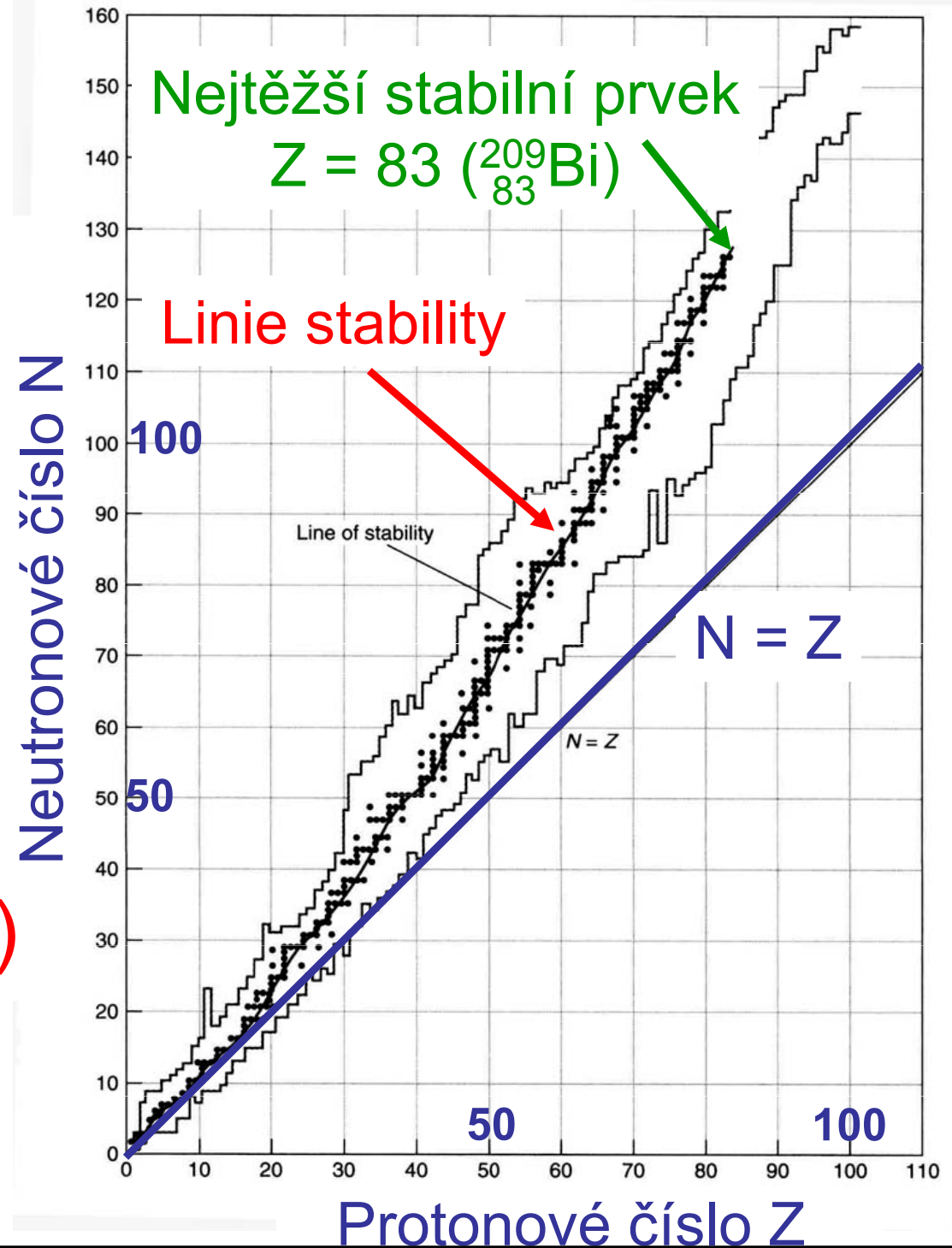


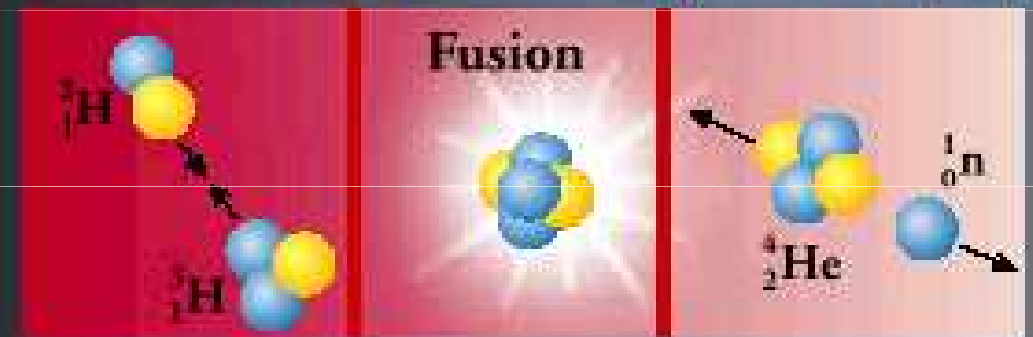
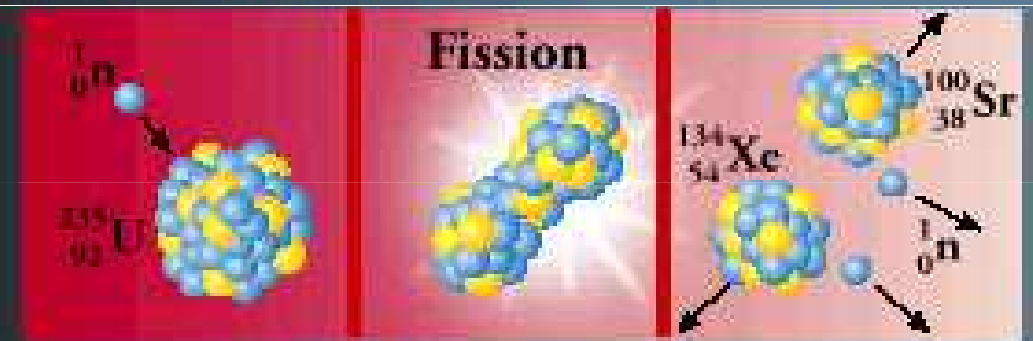
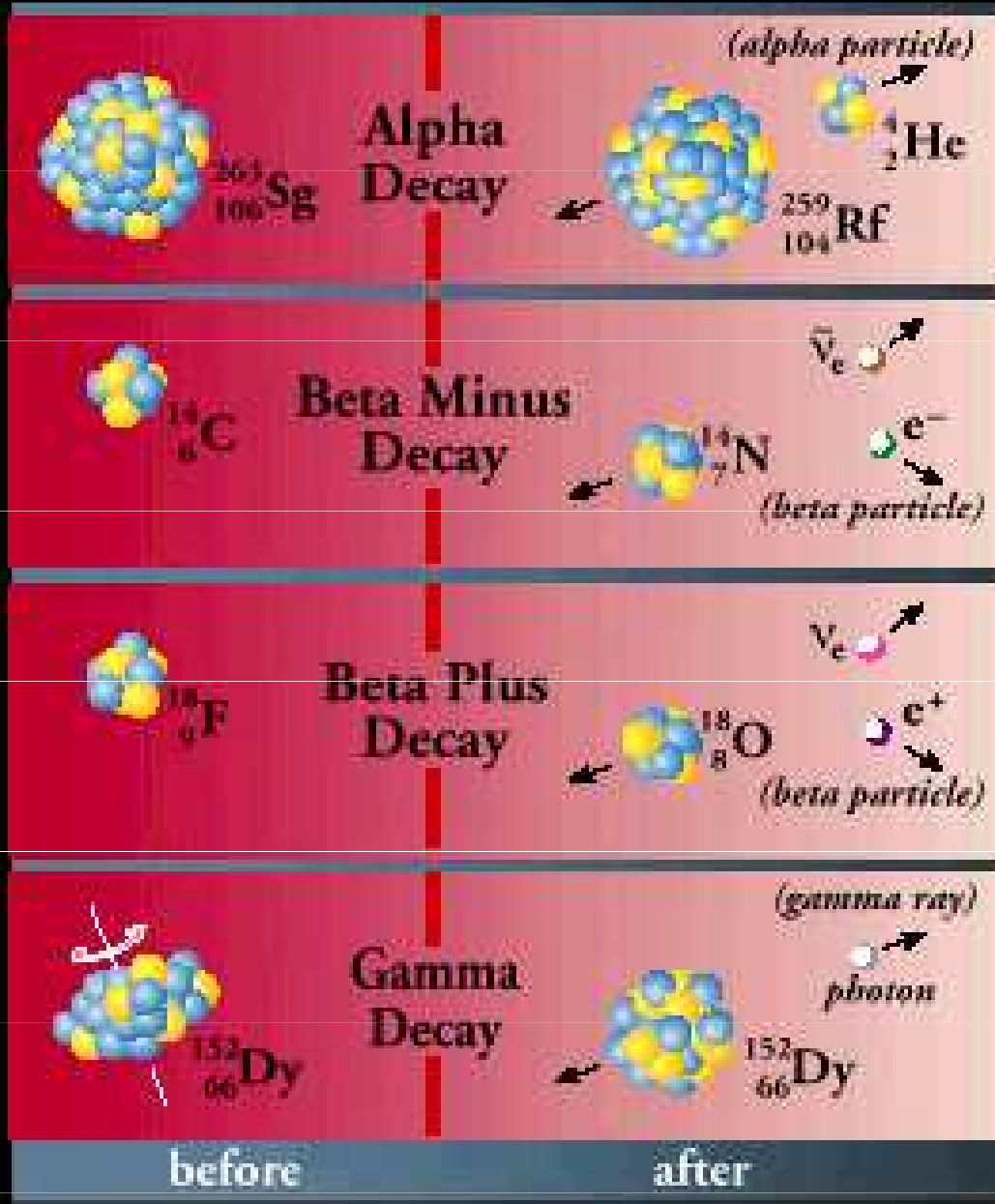
Stabilita izotopů

- 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



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

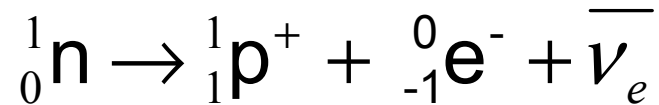
$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma \quad E_\gamma \geq m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV}$$

Využito v PET (pozitronová emisní tomografie)

Radioaktivní rozpad β^-

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

Podstatou rozpadu β^- je přeměna neutronu na proton, elektron a elektronové antineutrino



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

Hmotnost neutronu je vyšší než součet hmotnosti protonu a elektronu (a antineutrino) \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 nulové hodnoty až po maximální

