

ATOMOVÁ FYZIKA

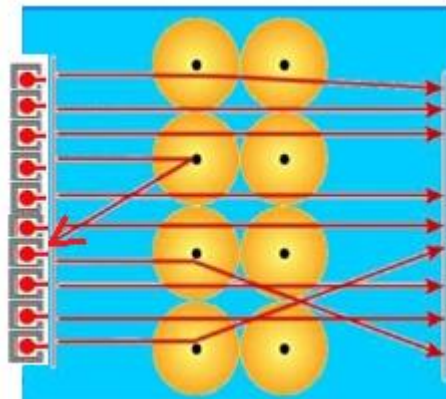
1. Modely atomu

1.1. Bohrov model atomu

V roce 1911 ozařoval Rutherford spolu s Geigerem a Marsdenem zlatou fólii částicemi α (kladné částice – jádra helia). Zjistil, velké množství částic fólií projde bez výrazné změny směru. Pouze 1 z 20 000 se v pravidelných odstupech výrazně odkloní. Odklon působí elektrická odpudivá síla.

Z toho usoudil, že látky se skládají z atomů, které mají kladnou oblast (jádro) a zápornou oblast (obal).

Rozbor experimentů vedl Rutherforda k vytvoření tzv. planetárního modelu atomu, který předpokládá, že:



- a) atom každého prvku je složen z jádra, v němž je soustředěna prakticky veškerá hmotnost (99,9 %) atomu, a elektronů obíhajících kolem jádra
- b) průměr atomu je řádově 10^{-10} m, průměr jádra 10^{-15} m
- c) elektrický náboj jádra je kladný a roven celkovému náboji elektronového obalu, takže atom je navenek neutrální

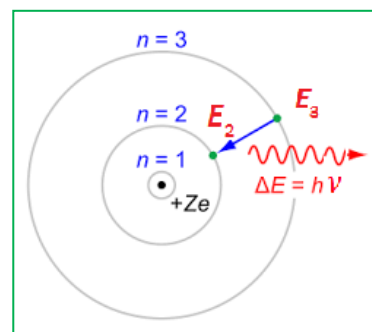
Niels Bohr v roce 1913 vyslovil na základě záření některých prvků hypotézu, že:

I. Elektrony obíhají kolem jádra atomu po kruhových trajektorích o poloměrech r_n daných podmínkou

$2\pi r_n = n\lambda$	$\lambda = \frac{h}{m_e v}$
-----------------------	-----------------------------

kde $n = 1, 2, 3,$
 $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg
 $h = 6,023 \cdot 10^{-34}$ Js
 λ

Je pořadí kruhové dráhy
je hmotnost elektronu
je Planckova konstanta
je vlnová délka vyzářeného fotonu (viz dále)



II. Při pohybu elektronu po určité kvantové dráze je energie atomu stálá,

$$E_n = konst.$$

Atom energii ani nepřijímá, ani nevydává (nezáří). Hovoříme o tzv. **stacionárním stavu**.

III. Při přechodu elektronu na jinou kvantovou dráhu, na níž má menší energii, vyzáří atom foton, jehož energie se rovná úbytku energie elektronu. Naopak při absorpci fotonu přejde elektron na jinou kvantovou dráhu, na níž má energii větší o energii pohlceného fotonu.

Vysílané (případně pohlcené) záření (foton) má energii

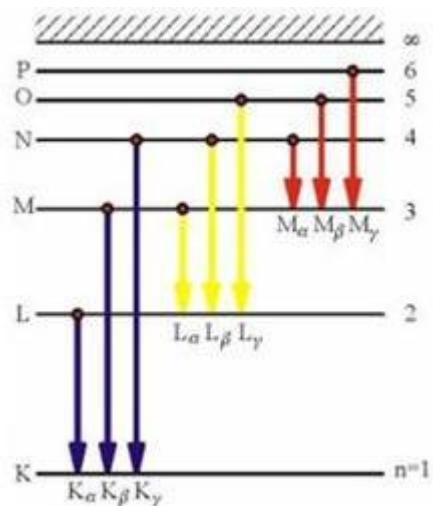
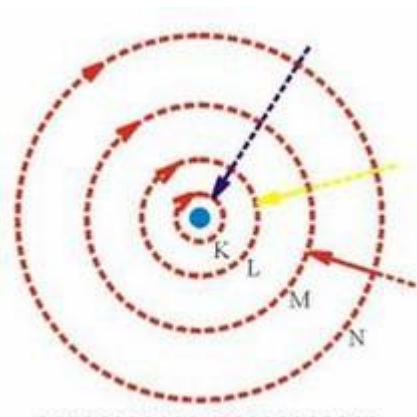
$E_j - E_i = h\nu$

Vlnová délka vyslaného (případně přijatého) fotonu je pro každý prvek charakteristická a určí se podle vztahu

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{j^2} \right)$$

$R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ je rydbergova konstanta $R = \frac{m e^4}{8 \epsilon_0^2 h^3 c}$

i, j je pořadí i-té a j-té kvantové dráhy



Kvantové dráhy mohou být značeny také jako K, L, M, N, O, P,....

Při snižování energie elektronu prvek získáme tzv. série

- **Lymanova série** (přechod na základní 1. hladinu, je v UV oblasti spektra)
- **Balmerova série** (přechod na 2. hladinu, je ve viditelné oblasti spektra, byla objevena jako první)
- **Paschenova série** (přechod na 3. hladinu, je v infračervené oblasti spektra)
- **Brackettova série** (přechod na 4. hladinu)

Čárové spektrum má tedy svůj původ v elektronových přechodech z vyšších do nižších energetických stavů.

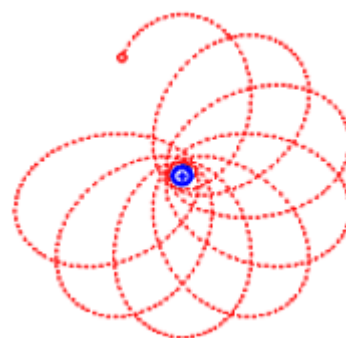
1.2. Sommerfeldův model atomu

Uvedená Bohrova teorie se nedá aplikovat na stavy elektronů ve dvou a víceelektronových atomech.

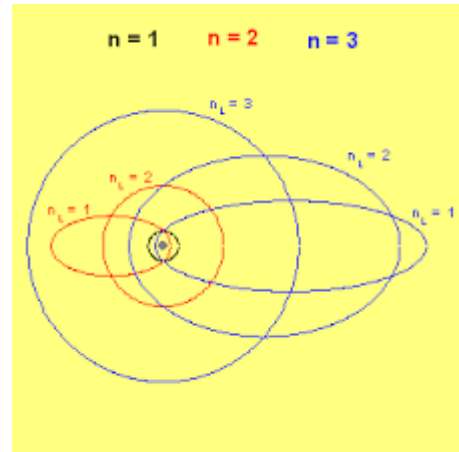
Byla zjištěna jemná struktura čar, které ukazují, že ne všechny spektrální čáry jsou jednoduché (singlety), ale mohou se skládat z několika čar velmi blízkých kmitočtů. Tak např. čáry vodíkového spektra mohou být dvojitě (dublety), čáry dalších prvků i trojitě (triplety).

Jemnou strukturu spektrálních čar se pokusil vysvětlit **Sommerfeld**.

Vzhledem k analogickému tvaru Coulombova a



gravitačního zákona předpokládal, že elektrony mohou obíhat kolem jádra v eliptických drahách. Užitím zákonitostí speciální teorie relativity se Sommerfeldovi podařilo dosáhnout alespoň částečně vysvětlení jemné struktury. Závislost hmotnosti elektronu na jeho rychlosti způsobuje totiž stáčení hlavní osy eliptické dráhy, takže elektron opisuje kolem jádra dráhu ve tvaru "růžice".



Energie elektronů na takových drahách jsou pak poněkud odlišné podle tvaru (excentricity) dráhy, i když mají tyto dráhy stejně velké hlavní poloosy. Tak se vysvětluje, že při přechodu elektronu na jinou dráhu se stejnou hodnotou hlavního kvantového čísla n se vyzařují fotony s různou energií a tedy s různými, nepatrně odlišnými kmitočty.

1.3. Uhlenbeck-Goudsmitův model

V r. 1925 **Uhlenbeck a Goudsmit** uvedli myšlenku, že elektrony v atomovém obalu konají kromě translačního pohybu po eliptických osách také rotační pohyb kolem vlastní osy.

