

4.5. Atomové jádro

4.5.1. Neutron – protonový model jádra



1. Znat složení jádra atomu, hmotnostní jednotku, hmotnosti a náboje částic atomu (protonu, neutronu a elektronu).
2. Umět napsat a vysvětlit rovnice přeměny částic jádra při jaderných dějích.
3. Číst v Mendělejevově tabulce zápisy prvků (jejich protonová a nukleonová čísla).
4. Odlišit nuklid, izotop, radionuklid a radioizotop.
5. Vyjádřit vztah pro vazebnou energii jádra a vztah pro hmotnostní schodek jádra.
6. Definovat vztah pro vazebnou energii jádra připadající na jeden nukleon a znát jeho význam pro uvolňování jaderné energie.
7. Nakreslit přibližný průběh závislosti vazebné energie připadající na 1 nukleon na nukleonovém čísle, a to z hlediska klasifikace na lehká, stabilní a těžká jádra.



Na přelomu 19. a 20. století došlo k několika významným objevům, které daly základ vzniku novým vědním disciplinám z oblasti struktury hmoty, a to především fyzice atomů a fyzice elementárních částic. Rentgen objevil **paprsky X** a inicioval tak rozvoj studia struktury atomů. Becquerel objevil **přirozenou radioaktivitu** uranové rudy. Rutherford rozlišil na základě různé pronikavosti radioaktivního záření **paprsky alfa a beta**. Thomson objevil **elektrony** a zjistil, že jsou částmi atomů. Curieová-Sklodovská a Sklodovský objevili radioaktivní prvky **polonium a radium**, později rovněž uměle izolovali čisté kovové radium z jáchymovského smolince. Všechny tyto poznatky směřovaly k hlubšímu poznání stavby atomu, tj. především k poznání jeho jádra.

Jádro atomu je centrální část atomu o poloměru řádově 10^{-15} m, která v sobě soustřeďuje téměř veškerou hmotnost celého atomu. Jádro je tvořeno protony a neutrony, které nazýváme společným názvem **nukleony**.

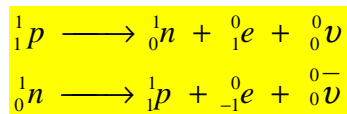
Proton je stabilní částice jádra atomu, má kladný náboj $+e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ stejně velký jako je náboj elektronu, jeho klidová hmotnost je však s hmotností elektronu ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$) řádově nesrovnatelná - je 1836krát větší

$$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{kg.}$$

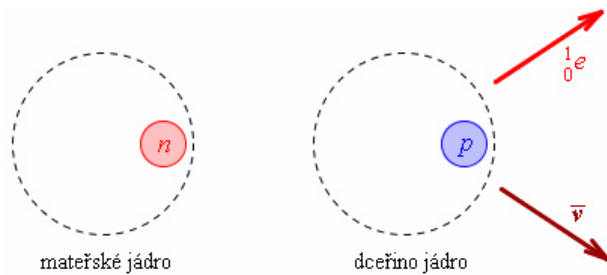
4.5.- 1.

Neutron je nestabilní částice, protože se ve volném stavu přeměňuje na proton, nemá náboj, jeho klidová hmotnost je srovnatelná s hmotností protonu.

Podstata **jaderných dějů** spočívá v dodání energie jádru atomu, kdy se při přeměně protonu na neutron a neutronu na proton generují další částice: pozitron a neutrino, elektron a antineutrino (obr. 4.5.- 1.).



4.5.- 2.

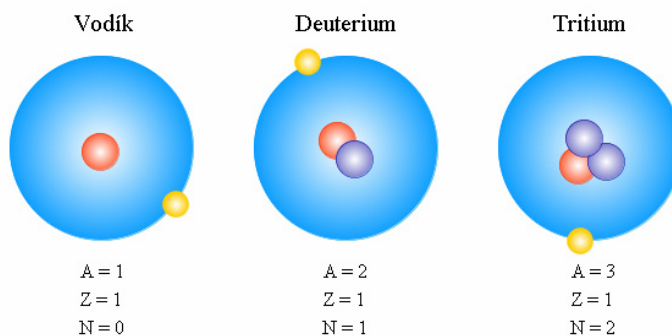


Obr. 4.5.- 1.

V Mendělejevově periodické soustavě prvků najdeme určitý chemický prvek X pod pořadovým číslem, které je současně Z číslem protonovým. A hmotnostní, nukleonové číslo nám podává informaci o počtu nukleonů v jádře (obr. 4.5.- 2.)

$$A = Z + N, \quad 4.5.- 3.$$

kde N je neutronové číslo jako počet neutronů v jádře atomu prvku ${}^A_Z X$. 4.5.- 4.



Obr. 4.5.- 2.

Nuklid je soubor stejných atomů, které mají jednoznačně určen počet protonů a neutronů.

Nuklidy téhož prvku, jejichž atomy mají stejný počet protonů (stejně číslo Z), ale různý počet neutronů (různé číslo nukleonové A) se nazývají **izotopy**.

Radionuklid je **nestabilní nuklid**, podléhající samovolné radioaktivní přeměně. **Radioizotop** je **nestabilní izotop**, podléhající samovolné radioaktivní přeměně.

Abychom mohli měřit, tj. srovnávat hmotnosti různých jader, zavádíme konvencí **atomovou hmotnostní jednotku** jako jednotku hmotnosti v rámci jaderné fyziky (jde o $1/12$ atomu nuklidu uhlíku ${}^{12}_6C$)

$$m_u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}. \quad 4.5.- 5.$$

Nukleony jsou vázány v jádře **jadernými silami**, které jsou mnohonásobně větší než odpuzování způsobené kladným nábojem protonů.

Vazebná energie jádra atomu E_J odpovídá práci, kterou musíme vykonat, abychom jádro uměle rozštěpili na volné nukleony. Jde o významnou vnitřní složku energie tělesa. Můžeme ji určit podle Einsteinova vztahu pro energii a **hmotnostní schodek** B definovat jako rozdíl mezi celkovou energií nukleonů a energií experimentálně zjištěné hmotnosti m_J jádra

$$E_J = (Zm_p + Nm_N - m_J) c^2 = Bc^2. \quad 4.5.- 6.$$

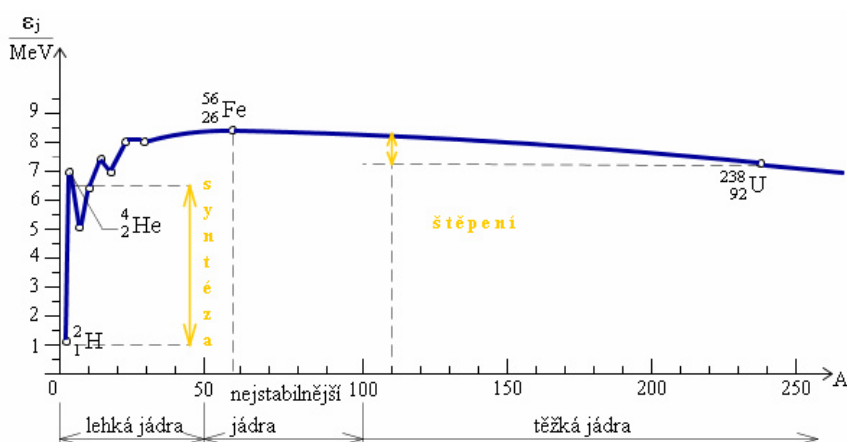
Hmotnostní schodky jader jsou tabelovány, nicméně v průměru lze konstatovat, že dosahují pouze 1% hmotnosti jádra.

Vazebná energie jader různých nuklidů se liší, protože se liší jejich hmotnosti. Pro potřebu porovnávání se proto definuje poměrná veličina **vazebná energie připadající na 1 nukleon**.

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

4.5.- 7.

Na obr. 4.5.- 3. vidíme závislost vazebné energie připadající na 1 nukleon ε_j na nukleonovém čísle A . **Nejstabilnější prvky** jsou prvky s největší hodnotou ε_j , jde o prvky střední části Mendělejevovy periodické soustavy prvků. U těchto jader se pohybuje ε_j v intervalu od 8MeV do 9MeV. Pro menší hodnoty nukleonových čísel ε_j nabývá menších a oscilujících hodnot (maxima náležejí prvkům se sudým počtem protonů a minima náležejí prvkům s lichým počtem protonů); pro vyšší hodnoty nukleonových čísel se hodnota ε_j pozvolna zmenšuje.



Obr. 4.5.- 3.

Právě rozdíly v hodnotách ε_j **nestabilních prvků** v jádře umožňují uvolňování jaderné energie. Jde o jaderné reakce **štěpení jader** a **syntézy jader** (viz kapitola 4.5.2.). Na obr. 4.5.- 3. vidíme interval vazebných energií připadajících na 1 nukleon cca 1MeV až 7MeV vhodný pro syntézu a interval cca 7MeV až 8MeV vhodný pro štěpení. Jinými slovy: **lehká jádra** mají tendenci k syntéze a **těžká jádra** ke štěpení.



KO 4.5.- 1. Srovnajte rozměry jádra a elektronového obalu.

KO 4.5.-2. Srovnajte proton a neutron z hlediska stability, elektrického náboje a hmotnosti.

KO 4.5.- 3. Proč se při přeměně protonu na neutron generuje právě pozitron?

KO 4.5.- 4. Proč se při přeměně neutronu na proton generuje právě elektron?

KO 4.5.- 5. Odlište částice neutrino a antineutrino v jaderných dějích.

KO 4.5.-6. Odlište vodík, deuterium a tritium podle nukleonového, protonového a neutronového čísla.

KO 4.5.-7. Které z částic (protony, neutrony, nukleony) jsou vázány v jádře jadernými silami?

KO 4.5.-8. Vysvětlete, proč existuje deficit mezi celkovou hmotností nukleonů a experimentálně zjištěnou hmotností jádra.

KO 4.5.-9. Objasněte, proč je třeba v jaderné fyzice definovat vazebnou energii jádra na 1 nukleon.

KO 4.5.-10. Která jádra prvků Mendělejevovy periodické soustavy jsou tzv. nejstabilnější a proč?

KO 4.5.-11. Proč mají lehká jádra tendenci k syntéze?

KO 4.5.- 12. Proč mají těžká jádra tendenci ke štěpení?



Vypočítejte vazebnou energii izotopu ${}_{92}^{235}\text{U}$. Podle MFCh tabulek je hmotnost jádra m_j tohoto izotopu určitým násobkem hmotnostní jednotky $m_j = 235,043925m_u$.

Provedeme zápis zkráceného zadání úlohy a označíme hmotnost protonu $m_Z = 1,007825m_u$; hmotnost neutronu $m_N = 1,008665m_u$

${}_{92}^{235}\text{U}$; $Z = 92$; $A = 235$; $m_j = 235,043925m_u$; $m_u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$E = ?$

Podle kvantové teorie určíme vazebnou energii jádra

$$E = Bc^2$$

a tzv. hmotnostní schodek

$$B = Zm_Z + (A - Z)m_N - m_j.$$

Po dosazení do obecného výsledku vypočítáme hodnotu energie hmotnostního schodku numericky

$$E = Bc^2 = (Zm_Z + (A - Z)m_N - m_j)c^2 \Rightarrow E = 2,8611295 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 1800 \text{ MeV}.$$



U 4.5.- 1. Určete, kolik protonů a neutronů obsahuje jádro atomu fosforu ${}_{15}^{31}\text{P}$. Kolik elektronů obsahuje neutrální atom a jak jsou rozděleny na jednotlivé slupky?



Určete velikost hmotnostní jednotky a energii jí odpovídající pomocí vztahu pro energii podle Einsteina.

Hmotnostní jednotka m_u je definována jako 1/12 hmotnosti atomu izotopu uhlíku ${}_{6}^{12}\text{C}$. 1 kilomol atomu izotopu uhlíku má hmotnost 12kg (1 mol 12g). Kilomol jakéhokoliv prvku obsahuje Avogadrovo číslo atomů: $N_A = 6,023 \cdot 10^{26}$ atomů.

