

Stavba atomového jádra

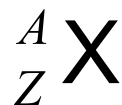
Jádro se skládá ze Z protonů a N neutronů

Protony a neutrony - nukleony,

nukleonové číslo $A=Z+N$

Protony a neutrony patří mezi baryony = těžké fermiony (částice s polocelým spinem)

Značení



Prvek X je dán protonovým číslem Z



U-235

$A = 235 \Rightarrow 235$ nukleonů

$Z = 92 \Rightarrow 92$ protonů

$\Rightarrow 235-92 = 143$ neutronů

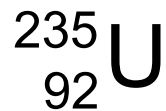
Izotopy

Atomy, jejichž jádra mají stejný počet protonů (\Rightarrow jádra jednoho prvku), odlišují se však počtem neutronů

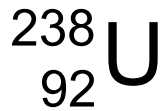
Velmi podobné fyzikální a chemické vlastnosti

Rozdílná hmotnost jádra \Rightarrow rozdílná hustota \Rightarrow možnost separace izotopů

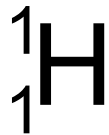
Radioaktivita odlišných izotopů je výrazně odlišná!



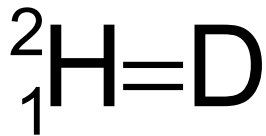
$7 \cdot 10^8$ let



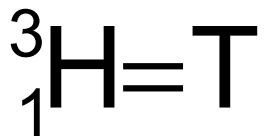
$4,5 \cdot 10^9$ let



lehký vodík (obyčejný stabilní izotop)



těžký vodík (deuterium stabilní izotop)



supertěžký vodík (tritium [poločas rozpadu](#) 12,33 roku)

Izobary

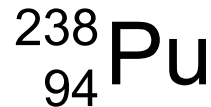
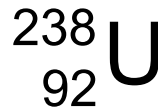
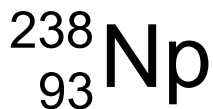
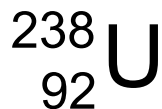
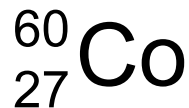
Atomy, jejichž jádra mají stejný počet nukleonů, ale odlišují se počtem protonů (\Rightarrow jádra odlišných prvků)

Přibližně stejná hmotnost jádra

Odlišné chemické vlastnosti (jádra odlišných prvků)

Přechod mezi sousedními izobary zprostředkovává rozpad β (β^- , β^+)

Příklady



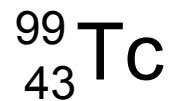
Izomery

Atomy (jádra) o stejném protonovém i neutronovém čísle, které se však liší energetickým stavem jádra

Obdobně jako elektrony atomového obalu mohou obsazovat různé energetické hladiny, mohou i protony a neutrony obsazovat různé jaderné energetické hladiny

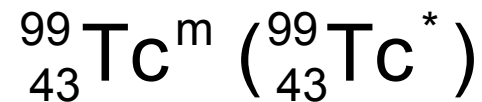
Přechod mezi izomery (z excitovaného stavu do nižšího nebo přímo nejnižšího = základního stavu) zprostředkovává rozpad γ , tj. vyslání vysokoenergetického fotonu

Příklad



stabilní

technecium



metastabilní (excitované) technecium

Hmotnostní deficit (defekt) Δm

Při vytvoření jádra ze Z protonů a N neutronů se uvolní vazebná energie, tj. sníží se energie vzniklého jádra \Rightarrow výsledné jádro je lehčí než součet hmotností nukleonů

Snížení je úměrné uvolněné vazebné energii \Rightarrow stabilní jádra jsou výrazněji lehčí, než součet hmotností nukleonů

$$m_J = Zm_p + Nm_n - \Delta m$$

Hmotnosti izotopů se standardně udávají včetně hmotností elektronů \Rightarrow

$$m_{atom} = Z(m_p + m_e) + Nm_n - \Delta m \qquad \Delta m = \frac{\Delta E_J}{c^2}$$

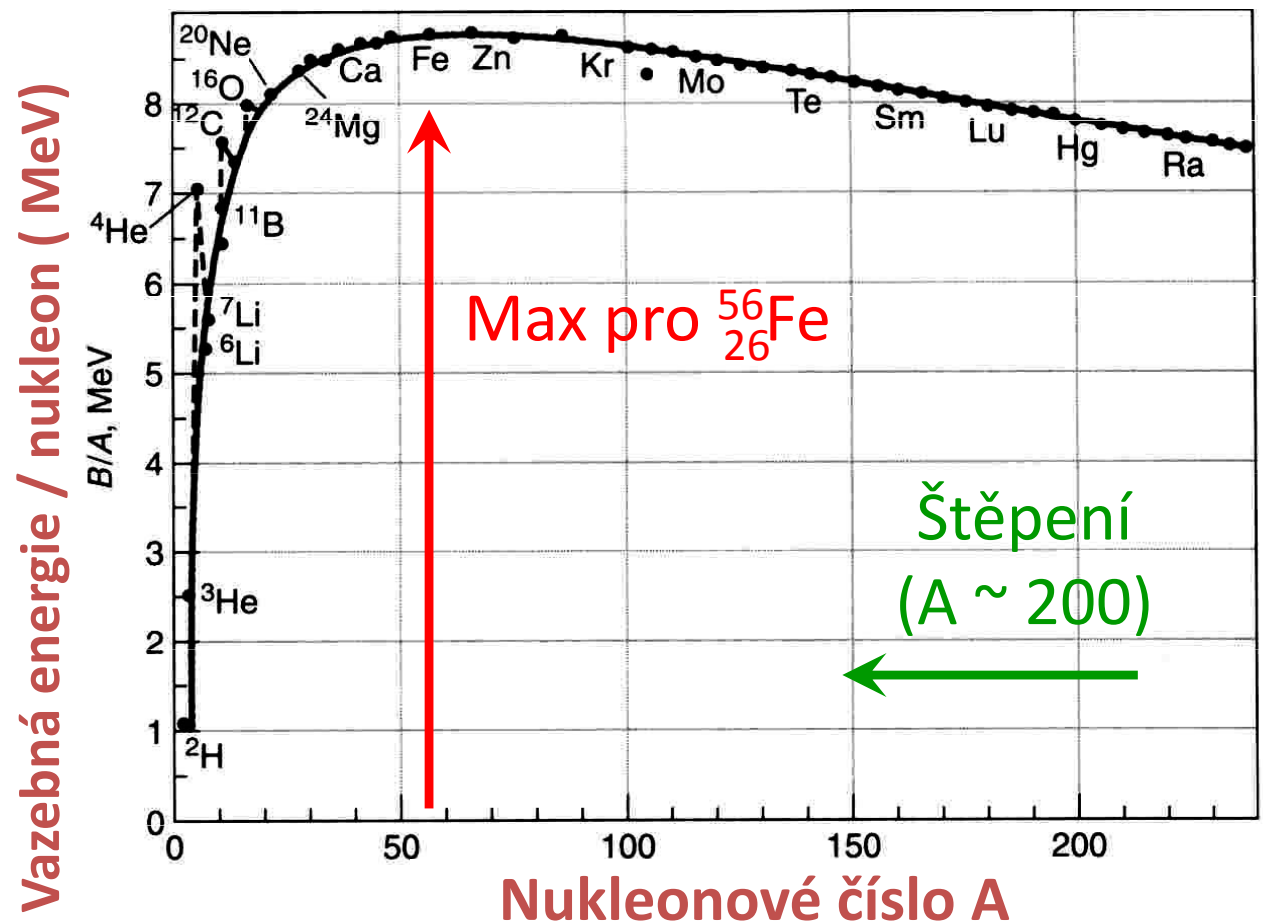
Vazebná energie jádra na jeden nukleon

- Vazebná energie celého atomu roste s nukleonovým číslem,
 $E_A = E_J \approx A$
- Vazebná energie na jeden nukleon není přesně konstantní