Tříčásticový rozpad

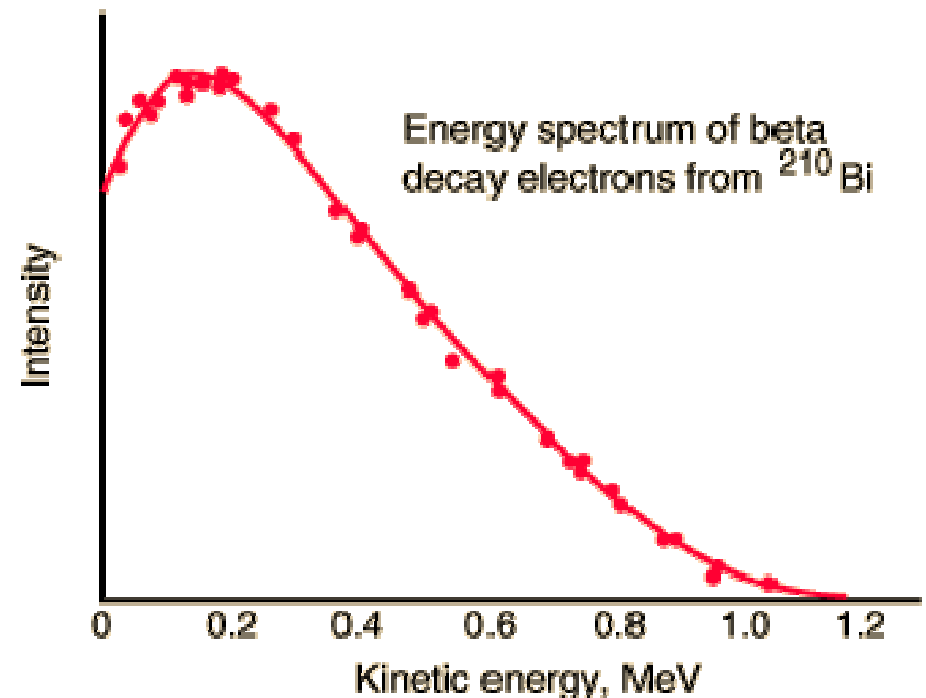
Zákon zachování energie a hybnosti

Maximální energie vyzářených elektronů

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

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

Nejtěžší izotop podléhající β^- rozpadu ${}^{255}_{99}\text{Es}$, konkurencí α rozpad



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

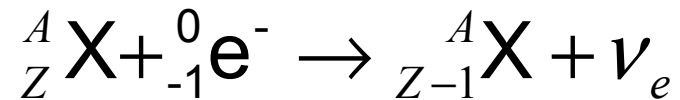
Při β^+ rozpadu se jeden proton v jádře přemění na neutron, pozitron a neutrino se vyzáří