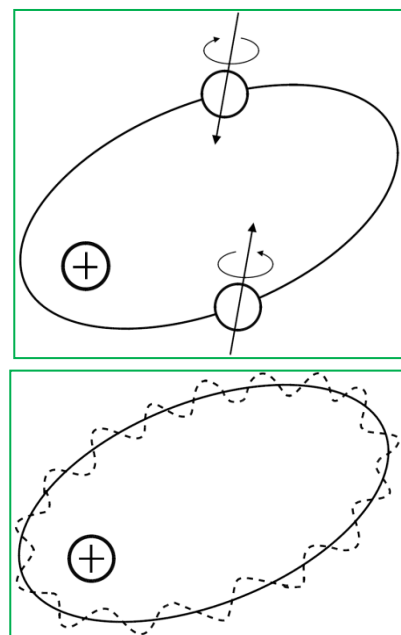
Vlastní rotace elektronu kolem jeho těžiště dává pak elektronu ještě další točivost, která se nazývá spinová točivost – **spin**.

Je to vektor, který má směr rotační osy (úhlové rychlosti) elektronu.

Magnetický spinový moment může být tedy buď souhlasně nebo nesouhlasně rovnoběžný s magnetickým dráhovým momentem.

Při těchto dovolených spinech je energie elektronu nepatrně rozdílná a podle toho elektrony s opačnými spiny vyzařují při stejných kvantových přechodech poněkud rozdílné spektrální čáry – dublety.

Osa vykonává ptecesní pohyb.



1.4. Schrödingerův model atomu

Schrödingerova rovnice je pohybová rovnice nerelativistické kvantové teorie. Formuloval ji v roce 1925.

Určuje pravděpodobnost výskytu elektronu na určitém místě v určitém čase.

Označujeme ji také jako vlnovou funkci volné částice.

Pokud popíšeme částici s celkovou energií E a hybností p , která se pohybuje ve směru osy x , pak je její konstrukce jednodušší.

Celkovou energii (nerelativistické) částice v potenciálním elektrostatickém poli lze zapsat jako

$$E = E_k + E_p = \frac{p^2}{2m} + E_p$$

kde E_k je kinetická energie částice, E_p je potenciální energie částice, p je hybnost a m je hmotnost částice.

Zároveň popsal elektron, který se nachází v potenciálové jámě vytvořené protonem (tedy jádrem atomu) jako vlnu pomocí vlnové funkce

$$\psi = Ae^{-\frac{i2\pi}{h}(Et - px)}$$

Aplikoval ji na energetickou rovnici

$$E\psi = \frac{p^2}{2m}\psi + E_p\psi$$

Derivací vlnové funkce volné částice získáme následující vztahy

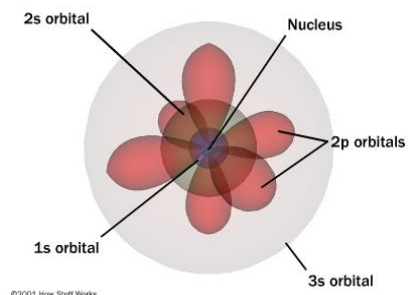
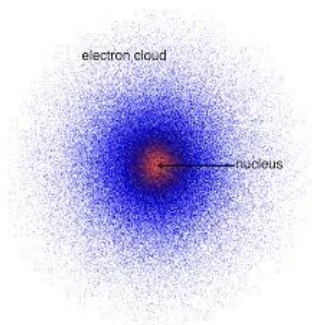
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{p^2}{h^2} \psi$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{E}{h} \psi$$

Po vyjádření ψ a úpravě dostaneme

$$E\psi = -\frac{h^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + E_p\psi$$

Schrödinger pomocí této rovnice spočítal spektrální čáry vodíku. Tento výpočet souhlasil s experimenty, výsledky Bohrova modelu atomu a také s maticovou mechanikou Wernera Heisenberga.



2. Jádro atomu

2.1. Stavba atomového jádra

Atomové jádro představuje centrální část atomu, v níž je soustředěna prakticky celá jeho hmota o rozměru asi $10^{-15} - 10^{-14}$ m.

Jádro je složeno z protonů a neutronů poutaných navzájem jadernými silami.

Protony a neutrony se nazývají společným názvem **nukleony**.

Proton (označení p) je elementární částice s kladným elementárním nábojem $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Má klidovou hmotnost $m_p = 1,6725 \cdot 10^{-27}$ kg a spin $\frac{1}{2}$.

Neutron (n) je elementární částice elektricky neutrální.

Klidová hmotnost je $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27}$ kg a spin $\frac{1}{2}$.

Vzhledem k uvedeným malým hmotnostem se v atomové fyzice užívá k vyjádření hmotnosti částic a jejich soustav **atomová hmotnostní jednotka u** , za kterou se volí $\frac{1}{12}$ klidové hmotnosti nejrozšířenějšího typu nuklidu uhlíku ${}_{12}^6\text{C}$ (označení vysvětlíme níže), což představuje hodnotu $u = 1,66053 \cdot 10^{-27}$ kg.

K popisu jádra užíváme **nukleonového (hmotnostního) čísla A** a **protonového (atomového) čísla Z** .

Protonové číslo Z určuje počet proton v jádře (u neutrálního atomu zároveň počet elektronů v obalu) - což je současně pořadové číslo v Mendělejevě periodické soustavě prvků.

Nukleonové číslo udává celkový počet nukleonů v jádře.

Neutronové číslo je rozdíl nukleonového a protonového čísla $N = A - Z$.

Na základě nukleonového a protonového čísla je jádro označováno symbolem ${}^A_Z X$ (např. ${}^1_1\text{H}$, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{56}_{26}\text{Fe}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ...) a dá se schématicky vyjádřit ve formě

prvek – látka složená ze stejného druhu neutrálních atomů se stejným protonovým číslem Z

nuklid – látka složená ze stejného druhu neutrálních atomů o stejném Z i stejném A

radionuklid – druh nuklidu, jehož jádra podléhají samovolně radioaktivní přeměně

izotopy – nuklidy téhož prvku mající stejné Z a lišící se v A (tedy počtem neutronů v jádře)

izobary – nuklidy různých prvků mající stejné A (a lišící se v Z)

izotony – nuklidy různých prvků obsahující v jádře stejný počet neutronů a lišící se v A i Z

izomery – druhy jader atomů téhož nuklidů s různými energetickými stavy jader.

Elektrický náboj atomového jádra má podle uvedených údajů zřejmě hodnotu $Q_j = +Ze$. Je rozhodující i pro stavbu elektronového obalu atomu a tím i pro chemické vlastnosti prvku.

Rozměry jádra vyplynuly z Rutherfordových pokusů.

Předpokládáme-li, že jádro je kulové, potom jeho objem $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ a tedy R^3 musí být úměrné A . Na základě těchto úvah se poloměr jádra (přesněji řečeno oblast působení jaderných sil) určuje podle empiricky získaného vztahu

$$R = R_0 A^{\frac{1}{3}},$$

kde $R_0 = 1,3 \cdot 10^{-15}$ m.

Poznámka:

Poloměry jader s velkými nukleonovými čísly A (např. radium, uran, thorium) jsou cca 10^{-14} m.

Příklad: Určete hustotu jádra izotopu uhlíku ${}^{12}_6\text{C}$.

Řešení: Ze vztahu vychází pro poloměr jádra izotopu uhlíku ${}^{12}_6\text{C}$ hodnota

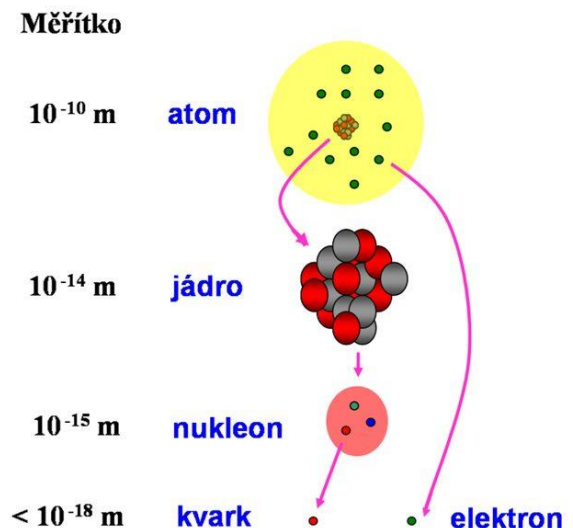
$R = 1,3 \cdot 10^{-15} \sqrt[3]{12} \approx 3 \cdot 10^{-15}$ m. Známe-li dále hmotnost jádra, můžeme si utvořit představu o hustotě jaderné hmoty. Pro uvedený izotop vychází

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi(3 \cdot 10^{-15})^3} \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Toto obrovské číslo platí v zásadě pro všechna jádra.