Maximum pro železo

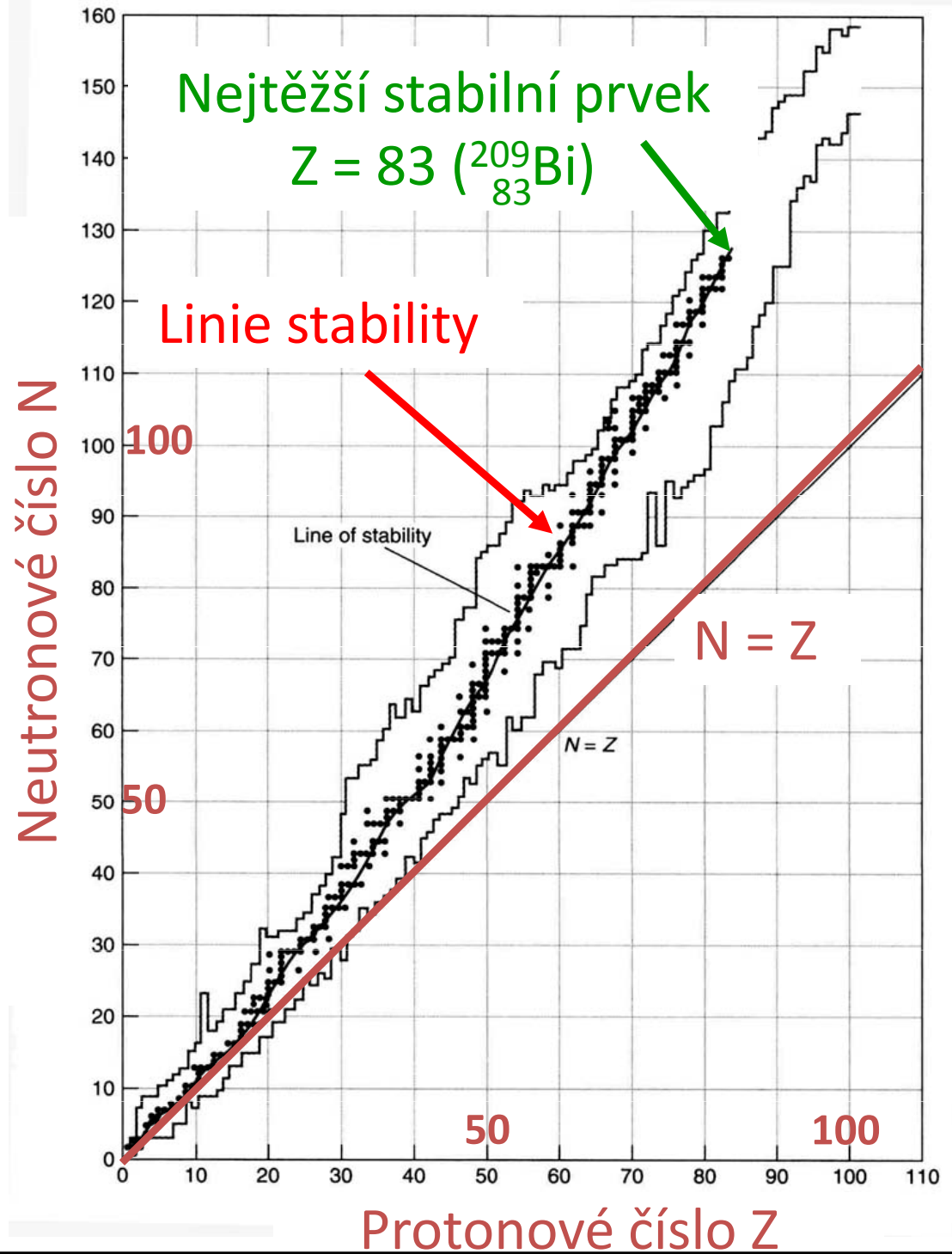
Nejnižší pro nejlehčí a nejtěžší prvky

Výjimečně stabilní ${}^4\text{He}$



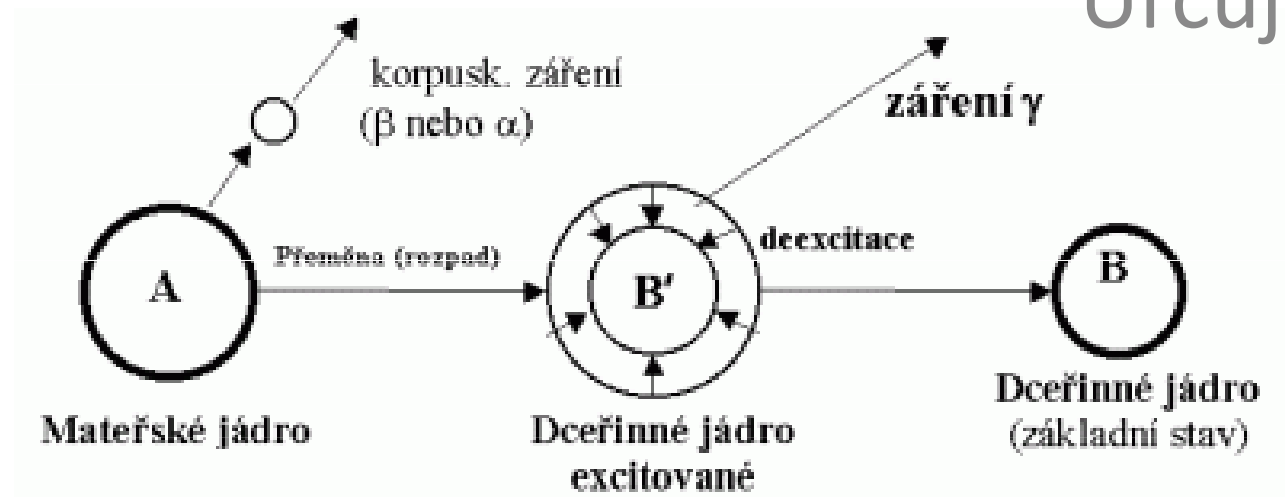
Stabilita izotopů

- **3000** známých jader,
pouze
266 stabilních
 $Z > 83 \Rightarrow$ nestabilní izotop
- Linie stability $N \approx Z$ pro
lehčí jádra,
 $N > Z$ pro těžší jádra
(elst. repulze protonů)



Základní typy jaderných přeměn

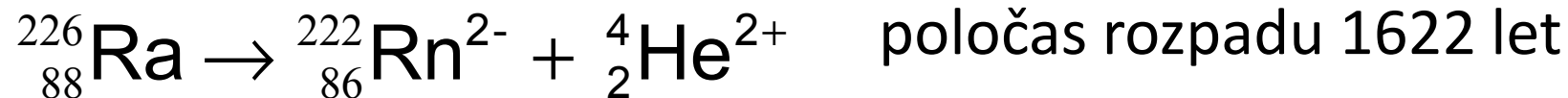
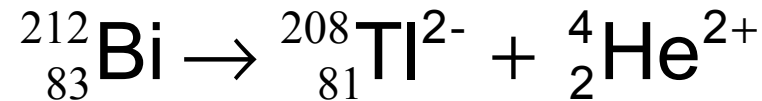
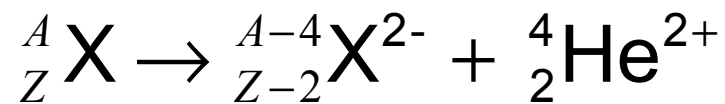
Určují druhy IZ



Radioaktivní rozpad α

$$\text{Částice } \alpha = {}^4_2\text{He}^{2+}$$

Emitování jádra hélia z jádra **těžkého atomu** ($A > 150$)
a jeho transmutace = přeměna na jiný prvek



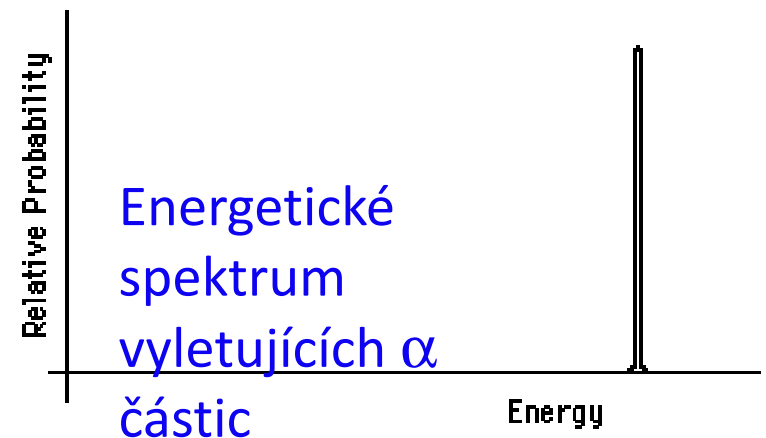
Při α rozpadu se zachovává nukleonové a protonové číslo