Můžeme tedy vypočítat hmotnost jednoho atomu $m = \frac{0,012}{6,023 \cdot 10^{23}} = 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$.

Hmotnostní jednotka potom bude mít hodnotu $m_u = \frac{m}{12} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. V podstatě jde o „metr“, kterým konvenčně měříme = porovnáváme hmotnosti všech atomů (jako násobky hmotnostní jednotky).

Podle Einsteinova vztahu pro výpočet energie platí pro energii hmotnostního schodku obecně a numericky

$$E = m_u c^2 \Rightarrow E = 900 \text{ MeV}.$$

Poznámka: Pokud energii chceme uvádět nikoliv v joulech, ale v MeV, musíme brát v úvahu převodní vztah: $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$. Rychlost světla ve vakuu je pro nás rovněž známá konstanta $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



U 4.5.- 2. Jak velkou silou F_e se přitahují náboj protonu a elektronu ($e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) v atomu vodíku, je-li jejich vzdálenost $r = 10^{-10} \text{ m}$? Porovnejte tuto sílu se silou gravitační F_g , je-li hmotnost protonu $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, hmotnost elektronu $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ a gravitační Cavendishova konstanta $\kappa = 6,68 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.



Hmotnost jádra kyslíku ${}^{16}_8\text{O}$ je $15,99491 m_u$. Vypočítejte vazebnou energii, která připadá na jeden nukleon.

Nejdříve si napíšeme zkrácené, matematizované zadání úlohy

$${}^{16}_8\text{O}; A = 16; Z = 8; m_j = 15,99491 m_u; m_u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\varepsilon_j = ?$$

Dále vyjádříme obecně vazebnou energii jádra

$$E = Bc^2 = (Zm_Z + (A - Z)m_N - m_j) \cdot c^2$$

a rovněž obecně vazebnou energii jádra připadající na 1 nukleon

$$\varepsilon_j = \frac{E}{A}.$$

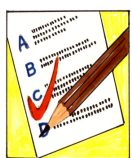
Dále vyhodnocujeme co nejpřesněji vazebnou energii jádra a vazebnou energii jádra připadající na 1 nukleon numericky (v elektronvoltech)

$$E = 2,0605248 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 1,287828 \cdot 10^8 \text{ eV};$$

$$\varepsilon_j = \frac{7,9 \cdot 10^6 \text{ eV}}{1 \text{ nukleon}}.$$



U 4.5.- 3. Hmotnost protonů urychlených v synchrotrónu se zvětšila 32krát. Jakou energii získaly protony, je-li jejich klidová hmotnost $m_0 = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.



TO 4.5.- 1. Energie slunečního záření vzniká v důsledku

a) přechodu elektronů z vyšších slupek do nižších slupek atomů prvků, které se nacházejí na

Slunci;

b) spalování uhlovodíků;

c) štěpení jader atomů uranu;

d) jaderné syntézy, při níž z vodíku vzniká hélium.

TO 4.5.- 2. Označme m_p a m_n klidové hmotnosti protonu a neutronu. Vyjádřete součet hmotností všech protonů a neutronů obsažených v jádře izotopu A_ZX .

- a) $Z m_p + A m_n$;
- b) $A(m_p + m_n)$;
- c) $Zm_p + (A - Z)m_n$;
- d) $Zm_n + (A - Z)m_p$.

TO 4.5.- 3. Označme algebraický součet hmotností všech protonů a neutronů obsažených v jádře o hmotnosti m . Je-li m_j hmotnost jádra, potom je lze srovnat a tvrdit, že

- a) $m > m_j$;
- b) $m < m_j$;
- c) $m > m_j$ nebo $m < m_j$ podle druhu izotopu.

TO 4.5.- 4. Je-li hmotnostní schodek jádra B (kg), je vazebná energie tohoto jádra

- a) Bc^2 (J);
- b) Bc^2 (eV);
- c) B/c^2 (J);
- d) B/c^2 (eV).

TO 4.5.- 5. Vazebná energie jádra je

- a) celková energie tohoto jádra;
- b) celková energie všech jeho nukleonů po uvolnění z jádra;
- c) energie potřebná k rozložení jádra, tj. k uvolnění nukleonů vázaných v jádře;
- d) definována variantami a), b), c), které jsou všechny správné.

TO 4.5.- 6. Označíme E celkovou energii jádra; E_n celkovou energii všech jeho nukleonů po uvolnění z jádra; E_b energii potřebnou k uvolnění nukleonů vázaných v jádře. Mezi energiemi E , E_n , E_b platí vztah

- a) $E = E_n + E_b$;
- b) $E - E_n = E_b$;
- c) $E + E_n = E_b$;
- d) $E_n - E = E_b$.

TO 4.5.- 7. Uvažujeme Avogadrovu konstantu $N_A = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ kmol}^{-1}$. Hmotnost jednoho atomu vodíku ${}^6_{12}\text{C}$ je přibližně rovna

- a) $6 \cdot 10^{-26} \text{ g}$;
- b) $12 \cdot 10^{-26} \text{ g}$;
- c) $2 \cdot 10^{-26} \text{ g}$;
- d) $2 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$.

TO 4.5.- 8. Poměr hmotností molekul těžké vody a normální vody je přibližně roven

- a) 1;
- b) 11/9;
- c) 17/9;
- d) 10/9.

TO 4.5.- 9. Vazebná energie připadající na jeden nukleon je

- a) největší pro jádra prvků z počátku periodické soustavy;
- b) největší pro jádra prvků ze střední části periodické soustavy;
- c) největší pro jádra prvků z konce periodické soustavy;
- d) stejná pro všechny prvky.

TO 4.5.- 10. O hmotnosti jádra atomu hélia lze konstatovat, že

- a) je větší než součet hmotností 2 protonů a 2 neutronů;
- b) je menší než součet hmotností 2 protonů a 2 neutronů;
- c) je rovna součtu hmotností 2 protonů a 2 neutronů;
- d) je menší než součet hmotností 1 protonu a 1 neutronu.

TO 4.5.- 11. Hmotnost atomového jádra

- a) je vždy větší než součet hmotností částic, z nichž se jádro skládá;
- b) je vždy menší než součet hmotností částic, z nichž se jádro skládá;
- c) je přesně rovna součtu hmotností částic, z nichž se jádro skládá;
- d) pro lehká jádra je menší, ale pro těžká jádra větší než součet hmotností částic, z nichž se jádro skládá.

TO 4.5.- 12. Který jev nastává v důsledku jaderných přeměn?

- a) rentgenové záření;
- b) termoemise;
- c) ionizace;

d) žádný z uvedených jevů.

TO 4.5.- 13. „Jaderné“ záření je

- a) záření β nebo rentgenové záření charakteristického spektra;
- b) záření α , β nebo rentgenové záření spojitého spektra;
- c) záření α , β , γ ;
- d) jenom záření α nebo γ .

TO 4.5.- 14. Atomové jádro těžkého prvku v klidu se samovolně rozpadá na 3 nestejně fragmenty. O těchto fragmentech lze s jistotou tvrdit, že

- a) jejich hybnosti mají stejné absolutní hodnoty;
- b) hybnost jednoho z nich bude rovna nule a hybnosti zbylých budou vzájemně opačné vektory;
- c) jejich kinetické energie budou stejné;
- d) jejich vektory rychlostí budou ležet v jedné rovině.

TO 4.5.- 15. Zářením „beta“ nazýváme

- a) elektrony emitované ze zahřátého kovu;
- b) elektrony vyrážené z elektronového obalu atomu světelnými kvanty;
- c) elektrony emitované z obalu atomu;
- d) elektrony emitované jádrem atomu.

4.5.2. Transmutace prvků a jaderná energie



1. Vyjmenovat základní elementární částice a jejich vlastnosti.
2. Popsat základní typy interakcí mezi částicemi.
3. Znat vlastnosti silných interakcí (s ohledem na přitažlivost, dosah a nasycenost).
4. Vysvětlit na základě zákona zachování energie symbolický zápis transmutací prvků za uvolnění jaderné energie.
5. Uvést některý z příkladů historicky prvních transmutací.
6. Odlišit štěpení jader v důsledku ostřelování částicemi a štěpení jader v důsledku ostřelování jinými jádry.
7. Objasnit podstatu neřízené řetězové jaderné reakce.
8. Vysvětlit princip uměle řízené stacionární řetězové reakce v jaderném reaktoru.
9. Porovnat princip dějů termionukleární syntézy a štěpení jader.
10. Odlišit tepelné reaktory současnosti a rychlé reaktory budoucnosti.



Elementární částice jsou takové materiální objekty, které se při srážkách s jinými částicemi nerozpadají. Studium jejich vlastností se od 30. let 20. století zabývá samostatný vědní obor fyzika elementárních částic (dnes klasifikujeme až na cca 350 různých elementárních částic).

5 základních elementárních částic (proton, neutron, elektron, foton, neutrino) jsou nositeli

4 základních typů interakcí mezi částicemi (vzájemného silového působení). Rozdíly mezi interakcemi charakterizuje především jejich dosah, tj. vzdálenost, na kterou působí. Jde o interakci

- gravitační,
- elektromagnetickou,
- slabou,
- silnou.

Gravitační interakci popisuje teorie gravitačního pole: částice gravitačního pole nazýváme gravitony;

elektromagnetickou interakci popisuje teorie elektromagnetického pole: částice elektromagnetického pole známe jako fotony;

slabou interakci popisuje kvantová teorie elektromagnetického pole, a to jako interakci 4 základních částic (p , n , e , ν) za výměny fotonů.

Vysoké hodnoty vazebné energie nukleonů dokazují, že jaderné síly jsou i kvalitativně jiného druhu, než jsou síly gravitační a elektromagnetické. Jaderné síly jsou projevem silné jaderné reakce.

Silnou (jadernou) interakci vysvětluje teorie atomového jádra, a to jako interakci nukleonů (protonů a neutronů) za výměny pionů (mezonů π).

Silné (jaderné) interakce se vyznačují tím, že

- mají krátký dosah (tj. působí jen na zanedbatelně malé vzdálenosti od nukleonu, řádově jde o hodnoty 10^{-15} m),
- jsou přitažlivé a nezávislé na náboji nukleonu,
- projevují nasycenost (nukleon má schopnost působit jen na omezený počet jiných nukleonů ve svém bezprostředním okolí).

Jaderné reakce jsou **jaderné přeměny - transmutace** v důsledku **interakcí jader X** s různými a částicemi, anebo s jinými a jádry. Při **štěpení jader (jaderném rozpadu)** je tedy jádro X ostřelováno částicí a , přičemž vznikne nuklid Y a uvolní se b částice, a to v souladu se **zákonem zachování energie**. Symbolický zápis reakce není napsán jako „rovnice“, chybí zápis kinetické energie vzniklých produktů Y a b a uvolněné jaderné energie ve formě tepla.



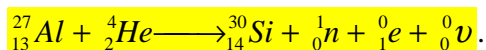
4.4.- 8.

Historicky první **umělou transmutaci** provedl **Rutherford**: ostřeloval dusík částicemi hélia a získal tak izotop kyslíku a vodík



4.4.- 9.