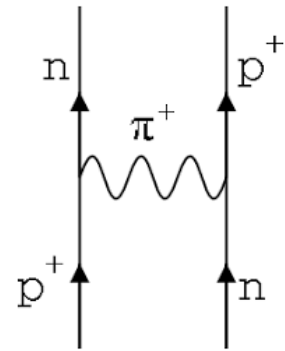
2.2. Teorie jaderných sil

V jádře atomu jsou tedy nukleony dohromady vázány ve velmi malém prostoru, přestože mezi protony působí silné coulombovské odpudivé síly. Poměrně značná stabilita jader většiny prvků vede k závěru, že se v jádře setkáváme s novým druhem interakce mezi částicemi, jejímž důsledkem jsou vůbec nejsilnější známé síly. Studium původu těchto **jaderných sil** není dosud ukončeno, je však známa řada jejich kvalitativních i kvantitativních charakteristik.



Dosud neúspěšnější teorii jaderných sil vypracoval v roce 1935 Hideki Yukawa. Popsal jaderné síly za předpokladu existence nových elementárních částic, které podobně jako fotony v elektromagnetickém poli tvoří kvanta jaderných sil. Hmotnost těchto nových částic leží mezi

hmotnosti elektronu a nukleonu, proto je Yukawa nazval mezony a nový typ pole polem mezonovým (odtud se také jeho teorie nazývá **teorií mezonového pole**). Na základě Yukawovy předpovědi byly mezony systematicky experimentálně hledány, v roce 1947 také objeveny a nazvány mezony π (piony).



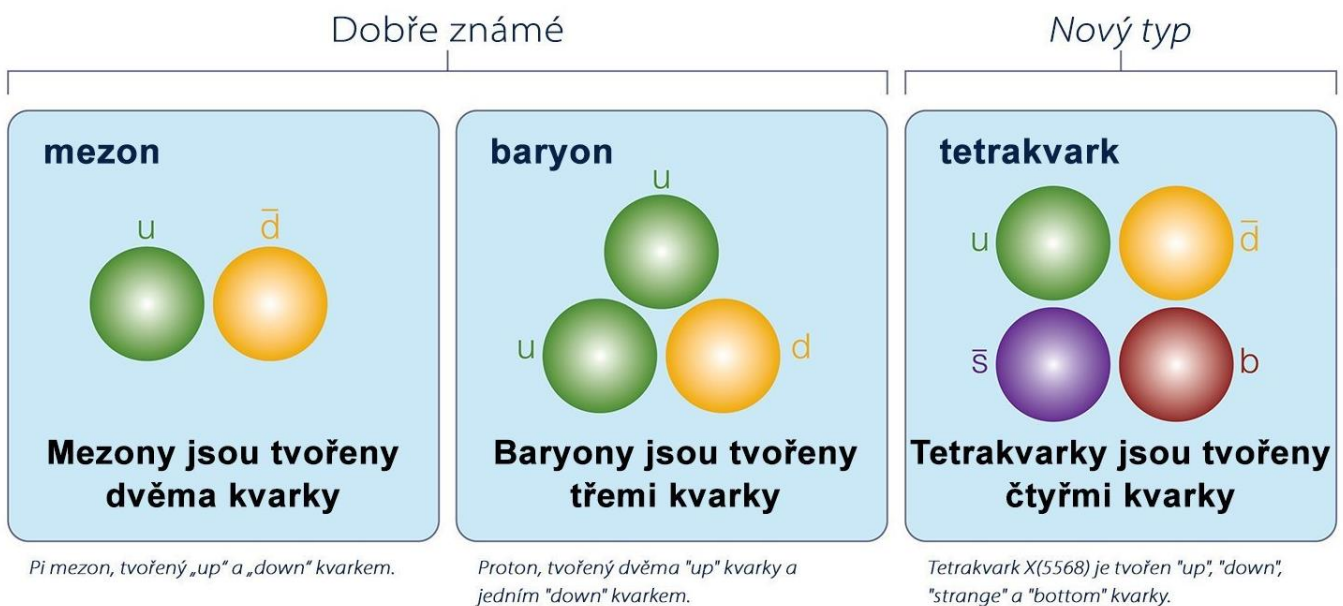
Podle mezonové teorie jaderných sil jsou všechny nukleony obklopeny jedním nebo více mezony, které mohou být elektricky neutrální nebo mít elektrický náboj. Rozdíl mezi protony a neutrony je ve složení jejich mezonových oblaků. Síly působící mezi dvěma neutrony, respektive mezi dvěma protony, jsou výsledkem vzájemné výměny neutrálních mezonů π^+ a π^- mezi nimi.

Teorie atomového jádra je značně obtížnější, než byla teorie elektronového obalu, v níž byly úspěšně zvládnuty vlastnosti elektronového obalu na základě principů kvantové mechaniky.

Poznámka: (Novější)

Silná interakce, či silná (jaderná) síla, je nejsilnější ze všech základních interakcí, působících mezi částicemi hmoty. Zprostředkovatelem této síly je částice gluon. Působnost síly je omezena pouze na subatomární úroveň (dosah této síly je kolem 10^{-15} m, tzn. jedná se o sílu krátkého dosahu).

Je zodpovědná za soudržnost kvarků tvořících hadrony, např. protony a neutrony, ale také za udržení protonů a neutronů v atomovém jádře.



Teorie popisující chování silnou interakci se nazývá kvantová chromodynamika.

2.3. Modely jádra

Za současného neúplného stavu poznání výzkum i praxe potřebují zjednodušené představy o struktuře jádra. Vytvářejí se schématicky **modely jádra**, které jsou schopny vystihnout alespoň některé jeho vlastnosti a umožňují i úspěšnou předpověď nových faktů.

- kapkový
- slupkový,
- dále vystihují některé aspekty jádra model Fermiho plynu, model shlukový, kolektivní, zobecněný a optický.

2.4. Hmotnostní úbytek

Jestliže je jádro složeno z protonů a neutronů, dalo by se očekávat, že jeho hmotnost by se dala vypočítat jako součet hmotností těchto částic. Měření ale ukazují, že hmotnost jádra m_j je vždy menší než součet hmotností $Z \cdot m_p$ protonů a $N \cdot m_n$ neutronů tvořících jádro. Hmotnostní rozdíl

Teoretická hmotnost

$$m_T = Z \cdot m_p + N \cdot m_n$$

Skutečná hmotnost

$$m_S = A \cdot u_j$$

Platí, že

$$m_S < m_T$$

Rozdíl

$$\Delta m = m_T - m_S$$

se nazývá **hmotnostní úbytek** (schodek, defekt)

Hmotnostní úbytek je důsledkem Einsteinova vztahu mezi hmotností a energií $E = mc^2$, resp. $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Při vzniku jádra z volných nukleonů konají totiž přitažlivé jaderné síly práci na úkor úbytku celkové energie soustavy nukleonů. Podle uvedeného Einsteinova vztahu pak platí

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2,$$

Hmotnostní úbytek odpovídá energii E_j , která se při vytvoření jádra uvolnila nebo naopak energii, kterou musíme jádru dodat, aby se rozdělilo na jednotlivé stavební částice (protony a neutrony). Energie E_j se nazývá **vazebná (vazební) energie jádra**. Čím je E_j větší, tím pevněji jsou nukleony v jádře vázány.

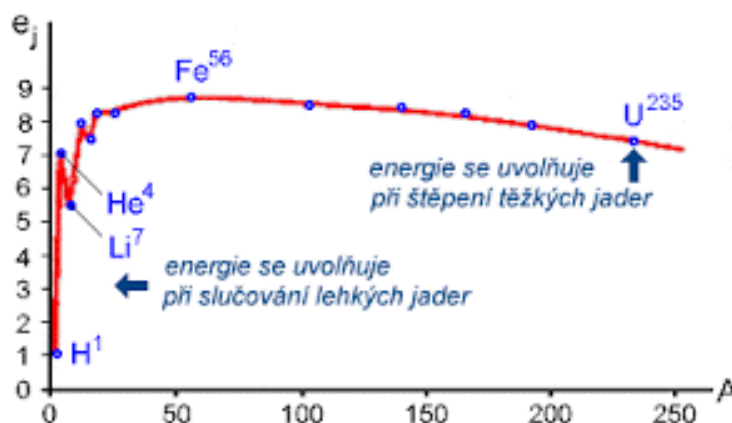
Ukazuje se, že vazebná energie není úměrná počtu A nukleonů v jádře. Zavádíme proto veličinu vazebná energie na jeden nukleon

$$e_j = \frac{E_j}{A}$$

Závislost vazebné energie připadající na 1 nukleon na nukleonovém čísle A je graficky znázorněna na obr.

Podle tohoto obrázku jsou tedy nejstabilnější jádra se středně velkými atomovými hmotnostmi (maximum 8,8 MeV pro w_j připadá na železo ${}^{56}_{26}\text{Fe}$).

K uvolnění nukleonů těchto jader (na rozbití jádra) je tedy třeba největší množství energie a naopak – při jejich vzniku, složení z nukleonů se nejvíce energie uvolní.