Vzniklý těžký aniont má Z elektronů

a $Z-2$ protonů \Rightarrow náboj $2-$

Za zákona zachování energie a hybnosti
je jednoznačně určena energie částice α
i dceřinného jádra

Díky vysoké hmotnosti částice α dochází
ke zpětnému rázu, jádro získává dostatečnou energii k ionizaci



Částice a antičástice

Ke každé částici existuje antičástice (někdy je identická s částicí), která má stejnou hmotnost, ale opačné hodnoty elektrického náboje a dalších „nábojů“ a čísel

Proton p^+ , antiproton p^-

Elektron e^- , pozitron e^+

Elektronové neutrino ν_e elektronové antineutrino $\bar{\nu}_e$

(obojí elektricky neutrální)

Při srážce částice se svou antičásticí dochází k **anihilaci**, částice a antičástice zaniknou a uvolněná energie se vyzáří ve formě dvou fotonů γ letících opačnými směry

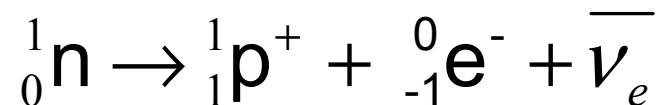
$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad E_\gamma \geq m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$$

Využito v PET (pozitronová emisní tomografie)

Radioaktivní rozpad β^-

$$\text{Částice } \beta \ (\beta^-) = e^-$$

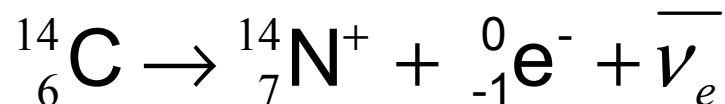
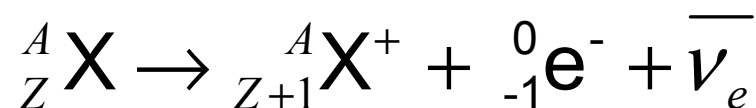
Rozpadu β^- předchází přeměna neutronu na proton, elektron a elektronové antineutrino



Poločas rozpadu **volného neutronu** je 10,3 minuty (stř. doba života je 14,7 minut)

Hmotnost neutronu je vyšší než součet hmotnosti protonu a elektronu (a antineutrina) \Rightarrow může docházet k samovolnému rozpadu

Při β^- rozpadu se jeden neutron v jádře přemění na proton, elektron a antineutrino se vyzáří



(Anti)neutrino jsou téměř nedetekovatelná

Zeslabení intenzity na polovinu $\approx 10^{16}$ m olova

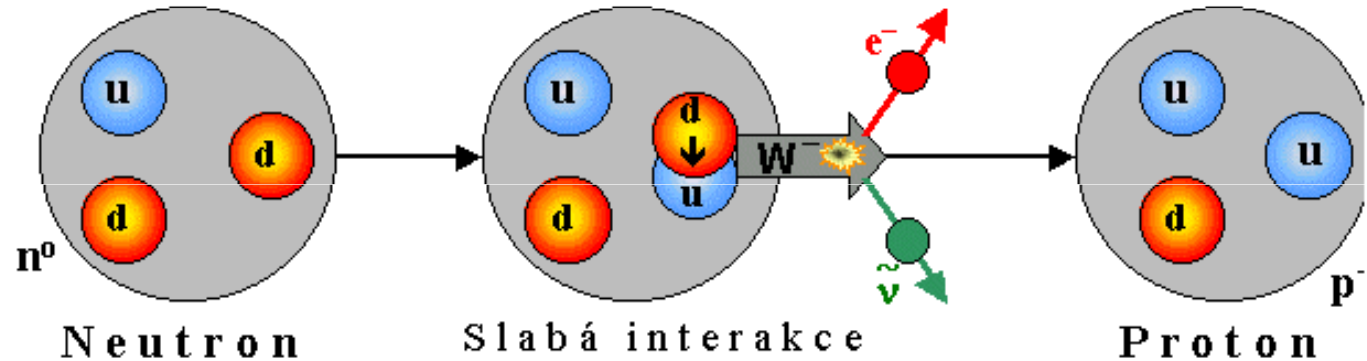
Hmotnost neutrino max. řádově milióntina hmotnosti elektronu

Radioaktivní rozpad β^-

Energetické spektrum β elektronů je spojité od 0 až po maximum

Tříčásticový rozpad

ZZE a ZZH



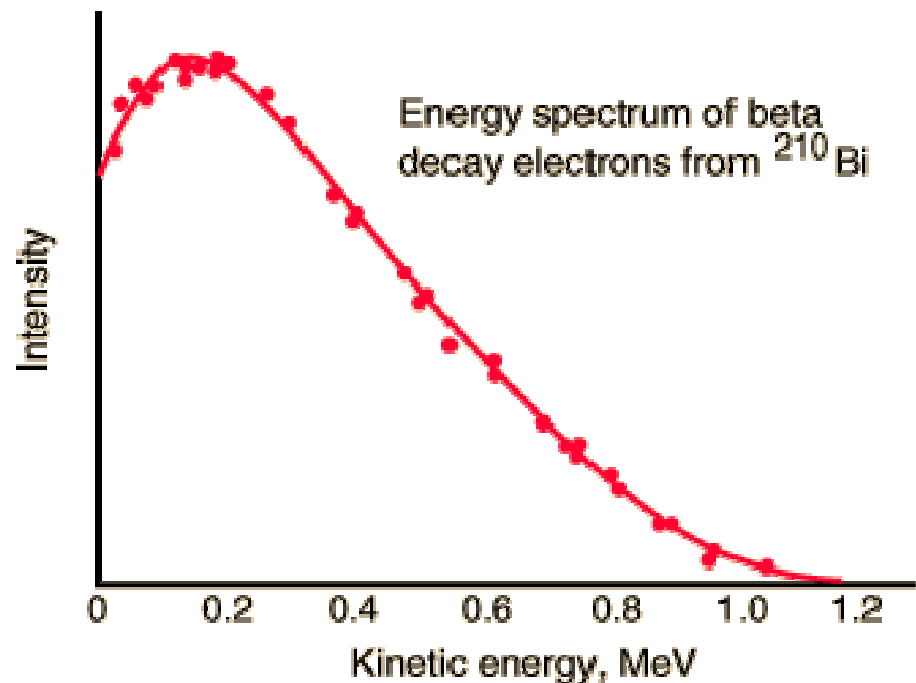
Maximální energie

0,02 MeV u tritia ${}^3_1\text{H}$

13,4 MeV u boru ${}^{12}_5\text{B}$

Nejtěžší izotop podléhající
 β^- rozpadu
konkurencí α rozpad

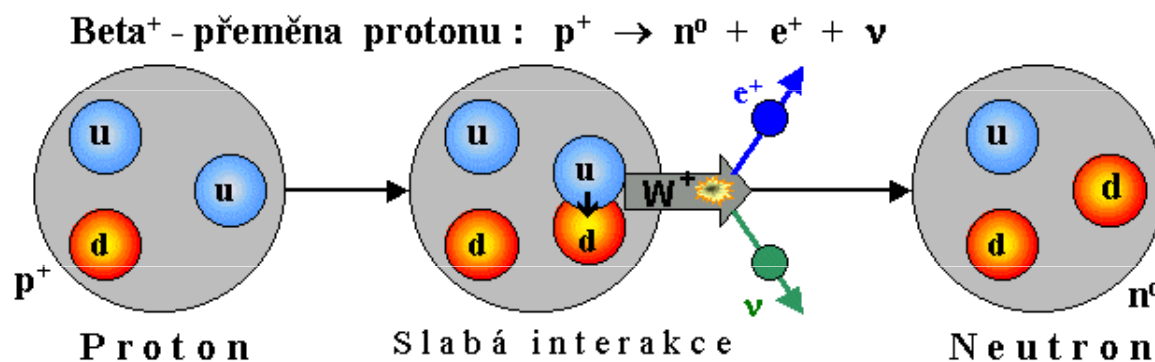
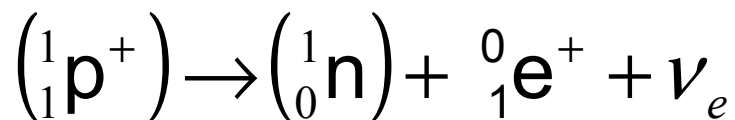
${}^{255}_{99}\text{Es}$