Historicky první umělou transmutaci za vzniku radioaktivního záření objevili **Curieovi**: ostřelovali hliník částicemi hélia a získali nestabilní jádro fosforu, které spontánně transmutovalo v jádro křemíku. Z hlediska radioaktivity můžeme hovořit o beta rozpadu plus, kdy jádro fosforu transmutuje v křemík a vyzářuje přitom pozitron a neutrino



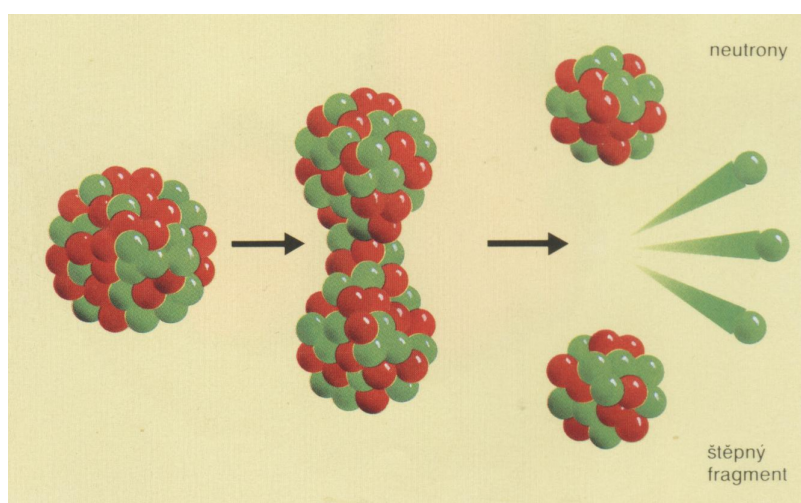
4.4.- 10.

Pokud jsou střelami jádra hélia, případně jádra deuteria, anebo neutrony, jde většinou o historicky významné jaderné experimenty.

Z hlediska praktického významu jaderných energií rozlišujeme **uvolněné jaderné energie**

- **nízké** (řádově keV) v důsledku ostřelování neutrony,
- **střední** (řádově MeV) v důsledku ostřelování fotony a elektricky nabitými částicemi,
- **vysoké** (řádově GeV), vznikající při rozpadu jádra na jeho nukleony.

Samovolné štěpení jader je forma radioaktivity, při níž se těžké jádro rozpadá na dva nebo tři štěpné fragmenty. Při tomto ději vylétá jeden nebo více neutronů (obr. 4.5.- 4.).



Obr. 4.5.- 4.

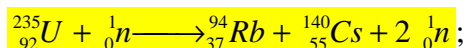
Historicky první jaderné reakce ostřelování neutrony provedl **Fermi**, když tzv. **pomalými (tepelnými) neutrony** ostřeloval jádra uranu.

Na obr. 4.5.- 5. vidíme schéma **mechanismu štěpení uranu** jako příklad **řetězové štěpné reakce**, a to při ostřelování jinými částicemi (neutrony). Neutrony jsou částice bez náboje, proto nejsou jádra odpuzovány a jaderná reakce se může realizovat již při relativně malých energiích neutronu.

Jediným přírodním prvkem, který se dá snadno štěpit, je právě uran. Přírodní uran je složen ze dvou atomů: U235 (asi z 1%) a U238 (asi z 99%). Oba izotopy mají stejný počet protonů a elektronů a stejné chemické vlastnosti. Atom U238 má však o 3 neutrony víc než atom U235, takže má i jiné fyzikální vlastnosti. Pravděpodobnost, že letící neutron způsobí štěpnou reakci, je mnohem vyšší u U235 než u U238. Přírodní uran se proto obohacuje o atomy U235.

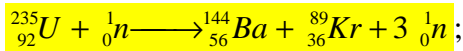
Uran se po srážce s neutronem rozpadá na

- rubidium a cesium, a to za vzniku dvou neutronů, které ostřelují další jádra uranu



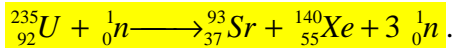
4.5.- 11.

- baryum a krypton, a to za vzniku tří neutronů, které ostřelují další jádra uranu



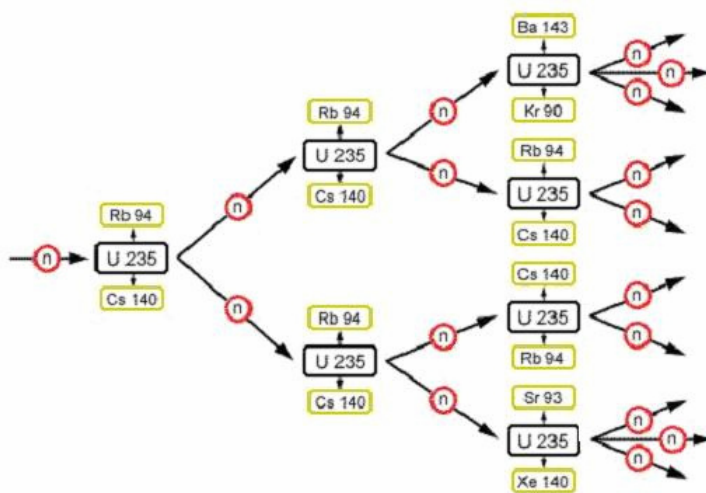
4.5.- 12.

- stroncium a xenon, a to za vzniku tří neutronů, které ostřelují další jádra uranu



4.5.- 13.

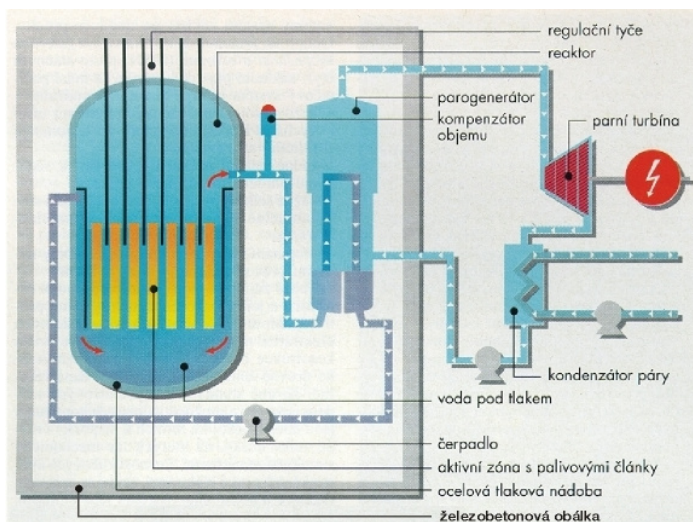
Vznikající neutrony mohou vyvolat štěpení dalších jader a při lavinovitém růstu počtu rozštěpených jader **explozivní** řetězovou jadernou reakcí. **Rychlost**, s jakou se jaderná reakce rozebíhá, závisí na tom, kolik uvolněných neutronů najde uranové jádro dříve, než jsou pohlceny někde jinde, nebo než odletí. Reakce se tedy dá řídit různým „nahuštěním“ a vhodným uspořádáním uranu, nejen vkládáním materiálů, které neutrony pohlcují.



Obr. 4.5.- 5.

Vzniklá jádra jsou nestabilní a dále se rozpadají. Vzniklé neutrony ostřelují další jádra a reakce lavinovitě roste. Asi 80% **jaderné energie** připadá na kinetickou energii excitovaných jader a neutronů, zbývajících 20% energie se uvolňuje jako teplo. Obrovskou uvolněnou energii lze využít pouze při **zpomalení** lavinového procesu. Optimální proces jaderné přeměny je charakterizován určitým **k středním počtem účinných neutronů**, připadajících na každé rozštěpené jádro. Jestliže je k vyšší, reakce probíhá jako ničivá exploze, je-li počet k nižší, reakce je neúčinná a zastavuje se. Při **stacionární řetězové reakci** je počet štěpení za

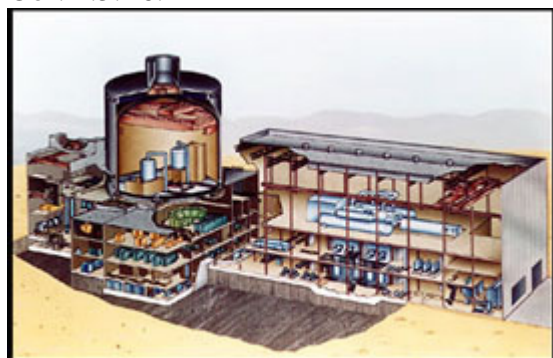
1 sekundu konstantní ($k = 1$). Jde o uměle řízený proces, realizovaný v **jaderném reaktoru**.



Na obr. 4.5.- 6. vidíme schéma jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem a na obr. 4.5.- 7. jadernou elektrárnu průřezově v reálu. V aktivní zóně s **palivovými články** ze štěpného materiálu (nejčastěji uranu) jsou zasunovány a vysunovány (podle potřeby nastavení rychlosti jaderné reakce) **regulační tyče**.

Moderátorem ke zpomalení jaderné reakce je obecně látka obsahující lehká jádra – např. voda a grafit, silně absorbuje neutrony zejména bór a kadmium.

Obr. 4.5.- 6.



Westinghouse AP600 Reactor Design

Obr. 4.5.- 7.

Vznikající obrovské teplo je třeba umenšovat a odvádět chlazením, a to pomocí oběhu **chladiwa** (např. vody) pod tlakem (buzeným čerpadlem). Chladivo proudí kanály, které jsou opět obklopeny moderátorem. V případě energetických reaktorů chladivo obíhá v tzv. primárním okruhu a ve výměnících předává teplo vodě v sekundárním oběhu. Tak vzniká pára, kterou jsou užitečně poháněny turbíny turbogenerátorů (parní turbíny).

Aktivní zóna musí být oddělena od vnějšího prostředí, a to prostřednictvím **ochranné ocelové tlakové nádoby** v **železobetonové obálce**. Železobeton má rovněž funkci moderátoru, tj. slouží k zachycení neutronů a k absorpci záření gama.



S budování jaderných elektráren (obr. 4.5.- 8. a obr. 4.5.- 9.) úzce souvisí nejen získání obrovských energií, ale též potřeba ochrany životního prostředí a bezpečnosti obyvatel.

Ve světě je rozšířeno několik základních typů reaktorů. Nejrozšířenější jsou **reaktory tlakovodní** (PWR), a to i u nás. Chladící voda je v nich pod vysokým tlakem, takže se při průchodu reaktorem nevaří.

Obr. 4.5.- 8.

Dále jsou dosti užívané **reaktory varné** (BWR), případně různé druhy **grafitových reaktorů** chlazených plynem, anebo těžkou vodou. Všechny tyto typy nesou společný název **tepelné reaktory**, protože se v nich ke štěpení používají zpomalené tepelné neutrony. Jejich nevýhodou je, že se v nich štěpí pouze U235, takže je využita jen malá část z celkového množství spáleného přírodního uranu.



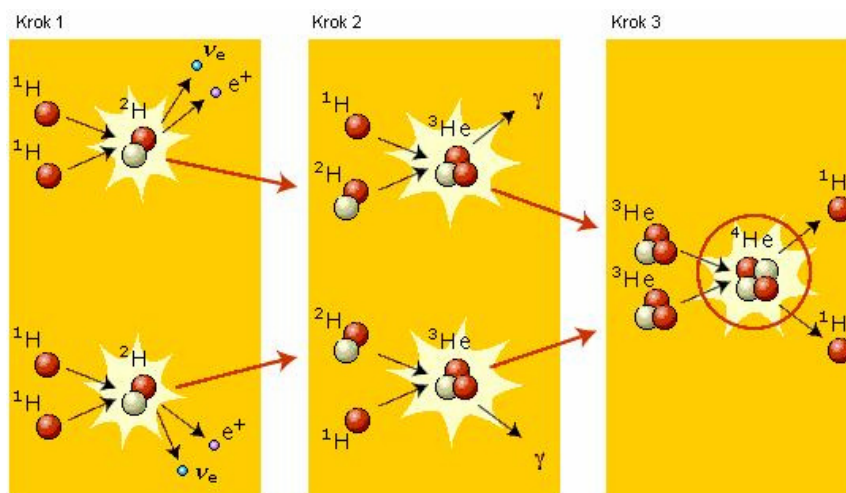
Do budoucna se počítá s tím, že tepelné reaktory nahradí účinnější tzv. **rychlé reaktory**, kde se nepoužívá již žádný moderátor a štěpení způsobují rychle letící neutrony. Pohlcením neutronů jádrem U238 totiž vzniká nový prvek –

plutonium (Pu239) jako vedlejší produkt činnosti tepelných reaktorů. Plutonium je však možné použít opět jako jaderné palivo, dokonce s vyšší skrytou energií než má U235.