Poznámka:

Jednotka energie $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

2.5 Radioaktivita

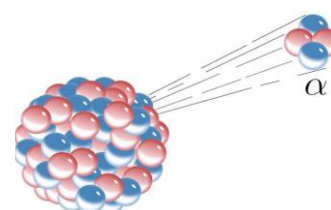
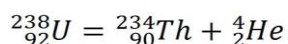
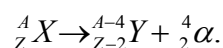
Je samovolná přeměna jader na jádra jiného prvku.

Přirozenou radioaktivitu objevil v roce 1896 Becquerel.

Přirozený radioaktivní rozpad má tři významné vlastnosti:

1. Vzniká jiný prvek (s výjimkou záření γ)
2. Je to vnitřní proces nezávislý na vnějších podmínkách (tlaku, teplotě, přítomnosti elektrického a magnetického pole).
3. Je doprovázen emisí jednoho ze čtyř druhů záření α , β^+ , β^- , γ .

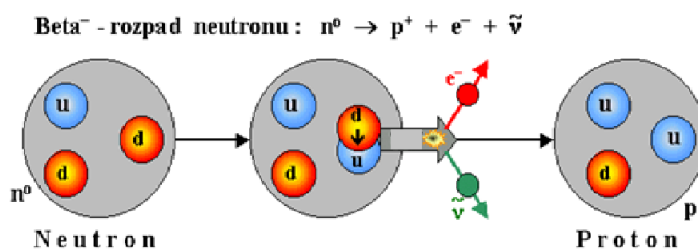
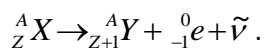
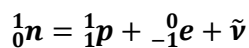
- **Přeměna α** probíhá podle schématu



Jak již bylo výše uvedeno, částice α je složena ze 2 protonů a 2 neutronů, je to jádro izotopu helia ${}^4_2\text{He}$. Proto se částici α říká také helion. Nový prvek má jádro s atomovým číslem o 2 menším a hmotnostním o 4 menším než prvek výchozí.

- **Přeměnu β^-** (emise elektronu)

Elektrony však nejsou v jádře obsaženy. K jejich emisi z jádra ale může dojít jen tehdy, jestliže se v jádře **neutron přemění na proton, elektron (částice β^-) a antineutrino $\bar{\nu}$ podle schématu:**

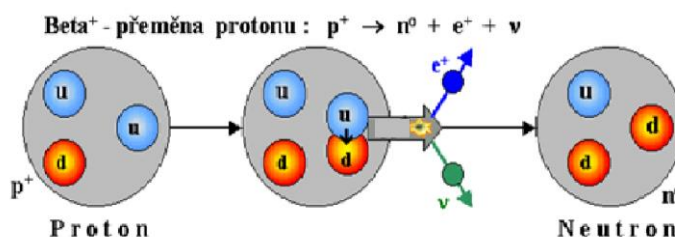
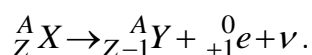
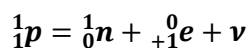


Jak je vidět ze vztahu nově vzniklé jádro má atomové číslo o jednotku **vyšší** než původní jádro, hmotnostní číslo zůstává stejné.

- Přeměna β^+** (emise pozitronu)

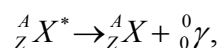
Pozitrony nejsou v jádře obsaženy.

Proton v jádře se rozpadne na neutron, pozitron (antičástice k elektronu) a neutrino.



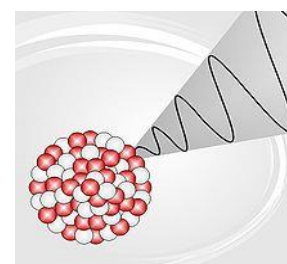
Nově vzniklé jádro má atomové číslo o jednotku **nižší** než původní jádro, hmotnostní číslo zůstává stejné.

- Přeměna γ** (emise fotonu) se dá zapsat schématicky ve tvaru



kde ${}^A_ZX^*$ značí excitované jádro (jádro s vyšší energií).

Vznikne jádro energeticky chudší - **izomer**



Dalšími typy přeměn jader radionuklidů jsou K – záchyt (elektronový záchyt) a inverzní přeměna β .

Ukázalo se, že radionuklidy jsou určitým způsobem vázány a lze je rozdělit do známých **radioaktivních přeměnových řad**.

Každý člen řady s výjimkou prvního vzniká radioaktivní přeměnou α nebo β předešlého radionuklidu v řadě, řada končí stabilním nuklidem, který se dále nepřeměňuje.

Řada	Mateřské jádro	Poločas přeměny (roky)	Stabilní konečný produkt
uranová (uran - radiová)	${}_{92}^{238}\text{U}$	$4,51 \cdot 10^9$	${}_{82}^{206}\text{Pb}$
aktiniová (uran – aktiniová)	${}_{92}^{235}\text{U}$	$7,07 \cdot 10^8$	${}_{82}^{207}\text{Pb}$
thoriová (uran – thoriová)	${}_{90}^{232}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{10}$	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
neptuniová	${}_{93}^{237}\text{Np}$	$2,25 \cdot 10^6$	${}_{83}^{209}\text{Bi}$

Podle experimentálních údajů platí pro jaderné přeměny v soulase s teorií **obecné zákony zachování** – zákon zachování energie a hmotnosti, elektrického náboje, hybnosti a spinu pro všechny částice, které se dané přeměny zúčastňují.

2.6. Zákon radioaktivní přeměny

Radioaktivitu objevil v roce 1896 Henri Becquerel u solí uranu.

K objasnění podstaty radioaktivity zásadním způsobem přispěli francouzští fyzikové Pierre Curie a Marie Curie-Skłodovská polského původu.

Při radioaktivní přeměně je počet $-dn$ rozpadajících se atomů (proto znaménko mínus) úměrný okamžitému počtu atomů n a časovému intervalu dt , ve kterém k přeměně dochází. Platí

$$-dn = \lambda n dt,$$

kde λ je tzv. **Přeměnová (rozpadová) konstanta**, která charakterizuje kolik jader se rozpadne za jednotku času. Označíme-li počet atomů v čase $t = 0$ symbolem n_0 , v čase t symbolem n , potom ze vztahu postupně dostáváme

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\lambda t$$



$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

Uvedený výsledný vztah se nazývá **zákon radioaktivní přeměny**.

Jestliže si, že počet atomů je úměrný hmotnosti radionuklidu, můžeme zákon přeměny psát pomocí hmotností

$$m = m_0 e^{-\lambda t}$$

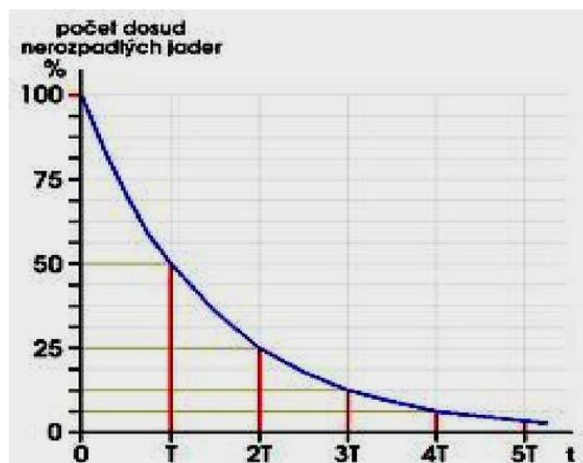
Je vhodnější pro praktické aplikace.

V tomto zápisu je m_0 původní hmotnost radioaktivního preparátu a m hmotnost po přeměně za dobu t .

Vedle přeměnové konstanty lze radionuklid charakterizovat poločasem přeměny, střední dobou života, aktivitou.

Poločas přeměny (rozpadu) T je doba, za kterou se přemění polovina z původního počtu atomů v daném radionuklidu. Dosadíme-li do

přeměnového zákona za $n = \frac{n_0}{2}$, potom pro poločas přeměny v sekundách vychází



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

Od poločasu přeměny je třeba rozlišovat **střední dobu života τ** . Je to doba, za kterou počet jader n_0 radioaktivního preparátu klesne na hodnotu $n = \frac{n_0}{e}$. Ze zákona přeměny a vztahu (6.13) pro poločas přeměny můžeme střední dobu života psát ve tvaru

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

Aktivita \mathcal{A} radionuklidu (radioaktivního preparátu, radioaktivního zářiče) představuje rychlost, se kterou se preparát rozpadá.

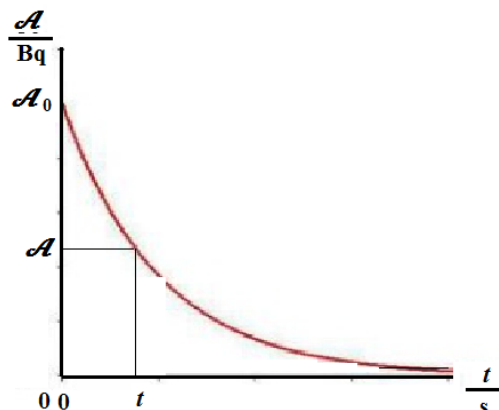
Můžeme říci, že aktivita udává počet rozpadlých jader za 1 sekundu nebo rychlost, s níž se atomy radionuklidu rozpadají. Jednotkou aktivity je becquerel (Bq) s rozměrem s^{-1} .