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

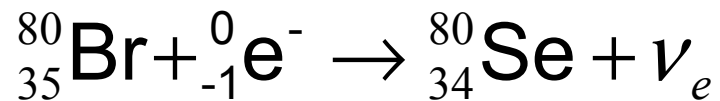


Radioaktivní rozpad β^- - záchyt K

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



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



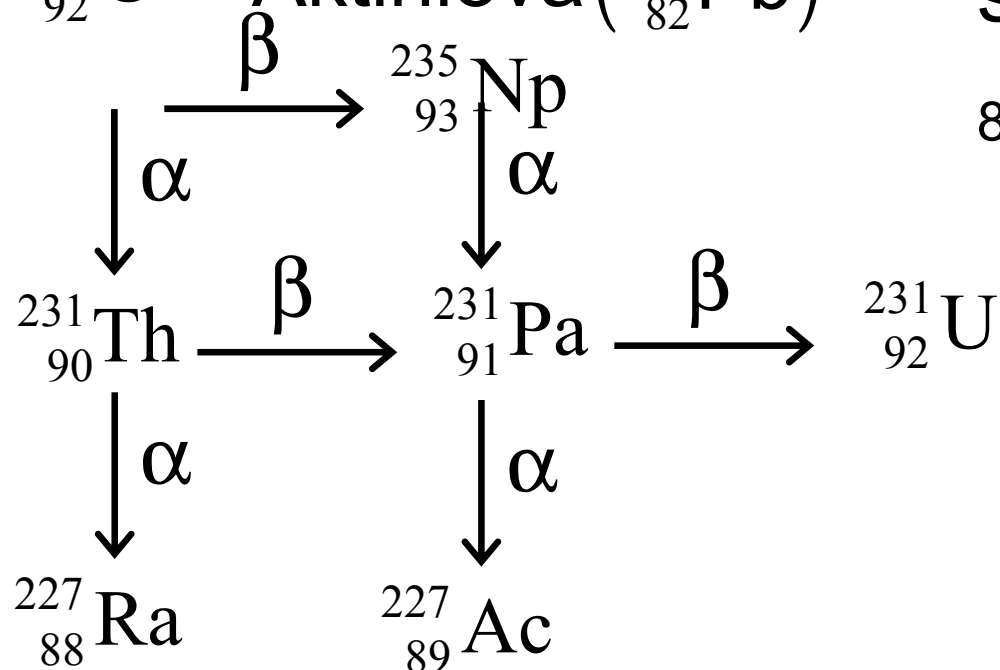
Rozpadové řady

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

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

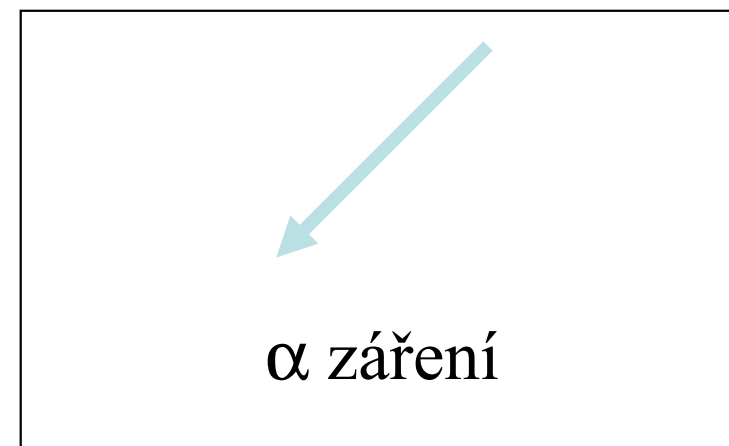
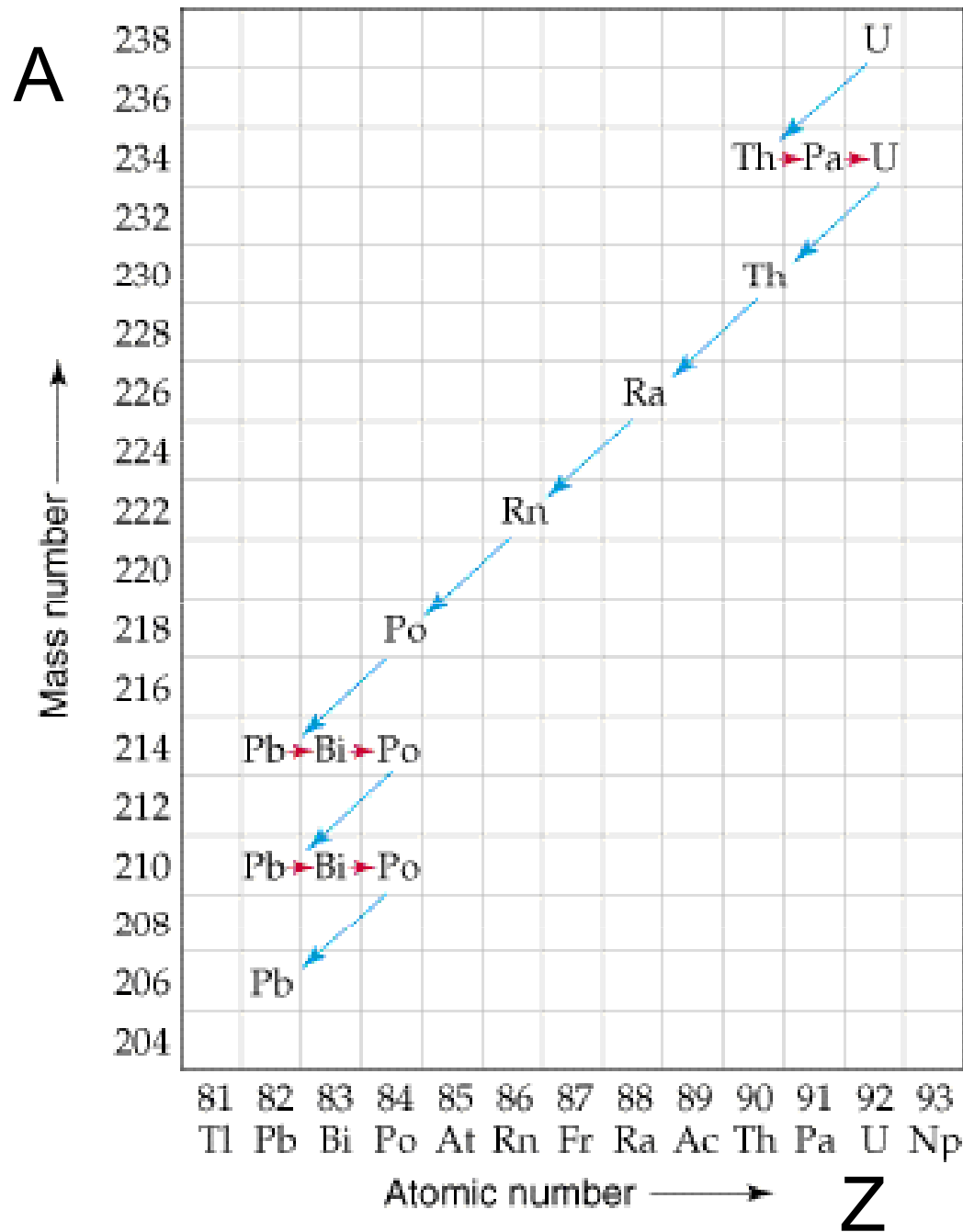
$^{232}_{90}\text{Th}$ Thóriová ($^{208}_{82}\text{Pb}$)

$^{235}_{92}\text{U}$ 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 $^{206}_{82}\text{Pb}$ (bizmutu $^{209}_{83}\text{Bi}$)



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)

$\gamma \rightarrow e^- + e^+ \Rightarrow$ 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