Obr. 4.5.- 9.

Plutonium je možné z vyhořelého paliva oddělit a poté z něj vyrobit palivové tyče do rychlého reaktoru. Aktivní zóna rychlého reaktoru s plutoniovým palivem se obklopí články z uranu U238, ve kterých vzniká během provozu další plutonium. Po skončení jaderného spalování je tak paradoxně možné získat více paliva, než jsme na začátku procesu do reaktoru vložili.

Jaderná termonukleární syntéza je typ jaderné reakce, při níž se **skládají lehká jádra v jádro těžší** (obr.4.5.- 10.). Dva atomy vodíku ${}^1_1\text{H}$ se slučují (v kroku č.1) v deuterium ${}^2_1\text{H}$, a to za vzniku pozitronu e^+ a neutrina ν_e , deuterium ${}^2_1\text{H}$ se slučuje (v kroku č.2) s vodíkem ${}^1_1\text{H}$ v izotop helia ${}^3_2\text{He}$ za vzniku gama záření γ . Dva izotopy helia ${}^3_2\text{He}$ se slučují v alfa částici ${}^4_2\text{He}$, a to za vzniku jader vodíku ${}^1_1\text{H}$.



Obr. 4.5.- 10.

Nejčastěji jde v případě termonukleárních reakcí o reakci mezi dvěma izotopy těžkého vodíku – deuterii a tritiem. Jejich spojením vznikne opět hélium a neutron, přičemž se uvolní obrovská energie. Výhodou je, že zásoby deuteria jsou prakticky neomezené a tritium lze získat z jiného lehkého prvku – lithia, který se v přírodě rovněž bohatě vyskytuje.



Aby se jádra mohla přiblížit na dosah jaderných vazeb, je třeba jim dodat energii o velikosti řádově v MeV, čehož lze dosáhnout **zahřátím plazmatu** na teplotu **vyšší než 10^6K** . Náročný ohřev je při jaderné syntéze kompenzován tím, že se uvolňuje obrovská energie, a to energie řádově milionkrát větší, než bývá energie uvolňovaná při běžných chemických reakcích. Do budoucna se uvažuje o řízených termonukleárních reakcích, ale jejich realizace je dosud ve fázi

výzkumné geneze.

Termonukleární syntéza byla mnohokrát uskutečněna uměle krátkodobě při výbuchu termojaderné bomby a děje se běžně v přírodě při vývoji života hvězd, včetně našeho Slunce. Na obr. 4.5.- 11. si připomínáme výbuch **vodíkové bomby** jako typickou ukázkou neřízené a destruktivní termonukleární reakce.



KO 4.5.- 13. Vyjmenujte 5 základních elementárních částic a určete, které z nich jsou částicemi látky a které z nich jsou částicemi pole.

KO 4.5.- 14. Vyjmenujte 4 základní typy interakcí a určete, mezi kterými elementárními částicemi k nim dochází.

KO 4.5.- 15. Jakými specifickými vlastnostmi se vyznačují silné jaderné interakce?

KO 4.5.- 16. Napište konkrétní rovnici některé z historicky prvních transmutací a vysvětlete ji obecně jako štěpnou reakci jádra ostřelovaného jádru hélia.

KO 4.5.- 17. Klasifikujte nízké, střední a vysoké energie uvolněné při jaderném rozpadu kvantitativně podle hodnot energie a kvalitativně podle podmínek vzniku.

KO 4.5.- 18. Proč se štěpení uranu může realizovat již při relativně malých energiích neutronu?

KO 4.5.- 19. Které faktory nejvýznamněji ovlivňují rychlost jaderné reakce?

KO 4.5.- 20. Jaká část jaderné energie je vyšší: kinetická energie vzniklých produktů, anebo uvolněná energie?

KO 4.5.- 21. Charakterizujte optimální proces jaderné přeměny pomocí středního počtu účinných neutronů a případy, kdy jaderná přeměna optimálně řízena není.

KO 4.5.- 22. Popište základní části jaderné elektrárny s jaderným reaktorem, prvky aktivní zóny a vnější ochranu.

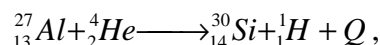
KO 4.5.- 23. Jakou funkci plní tzv. moderátor a z jakých bývá nejčastěji materiálů?

KO 4.5.- 24. Proč můžeme získat v rychlém reaktoru více paliva, než kolik jsme do něj na začátku spalování vložili?

KO 4.5.- 25. Vysvětlete princip termonukleární syntézy a podmínky jejího vzniku.



Vypočítejte, jaké množství energie se uvolní při reakci



jestliže relativní atomová hmotnost izotopu hliníku je $26,9899m_u$; křemíku $29,9832m_u$; hélia $4,003m_u$ a vodíku $1,0081m_u$.

Nejdříve si vyjádříme hmotnosti jader prvků, které se účastní reakce jako násobky hmotnostní jednotky $m_u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg :

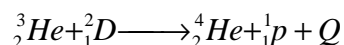
$$m_{\text{Al}} = 26,9899m_u ; \text{ křemíku } m_{\text{Si}} = 29,9832m_u ; \text{ hélia } m_{\text{He}} = 4,003m_u \text{ a vodíku } m_{\text{H}} = 1,0081m_u.$$

Energii Q uvolněnou při reakci vypočítáme podle Einsteinova vztahu jako hmotnostní schodek ΔE , a to obecně i numericky

$$Q = \Delta E = \Delta m \cdot c^2 \Rightarrow \Delta E = ((m_{\text{Al}} + m_{\text{He}})m_u - (m_{\text{Si}} + m_{\text{H}})m_u) \cdot c^2 \Rightarrow Q = 23,9 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 1,5 \text{ MeV}.$$

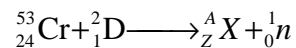
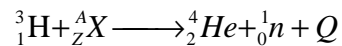
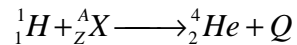


U 4.5.- 4. Vypočítejte energii, která se uvolní při jaderné reakci





U 4.5.- 5. Doplňte zápis jaderných reakcí o jádra prvků A_ZX a velikosti Q uvolněné jaderné energie



Jádro atomu ${}^{235}_{92}\text{U}$ se štěpí na ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ a ${}^{143}_{54}\text{Xe}$. Celková uvolněná energie je 160 MeV. Vypočtete, jakou rychlostí se pohybují oba úlomky jádra za předpokladu, že jejich rychlosti jsou opačně orientovány.

Celková uvolněná jaderná energie bude odpovídat součtu kinetické energie obou úlomků jádra

$$E_C = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2.$$

Velikosti rychlostí pohybu obou úlomků vyjádříme podle zákona zachování hybnosti

$$m_1v_1 = m_2v_2.$$

Úlohu řešíme matematicky jako soustavu dvou rovnic o dvou neznámých. Například řešíme nejprve rychlost prvního úlomku

$$v_1 = \frac{m_2v_2}{m_1},$$

substituueme ji do zákona zachování energie a vyhodnotíme tak rychlost druhého úlomku obecně

$$v_2 = \sqrt{\frac{2E_C m_1}{m_2^2 + m_1 m_2}}$$

a poté i rychlost prvního úlomku obecně prostřednictvím pouze zadaných hodnot

$$v_1 = \frac{m_2}{m_1} \sqrt{\frac{2E_C m_1}{m_2^2 + m_1 m_2}}.$$

Hmotnost 1.úlomku (stroncia) $m_1 = 90.m_u = 149.10^{-27}\text{kg}$;

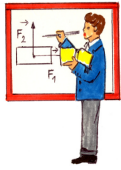
Hmotnost 2.úlomku (xenonu) $m_2 = 143.m_u = 237.10^{-27}\text{kg}$.

Po dosazení hodnot ze zadání do obecného výsledku získáme i výsledky numerické

$$v_2 = 9,1.10^6 \text{ m.s}^{-1}; v_1 = 14,5.10^6 \text{ m.s}^{-1}.$$



U 4.5.- 6. Určete izotop bóru, jehož jádro se při pohlcení protonu rozloží na 3heliony.



Pro řízené uvolňování termionukleární energie má praktický význam reakce typu ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \longrightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{H} + 4\text{MeV}$,

protože deuterium ${}^2_1\text{H}$ (těžký vodík) máme k dispozici ve velkých množstvích. Aby se tato reakce uskutečnila, musí střední kinetická energie deuteria dosáhnout hodnoty 0,14MeV. Vypočtete, na jakou teplotu musí být deuterium zahřáto, jestliže u něj uvažujeme 3 stupně volnosti.

Na 1stupu volnosti připadá kinetická energie

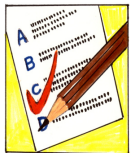
$$E_K = \frac{1}{2} k T,$$

4.5.- 14.

přičemž je (podle MFCh tabulek) Boltzmannova konstanta $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Teplotu deuteria vyjádříme obecně a poté i numericky

$$T = \frac{2E_K}{k} \cdot \frac{1}{3} \Rightarrow T = \frac{2 \cdot 0,14 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} = 1,1 \cdot 10^9 \text{ K}.$$



TO 4.5.- 16. 5-ti základními elementárními částicemi jsou

- a) proton, neutron, elektron, foton, neutrino;
- b) proton, neutron, elektron, foton, graviton;
- c) proton, neutron, elektron, foton, mezon;

d) nukleon, elektron, pozitron, foton, neutrino.

TO 4.5.- 17. Základní elementární částice

- a) se při srážce s jinými částicemi nerozpadají;
- b) jsou nositeli 4 typů interakcí - vzájemného silového působení;
- c) jsou nejmenšími a nedělitelnými stavebními kameny hmoty;
- d) jsou elementárními částicemi látky.

TO 4.5.- 18. Interakce jako vzájemné silové působení jsou

- a) gravitační, elektrická, magnetická, jaderná;
- b) gravitační, elektrická, magnetická, kvantová;
- c) gravitační, elektromagnetická, silná a slabá;
- d) gravitační, elektromagnetická, fotonová a nukleonová.

TO 4.5.- 19. Slabou interakci vysvětluje kvantová teorie elektromagnetického pole, a to jako interakci

- a) protonu, neutronu, elektronu, neutrina a fotonu;
- b) protonu, neutronu, elektronu, neutrina a pionu;
- c) protonu, neutronu, elektronu, neutrina, a to za výměny fotonů;

d) protonu, neutronu, elektronu, neutrina, a to za výměny pionu.

TO 4.5.- 20. Silnou interakci vysvětluje teorie atomového jádra jako interakci

- a) nukleonů za výměny pionů (mezonů π);
- b) protonů, a to za výměny pionů;
- c) neutronů, a to za výměny pionů;
- d) elektronů, a to za výměny fotonů.

TO 4.5.- 21. Jaderné reakce jsou jaderné přeměny v důsledku

- a) interakcí jader s různými částicemi, anebo s jinými jádry;
- b) interakcí jader s různými částicemi;
- c) interakcí jader s jinými jádry;
- d) interakcí částic.

TO 4.5.- 22. Při štěpení jader vznikne

- a) nuklid a uvolní se částice, které mohou vyvolat štěpení dalších jader až řetězovou reakci;
- b) nukleon a uvolní se částice, které mohou vyvolat štěpení dalších jader až řetězovou reakci;
- c) neutron a uvolní se částice, které mohou vyvolat štěpení dalších jader až řetězovou reakci;
- d) nuklid a uvolní se částice, které vždy nutně vyvolají řetězovou reakci.

TO 4.5.- 23. Z jádra ^{238}U vznikne jadernou přeměnou jádro ^{238}U . Přitom se vyzáří

- a) jedna částice alfa a dva protony;
- b) jedna částice alfa a dva neutrony;
- c) jedna částice alfa a dva elektrony;
- d) jedna částice alfa a dva pozitrony.