\mathcal{A}_0 je aktivita zářiče v čase $t = 0$ s, \mathcal{A} je aktivita v čase t .

Aktivita je úměrná počtu jader n .

$$\mathcal{A} = \lambda n$$

Protože počet jader je



$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

Pak

$$\mathcal{A} = \lambda n_0 e^{-\lambda t}$$

Protože

$$\mathcal{A}_0 = \lambda n_0$$

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

Můžeme říci, že aktivita udává počet rozpadlých jader za 1 sekundu nebo rychlost, s níž se atomy radionuklidu rozpadají. Jednotkou aktivity je becquerel (Bq) s rozměrem s^{-1} .

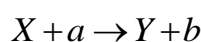
kde \mathcal{A}_0 je aktivita zářiče v čase $t = 0$, \mathcal{A} aktivita v čase t .

2.7. Energie z jádra

• Transmutace

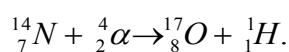
Nejčastější příčinou jaderné reakce je buď látková částice, která vnikne velkou rychlostí do jádra, nebo foton, jež jádro absorbuje. Výsledkem interakce je nové, transmutované jádro a jedna nebo více částic s určitou kinetickou energií.

Schématicky můžeme tyto jaderné reakce zapsat ve formě



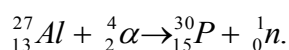
kde X je jádro do reakce vstupující (terčové), Y jádro nově vzniklé (dceřinné), a ostřelující (bombardující) částice (střela), b nově vzniklá lehká částice. Jako částice a , b mohou v jaderných reakcích vystupovat neutron (n), proton (p), deuteron (jádro deuteria 2_1H , d), α – částice, foton (γ).

První umělou transmutaci realizoval Rutherford v roce 1919 při ostřelování atomů dusíku α – částicemi, čímž získal stabilní kyslík. Tuto klasickou umělou transmutaci si můžeme zapsat ve tvaru

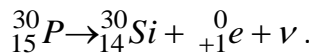


Experiment manželů Joliotových – Curieových v roce 1934 vedl k objevení umělé radioaktivity spočíval v tom, že do hliníkové nádoby vložili izotop polonia ${}^{210}_{84}Po$ a pozorovali pronikavé záření, které neustalo ani po odstranění polonia.

Muselo tedy vycházet z hliníku. Toto záření splňovalo zákon přeměny podobně jako záření přirozených radionuklidů. Vysvětlení uvedeného experimentu je následující – polonium jako přirozený zářič vysílá částice α , které přeměňují hliník na radioaktivní izotop fosforu podle schématu



Vzniklý nestabilní izotop fosforu se s poměrně krátkým poločasem rozpadu ($T = 135,6$ s) mění ve stabilní křemík za současného vyslání pozitronu a neutrina:



- **Typy jaderných reakcí:**

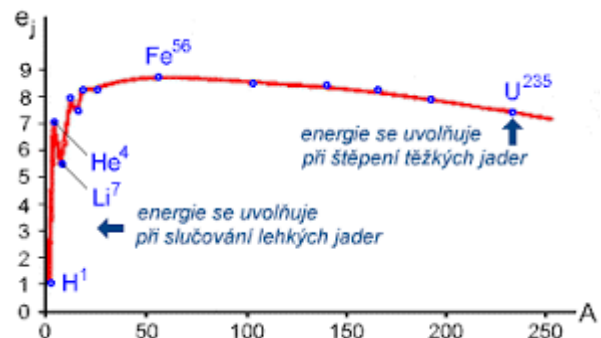
1. Prostá přeměna – z terčového jádra vzniká jádro dceřinné, přičemž protonová i nukleonová čísla obou jader se málo liší.

2. Štěpení jader – z terčového jádra vzniknou dvě jádra se značně odlišnými Z , A od původního jádra.

3. Tříštění jader - z terčového jádra se uvolní takové množství částic, že vznikne jádro s podstatně odlišnými Z , A .

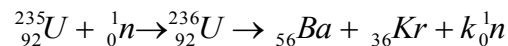
4. Syntéza jader – ze dvou lehkých jader vzniká nové jádro.

- **Ke štěpení** těžkých na jádra středně těžká nemůže dojít samovolně, ale pouze tehdy, je-li narušen jejich rovnovážný stav. Minimální energie k tomu potřebná se nazývá **aktivační energie**. Absorbí této energie se jádro dostává do excitovaného stavu, ztrácí stabilitu a štěpí se na dvě nová, středně těžká jádra.

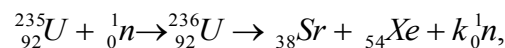


Štěpení těžkých jader objevili v roce 1939 Hahn, Meitnerová a Strassmann. Zjistili, že při ostřelování izotopu uranu ${}_{92}^{235}\text{U}$ pomalými neutrony se jádro uranu rozštěpí na dvě lehčí jádra ze středu periodické soustavy, na jádra barya a lanthanu.

K nejpravděpodobnějším patří reakce



nebo

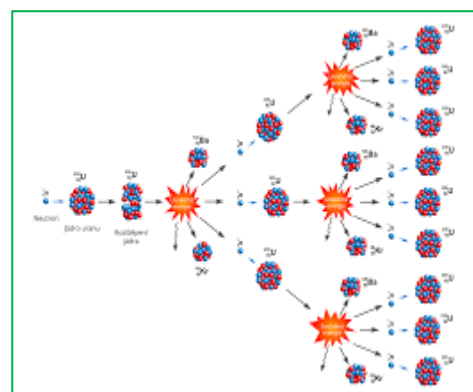


kde počet emitovaných neutronů k může nabýt hodnot 2 nebo 3.

Protože při štěpení uranu vzniká vedle zplodin štěpení ještě několik dalších neutronů, lze při vhodném uspořádání využít těchto neutronů pro štěpení dalších jader.

Tak vzniká lavinový, samovolně se udržující děj nazývaný **řetězová reakce**.

První řetězovou reakci se podařilo uskutečnit v roce 1942 kolektivu vědců, který vedl Fermi. Pro vznik řetězové reakce musí být dodrženy určité podmínky, které vedou mimo jiné



k tomu, že řetězovou reakci samovolně se udržující bez pomocného zdroje neutronů lze uskutečnit pouze u velmi omezeného počtu štěpitelných jader, prakticky u ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{92}^{233}\text{U}$, ${}_{94}^{239}\text{Pu}$.

Taková reakce byla, jak známo, uskutečněna v atomové bombě. K nedestruktivnímu využití jaderné energie dochází při jejím získávání v řízených řetězových reakcích, k nimž dochází v tzv. jaderných reaktorech.

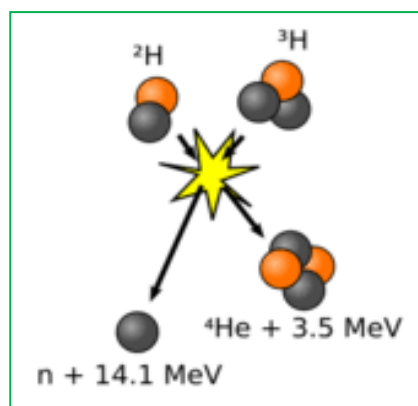
- **Při syntéze (jaderné fúzi)** jader se uvolňuje energie sloučením těžkých jader. Aby k ní došlo, musí se jádra přiblížit na vzdálenost působnosti jaderných sil, tj. řádově 10^{-15} m. Tomu však brání odpuzivé elektrostatické síly mezi kladnými náboji.

K jejich překonání je nutno dodat jádrům značnou energii.

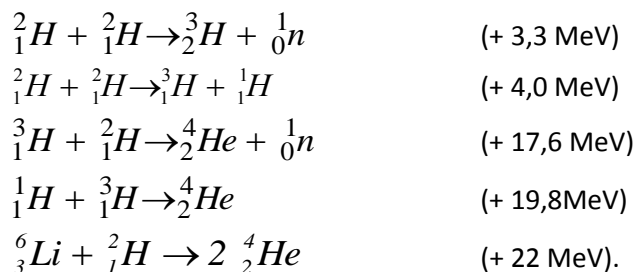
Nejlépe se toho dosahuje zahřátím jaderného materiálu na velmi vysokou teplotu (asi 10^8 K), proto se přeměny jader syntézou nazývají **termojaderné reakce**.