Radioaktivní rozpad β^+

$$\text{Částice } \beta^+ = e^+$$

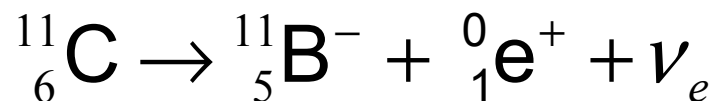
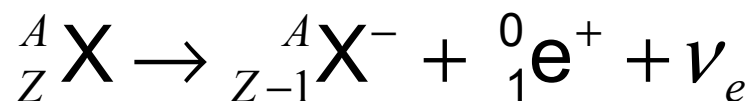
Podstatou rozpadu β^+ je přeměna protonu na neutron, pozitron a elektronové neutrino



Hmotnost protonu je nižší než hmotnost neutronu \Rightarrow nemůže docházet k samovolnému rozpadu volného protonu, ale může k této přeměně docházet v jádře atomu

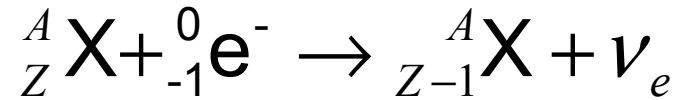
Při β^+ rozpadu se jeden proton v jádře přemění na neutron, pozitron a neutrino se vyzáří

Všechny β^+ radionuklidy jsou umělé (využití: např. PET)

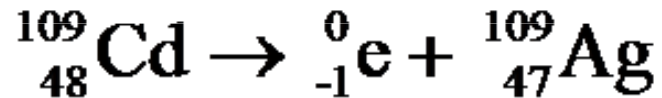
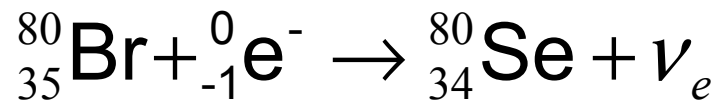


Radioaktivní rozpad β^- - záchyt K

Zachycení elektronu z první slupky obalu (slupka K)
jádro a následná jaderná reakce



Přeměna atomu, změna protonového čísla jako při
rozpadu β^+



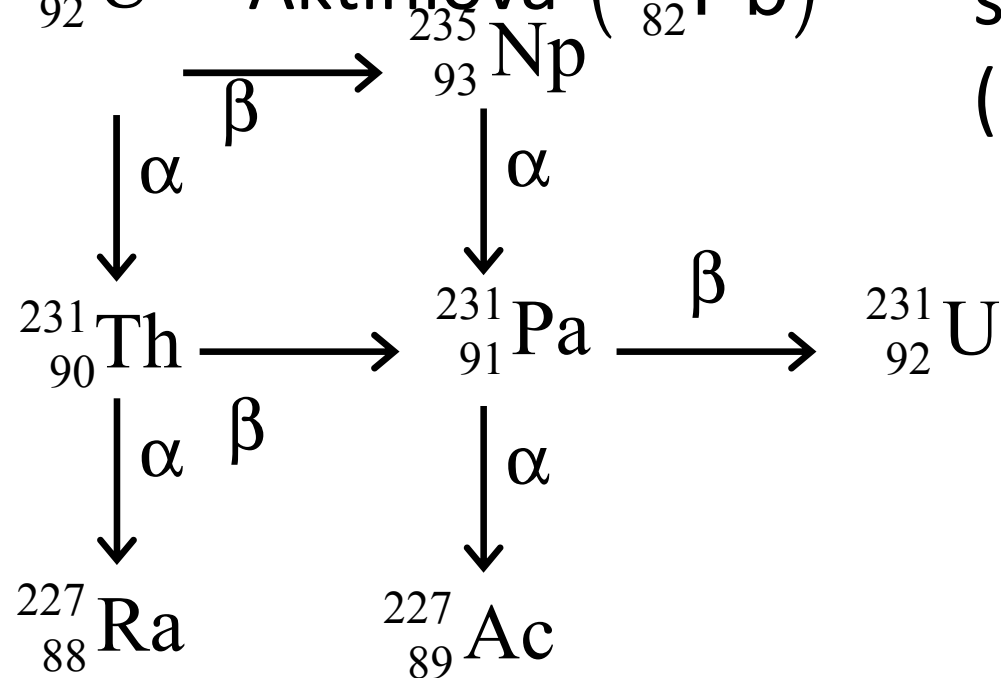
Rozpadové řady

$^{238}_{92}\text{U}$ Uranová ($^{206}_{82}\text{Pb}$)

$^{237}_{93}\text{Np}$ Neptuniová ($^{209}_{83}\text{Bi}$)

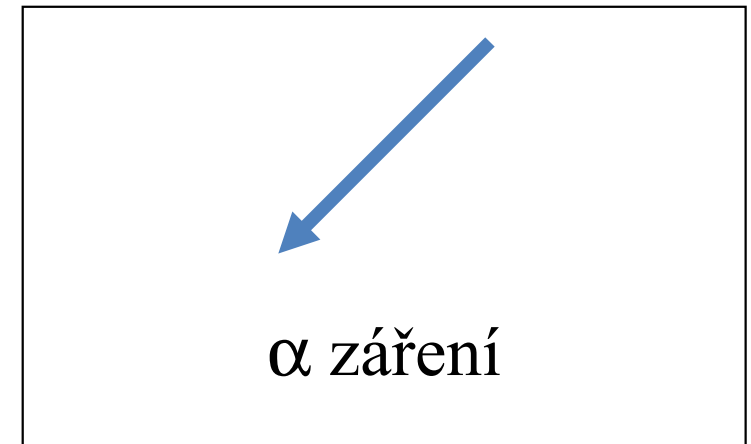
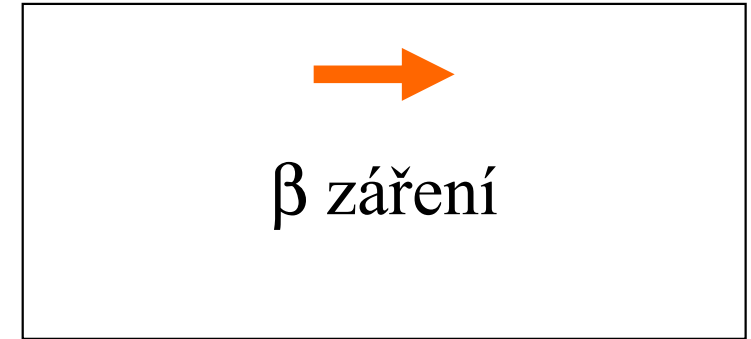
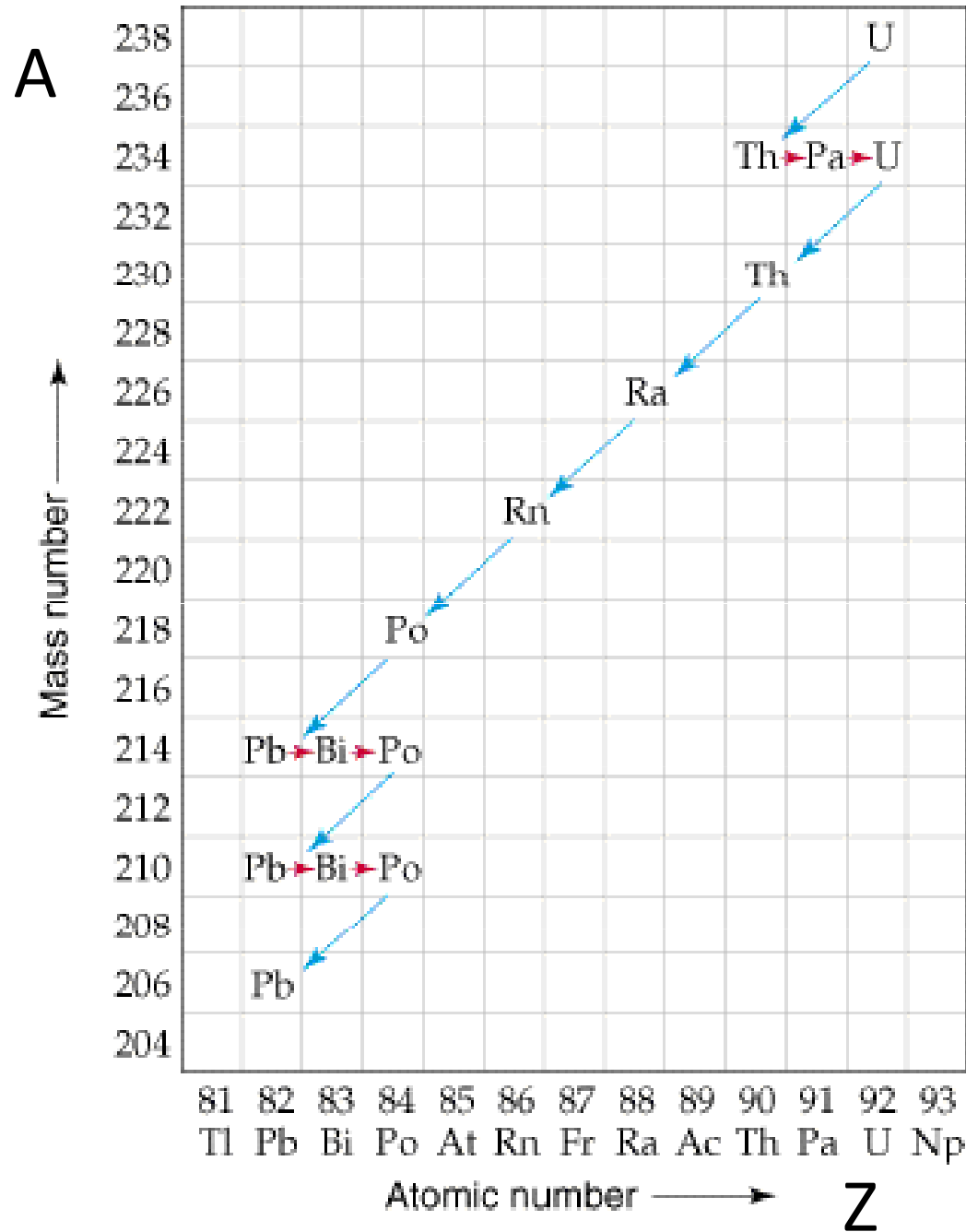
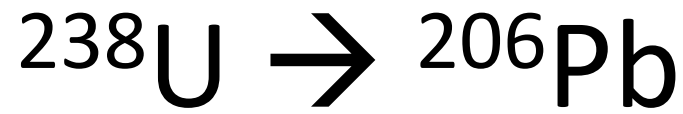
$^{232}_{90}\text{Th}$ Thóriová ($^{208}_{82}\text{Pb}$)