TO 4.5.- 24. Při ostřelování izotopu $^{14}_7\text{N}$ neutrony vzniknou protony a izotop

- a) $^{14}_8\text{O}$;
- b) $^{15}_8\text{O}$;
- c) $^{15}_7\text{N}$;
- d) $^{16}_6\text{C}$.

TO 4.5.- 25. Důsledkem ostřelování $^{27}_{13}\text{Al}$ částicemi alfa vznikne radioaktivní izotop $^{30}_{15}\text{P}$ a

- a) pozitron;
- b) proton;
- c) elektron;
- d) neutron.

TO 4.5.- 26. Po pohlcení částice alfa jádrem ${}^9_4\text{Be}$ vznikne izotop ${}^{12}_6\text{C}$ a současně se uvolní

- a) proton;
- b) neutron;
- c) elektron;
- d) pozitron.

TO 4.5.- 27. Jádro radioaktivního izotopu ${}^{30}_{15}\text{P}$ se přemění na ${}^{30}_{14}\text{Si}$ a přitom vyzáří

- a) proton;
- b) pozitron;
- c) elektron;
- d) neutron.

TO 4.5.- 28. V jaderné reakci ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \longrightarrow {}^7_3\text{Li} + x$ symbol x znamená

- a) neutron;
- b) proton;
- c) částici β ;
- d) částici α .

4.5.3. Radioaktivita

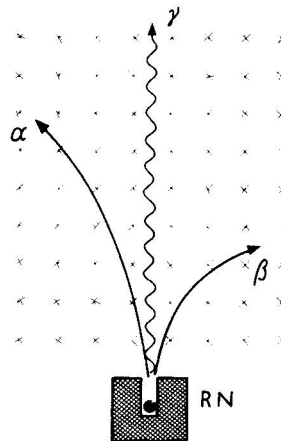


1. Definovat proces přirozené radioaktivity jako transmutaci radioizotopu.
2. Popsat vlastnosti alfa, beta a gama radioaktivního záření.
3. Umět napsat rovnice alfa a beta rozpadů.
4. Nakreslit potenciálovou bariéru a objasnit její význam z hlediska jaderných sil.
5. Vysvětlit podstatu absorpce radioaktivního záření faktory, které ji významně ovlivňují.



Přirozenou radioaktivitu látek můžeme definovat nejjednodušeji jako schopnost atomů samovolně se rozpadat, u některých atomů radioaktivních látek je tato vlastnost velmi intenzivní v čase. Rozpad jader atomů znamená přeměnu na atomy jednodušší, a to za emise elektromagnetického záření nebo částic. Příčinou nestability některých jader atomů je, že mají nadbytek protonů nebo nadbytek neutronů v jádře, případně jsou jádra tak těžká a složitá, že nemohou přirozeně existovat ve stabilním stavu.

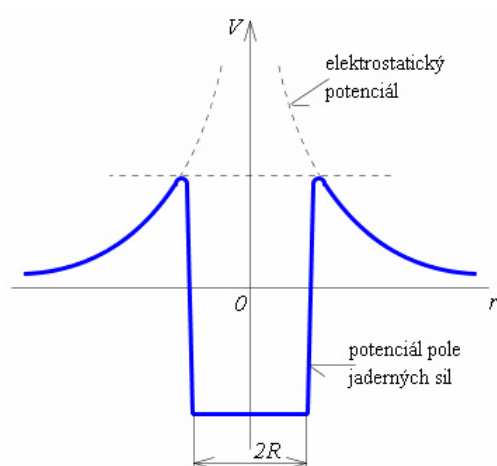
Přirozená radioaktivita je **jaderný děj**, při kterém se radionuklid (nestabilní izotop určitého prvku) přeměňuje na izotop jiného prvku, přičemž se z jádra radionuklidu RN uvolňují tři druhy jaderného, radioaktivního záření: záření



alfa, beta a gama (obr. 4.5.- 12.). Radioaktivní záření nezávisí na změnách teploty, tlaku, anebo chemických změnách radionuklidů. Pro každý radioizotop je charakteristická pouze doba, za kterou vždy poklesne počet jader radioaktivní látky na polovinu původní hodnoty. Poločas rozpadu je u různých radioizotopů velmi odlišný, pohybuje se od vteřiny až po miliardy let.

Záření alfa (α částic ${}^4_2\text{He}$) je emisí dvou protonů a dvou neutronů, v podstatě jádro vysílá proud jader atomu hélia, které nese kladný náboj. Částice tohoto záření vykazují relativně velkou rychlost (jen o řád menší než je rychlost fotonu), a proto i velkou energii. Z tohoto důvodu se záření alfa vyskytuje u těžších atomů.

Jestliže je **rozpad alfa** charakteristický emisí jader atomu hélia, znamená to podle zákona zachování energie vznik nové částice s protonovým číslem $Z - 2$ a nukleonovým číslem $A - 4$.



S alfa zářením úzce souvisí děje v jádře atomu: nukleony jsou pevně vázány uvnitř jádra atomu jadernými silami. Potenciál, který této vazbě odpovídá, vytváří relativně hlubokou **potenciálovou jámu** (obr. 4.5.- 13.). Ve vzdálenosti r větší než poloměr jádra R je potenciální energií W elektrostatická potenciální energie

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r},$$

kde Q_1 je náboj částice alfa a Q_2 je náboj zbytku jádra (viz křivka poklesu elektrostatického potenciálu v nepřímé úměře).

Obr. 4.5.- 13.

Pokud je potenciálová bariéra vysoká, záření alfa nemá tendenci unikat. Např. 50% jader uranu ${}^{238}\text{U}$ pronikne bariérou (tzn. že se radioaktivně rozpadne) za 4,5 miliard roků. Jinými slovy: poločas rozpadu ${}^{238}\text{U}$ je 4,5 miliard roků (věk Země je přibližně stejný). Všechny izotopy s atomovým číslem větším jako 92 mají částice alfa s velkými energiemi, proto mají nižší bariéry a kratší poločas rozpadu. Z tohoto důvodu se tyto izotopy nevyskytují volně v přírodě.

Záření beta (β částic e) je proudem elektronů (emisí záporného či kladného elektronu – pozitronu), které vyletují z jádra atomu, nese tedy záporný náboj. Částice tohoto záření vykazují rychlost blízkou rychlosti světla; mají malou hmotnost, což se na rozdíl od alfa záření projevuje větším zakřivením trajektorie v magnetickém poli.

Rozpad beta mínus je charakteristický emisí elektronů, což znamená vznik nové částice s protonovým číslem $Z+1$ a stejným nukleonovým číslem A .

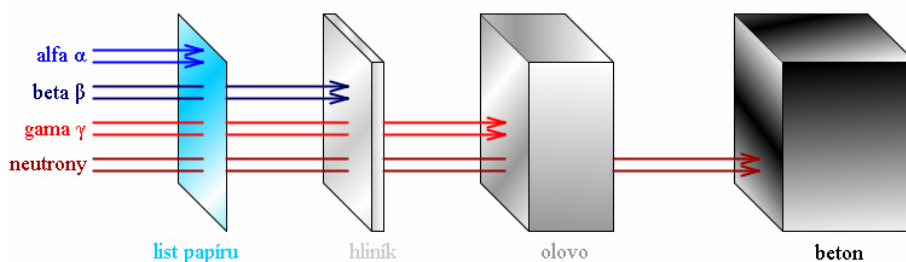


Rozpad beta plus je charakteristický emisí protonů, což znamená vznik nové částice s protonovým číslem $Z - 1$ a stejným nukleonovým číslem A .



Záření gama (γ částic) je **proudem fotonů**, je to tedy elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou, a proto se v magnetickém poli neodchyluje. Pouze provází jaderné děje, mimo ně neexistuje (neexistuje žádný „gama rozpad“). Zářením gama se vyrovnávají energetické rozdíly mezi různými energetickými stavy atomového jádra.

Jaderné přeměny (na úrovni alfa a beta rozpadů) jsou běžnými změnami vnějších podmínek neovlivnitelné, protože jsou k nim zapotřebí extrémně vysoké energie - řádově v MeV. Teplotní a chemické změny by poskytly energie maximálně pouze řádově v elektronvoltech. Izotopy vznikající přirozenou radioaktivní přeměnou popisujeme tzv. přeměnovými řadami, přičemž výchozím radionuklidem bývá uran, thorium, anebo aktinium. Finálním izotopem pak bývá stabilní olovo.



Obr. 4.5. 14.

Na obr. 4.5.- 14. vidíme srovnávací schéma **absorpce** záření alfa, beta, gama a neutronového záření různými **materiály**. Alfa částice proletí několik centimetrů vzduchem, ale zastaví je list papíru, látka, anebo kůže. Beta záření může ve vzduchu urazit i několik metrů, ale pohltí je např. hliníková fólie nebo sklo. Nejpronikavější je záření gama, ale i to lze odstínit např. olovenou deskou. Proud neutronů je velmi pronikavým zářením, musí se stínit betonem.

Pronikavost radioaktivního záření se zmenšuje se druhou mocninou změny **vzdálenosti** (bodového zdroje radioaktivního záření od detektoru, případně ozařované látky).

Dalšími kritérii stanovení rozdílu v absorpci záření jsou za srovnatelných podmínek (stejná vzdálenost pronikající látky od zářiče, stejné materiály o stejných tloušťkách vrstvy) závislost na **protonovém čísle** a **hustotě** stínícího materiálu.

Na základě vlastnosti pronikat různými materiály může být záření **použito** k měření tloušťky materiálů nebo ke zjišťování jejich struktury, ke kontrole jakosti výrobků apod.



KO4.5.-26. Závisí radioaktivní děj na čase, vnějších podmínkách prostředí, na teplotě a chemickém složení radionuklidů?

KO4.5.-27. Proč záření alfa pozorujeme u těžších atomů?

KO4.5.-28. Porovnejte potenciál pole jaderných sil s potenciálem elektrostatickým v relativní blízkosti jádra atomu.

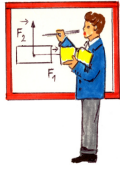
KO4.5.-29. Napište a porovnejte rozpadové děje pro beta plus a beta minus záření.

KO 4.5.-30. Proč záření gama nemůžeme nazvat „gama rozpadem“?

KO 4.5.-31. Porovnejte absorpci a pronikavost při radioaktivních dějích, a to podle druhu záření, podle materiálů ozařovaných (stíněných) látek a podle vzdálenosti zářiče-detektoru (zářiče-látka).

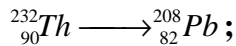


U 4.5.-7. Zapište jadernou reakci, při které dojde ke srážce urychleného protonu s jádrem izotopu lithia ${}^7_3\text{Li}$ a vzniknou 2 jádra hélia.



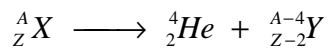
Konečným produktem radioaktivního rozpadu thoria ${}^{232}_{90}\text{Th}$ je olovo ${}^{208}_{82}\text{Pb}$. Kolik α a β částic se při rozpadu uvolní?

Provedeme zkrácený zápis zadání úlohy

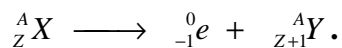


počet přeměn α ? ; počet přeměn β ?

Obecně popíšeme vznik α záření



a vznik β^- záření



Určíme obecně i numericky počet přeměn α :

$$\frac{A_{\text{Th}} - A_{\text{Pb}}}{A_{\text{He}}} = 6$$

a počet přeměn β :

$$Z_{\text{Pb}} - (Z_{\text{Th}} - 6 \cdot Z_{\text{He}}) = 4.$$



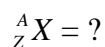
U 4.5.- 8. Zapište důležitou jadernou reakci, při které z jádra dusíku ${}^{14}_7\text{N}$ pohlcením neutronu vzniká radiouhlík ${}^{14}_6\text{C}$, který je používaným indikátorem v botanice a biologii.



