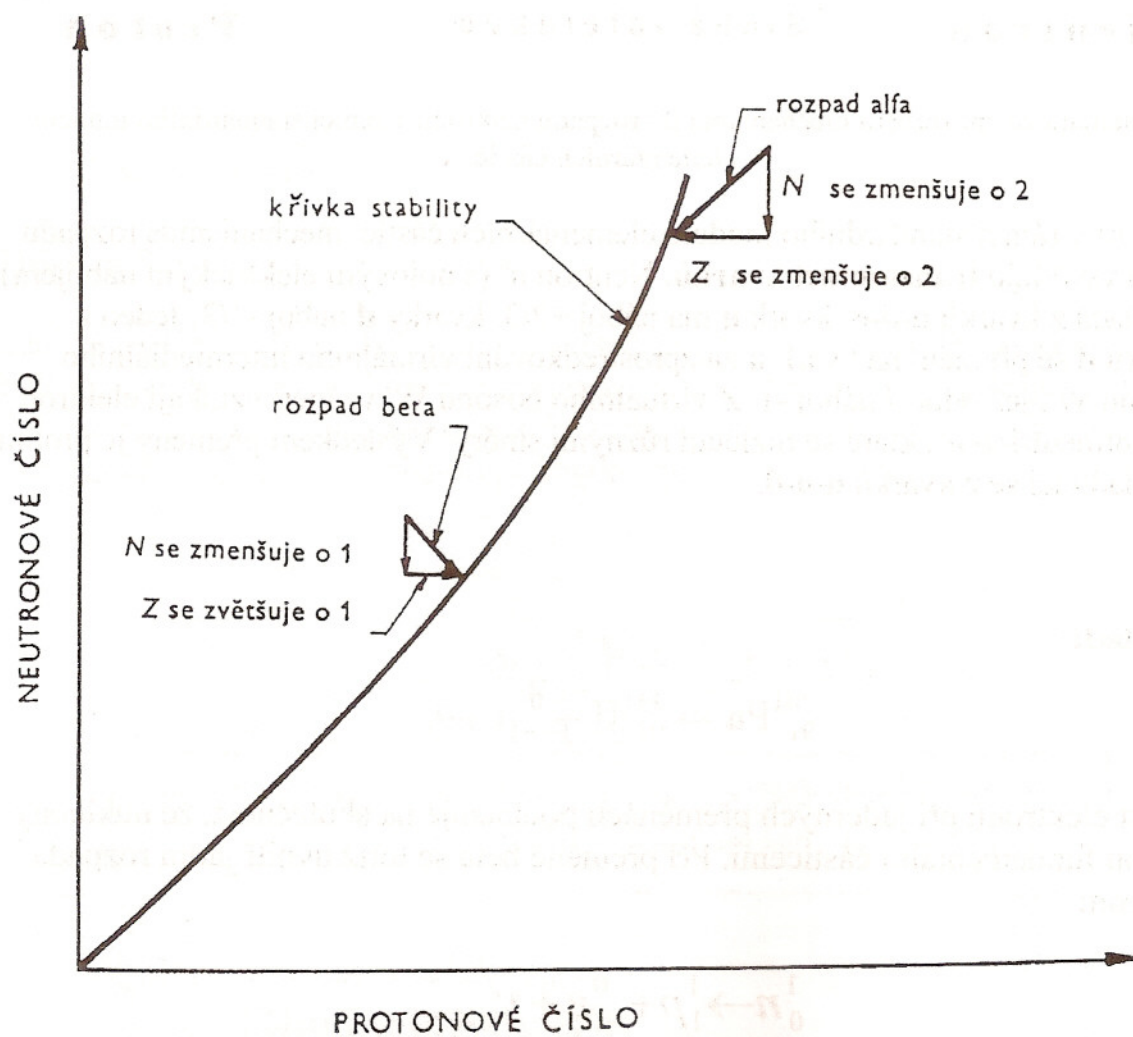


Záření beta jsou elektrony.

Pohybují se velmi rychle, nesou záporný elektrický náboj a jejich pohyb může být tedy ovlivňován elektrickým polem. Jejich pronikavost je větší než u alfa částic, mohou pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou. K jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1 m nebo kovové folie (staniol) o šířce 1 mm.

7.

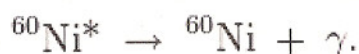
Graficky znázorněné transmutace α , β :



Rozpad alfa a beta umožňuje nestabilnímu jádru dosáhnout stabilní konfigurace.