V přírodě takové reakce probíhají ve Slunci a v ostatních hvězdách a jsou hlavním zdrojem energie ve vesmíru. Základní termonukleární reakcí ve hvězdných podmínkách je slučování vodíkových jader na jádra hélia (tzv. proton – protonové reakce).

Na Zemi ovšem uvedená reakce prozatím ve stadiu experimentů.



Na Zemi se zdají energeticky nejvýhodnější reakce vzájemné syntézy mezi izotopy vodíku ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ (deuteria), ${}^3_1\text{H}$ (tritia) a lithia ${}^6_3\text{Li}$. Technicky nejdostupnější jsou tyto reakce:



Využití uvedených reakcí předpokládá bohatý a levný zdroj deuteria. Takovým zdrojem jsou světová moře a oceány, jež obsahují 0,015 % deuteria (což je řádově 10^{15} tun).

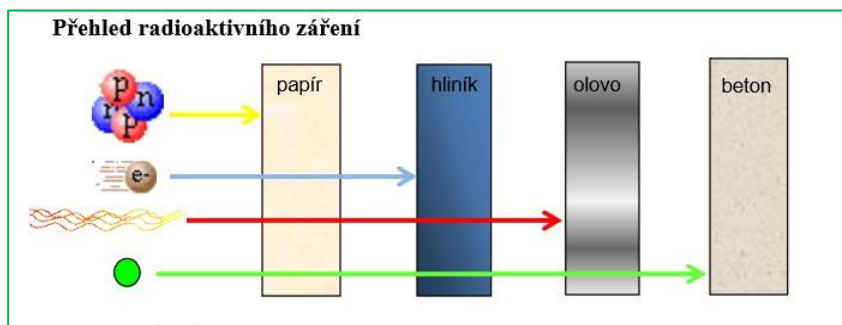
Proti štěpení jader má termonukleární syntéza tři podstatné výhody:

1. Prakticky nevyčerpatelné zásoby paliva (v 1 litru mořské vody je 0,15 g deuteria, z 1 l vody by bylo tedy možné teoreticky uvolnit jadernou energii $3,6 \cdot 10^9$ až $14,4 \cdot 10^9$ J, což odpovídá energii získané spálením 100 – 330 l benzínu),
2. menší množství radioaktivního odpadu,
3. vysoká možná účinnost v předpokládaných termojaderných elektrárnách (60 – 80%) pro menší množství odpadního tepla.

2.6. Ochrana před zářením

Materiál, který zastaví určitý typ záření, závisí na energii emitovaného záření.

Nejslabší jsou α částice, nejpronikavější jsou neutrony.



Jestliže uvažujeme rovnoměrný paprsek záření, pak jeho intenzita závisí exponenciálně na tloušťce látky, kterou prochází, a lineárním součiniteli zeslabení, který je tím vyšší, čím je větší hustota a atomová hmotnost látky.

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

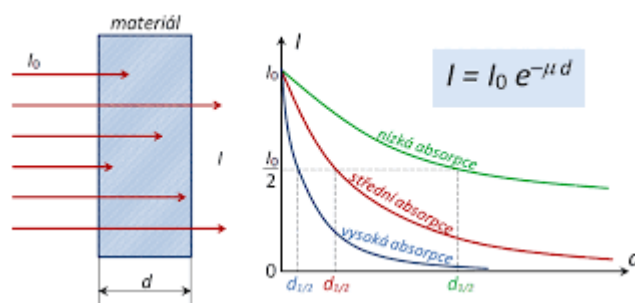
Kde

μ je koeficient pohltivosti (m^{-1})

d je tloušťka vrstvy

Každý materiál je charakterizovaný polovrstvou – tloušťka material, na které klesne energie (intenzita) záření a polovinu.

Platí:



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

Tabulka polovrstev vybraných látek

Hodnoty polovrstev vybraných látek jsou udány v centimetrech. U hodnot označených ^a se při zvýšení intenzity už hodnota polovrstvy nevyšší.

Energie	Olovo (11,35 g/cm ³)	Železo (7,86 g/cm ³)	Hliník (2,82 g/cm ³)	Voda (1 g/cm ³)	Vzduch (0,0012929 g/cm ³)	Beton (2,35 g/cm ³)
0,3 MeV	0,16	0,845	2,457	5,823	5,133. 10 ³	2,76
0,5 MeV	0,396	1,062	2,936	7,532	6,243. 10 ³	3,39
1 MeV	0,816	1,471	4,225	9,76	8,451. 10 ³	4,65
1,5 MeV	1,174	1,833	5,058	12,157	10,434. 10 ³	5,72

2 MeV	1,358	2,074	6,187	13,86	12,375. 10 ³	6,66
2,5 MeV	1,443	2,294	6,794	15,75	13,860. 10 ³	
3 MeV	1,474	2,343	7,372	17,769	15,065. 10 ³	8,15
3,5 MeV	1,506 ^a	2,585	7,965	19,25	16,500. 10 ³	
4 MeV		2,76	8,349	20,382	17,769. 10 ³	9,36
5 MeV		2,851	9,625	23,1	20,382. 10 ³	10,34
10 MeV		2,948 ^a	11,745	30,13	24,750. 10 ³	13,86
20 MeV			12,157 ^a	38,5	33,000. 10 ³	14,14 ^a
30 MeV				40,764	33,640. 10 ³	
40 MeV				43,312	34,650. 10 ³	

- **Olovo**

Olovo je prvek s velkou měrnou hustotou (11 340 kg.m⁻³) a protonovým číslem (82). Má tudíž vysokou elektronovou hustotu a je dobrým stínícím materiálem pro záření γ .

Olověné destičky se používají v lékařství jako ochrana před ionizujícím zářením.

Dále se používají například olověné kontejnery na přepravu a skladování zářičů. A pokud je potřebné, aby byla zachována optická viditelnost, může se použít tzv. olovnaté sklo.

- **Vzduch**

Vzduch má velmi nízkou protonovou hustotu.

Polotloušťky pro záření alfa o různých intenzitách jsou v řádech desítky centimetrů, pro beta je v řádech metrů. Polotloušťka pro záření gama o intenzitě 1 MeV se pohybuje okolo 90 m.

- **Voda**

Voda má větší protonovou hustotu než vzduch, proto je také polotloušťka pro záření gama je přibližně 10 cm.

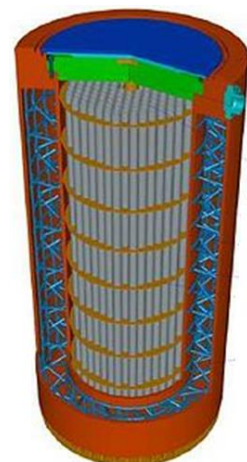
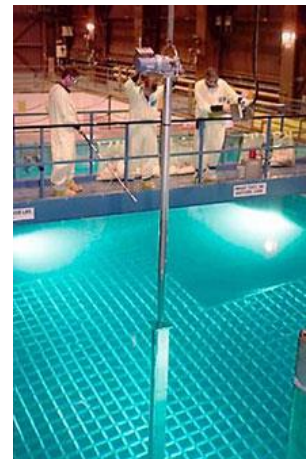
V jaderné energetice se používá při skladování jaderného odpadu při tzv. mokřím způsobu skladování. Vrstva vody o tloušťce nejméně 2,5 m při tomto způsobu skladování plní jak chladicí tak stínící funkci.

Nevýhodou tohoto způsobu je vznik kapalných radioaktivních odpadů.

Mokrý způsob skladování odpadu.

- **Beton**

Beton má přes svou nízkou hustotu velice dobré stínící vlastnosti. Například u záření o energii 1,5 MeV je potřeba olovo o polotloušťce 1,174 cm. Pro stejné záření je potřeba beton s polotloušťkou 5,72 cm. Používá se proto při



stínění záření gama. Na rozdíl od olova a železa také dobře stíní neutronové záření. Beton se používá například při tzv. suchém způsobu skladování radioaktivního materiálu v elektrárnách, jako součást takzvaných CASTOR a CONSTOR kontejnerů, spolu s ocelí a dalšími materiály.



Suchý způsob skladování radioaktivního odpadu

- **Ocel**

Ocel se díky své hustotě, která se zpravidla pohybuje mezi $7,750$ a $8,050 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, využívá, stejně jako olovo, ke stínění záření γ . Spolu s betonem se používá pro výrobu CASTOR a CONSTOR kontejnerů.

- **Hliník**

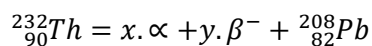
Hliník má mnohem menší hustotu a protonové číslo než olovo. Proto se také využívá pro stínění beta, protože redukuje brzdné záření.