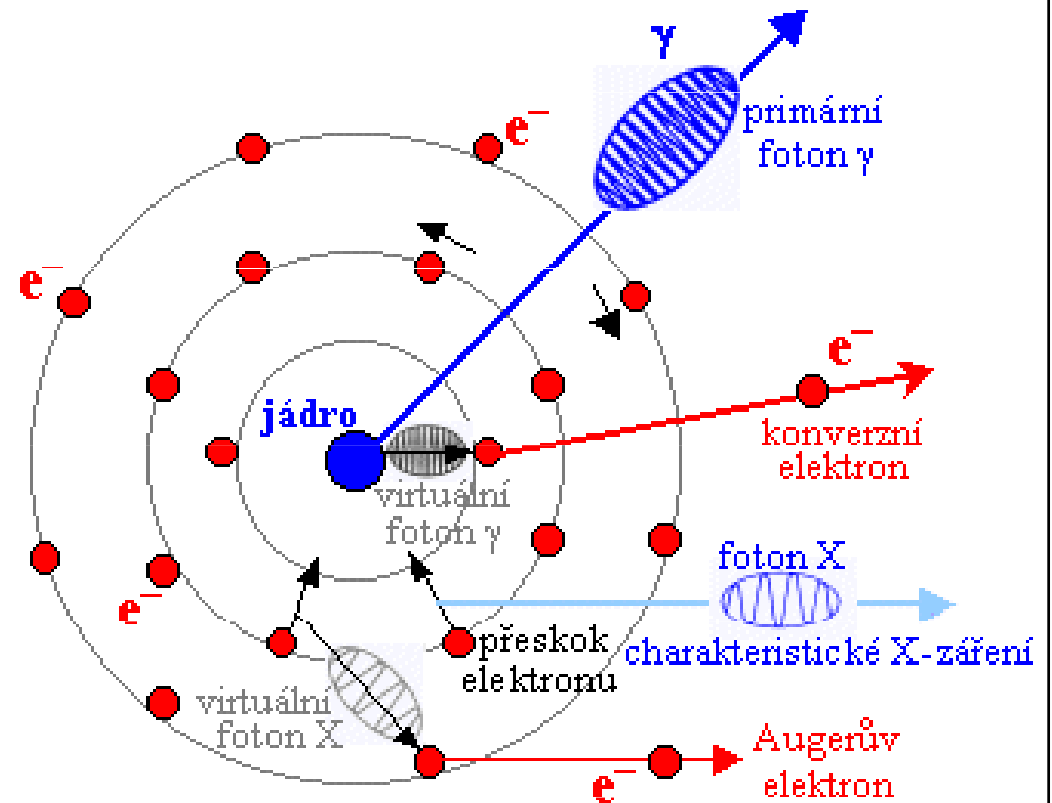
Vyražený elektron s velkou energií a ionizační schopností ionizuje prostředí

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

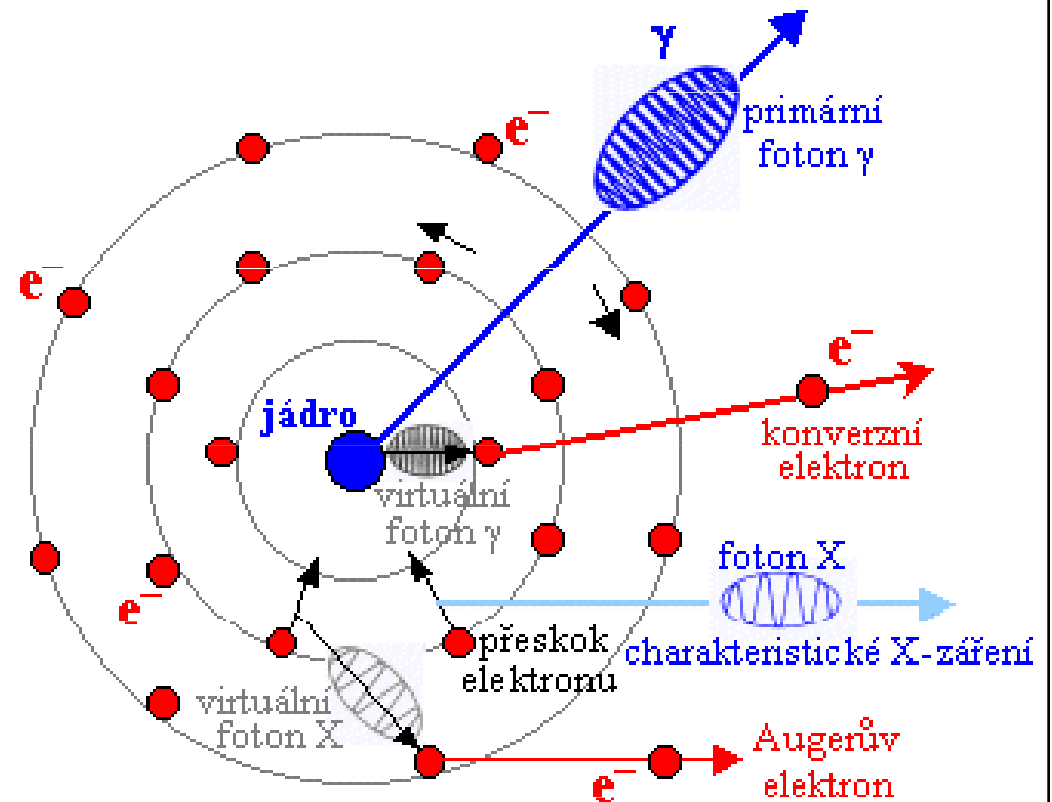
Vnitřní konverze dominuje pro přeměny, kdy spin obou izomerů je shodný