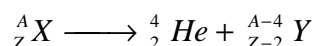
Určete složení jádra izotopu prvku, který vznikne po čtyřech rozpadech α a po dvou rozpadech β , a to z uranu ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Provedeme zápis zkráceného zadání úlohy

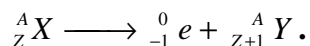
${}^{238}_{92}\text{U}$; 4 rozpady α ; 2 rozpady β



Popíšeme obecně vznik α záření



a vznik β záření

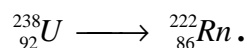


Změnu neutronového čísla a změnu protonového čísla určíme obecně i numericky

$$A_U - 4 \cdot A_{He} = 222$$

$$Z_U - (4 \cdot Z_{He} - 2e) = 86$$

a pomocí Mendělejevovy periodické tabulky prvků usoudíme, že konečným izotopem je radon



U 4.5.- 9. Určitý prvek vzniká z uranu ${}^{238}_{92} U$ vyzářením 5-ti částic alfa a 2 částic beta. Který je to prvek v Mendělejevově periodické soustavě prvků?

TO 4.5.- 29. Záření alfa je

- a) je emisí dvou protonů a dvou neutronů a nese kladný náboj;
- b) je emisí jader atomu hélia a nese kladný náboj;
- c) je emisí atomů hélia a nese záporný náboj;
- d) je emisí atomu hélia a nenese žádný náboj.

TO 4.5.- 30. Záření beta je proudem

- a) pouze elektronů s rychlostí blížíící se rychlosti světla, nese záporný náboj;
- b) pouze pozitronů s rychlostí blížíící se rychlosti světla, nese kladný náboj;
- c) kladných a záporných fotonů o rychlosti světla;
- d) elektronů a pozitronů s rychlostí blížíící se rychlosti světla, nese záporný náboj.

TO 4.5.- 31. Záření gama je proudem

- a) elektronů, nese záporný náboj;
- b) pozitronů, nese kladný náboj;
- c) fotonů, nenese žádný náboj;
- d) neutronů, nenese žádný náboj.

4.5.4. Zákon radioaktivní přeměny



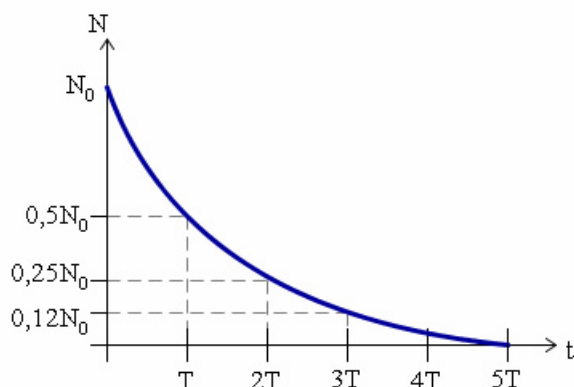
1. Umět matematicky odvodit z elementárního úbytku jader při radioaktivním ději zákon radioaktivní přeměny.
2. Nakreslit graf závislosti počtu jader při radioaktivní přeměně na čase.

- Umět matematicky odvodit závislost mezi rozpadovou konstantou a poločasem přeměny.
- Definovat rychlost radioaktivního rozpadu v závislosti na materiálové rozpadové konstantě zářiče a na poločase rozpadu.
- Definovat rychlost radioaktivního rozpadu v závislosti na materiálovém koeficientu absorpčního záření a na polovrstvě ozařované látky.
- Umět klasifikovat radioaktivní látky na vysoce radioaktivní až radioaktivně stabilní podle poločasu rozpadu a rychlosti rozpadu jader.



Zákon radioaktivní přeměny vyjadřuje, že elementární úbytek jader dN závisí na počátečním počtu jader N_0 , na elementární době dt , za kterou proces jaderného rozpadu proběhne a také na materiálu radionuklidu, který vyjadřujeme **rozpadovou (přeměnovou) konstantou** λ (viz MFCh tabulky)

$$dN = -\lambda N_0 dt \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N_0} = \int_0^t -\lambda dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t} \quad 4.5.- 18.$$



Vidíme tedy, že při radioaktivním rozpadu počet jader ubývá exponenciálně s časem (obr. 4.5.- 15).

Obr. 4.5.- 15.

Poločas přeměny T je doba, za kterou se rozpadne polovina původního počtu jader N_0 (viz MFCh tabulky, ve kterých se uvádí buď poločasy rozpadu a rozpadové konstanty se dopočítávají, anebo naopak)

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad 4.5.- 19.$$

Poločas rozpadu je charakteristická konstanta pro daný radionuklid určená materiálově. Teoreticky a obecně viděno jsou všechny látky „radioaktivní“, protože prakticky a konkrétně se u známých radionuklidů poločasy radioaktivních přeměn pohybují od zlomků sekundy až po miliardy let, zatímco u některých jiných látek je rozpad tak extrémně dlouhým dějem, že jej neumíme změřit a látku pak považujeme za radioaktivně stabilní.

Jako závislost exponenciálně se zmenšující v čase můžeme rovněž odvodit **rychlost radioaktivního rozpadu**. Radioaktivita každého radionuklidu se s časem exponenciálně snižuje, jinými slovy: radionuklid „vymírá“. Přibližně za dobu 10-ti poločasů, kdy radioaktivita látky klesne na tisícinu (přesně na 1/1024), většina radioaktivních látek vyhasne natolik, že již nejsou zdraví nebezpečné. Výjimkou mohou být jen velké průmyslové zářiče o vysoké aktivitě, u nichž je i po 10-ti poločasech rozpadu zbytková aktivita vysoká.

$$dR = -\lambda R_0 dt \Rightarrow \int_{R_0}^R \frac{dR}{R_0} = \int_0^t -\lambda dt \Rightarrow \ln \frac{R}{R_0} = -\lambda t \Rightarrow R = R_0 e^{-\lambda t} \quad 4.5.- 20.$$

Rychlost rozpadu radioaktivní látky můžeme rovněž vyjádřit pomocí měření **stínění** – absorpce ozařované látky jako

$$R = R_0 e^{-\mu \cdot d}, \quad 4.5.- 21.$$

a to prostřednictvím znalosti **polovrstvy** d (polotloušťky) ozařované látky a **koeficientu absorpčního záření** μ jako materiálové konstanty dané pro konkrétní ozařovanou látku.

Obdobně jako vztah mezi materiálovou konstantou zářiče a poločasem rozpadu odvodíme vzájemný vztah obou koeficientů μ , d (případně viz MFCh tabulky)

$$\frac{R_0}{2} = R_0 e^{-\mu \cdot d} \Rightarrow \mu = \frac{\ln 2}{d}. \quad 4.5.- 22.$$



KO 4.5.- 32. Zapište zákon radioaktivní přeměny jader jako závislost na poločase rozpadu.

KO 4.5.- 33. Porovnejte odvození zákona radioaktivní přeměny pro počet jader a pro rychlost rozpadu.

KO 4.5.- 34. Kdy bude počet aktuálně se rozpadajících jader nulový (viděno teoreticky matematicky a prakticky fyzikálně)?

KO 4.5.- 35. Porovnejte vyjádření rychlosti rozpadu pomocí materiálové konstanty zářiče a pomocí materiálové konstanty ozařované látky.

KO 4.5.- 36. Porovnejte vyjádření poločasu rozpadu na rozpadové konstantě zářiče a polotloušťky ozařované látky na koeficientu absorpčního záření.



Vypočtete, kolik procent určitého počtu jader polonia s poločasem rozpadu 2400s se rozpadne za 300s.

Provedeme zápis zkráceného zadání úlohy

$$T = 2400 \text{ s} ; t = 300 \text{ s}$$

$$x = ? \%$$

Vyjádříme elementární úbytek jader jako závislost na aktuálním počtu jader a na materiálové, tzv. rozpadové konstantě, a to za elementární čas

$$-dN = \lambda N dt.$$

Dále separujeme proměnné a rovnici integrujeme, takže vyjádříme zákon radioaktivní přeměny jako závislost počtu nerozpadlých jader na původním počtu jader a na rozpadové, materiálové konstantě v čase

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

Dosazením poloviny původního počtu jader za aktuální počet jader odvodíme vzájemný vztah rozpadové konstanty a poločasu rozpadu

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda \cdot T} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T}.$$

Úlohu řešíme dále substitucí tohoto vztahu do zákona radioaktivní přeměny a dospějeme k závěru, že

$$N = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}$$

Dosazením zadaných hodnot do exponentu získáme konkrétní vztah mezi počtem nerozpadlých částic a původním počtem jader

$$N = 0,917 N_0$$

K hledanému počtu rozpadlých částic dospějeme elementární úvahou, že původní počet jader je roven součtu nerozpadlých a rozpadlých jader

$$N' = N_0 - N = N_0 - e^{-\frac{\ln 2}{2400} \cdot 300} N_0 = 0,083 N_0$$

Pomocí přímé úměry vyhodnotíme množství jader polonia procentově

$$\begin{array}{l} N_0 \dots\dots\dots 100 \% \\ 0,083 N_0 \dots\dots\dots x \% \Rightarrow x = 8,3 \% \end{array}$$



U 4.5.-10. Určete poločas rozpadu radioaktivní látky, víme-li, že se její hmotnost během 120-ti sekund zmenší rozpadem o 20%.

U 4.5.-11. Za jak dlouho ubude rozpadem 10^{-8} kg dané radioaktivní látky, jejíž původní hmotnost byla $5 \cdot 10^{-8}$ kg. Látka má poločas rozpadu 180s.



Určete poločas rozpadu radioaktivní látky, byla-li při měření radioaktivity stanovena střední hodnota 560impulzů za minutu a při opakovaném měření po 6-ti hodinách pouze 400impulzů za minutu.

Nejdříve si zaznamenáme zkrácený, matematizovaný zápis zadání úlohy a převedeme jednotky do soustavy SI

$$R = 560 \text{imp/min} = 9,3 \text{imp/s} ; R' = 400 \text{imp/min} = 6,6 \text{imp/s} ; t' = 21600 \text{s}$$

$$T = ?$$

Dále můžeme konstatovat, že rychlost rozpadu R v čase t a rychlost rozpadu R' v čase $t+t'$ jsou dány zákonem radioaktivního rozpadu

$$R = R_0 \cdot e^{-\lambda t} \wedge R' = R_0 \cdot e^{-\lambda(t+t')}$$

přičemž R_0 je rychlost na počátku měření a λ je materiálová, rozpadová konstanta zářiče.

Vztah mezi rozpadovou konstantou a poločasem rozpadu lze rovněž odvodit ze zákona radioaktivního rozpadu

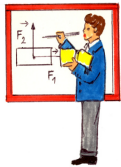
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

Sklopením výše uvedených vztahů můžeme vyhodnotit poločas rozpadu obecně i numericky

$$T = \frac{\ln 2 \cdot t'}{\ln R - \ln R'} \Rightarrow T \cong 12,36 \text{ hod.}$$



U 4.5.- 12. Jakou střední hodnotu impulzů za minutu naměříme po 6-ti dnech, je-li aktuální naměřená hodnota 500impulzů za minutu a poločas rozpadu radioaktivní látky je 46dní?



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

Provedeme zkrácený, matematizovaný zápis zadání úlohy

$$d = 0,02\text{m} ; R_0 = 83,3\text{imp/s} ; R = 33,3\text{imp/s}$$

$$d' = ?$$

Vyjádříme rychlost rozpadu radioaktivní látky

$$R = R_0 e^{-\mu \cdot d}$$

A vzájemný vztah polovrstvy a koeficientu absorpčního záření

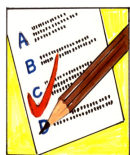
$$\mu = \frac{\ln 2}{d'}$$

Skloubením obou vztahů získáme obecný výsledek a po dosazení hodnot ze zadání výsledek numerický

$$d' = \frac{d \cdot \ln 2}{\ln R - \ln R'} \Rightarrow d' = 0,015\text{mm.}$$



U 4.5.-13. Kolik impulzů za minutu naměříme za stínícím materiálem o tloušťce 10mm, je-li jeho polovrstva 20mm a na straně zářiče je naměřeno 500impulzů za minutu.