POZOR:

Gama záření nezpůsobuje u gama zářiče transmutaci mateřského prvku, jádro takového prvku se emisí fotonů γ záření pouze zbavuje nadbytečné energie, přechází z excitovaného stavu (značený hvězdičkou) do stavu o nižší energii, tzv. **deexcitace jádra**

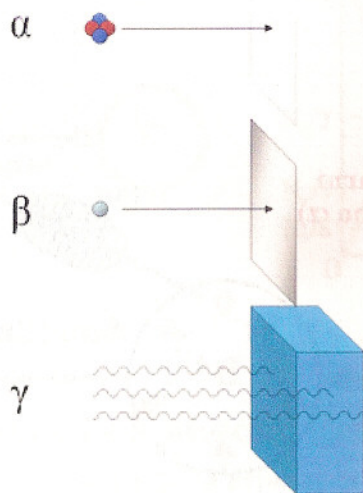


Fyziologické účinky:

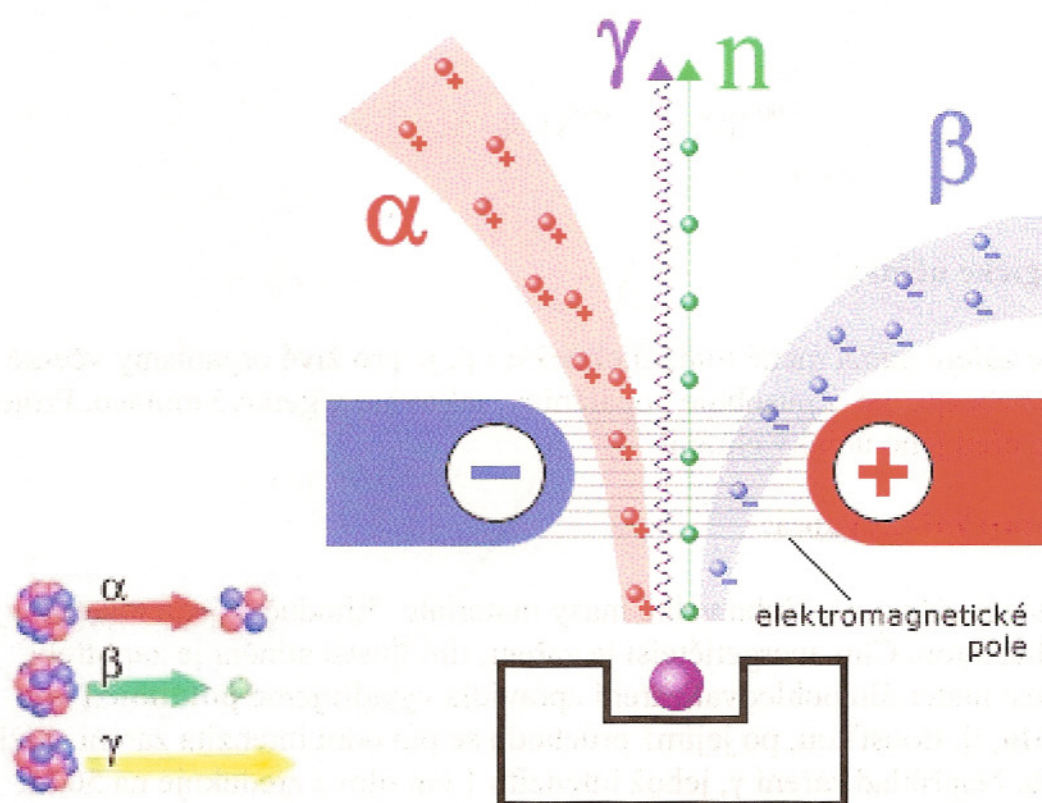
I když je záření gama méně ionizující než α i β , je pro živé organismy včetně člověka nebezpečné. Způsobuje popáleniny, rakovinu a genové mutace. Proto je nutno se před jeho účinky chránit.

Stínění pro záření gama:

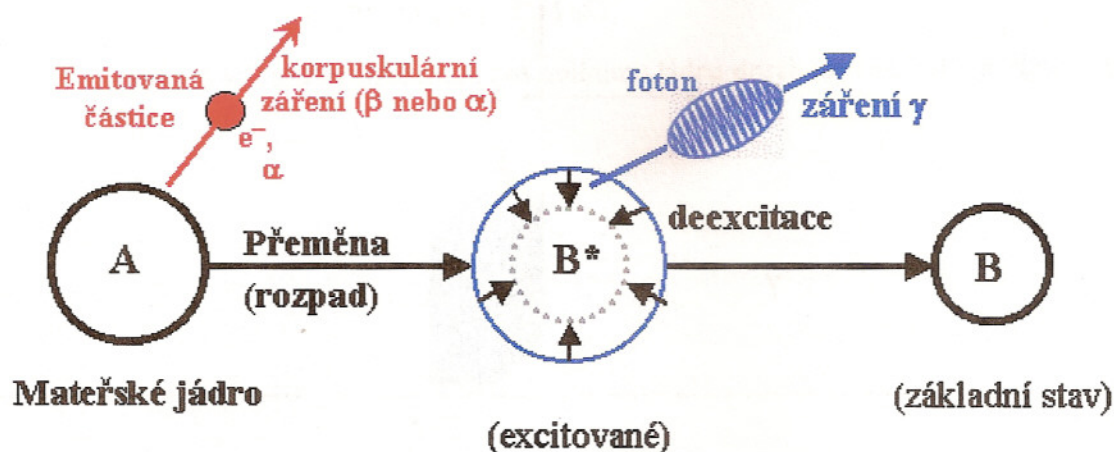
Na pohlčení záření γ je třeba velké masy materiálu. Vhodnější jsou materiály s velkou hustotou. Čím energetičtější je záření, tím tlustší stínění je zapotřebí. Schopnost materiálu pohlcovat záření zpravidla vyjadřujeme **polotloušťkou materiálu**, tj. tloušťkou, po jejímž průchodu se původní intenzita záření sníží na polovinu. Například záření γ , jehož intenzitu 1 cm olova zredukuje na 50 %, bude mít poloviční intenzitu také po průchodu 6 cm betonu.