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

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

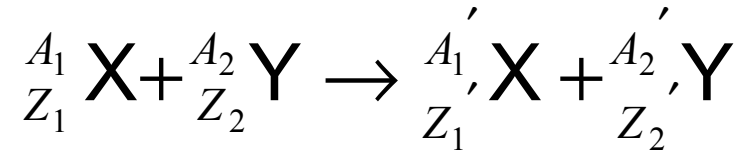
$$\text{ICC}(^{109}\text{Ag})=26 \%$$

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



Jaderné reakce

Zákony zachování



Počtu nukleonů

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

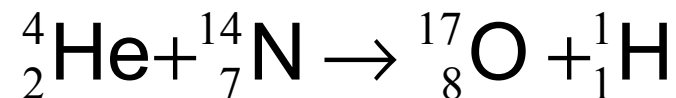
Elektrického náboje

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

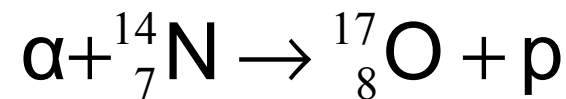
Protonové číslo se nezachovává, pokud dochází k přeměně mezi protonem a neutronem, jinak ano

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

Energie



Hybnosti



Momentu hybnosti



Příprava radioizotopů

Stabilní externí zářič

Požadujeme časově neproměnnou, konstatní aktivitu (přibližně, s časem klesá)

Látky s dlouhým poločasem rozpadu

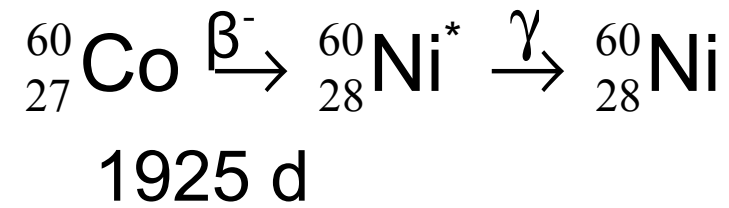
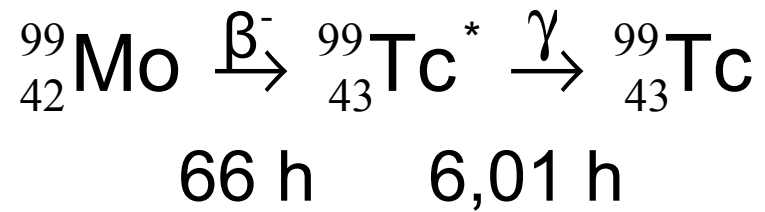
Interní zářič

Použití pro značení chemických látek pro stopování (tracing), radioimmunoassay (RIA), pozitronovou emisní tomografii (PET), jednofotonovou emisní výpočetní tomografii (SPECT)

Krátký poločas rozpadu (rychlé odbourání)

Dostatečná radioaktivita pro diagnostiku vs. co nejnižší dávka pro organismus

γ zářiče



$$E(\beta^-) = 0,318 \text{ MeV}$$

$$E(\gamma_1) = 1,332 \text{ MeV}$$

$$E(\gamma_2) = 1,722 \text{ MeV}$$

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

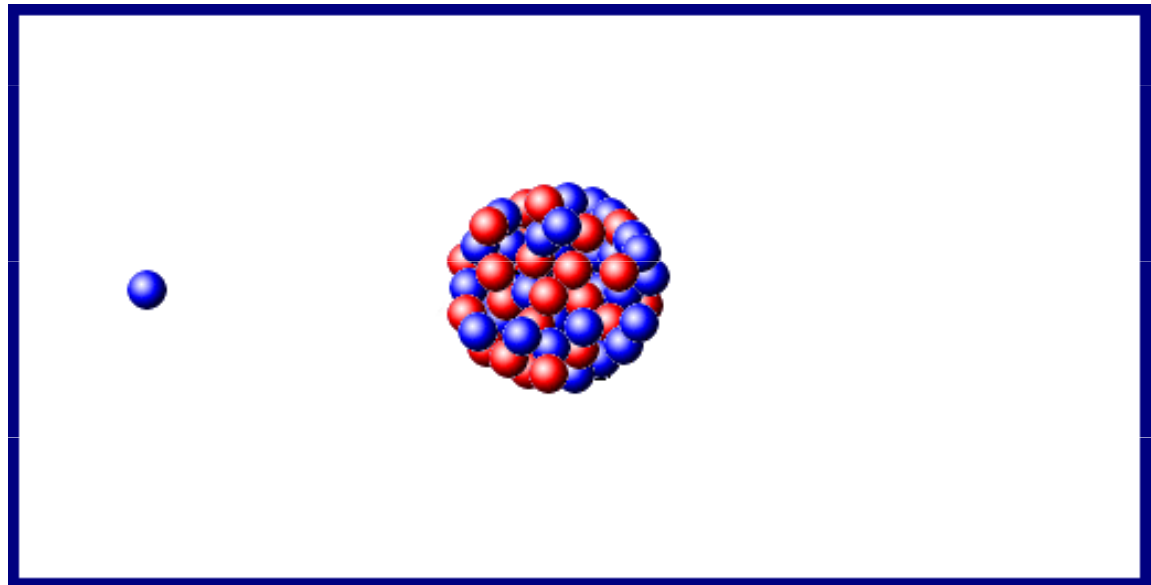
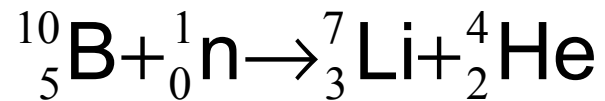
Jaderné reakce