TO 4.5.-32. Kolik procent izotopů ${}^3_1\text{H}$ se rozpadne za dobu 24 let, je-li známo, že poločas rozpadu této látky je asi 12let.

- a) asi 25% ;
b) asi 50% ;

- c) asi 75% ;
d) asi 100% .

TO 4.5.- 33. Za dobu 10hodin se rozpadne 75% počátečního počtu jader radioaktivního izotopu. Poločas rozpadu tohoto izotopu je

- a) 7,5hod;
- b) 6,6hod;
- c) 2,5hod;
- d) 5hod.

TO 4.5.- 34. Poločas rozpadu radioaktivního izotopu, který emituje při rozpadu každého jádra částici, je T . V počátečním okamžiku obsahuje látka N_0 jader (viz obr. 4.5.- 15.) .Kolik částic emitovala látka za dobu $3T$?

- a) $\frac{N_0}{8}$;
- b) $\frac{7N_0}{8}$;
- c) $\frac{N_0}{9}$;
- d) $\frac{8N_0}{9}$.

TO 4.5.- 35. Poločas rozpadu radioaktivního izotopu, který emituje při rozpadu každého jádra částici, je T . V počátečním okamžiku obsahuje látka N_0 jader (viz obr. 4.5.- 15.). Za dobu $4T$

- a) zůstane 6,25% původních jader;
- b) přemění se 6,25% jader;
- c) zůstane 25% původních jader;
- d) přemění se 25% jader.

4.5.5. Detekce a dozimetrie jaderného záření



1. Stanovit ionizaci a excitaci atomů látky prostředí jako primární účinky radioaktivního záření, a to za účelem detekce a dozimetrie radioaktivního záření.
2. Určit druhy a vlastnosti ionizujícího záření.
3. Definovat aktivitu zářiče a jednotku, ve které se měří.
4. Definovat absorbovanou dávku a jednotku, ve které se měří.
5. Definovat dávkový ekvivalent a jednotky, ve kterých se měří.
6. Definovat ozáření a jednotku, ve které se měří.
7. Vysvětlit obecně funkci plynových detektorů a jeho nejznámějšího typu – Geiger Müllerova počítače.
8. Vyjmenovat a stručně popsat i jiné dozimetrické metody.
9. Znat princip a cíl jaderné spektrometrie.



Ionizující záření je záření, které vysílají radioaktivní látky, rentgenové záření, záření vzniklé uměle v urychlovačích částic a záření neutronové (unikající z jaderného reaktoru, anebo vznikající při speciálních jaderných reakcích). Ionizující se nazývá proto, že při průchodu hmotou ionizuje okolní atomy. K ionizaci může docházet buď přímo, pokud je záření tvořeno elektricky nabitými částicemi, anebo nepřímo, pokud jde o částice neutrální, např.

neutrony.

Protože je záření radioaktivních látek pro lidské oko neviditelné, musíme vycházet z různých **fyzikálních měřicích metod** založených na **účincích** ionizujícího záření a na vzniku různých dalších **doprovodných jevů** (např. při silné ionizaci vzduchu se vytvoří ozon, který cítíme). Nejčastěji se měří ionizace vyvolaná průchodem fotonu nebo jiné částice sledovaným prostředím, měří se vzniklé poruchy v pevné látce, zčernání fotografické emulze, změny optických vlastností látek, změny barvy látek, množství uvolněného tepla, změny elektrických vlastností polovodičových součástek apod.

Měření se buď provádějí **relativně**, a to srovnáním hodnoty naměřené pro neznámý vzorek s hodnotou naměřenou za stejných podmínek pro vhodný standard o známé aktivitě, anebo se provádějí přesnější měření **absolutní**. Při absolutních měřeních se naměřená hodnota musí korigovat na řadu známých efektů, které ovlivňují výsledek (provádějí se korekce na geometrické uspořádání, na pohlcování záření ve vzorku nebo v jeho okolí, na odraz záření od podložky, na náhodné překrývání signálu atd.) Absolutní měření jsou velmi náročná na složitou speciální aparaturu a provádějí se pouze v případech, kdy je přesnost měření nezbytně nutná.

Radioaktivitu měříme pomocí detektorů a dozimetrů. **Detektory** jsou přístroje, kterými určujeme pouze **kvalitativně** přítomnost záření a orientační odhad jeho intenzity. **Dozimetry** jsou přístroje určené **kvantitativně** k přesnému měření velikosti dávky - energie, kterou radioaktivní záření předalo zkoumané hmotě. Detekce i dozimetrie se tak **uplatňuje** při studiu jaderných dějů i při ochraně před účinky jaderného záření.

Aktivitu zářiče definujeme jako elementární počet jader dN , které se přemění za elementární dobu dt (jde o počet radioaktivních přeměn probíhajících v látce za jednotku času)

$$A = \frac{dN}{dt}. \quad 4.5.- 24.$$

Jinými slovy: elementární úbytek jader dN závisí na počáteční aktivitě zářiče v elementárním čase dt daného jaderného rozpadu, přičemž počáteční aktivita zářiče A_0 závisí na počátečním počtu jader N_0 a na materiálu radionuklidu vyjádřeným rozpadovou (přeměnovou) konstantou λ (viz MFCh tabulky)

$$dN = -\lambda N_0 dt \Rightarrow dN = -A_0 dt \Rightarrow A = -\lambda N \wedge A_0 = -\lambda N_0. \quad 4.5.- 25.$$

Aktuální aktivitu zářiče lze tedy popsat známým zákonem radioaktivní přeměny

$$A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad 4.5.- 26.$$

kde A aktuální aktivita zářiče exponenciálně ubývá v čase a A_0 je jeho počáteční aktivita.

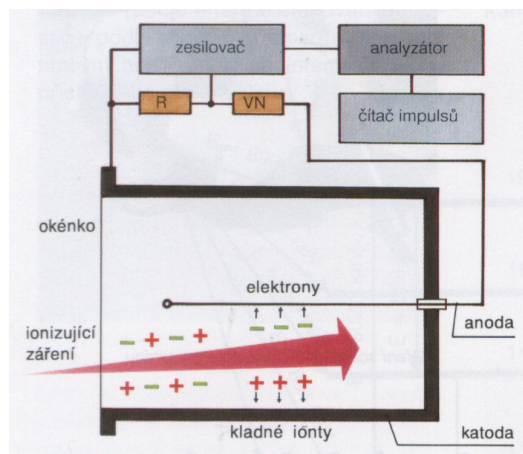
Dojde-li v látce k jedné přeměně za jednu sekundu, má aktivitu **Becquerel Bq**; v praxi se užívají spíše dekadické násobky této jednotky.

Účinek ionizujícího záření není dán pouze aktivitou sledované radioaktivní látky, ale závisí také na tom, jakou energii záření nese a jak účinně ji předává do prostředí, jímž prochází. Mírou **energetického účinku** ionizujícího záření je tzv. **absorbovaná dávka**. Dávka je fyzikální veličina definovaná podílem střední hodnoty energie, kterou ionizující záření předalo látce, a hmotnosti této látky. Jednotkou absorbované dávky je **gray Gy**, který se definuje jako absorpce energie jednoho joulu v jednom kg látky.

Účinek radioaktivního záření na živý organismus je třeba ještě korigovat podle **druhu záření**. Např. částice alfa jsou škodlivější než neutrony a neutrony způsobují v živé tkáni větší devastaci než elektrony. **Biologická účinnost** jednotlivých druhů záření se vyjadřuje pomocí **jakostního faktoru**. Absorbovaná dávka vynásobená jakostním faktorem se nazývá **dávkový ekvivalent** a jeho jednotkou je **sievert Sv**. Záření gama, které působí na člověka v běžném prostředí, má jakostní faktor 1. Vyšší hodnoty jakostního faktoru mají neutrony, nejvyšší hodnoty má záření alfa. Dříve se dávkový ekvivalent měřil v **rentgenech R** ($1\text{Sv}=100\text{R}$). Maximální dávkový ekvivalent pro jednotlivce nesmí překročit $5\text{mSv}/\text{rok}$.

Např. monitory televizorů září **brzdným zářením X**, které vzniká při interakcích urychlených elektronů v elektrických polích elektronových obalů jader atomů stínítka, na které dopadají. Brzdné záření se vyznačuje spojitém spektrem a malou energií. Statistickými měřeními bylo prokázáno, že člověk pravidelně sledující televizi je z obrazovky ozařován přibližně dávkovým ekvivalentem $0,02\text{mSv}/\text{rok}$. Jde o hodnotu 100krát menší, než vykazují různá lékařská diagnostická a terapeutická zařízení (rentgeny, nukleární medicína).

Fyzikální veličinu absorbovaná dávka je třeba odlišovat od fyzikální veličiny **ozáření (expozice)**, která je **mírou ionizačních účinků záření γ a záření X ve vzduchu**. Jde o veličinu definovanou podílem celkového elektrického náboje všech kationů, které vznikly ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů uvolněných fotony i všech elektronů a pozitronů vytvořených fotony a hmotnosti tohoto vzduchu. Jednotkou ozáření je **$\text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$** .



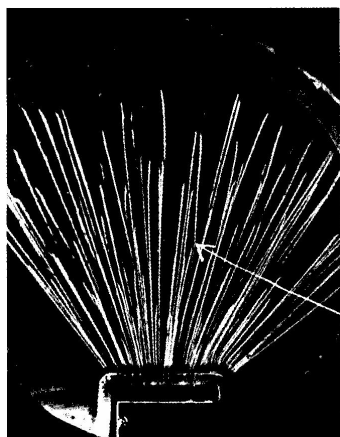
Plynové detektory (obr. 4.5.- 16.) jsou nejčastěji používanými detektory radioaktivního záření. Jsou založeny na primárních účincích radioaktivního záření – **ionizaci a excitaci atomů plynu**. Protože elektrický náboj indikující radioaktivní záření a vytvořený ionizací plynu je velmi malý, je třeba ho lavinovitým procesem zesílit natolik, aby byl spolehlivě měřitelný.

Obr. 4.5.- 16.

Plyn o nízkém tlaku je uzavřen v kovovém obalu s elektrodou uprostřed. Mezi obal a elektrodou je vloženo napětí (řádově 1kV , takže elektrické pole má značnou intenzitu). Jakmile dovnitř detektoru vnikne záření, způsobí ionizaci plynu, která se projeví jako ionizační proud mezi elektrodou a obalem. Podle závislosti proudu na napětí se rozlišují různé typy plynových detektorů, nejpoužívanější je **Geiger Müllerova trubice (počítač)**. Částice jaderného záření, která trubicí proletí, způsobí ionizaci několika molekul plynu. Vzniklé volné elektrony jsou

urychlovány silným elektrickým polem. Proudový impuls projde obvodem počítače a po elektrickém zesílení je registrován akusticky nebo čítačem. Podle **četnosti impulsů** lze usuzovat na aktivitu měřeného vzorku.

Existují také metody, které umožňují registrovat jedinou částici a sledovat její **stopu**, a to pomocí např. **Wilsonovy mlžné komory** (obr. 4.5.- 17.). Kolem stopy částice se vytvoří mlžné kapičky, tím se stopa zviditelní a lze ji fotograficky zachytit. Pomocí vnějšího magnetického pole je možné dráhy nabitých částic zakřivit, analyzovat stopy a určit přesně druh částice, která stopu způsobila.



Obr. 4.5.- 17.

Moderační detektory slouží k detekci **neutronů** a ke stanovení jejich **energie**. Jsou tvořeny látkou, která účinně zpomaluje (moderuje) neutrony. Je to zpravidla látka s vysokým obsahem vodíku (parafín, polyetylén apod.).

Filmové dozimetry jsou tvořeny speciální fotografickou emulzí. Intenzita jejího **zčernání** je úměrná dávce záření. Stanovují se jimi relativně nízké dávky v osobní dozimetrii, např. na pracovištích, kde se pracuje se zářiči.