PŘÍKLADY

1. Konečným produktem radioaktivní přeměny ${}_{90}^{232}\text{Th}$ je ${}_{82}^{208}\text{Pb}$. Kolik α a β^- částic se při přeměně uvolní?
[6α , $4 \beta^-$]

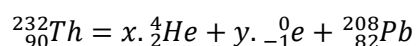
Řešení 1

Sestavíme rovnici, ve které se součet protonových a nukleonových čísel na levé straně rovnice musí rovnat součtu protonových a nukleonových čísel na pravé straně rovnice



α částice jsou jádra helia ${}_{2}^4\text{He}$

β^- jsou elektrony ${}_{-1}^0e$



Porovnáme nukleonová čísla:

$$232 = x \cdot 4 + y \cdot 0 + 208$$

$$x = 6$$

Porovnáme protonová čísla:

$$90 = 6.2 + y \cdot (-1) + 82$$

$$y = 4$$

Uvolní se 6 α a 4 β^- .

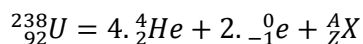
2. Určete složení atomového jádra prvku, který vznikne po čtyřech přeměnách α a dvou přeměnách β^- z ${}_{92}^{238}\text{U}$.
- [${}_{86}^{222}\text{Rn}$]

Řešení 2

α částice jsou jádra helia ${}^4_2\text{He}$

β^- jsou elektrony ${}^0_{-1}\text{e}$

Ze sestavené rovnice určíme nukleonové a protonové číslo. Pak podle protonového čísla určíme z Mendělejevovy tabulky hledaný prvek.



Porovnáme nukleonová čísla:

$$238 = 4 \cdot 4 + 2 \cdot 0 + A$$

$$A = 222$$

Porovnáme protonová čísla:

$$92 = 4 \cdot 2 + 2 \cdot (-1) + Z$$

$$Z = 86$$

Protonové číslo $Z = 86$ odpovídá prvku ${}_{86}^{222}\text{Rn}$.

3. Kolik procent z původního počtu atomových jader zůstane nepřeměněno v daném množství radionuklidu po uplynutí doby pěti, sedmi poločasů přeměny?
[3%, 0,8%]

Řešení 3

a) $t = 5T, x = ?$

K řešení použijeme rozpadový zákon

$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

n je konečný počet jader, n_0 je původní počet jader.

Z původního počtu jader n_0 zůstane část jader $x \cdot n_0$:

$$x \cdot n_0 = n_0 e^{-\lambda t}$$

Rozpadová konstanta souvisí s poločasem rozpadu vztahem

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

$$x \cdot n_0 = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

Po pěti poločasech přeměny je

$$x = e^{-\frac{\ln 2}{T} 5T}$$

$$x = e^{-5 \cdot \ln 2}$$

$$x = 0,031 = 3,1\%$$

b) $t = 7T, x = ?$

Řešíme stejným způsobem.

$$x \cdot n_0 = n_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

$$x = e^{-\frac{\ln 2}{T} 7T}$$

$$x = e^{-7 \cdot \ln 2}$$

$$x = 0,0078 = 0,78\%$$

4. Za jak dlouho se přemění 1 % počátečního množství radionuklidu ^{60}Co o poločasu přeměny 5,2 roků?
[27,5 dní]

Řešení 4

$$x = 99\% = 0,99, T = 5,2 \text{ roků} = 1898 \text{ dní}, t = ?$$

Rozpadne se 1%, zůstane 99%

$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

$$x \cdot n_0 = n_0 e^{-\lambda t}$$

$$x = e^{-\lambda t}$$

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

$$\ln x = -\lambda t \ln e$$

$$\ln x = -\lambda t$$

$$t = \frac{\ln x}{-\lambda}$$

$$t = \frac{\ln x}{\frac{\ln 2}{T}} = \frac{\ln 0,99}{\frac{\ln 2}{1898}} = 27,5 \text{ dní}$$

5. Jaká část původního počtu jader radionuklidu ^{90}Sr zůstane za 10 let? (poločas přeměny je 28 let).
[0,78]

Řešení 5

$$t = 10 \text{ let}, T = 28 \text{ let}, x = ?$$

$$n = n_0 e^{-\lambda t}$$

$$x \cdot n_0 = n_0 e^{-\lambda t}$$

$$x = e^{-\lambda t}$$

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

$$x = e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

$$x = e^{-\frac{\ln 2}{28} 10}$$

$$x = 0,78 = 78\%$$

6. Určete přeměnovou konstantu a poločas přeměny radionuklidu, jestliže za jednu hodinu klesne jeho aktivita o 15 %.
[$4,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 15400 s = 4,277 hodin]

Řešení 6

Aktivita \mathcal{A} klesne o 15 procent, zůstane tedy na hodnotě 85%.

$$x = 85\% = 0,85 \text{ z původní aktivity } \mathcal{A}_0, t = 1 \text{ hodina} = 3600 \text{ s}, \lambda = ?, T = ?$$

Aktivita určuje rychlost poklesu jader. Mění se exponenciálně.

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$
$$x \cdot \mathcal{A}_0 = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

$$x = e^{-\lambda t}$$
$$\ln x = -\lambda t \ln e$$
$$\lambda = -\frac{\ln x}{t} = -\frac{\ln 0,85}{3600} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

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

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$
$$T = \frac{\ln 2}{4,5 \cdot 10^{-5}} = 15400 \text{ s}$$

7. Aktivita radioaktivní látky klesne za dva dny ze 150 MBq na 90 MBq. Jaká bude aktivita látky po dalších osmi dnech?

[11,7 MBq]

Řešení 7

$$\mathcal{A}_0 = 150 \text{ MBq}, \mathcal{A}_1 = 90 \text{ MBq}, t_1 = 2 \text{ dny} = 172800 \text{ s}, t_2 = 8 \text{ dnů} = 691200 \text{ s}, \mathcal{A}_2 = ?$$

Aktivita se mění exponenciálně.

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

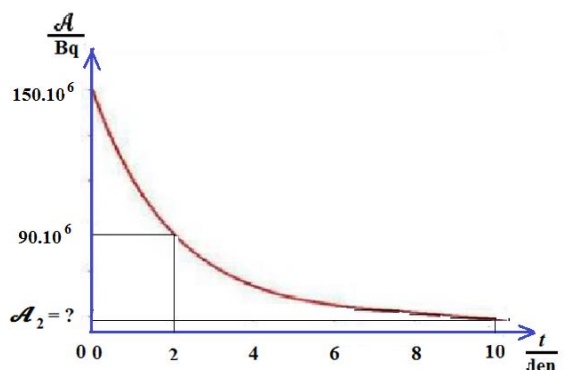
Nejdříve určíme rozpadovou konstantu λ .

$$\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t_1}$$

$$\frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_0} = e^{-\lambda t_1}$$

$$\ln \frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_0} = -\lambda t_1 \ln e$$

$$\lambda = \frac{\ln \frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_0}}{-t_1} = \frac{\ln \frac{90 \cdot 10^6}{150 \cdot 10^6}}{-172800} = 2,956 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$



Z dalších údajů určíme aktivitu po dalších osmi dnech.

Za výchozí aktivitu můžeme použít aktivitu 90 MBq.

$$\mathcal{A}_2 = \mathcal{A}_1 e^{-\lambda t_2}$$

$$\mathcal{A}_2 = 90 \cdot 10^6 \cdot e^{-2,956 \cdot 10^{-6} \cdot 691200}$$

$$\mathcal{A}_2 = 11,66 \cdot 10^6 \text{ Bq}$$

8. Poločas přeměny ${}_{15}^{32}\text{P}$ je 15 dní. Určete hmotnost a aktivitu radionuklidu po 10 dnech je-li počáteční aktivita 100 MBq.
[6,26 kg, 63 MBq]

Řešení 8

$$T = 15 \text{ dní}, t = 10 \text{ dní}, \mathcal{A}_0 = 100 \text{ MBq}, M_m = 0,032 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, m = ?, \mathcal{A} = ?$$

Rozpadová konstanta je

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{1296000} = 5,34 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

Aktivita po 10 dnech je

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

$$\mathcal{A} = 10^8 \cdot e^{-5,34 \cdot 10^{-7} \cdot 864000} = 63,04 \cdot 10^6 \text{ Bq}$$

Počet jader souvisí s hmotností podle vztahu

$$m = \frac{M_m}{N_A} n$$

Kde M_m je molární hmotnost, $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ částic / mol je Avogadrova konstanta.