Přirozená radioaktivita

Umělá radioaktivita – zásah člověka

Ostřelování jader částicemi \Rightarrow umělé izotopy

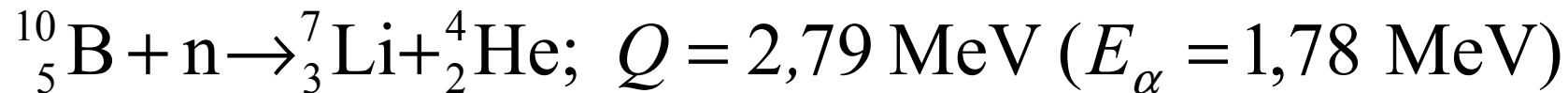
Urychlovače částic



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



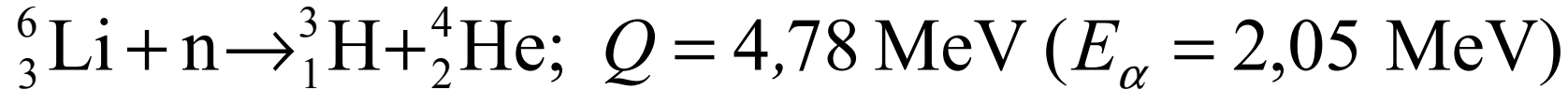
Odlišení vysokoenergetických produktů od registrace pozadí γ

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

Proporcionální detektor plněný BF_3

Detekce neutronů

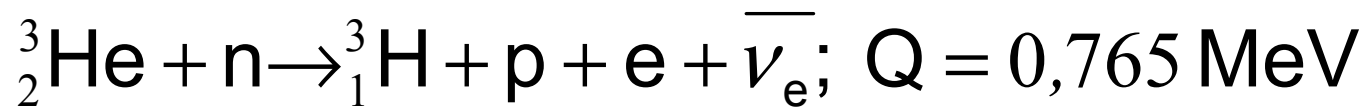
Pomalé neutrony: do 0,3 eV



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

Lithium netvoří plynné směsi

Pevný scintilační detektor LiI (Eu)

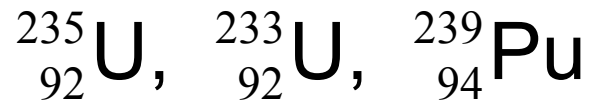


Snadná dostupnost ${}^3_2\text{He}$

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

Detekce rychlých neutronů

Stejné metody jako pro pomalé neutrony, ale složitá závislost účinných průřezů na energii

Pružný rozptyl

Vyražení protonu neutronem a následná detekce protonu (10 keV - 10 MeV)

Plynové detektory plněné vodíkem

Fólie z polyethylenu [-CH₂-]

Prahové detektory

Sada jader reagujících s neutrony endoenergetickou reakcí

Rozpadový zákon

Radioaktivní uhlík ^{14}C se rozpadá s poločasem rozpadu $T=20$ minut.

Jaká část radioaktivního uhlíku zůstane z původního množství po uplynutí času $t=2$ hodin?

Jaká část radioaktivního uhlíku zůstane z původního množství po uplynutí $t=45$ minut?

Po uplynutí jaké doby zbyde $1/10$ původního množství radioaktivního uhlíku?

Pravidla logaritmování

$$\ln(e^x) = \ln(\exp(x)) = x = \exp(\ln(x)) = e^{\ln x}$$

$$\log 10^3 = 3; \quad \log 10 = \log(10^1) = 1 \quad \log(1) = \log(10^0) = 0$$

$$\ln(x \cdot a) = \ln x + \ln a$$

$$\log(10^2 \cdot 10^3) = \log(10^2) + \log(10^3) = 2 + 3 = 5$$

$$\ln(x^a) = a \ln x$$

$$\log(10^4) = 4 \log 10 = 4 \cdot 1 = 4$$

$$\log(0,1) = \log(10^{-1}) = -1$$

$$\ln\left(\frac{1}{x}\right) = \ln(x^{-1}) = -1 \cdot \ln(x) = -\ln x$$

Rozpadový zákon

Pravděpodobnost rozpadu kteréhokoliv atomu je nezávislá na ostatních atomech

$$dn(t) = -\lambda n(t) dt$$

$dn(t)$... změna počtu radioaktivních jader za čas dt

$n(t)$... počet radioaktivních jader v čase t

λ ... rozpadová (přeměnová) konstanta

parametr daného nuklidu

přímo souvisí s poločasem rozpadu

Rozpadový zákon - odvození

Označíme-li počáteční čas rozpadu $t_0=0$ a konečný čas rozpadu t , musí pro všechny časy

$t' = 0..t$ platit:
$$dn(t') = -\lambda n(t') dt' \Rightarrow \frac{dn(t')}{n(t')} = -\lambda dt'$$

Celková změna počtu jader a času během rozpadu je dána integrálem

$$\int_0^t \frac{dn(t')}{n(t')} = \int_0^t -\lambda dt'$$

$$\int_0^t \frac{dn(t')}{n(t')} = [\ln n(t')]_0^t = \ln n(t) - \ln n(0) = \ln \frac{n(t)}{n_0}$$

$$\int_0^t -\lambda dt' = [-\lambda t']_0^t = -\lambda t \rightarrow \ln \frac{n(t)}{n_0} = -\lambda t$$

Rozpadový zákon

Množství radioaktivních jader klesá exponenciálně s časem

$$\ln \frac{n(t)}{n_0} = -\lambda t \Rightarrow \underline{n(t) = n_0 \exp(-\lambda t)}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