$^{235}_{92}\text{U}$ Aktiniová ($^{207}_{82}\text{Pb}$)



Čtyři rozpadové řady dány snížením počtu nukleonů o 4 při rozpadu α a zachováním počtu nukleonů při rozpadu β

Rozpadové řady končí stabilními izotopy olova ^{82}Pb (bizmutu ^{83}Bi)



Radioaktivní záření γ

Vzniká v jádře atomů při změně energetického stavu jádra – následek emise či absorpce částice

Vlnová délka $\lambda < 300 \text{ pm}$

Energie 100 keV až 10 MeV

Silně ionizující

Fotoelektrický jev (dominantní do 0,5 MeV)

Comptonův rozptyl (dominantní 0,5 – 5 MeV)

Tvorba elektron – pozitronových párů (e^- , e^+)

Opačný proces k anihilaci páru částice – antičástice

Pouze u fotonů s energií větší než $2m_e c^2 \cong 1 \text{ MeV}$

Pouze za účasti interakce s další částicí (atomem)

\Rightarrow nenastává ve vakuu



Vnitřní konverze záření γ

Foton emitovaný jádrem vyrazí elektron z vnitřní vrstvy atomového obalu

Těžký atom \Rightarrow vysoké protonové číslo \Rightarrow velká elektrostatická energie vnitřních elektronů

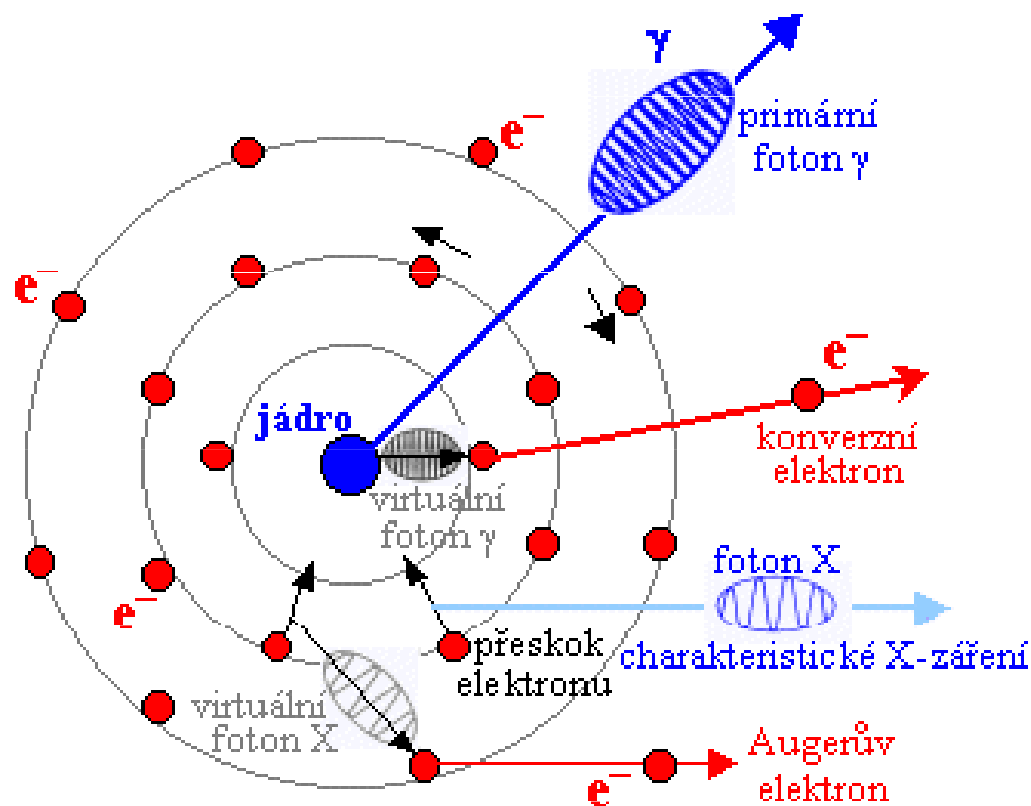
Vyražený elektron s velkou energií a ionizační schopností ionizuje prostředí

Konverzní elektron

Přeskok elektronu z vyšší vrstvy na uvolněné místo vnitřní vrstvy \Rightarrow vznik RTG záření s možností další konverze

Augerův elektron

\Rightarrow γ zářič může být zdrojem sekundárního záření β a RTG záření



Vnitřní konverze záření γ

Relativní pravděpodobnost vnitřní konverze vůči rozpadu gama se nazývá konverzní koeficient (koeficient vnitřní konverze)

Konverzní koeficienty rostou s E_γ a rostou se Z jádra

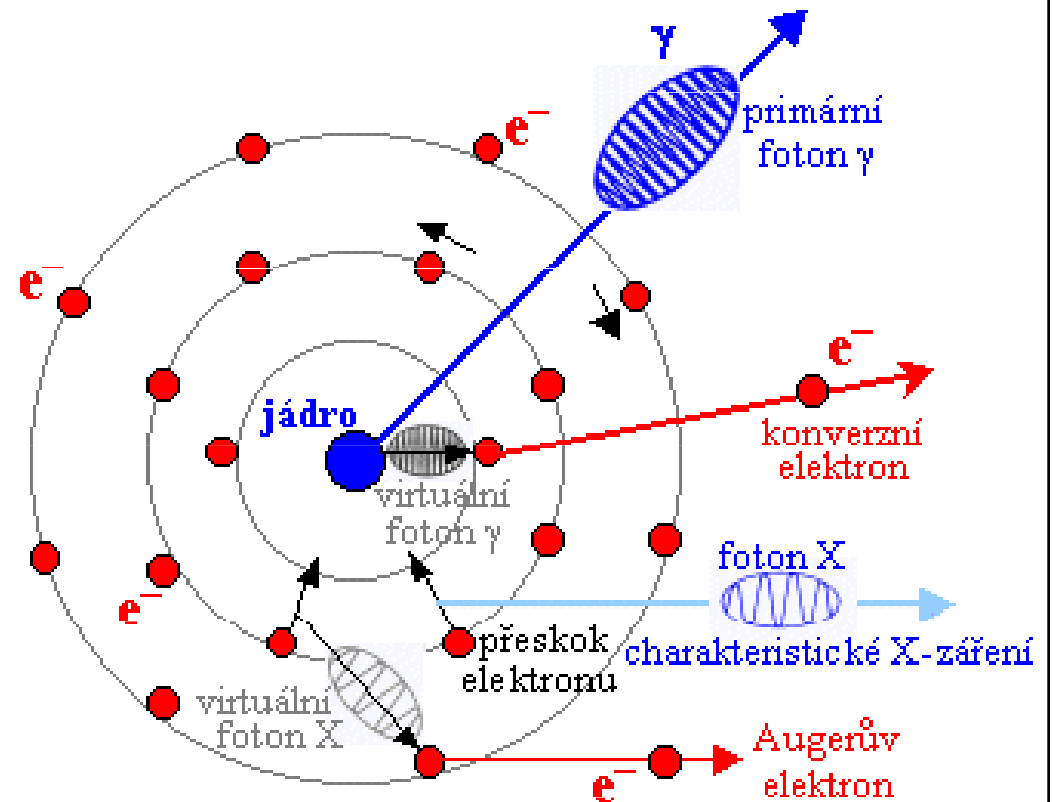
Vnitřní konverze dominuje pro přeměny, kdy spin obou izomerů je shodný