Aktivita je úměrná počtu jader

$$\mathcal{A} = \lambda n$$

Vyjádříme

$$n = \frac{\mathcal{A}}{\lambda}$$

Pak

$$m = \frac{M_m \mathcal{A}}{N_A \lambda}$$

$$m = \frac{0,032}{6,023 \cdot 10^{23}} \cdot \frac{63,04 \cdot 10^6}{5,34 \cdot 10^{-7}} = 6,27 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

9. Určete hmotnost ${}_{6}^{14}\text{C}$ má-li 3,6 Bq. Poločas přeměny je 5600 roků.
[2,13 · 10⁻¹⁴ kg]

10. Vypočítejte vazebnou energii a vazebnou energii připadající na jeden nukleon jádra ${}_{13}^{27}\text{Al}$.
 Hmotnost protonu je $1,672 \cdot 10^{-27}$ kg, hmotnost neutronu je $1,674 \cdot 10^{-27}$ kg, hmotnostní jednotka má hmotnost $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg, Relativní atomová hmotnost hliníku je 26,9815.
 [$3,6 \cdot 10^{-11}$ J, $0,133 \cdot 10^{-11}$ J]

Řešení 10

$Z = 13$ protonů, $A = 27$ nukleonů, $N = 14$ neutronů, $E_j = ?$, $e_j = ?$

$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ kg, $m_n = 1,674 \cdot 10^{-27}$ kg, $u_j = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg,

Vazebnou energii jádra určíme ze vztahu

$$E = \Delta mc^2$$

Kde Δm je hmotnostní úbytek, $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ je rychlost šíření elektromagnetického vlnění (světla).

Nejdříve je nutné stanovit hmotnostní úbytek Δm .

1. Určíme teoretickou hmotnost m_T

$$m_T = Z \cdot m_p + N \cdot m_n$$

$$m_T = 13 \cdot 1,672 \cdot 10^{-27} + 14 \cdot 1,674 \cdot 10^{-27} = 45,172 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

2. Určíme skutečnou hmotnost

$$m_S = A \cdot u_j$$

$$m_S = 27 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 44,82 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

3. Určíme Δm

$$\Delta m = m_T - m_S$$

$$\Delta m = 45,172 \cdot 10^{-27} - 44,82 \cdot 10^{-27} = 0,352 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

4. Určíme vazebnou energii

$$E = \Delta mc^2 = 0,352 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 3,168 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

5. Určíme vazebnou energii na jeden nucleon

$$e_j = \frac{E}{A} = \frac{3,168 \cdot 10^{-11}}{27} = 0,117 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

11. Určete poločas rozpadu radioaktivní látky, byla-li při měření radioaktivity stanovena střední hodnota 560 impulzů za minutu a při opakovaném měření po šesti hodinách už pouze 400 impulzů za minutu.

[741,45 minut]

Řešení 11

$\mathcal{A}_0 = 560 \text{ min}^{-1}, \mathcal{A} = 400 \text{ min}^{-1}, t = 6 \text{ hod} = 360 \text{ s}, T = ?$

Počet impulzů určuje aktivitu látky

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

Určíme rozpadovou konstantu

$$\frac{\mathcal{A}}{\mathcal{A}_0} = e^{-\lambda t}$$

$$\ln \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{A}_0} = -\lambda t \ln e$$

$$\lambda = \frac{\ln \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{A}_0}}{-t} = \frac{\ln \frac{400}{560}}{-360} = 9,346 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1}$$

Stanovíme poločas rozpadu

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

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{9,346 \cdot 10^{-4}} = 741,45 \text{ min}$$

12. Jakou střední hodnotu impulzů za minutu naměříme po šesti dnech, je-li aktuální naměřená hodnota 500 impulzů za minutu a poločas rozpadu látky je 46 dnů? [456 pulzů za minutu]

Řešení 12

$\mathcal{A}_0 = 500 \text{ impulzů/min}, t = 6 \text{ dny} = 8640 \text{ min}, T = 46 \text{ dny} = 66240 \text{ min}, \mathcal{A} = ?$

Počet impulzů určuje aktivitu látky

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

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

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

$$\mathcal{A} = 500 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{66240} \cdot 8640} = 456,78 \text{ impulzů/min}$$

13. Určete polovrstvu (polotloušťku) materiálu, jestliže při měření s deskou tloušťky 20 mm vytvořené z uvažovaného materiálu byly stanoveny tyto střední hodnoty: na straně přivrácené k zářiči 5000 impulzů za minutu, na odvrácené straně od zářiče 2000 impulzů za minutu.

[15,1 mm]

Řešení 13

$d = 20 \text{ mm}, \mathcal{A}_0 = 5000 \text{ impulzů/min}, \mathcal{A} = 2000 \text{ impulzů/min}, d_p = ?$

Intenzita záření při průchodu materiálem exponenciálně klesá. Naměříme proto menší aktivitu. Pokles bude záviset na tloušťce materiálu.

$$\mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\mu d}$$

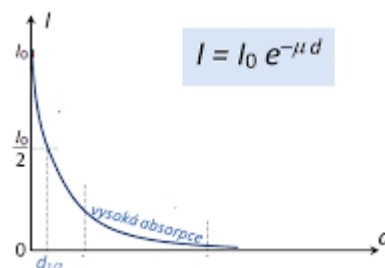
Určíme koeficient pohltivosti μ

$$\mu = \frac{\ln \frac{A}{A_0}}{-d} = \frac{\ln \frac{2000}{5000}}{-0,02} = 45,81 \text{ m}^{-1}$$

Polovrstva je tloušťka materiálu, na které klesne intenzita záření na polovinu, a tím i aktivity.

Ze vztahu mezi koeficientem pohltivosti a tloušťkou polovrstvy d_p .

$$d_p = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{\ln 2}{45,81} = 0,015 \text{ m}$$



14. Kolik impulzů za minutu naměříme za stínícím materiálem o tloušťce 10 mm, je-li jeho polovrstva 20 mm a na straně zářiče je naměřeno 500 impulzů za minutu?
[353,5 pulzů za minutu]

Řešení 14

$$d = 10 \text{ mm}, d_p = 20 \text{ mm}, A_0 = 500 \text{ impulzů/min}, A = ?$$

$$A = A_0 e^{-\mu d}$$

Ze vztahu pro polovrstvu určíme součinitel pohltivosti μ

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

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

Dosadíme

$$A = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{d_p} d}$$

$$A = 500 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{0,02} \cdot 0,01} = 353,57 \text{ impulzů/min}$$

15. Určete hmotnost $^{14}_6\text{C}$ má-li aktivitu 3,6 Bq. Poločas přeměny je 5600 roků.
[2,13 · 10⁻¹⁴ kg]

Řešení 15

$$T = 5600 \text{ roků} = 1,766 \cdot 10^{11} \text{ s}, A_0 = 3,6 \text{ Bq}, M_m = 0,014 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, m = ?$$

Počet jader souvisí s hmotností podle vztahu

$$m = \frac{M_m}{N_A} \cdot n$$

Kde A je relativní atomová hmotnost, $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ částic / mol je Avogadrova konstanta.

Aktivita je úměrná počtu jader

Vyjádříme $\mathcal{A} = \lambda n$

$$n = \frac{\mathcal{A}}{\lambda}$$

Pak

$$m = \frac{M_m}{N_A} \cdot \frac{\mathcal{A}}{\lambda}$$

Vypočteme rozpadovou konstantu

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{1,766 \cdot 10^{11}} = 3,924 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

Dosadíme

$$m = \frac{0,014}{6,023 \cdot 10^{23}} \cdot \frac{3,6}{3,924 \cdot 10^{-12}} = 2,13 \cdot 10^{-14} \text{ kg}$$

Seznam konstant

Název konstanty	Značka	Hodnota konstanty
Tíhové zrychlení	g	9,806 65 m.s ⁻²
Gravitační konstanta	κ	6,67.10 ⁻¹¹ N.m ² .kg ⁻²
Avogadrova konstanta	N _A	6,023.10 ²³ mol ⁻¹
Plynová konstanta	R	8,314 J.K ⁻¹ .mol ⁻¹
Rychlost šíření světla ve vakuu	C	2,998.10 ⁸ m.s ⁻¹
Permitivita vakua	ε _o	8,854.10 ⁻¹² F.m ⁻¹
Permeabilita vakua	μ _o	1,256 H.m ⁻¹
Faradayova konstanta	F	9,649 .10 ⁴ C.mol ⁻¹
Elementární náboj	e	1,602.10 ⁻¹⁹ C
Atomová hmotnostní konstanta	m _u	1,66.10 ⁻²⁷ kg
Klidová hmotnost protonu	m _p	1,674. 10 ⁻²⁷ kg
Klidová hmotnost neutronu	m _o	1,676. 10 ⁻²⁷ kg
Klidová hmotnost elektronu	m _e	9,1.10 ⁻³¹ kg
Planckova konstanta	h	6,625.10 ⁻³⁴ J.s
Boltzmannova konstanta	k	1,38.10 ⁻²³ J.K ⁻¹
Stefan-Boltzmannova konstanta	σ	5,67.10 ⁻⁸ W.m ⁻² .K ⁻⁴
Konstanta Wienova zákona	b	2,898.10 ⁻³ m.K
Rydbergova Konstanta	R _∞	1,097.10 ⁷ m ⁻¹