Poločas rozpadu T

$$n(T) = \frac{n_0}{2}$$

$$n(T) = n_0 \exp(-\lambda T)$$

$$\frac{n_0}{2} = n_0 \exp(-\lambda T) \Rightarrow \frac{1}{2} = \exp(-\lambda T) \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\ln 2 = -\lambda T$$

$$\underline{n(t) = n_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T} t\right)} = n_0 [\exp(\ln 2)]^{-\frac{t}{T}} = n_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$

Aktivita látky

Aktivita látky udává počet přeměn za jednotku času (1 přeměna = úbytek 1 radioaktivního jádra)

$$dn(t) = -\lambda n(t) dt \Rightarrow \underline{A(t)} = -\frac{dn(t)}{dt} = \underline{\lambda n(t)}$$

Aktivita je přímo úměrná počtu radioaktivních jader a přeměnové konstantě

Aktivita klesá s časem stejně jako množství radioaktivního materiálu

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}; \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

Jednotky aktivity

Bq (Becquerel)

1 Bq = 1 přeměna za 1 s

Ci (Curie)

1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq

Intenzita záření

Intenzita dopadajícího (prošlého) záření je dána jako počet částic dopadajících (prošlých) za 1s

Nezohledňuje energii částic, pouze jejich počet

Jednotky stejné jako pro aktivitu (Bq, Ci)

Celková intenzita záření vycházejícího ze zářiče je rovna jeho aktivitě

Pro posouzení účinků záření je nutné použít souvisejících jednotek zahrnujících jak energii, tak počet absorbovaných částic

Absorpční zákon

Vychází z předpokladu, že útlum (podíl pohlcených částic) na jednotku délky závisí pouze na materiálu absorbátoru a druhu záření

Zanedbává závislost útlumu na energii částice

Nepodstatné, pokud se částice pohltí během několika srážek (fotony, lehké nabitě částice – pouze přibližně)

Nezanedbatelné, jestliže částice během absorpce výrazně mění energii – pohlcování těžkých částic

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x) = I_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{d}}$$

μ ... lineární koeficient útlumu (absorpční koeficient)

d ... polotloušťka (polovrstva)

$$d = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$I(x)$...intenzita ve vzdálenosti x

Absorpční zákon - odvození

Označíme-li počátek absorpce $x_0=0$ a konečnou polohu x , musí pro všechny vzdálenosti $x' = 0..x$ platit:

$$dI(x') = -\mu I(x') dx' \Rightarrow \frac{dI(x')}{I(x')} = -\mu dx'$$

Celková změna intenzity a polohy během absorpce je dána integrálem

$$\int_0^x \frac{dI(x')}{I(x')} = \int_0^x -\mu dx'$$

$$\int_0^x \frac{dI(x')}{I(x')} = [\ln I(x')]_0^x = \ln I(x) - \ln I(0) = \ln \frac{I(x)}{I_0}$$

$$\int_0^x -\mu dx' = [-\mu dx']_0^x = -\mu x$$

$$\ln \frac{I(x)}{I_0} = -\mu x \Rightarrow I(x) = I_0 \exp(-\mu x)$$

Absorpční zákon – zdůvodnění nepřesnosti exp. závislosti

Vztah

$$dI(x') = -\mu I(x') dx'$$

je nepřesný, protože během absorpce se snižuje energie částice. Lineární absorpční koeficient závisí na energii částice



Lineární absorpční koeficient se mění podél dráhy absorpce

Správně bychom měli uvažovat nejpřesnější zápis

$$dI(x') = -\mu(x')I(x')dx' \quad \Downarrow \quad dI(x') = -\mu(E(x'))I(x')dx'$$

obecný (neexp.) tvar absorpčního zákona

Jednotky ionizujícího záření (IZ)

Absorbovaná dávka, gray, Gy, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$

Střední množství energie odevzdané prostředí, vztažené na jednotkovou hmotnost

Starší jednotka rad (radiation absorbed dose), $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

Kerma

Obdoba absorbované dávky, ale uvažuje pouze energii předanou primárním zářením (zpravidla se používá pro fotony)

Dávkový ekvivalent, sievert (J/kg), $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

Stejná jednotka jako absorbovaná dávka, ale uvažuje rozdílný biologický účinek různých druhů záření o stejné energii

Absorbovaná dávka se násobí následujícími bezrozměrnými koeficienty

Gama záření, elektrony: 1

Neutrony, protony: 10

Částice alfa, částice s více než jedním nábojem: 20

Jednotky ionizujícího záření (IZ)

Dávková (kermová) rychlost, Gy/s = J/kg/s

Absorbovaná dávka (kerma) vztažená na jednotkový čas

Dána intenzitou (počet částic za 1 s) a energií dopadajícího záření

Expozice, C/kg

Udává množství vzniklého náboje (stejně velkého kladného a záporného) vzniklé v 1 kg vzduchu vlivem rentgenového nebo γ záření

Starší jednotka 1 R (rentgen) = $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg

Množství vzniklého náboje je úměrné absorbované energii (1 R \approx 1 rad)

Expoziční rychlost, C/kg/s

Míra intenzity rentgenového nebo γ záření

Kosmické záření je proud energetických částic pocházejících z kosmu, pohybujících se vysokou rychlostí a dopadajících do zemské atmosféry. Jedná se především o protony (85 až 90 procent) a jádra hélia (9 až 14 procent). Zbytek tvoří elektrony, jádra jiných atomů a další elementární částice.