Příklady (pokud se jádro rozpadá několika možnými γ rozpady, stanovuje se hodnota ICC = internal conversion coefficient pro každou energii γ záření zvlášť

$$\text{ICC}({}^{57}\text{Fe})=8,5 \%$$

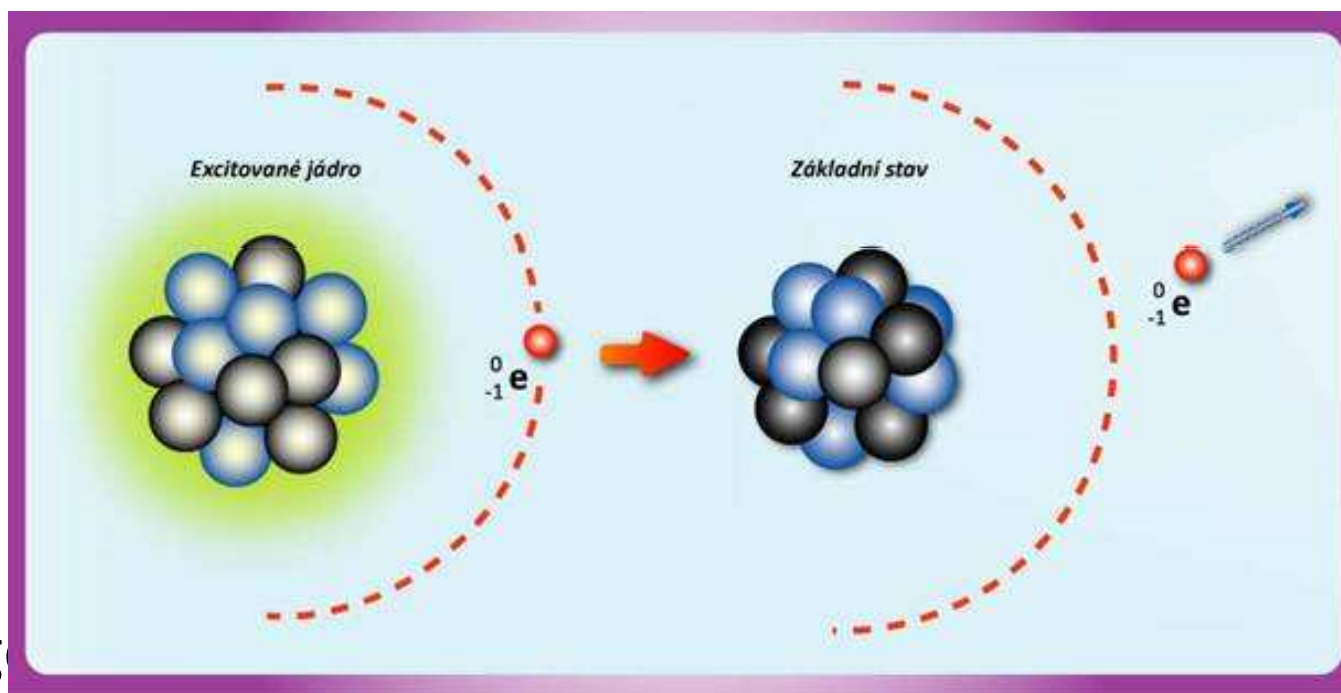
$$\text{ICC}({}^{109}\text{Ag})=26 \%$$

$$\text{ICC}({}^{60}\text{Ni})=1,7 \cdot 10^{-2} \%$$



Vnitřní konverze

- proces deexcitace atomového jádra, při kterém se energie excitovaného jádra předá prostřednictvím přímé elektromagnetické interakce některému z elektronů atomového obalu a ten z atomu vylétá.



- Energo

etní

Zákon radioaktivního rozpadu

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Aktivita (radioaktivita) A:

kde **N** je počet jader v daném okamžiku ve vzorku [**Bq** = s⁻¹, **Ci** = 3,7 · 10¹⁰Bq].

Předpokládejme konstantní pravděpodobnost **λ** rozpadu každého jádra za jednotku času.

Počet **dN** jader rozpadlých za dobu **dt**:

$$dN = -N\lambda dt \longrightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt$$

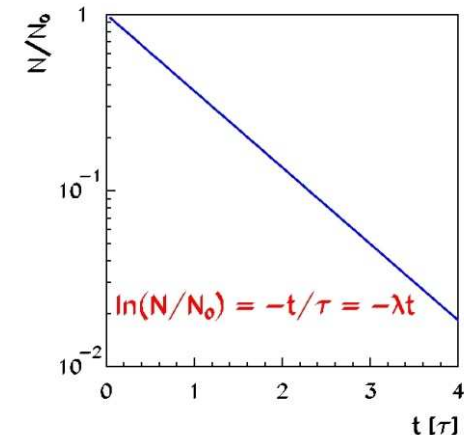
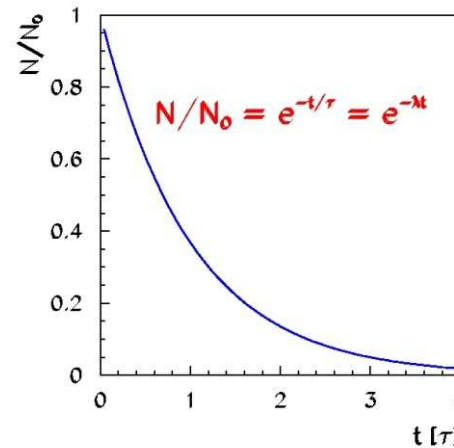
Obě strany integrujeme: $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t \longrightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

pro radioaktivitu dostaneme:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

kde $A_0 \equiv -\lambda N_0$



Pravděpodobnost rozpadu **λ** se nazývá rozpadovou konstantou. →

Čas, za který poklesne **N** na **N/2** je poločas rozpadu **T_{1/2}**.

Dosadíme **N = N₀/2**:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Střední doba života τ:

Pro **t = τ** klesne aktivita na **1/e = 0,36788**. $\tau = \frac{1}{\lambda}$

Celková pravděpodobnost λ při různých alternativních možnostech s rozpadovými

konstantami $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_M$: $\lambda = \sum_{k=1}^M \lambda_k \longrightarrow \Gamma = \sum_{k=1}^M \Gamma_k$

U rozpadových řad máme posloupnost rozpadů $\lambda_1 N_1 \rightarrow \lambda_2 N_2 \rightarrow \lambda_3 N_3 \rightarrow \dots \rightarrow \lambda_i N_i \rightarrow \dots \rightarrow \lambda_M N_M$
časová změna N_i pro i -tý izotop v řadě: $dN_i/dt = \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i$

řešíme soustavu diferenciálních rovnic
a předpokládáme:

$$N_1 = C_{11} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = C_{21} e^{-\lambda_1 t} + C_{22} e^{-\lambda_2 t}$$

...

$$N_M = C_{M1} e^{-\lambda_1 t} + \dots + C_{MM} e^{-\lambda_M t}$$

Pro koeficienty C_{ij} platí: $i \neq j$ $C_{ij} = C_{i-1,j} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i - \lambda_j}$

Koeficienty s $i = j$ dostaneme z okrajových podmínek v čase $t = 0$: $N(0) = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3} + \dots + C_{ii}$

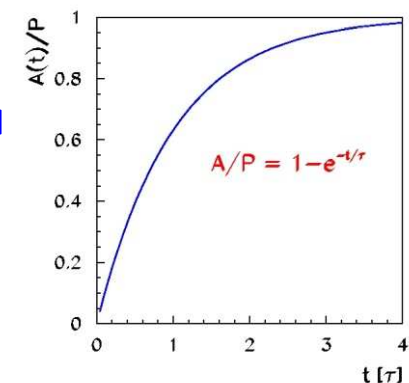
Zvláštní případ pro $\tau_1 \gg \tau_2, \tau_3 \dots \tau_M$: každý následující člen má stejný počet rozpadů za sekundu jako první. Počet existujících atomů je nepřímo úměrný jeho λ . \rightarrow Rozpadová řada je v radioaktivní rovnováze.