Složky radioaktivního záření:



Shrnutí:



V důsledku transmutace mateřského prvku ubývá (a nového produktu přibývá). Pokles počtu radioaktivních jader mateřského prvku (N), úbytek hmotnosti mateřského prvku (m) a snížení intenzity radioaktivního záření (I) vysvětluje **rozpadový zákon**.

Rozpadový zákon (dále je vysvětlen a zapsán jen pro jader N):

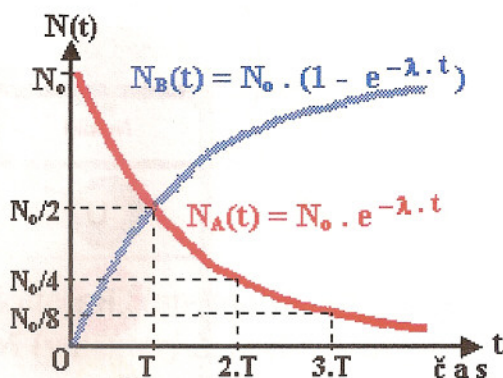
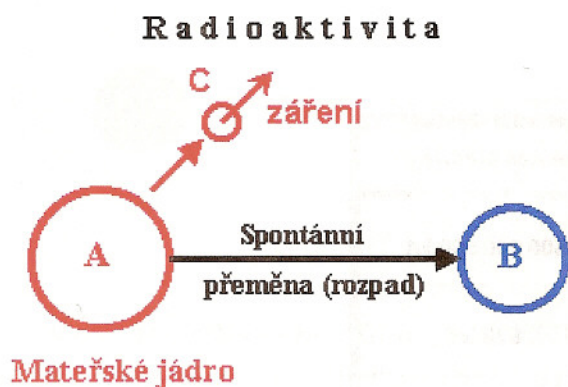
Nelze nijak předpovědět čas, za který se určité konkrétní jádro přemění. Lze stanovit pouze **pravděpodobnost**, **rozpadovou konstantu** λ , s jakou se jádro daného prvku rozpadne za jednotku času (1 sekundu).

Radioaktivní látka (vzorek) v počátečním čase $t=0$ obsahuje celkem N_0 stejných radioaktivních jader A, které se budou postupně přeměňovat na jádra B (podle schématu). Zajímá nás, jak rychle nám bude ubývat počet mateřských jader A (a tím zároveň přibývat dceřiných jader B).

Zákon vyjadřuje funkční závislost $N(t)$ okamžitého počtu zbylých mateřských jader na čase t :

Exponenciální tvar zákona radioaktivního rozpadu:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$



Grafem je **klesající** křivka zvaná **exponenciála** (červená křivka). Počet jader dceřiného prvku B naopak **roste** (modrá křivka) podle exponenciálního zákona $N_B(t) = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})$.

Jelikož radioaktivita je jev, kdy se přeměňují atomová jádra jednoho prvku na jádra jiného prvku, přičemž čas měříme v sekundách, je **přírozenou jednotkou aktivity 1 rozpad za 1 sekundu**. Tato jednotka byla na počest francouzského průkopníka v oblasti radioaktivity Henri Becquerela nazvána **becquerel** :

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ rozpad/1 sekundu}$$

Poločas rozpadu T:

Čas, za který se vždy rozpadne polovina zbývajících množství radioaktivních jader (intenzita záření klesne na polovinu).

Př.:
$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{1}{2}$$

(viz také graf - červenou křivku)

Příklady poločasu rozpadu a aktivity:

Radionuklid	^3H	^{14}C	^{60}Co	^{137}Cs	^{226}Ra	^{235}U	^{238}U
T [roky]	12,3	5730	5,27	30	1602	$7,1 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^9$
A [Bq]	$3,6 \cdot 10^{14}$	165GBq	$4,2 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^{12}$	36,6GBq	79kBq	12kBq

Nuklid	Poločas přeměny
 $^{238}_{92}\text{U}$	4 500 000 000 let
 $^{226}_{88}\text{Ra}$	1 620 let
 $^{115}_{47}\text{Ag}$	20 minut
 $^{212}_{84}\text{Po}$	0,000 000 3 s