Vznik radioaktivních jader konstantní rychlostí – ozářením v reaktoru a na urychlovači. Rychlost vzniku radioaktivních jader je P :

$$dN/dt = -\lambda N + P$$

Řešení rovnice ($N_0 = 0$): $\lambda N(t) = A(t) = P(1 - e^{-\lambda t})$

Je sice účelné ozařovat několik poločasů ale ne moc dlouho –
dochází k nasycení.



Vývoj aktivity při
rovnoměrném ozařování

Aktivita

- úbytek počtu dosud nepřeměněných jader za časovou jednotku.
- Jednotkou aktivity je becquerel, značka Bq, rozměr jednotky je s^{-1} .
- Stará jednotka aktivity curie ($1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$),

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

Zákon radioaktivní přeměny

Aktivita A (počet přeměn za sekundu, resp. rychlost přeměny) je přímo úměrná počtu dosud nepřeměněných jader N daného radionuklidu (vše v čase t), tedy

$$A(t) = \lambda N(t)$$

kde λ je *přeměnová konstanta* pro daný radionuklid.

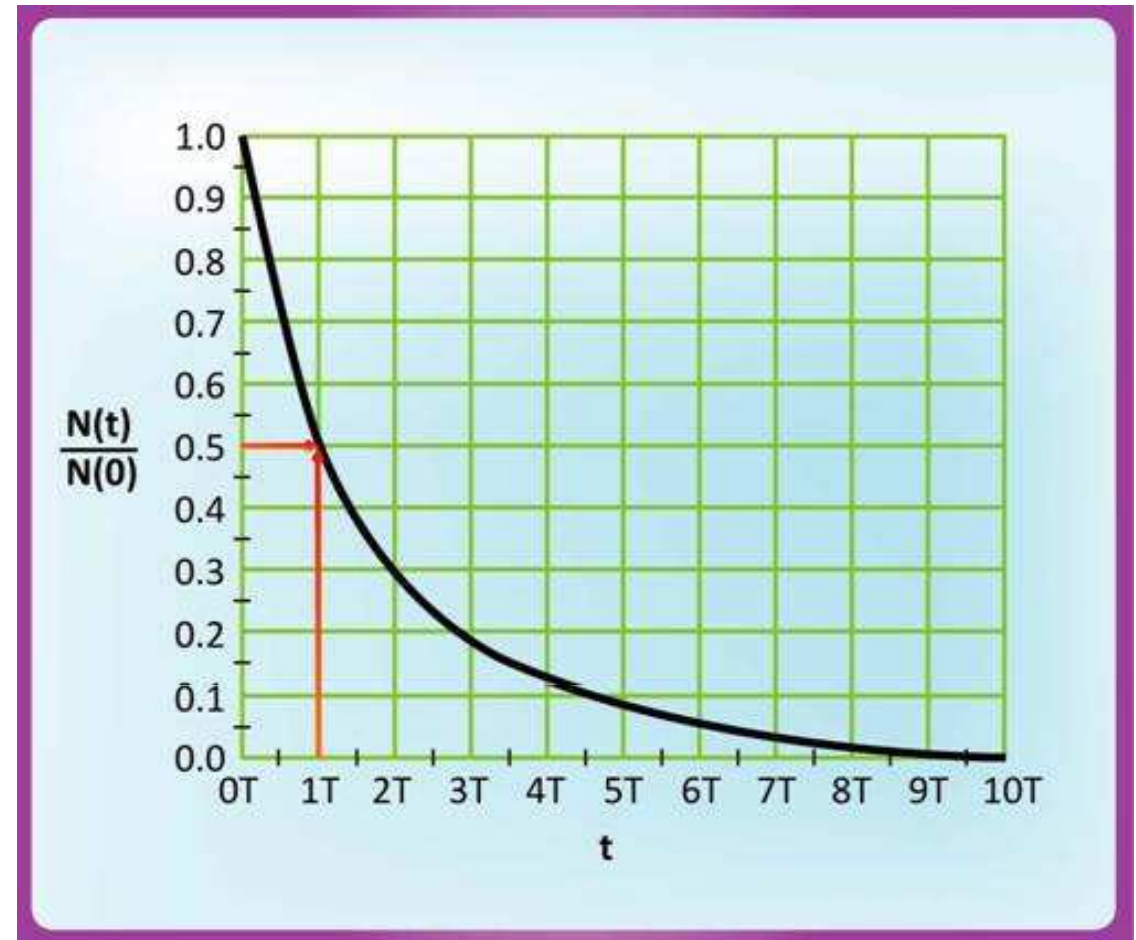
Poločas přeměny

- je doba, za níž se přemění polovina počátečního počtu $N(0)$ dosud nepřeměněných jader,
- značka T (resp. $T_{1/2}$),
- přesněji *čas polopřeměny*, též *poločas rozpadu*,
- Platí přitom, že $\lambda T = \ln(2)$.

Exponenciální tvar zákona

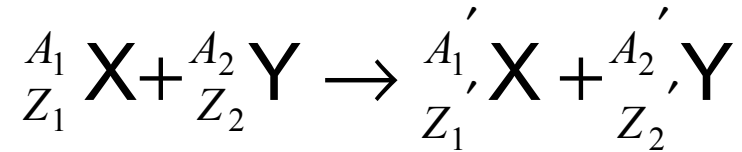
Důsledkem zákona radioaktivní přeměny je exponenciální úbytek počtu mateřských radioaktivních jader s časem

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$



Jaderné reakce

Zákony zachování



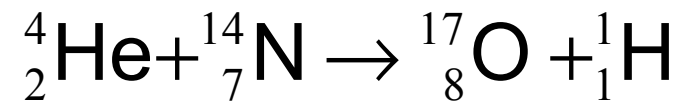
Počtu nukleonů

$$A_1 + A_2 = A_1' + A_2'$$

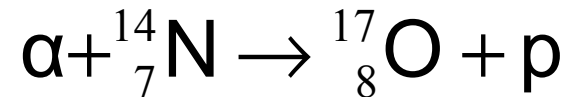
Elektrického náboje

$$Z_1 + Z_2 = Z_1' + Z_2'$$

Energie



Hybnosti



Momentu hybnosti



Zákony zachování

Při všech radioaktivních přeměnách se zachovává:

Celková energie \Rightarrow celková relativistická hmotnost

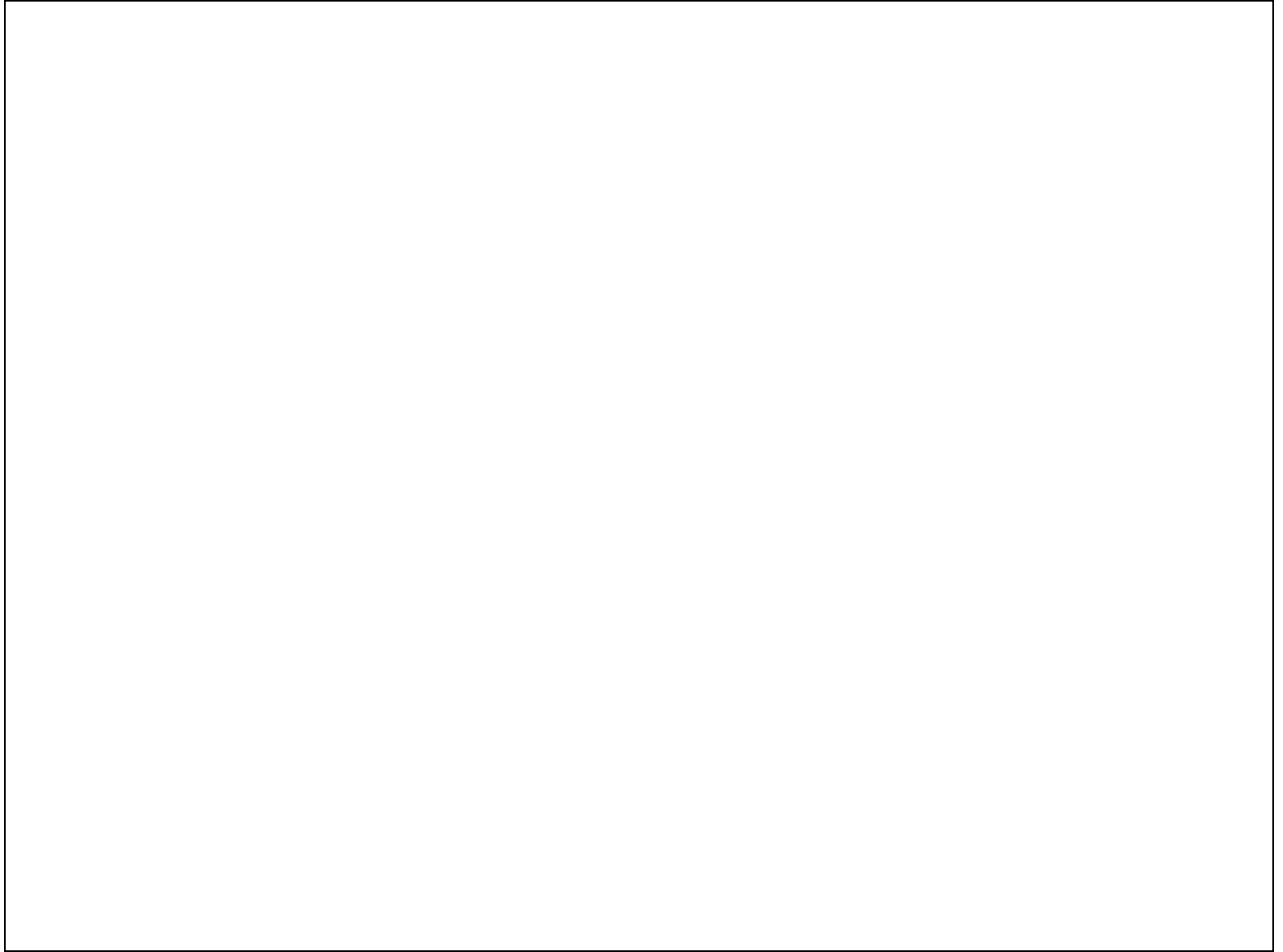
Celková hybnost

Elektrický náboj

Nukleonové číslo

Protonové číslo se nezachovává pokud dochází k přeměně mezi protonem a neutronem, jinak ano

Zachovává se pseudoprotonové číslo, které vychází z náboje elementárních částic \Rightarrow zachování náboje



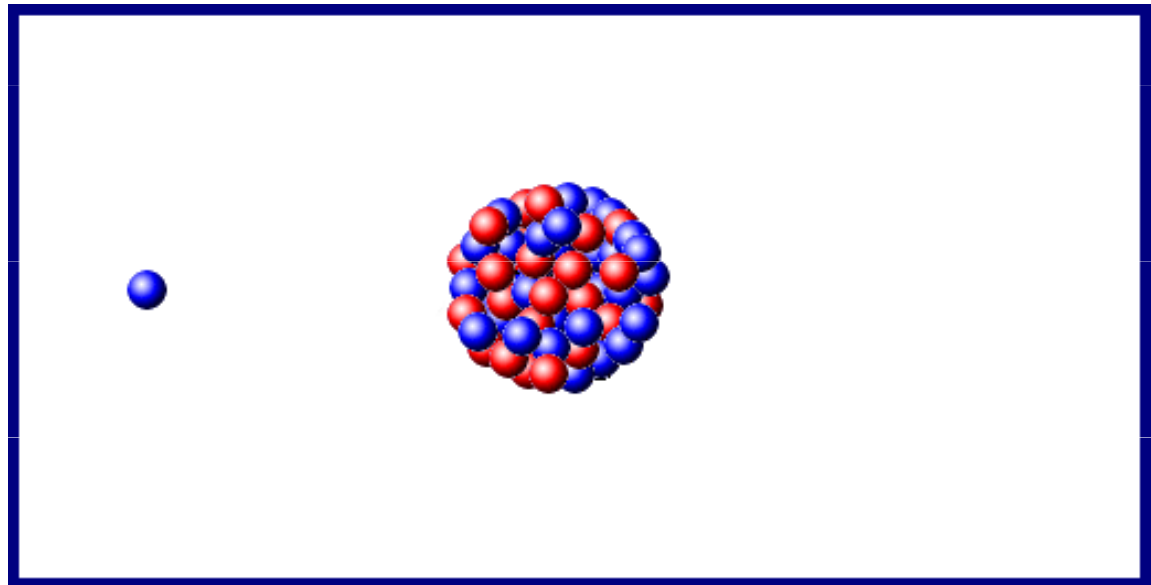
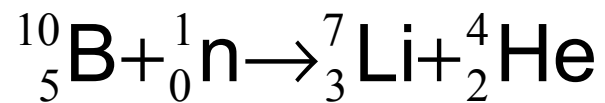
Jaderné reakce

Přirozená radioaktivita

Umělá radioaktivita – zásah člověka

Ostřelování jader částicemi \Rightarrow umělé izotopy

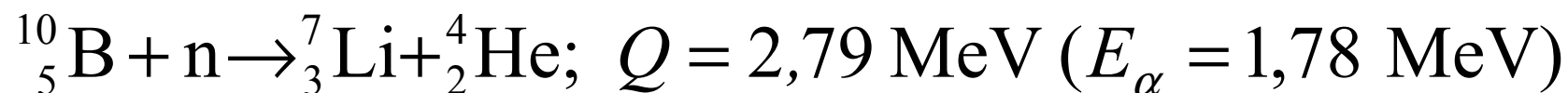
Urychlovače částic



Detekce neutronů

Detekce založena ve většině případů na reakci za vzniku nabitých částic (přímo ionizujících) a jejich následné detekci

Pomalé neutrony: do 0,3 eV



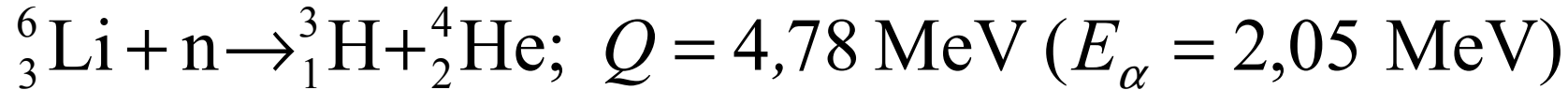
Odlišení vysokoenergetických produktů od registrace pozadí γ

Přírodní B: 19,8 % \Rightarrow přímé použití ${}^{10}_5\text{B}$

Proporcionální detektor plněný BF_3

Detekce neutronů

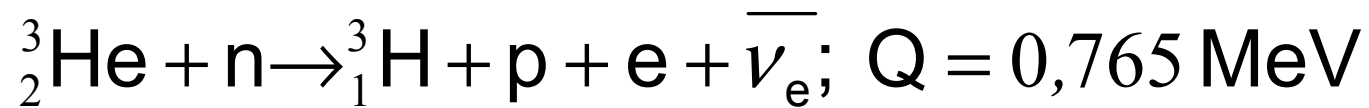
Pomalé neutrony: do 0,3 eV



Přírodní Li: 7 % \Rightarrow použít separovaný izotop ${}^6_3\text{Li}$

Lithium netvoří plynné směsi

Pevný scintilační detektor LiI (Eu)

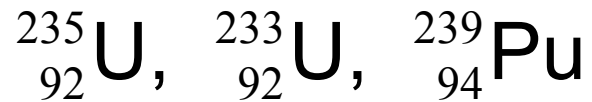


Snadná dostupnost ${}^3_2\text{He}$

Plynné detektory

Detekce pomalých neutronů

Štěpení jader neutrony



Uvolněná energie ~ 200 MeV

Jaderné indikátory

Záchyt neutronu atomovým jádrem

Vzniklé jádro se rozpadá rozpadem β s dlouhým
poločasem rozpadu

Změření aktivity β vzorku ozářeného neutrony \Rightarrow
absorbovaná dávka

Měření aktivity v laboratoři, expozice v terénu