V osobní dozimetrii se užívají i **termoluminiscenční dozimetry**. Termoluminiscenční látka má totiž tu vlastnost, že záření v ní vybudí elektrony do vyššího energetického stavu. Když se pak ozářená látka zahřeje (řádově na 200⁰C), elektrony se vrací do základního stavu, přičemž přebytek své energie vyzáří ve formě světelných záblesků. Světelné záblesky se pomocí **fotonásobiče** (obr. 4.5.- 18.) převádějí na napěťové impulsy a měří se.

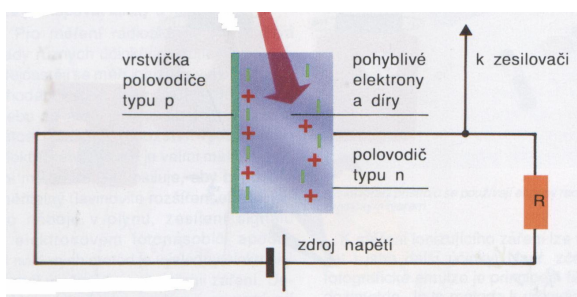


Obr. 4.5.- 18.

Scintilační detektory jsou založeny na podobném principu jako termoluminiscenční detektory. Záření vybudí ve scintilátoru elektrony do vyššího energetického stavu a návrat elektronů do základního stavu se projeví jako **světelné záblesky**, které se opět převádějí na

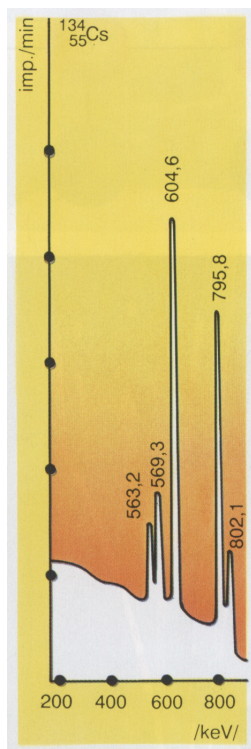
napětíové impulzy, zesilují se a měří fotonásobičem. Materiálem scintilátorů mohou být pevné krystaly anorganických sloučenin (nejčastěji jodidu sodného), organických sloučenin (např. antracen), nebo roztoky či suspenze organických scintilátorů v organickém rozpouštědle (např. toluenu). Vzorky se pak měří přímo rozpuštěné ve scintilátoru.

Polovodičové detektory (obr. 4.5.- 19.) využívají specifických vlastností polovodičů. Záření totiž způsobí v polovodiči přeskok elektronu do tzv. vodivého pásma polovodiče. Působí-li na polovodič elektrické pole, projeví se tento přeskok jako prudké zvýšení vodivosti. Vhodné elektronické zařízení zaznamená **elektrický impuls**. Polovodičové detektory jsou většinou tvořeny monokrystalem křemíku nebo germania se stopovým množstvím lithia, nebo superčistým germánem. Ke svému provozu většinou potřebují chlazení na teplotu kapalného dusíku.



Obr. 4.5.- 19.

Měření energie jaderného záření se zabývá **jaderná spektrometrie**. Rozdělení četnosti emitovaných částic v závislosti na jejich energii nazýváme jaderné spektrum (alfa, beta, gama spektrum). Spektrum beta je spojitě s určitou maximální hodnotou energie, spektra alfa a gama jsou čárová. Jaderné spektrum je charakteristické pro každý radionuklid a slouží jako hlavní zdroj informací o **struktuře atomového jádra**. Jaderná spektrometrie se **využívá** ke kvalitativní chemické analýze (podle energie emitovaných částic, případně podle poločasu rozpadu) i ke kvantitativní analýze (podle intenzity záření příslušného radionuklidu).

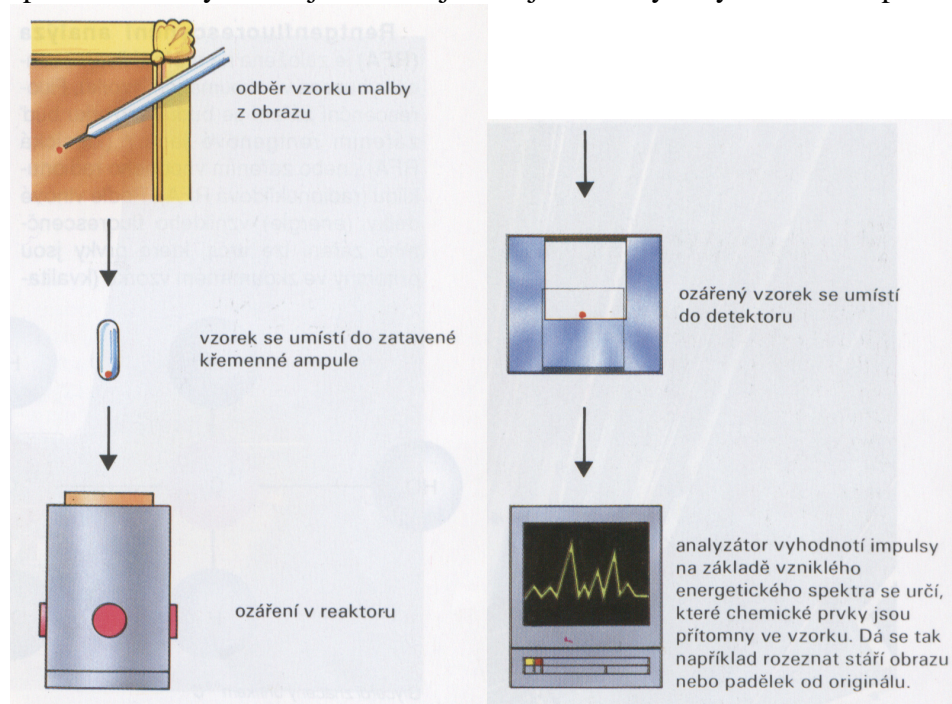


Na obr. 4.5.- 20. se radioaktivní Cs rozpadá beta rozpadem a vyzařuje kvanta gama záření o různých energiích, které odpovídají rozdílům energetických stavů jimiž jádro při své přeměně prochází. Na ose x histogramu vidíme energii emitovaných částic (v keV), na ose y rozdělení četnosti impulzů v detektoru částic podle energie (v impulsech za minutu).

Obr. 4.5.- 20.

Užití jaderné spektrometrie je významné např. pro **aktivační analýzu**, pomocí které se stanovuje prvkové složení neznámého vzorku (obr. 4.5.- 21.). Vzorek se ozáří nejčastěji neutrony v jaderném reaktoru (lze

užit i aktivaci pomocí protonů nebo vysoce energetických fotonů získaných v urychlovačích). Atomy prvků přítomných ve vzorku se aktivují a vzniklé radionuklidy se pak stanovují spektrometricky. Jde o jednu z nejcitlivějších analytických metod v praktické fyzice.



Obr. 4.5.- 21.



KO 4.5.- 37. Jaké znáte účinky ionizujícího záření?

KO 4.5.- 38. Jaký je rozdíl mezi relativní a absolutní metodou měření radioaktivního záření?

KO 4.5.- 39. Jaký je rozdíl mezi detektorem a dozimetrem?

KO 4.5.- 40. Odlište aktuální a počáteční aktivitu zářiče pomocí odvození zákona radioaktivní přeměny.

KO 4.5.- 41. Lze pomocí soustavy jednotek SI odlišit jednotky gray a sievert?

KO 4.5.- 42. Které z částic jsou pro živé organismy nejničivější: jádra hélia, elektrony, anebo neutrony?

KO 4.5.- 43. Odlište jednotku absorbované dávky a jednotku ozáření pomocí soustavy jednotek SI.

KO 4.5.- 44. Vyjmenujte dozimetry, jejichž princip je založen na detekci elektrického náboje, jeho zesílení a poté i měření.

KO 4.5.- 45. Jaké je užití jaderné spektrometrie?

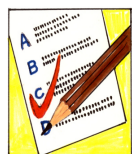


U 4.5.- 14. Jednotkou dávky záření je joule na kilogram. Je to dávka absorbovaná tělesem o hmotnosti 1kg, která odpovídá absorbované energii ionizujícího záření 1joule. Vypočtete, kolik iontových dvojic se vytvoří ve vzduchu o hmotnosti 1kg při pohlcení jednotky dávky záření, jestliže k vytvoření jedné dvojice je třeba energie 32,5eV.

U 4.5.- 15. Kapacita Geiger-Müllerova počítáče je 10pF. Na vlákno počítáče dopadne 100 000 elektronů při průchodu 1 částice trubicí. Jaký pokles napětí ukáže elektrostatický voltmetr?

U 4.5.- 16. Jak rozeznáme ve Wilsonově mlžné komoře stopy částic alfa a beta, jsou-li jejich energie stejné?

U 4.5.- 17. Jak se změní aktivita zářiče, jestliže jeho počet jader klesne na polovinu?



TO 4.5.- 36. Geiger-Müllerův detektor je

- a) polovodičový detektor;
- b) scintilační detektor;
- c) moderační detektor;
- d) plynový detektor.

TO 4.5.- 37. Účinek ionizujícího záření je dán

- a) aktivitou zářiče;
- b) energií, kterou záření nese;
- c) materiálem prostředí, kterým záření prochází;
- d) dobou působení zářiče.

TO 4.5.- 38. Ionizující záření je záření,

- a) které vysílají radioaktivní látky;
- b) rentgenové;
- c) záření vzniklé uměle v urychlovačích částic;
- d) záření neutronové.

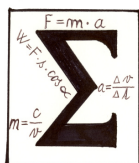
TO 4.5.- 39. Úkolem moderátoru v jaderném reaktoru je

- a) ochrana lidí před ozářením;
- b) regulace velikosti výkonu reaktoru;
- c) regulace výkonu neutronů v reaktoru;
- d) zpomalování neutronů.

TO 4.5.- 40. V jaderném reaktoru by nejlépe splňoval(o) úlohu moderátoru

- a) olovo;
- b) beton;
- c) kadmium;

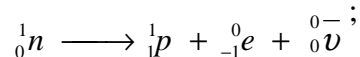
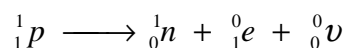
d) grafit.



- Hmotnost protonu

$$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg};$$

- Jaderné reakce rozpadu přeměny protonu a neutronu



- Nukleonové číslo jako součet protonů a neutronů

$$A = Z + N;$$

- Zápis jádra atomu prvku X pomocí protonového a nukleonového čísla



- Hmotnostní jednotka

$$m_u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg};$$

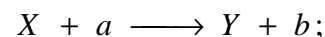
- Energie hmotnostního schodku

$$E_j = (Zm_p + Nm_N - m_j) c^2 = Bc^2;$$

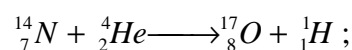
- Vazebná energie připadající na 1 nukleon

$$\varepsilon_j = \frac{E_j}{A};$$

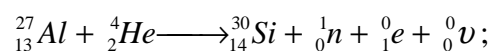
- Obecná transmutace jádra prvku X v jádro prvku Y , a to za působení částic či jiných jader prvku a a za vzniku jiných částic či jiných jader prvku b



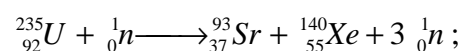
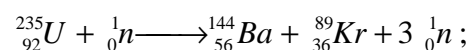
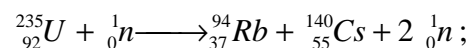
- Rutherfordova transmutace dusíku ostřelovaného jádrem hélia



- Umělá transmutace Curieových za vzniku radioaktivního záření



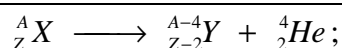
- Řetězová reakce štěpení uranu za vzniku 2 až 3 neutronů



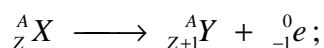
- Střední kinetická energie nutná ke startu termonukleární reakce

$$E_k = \frac{1}{2} k T;$$

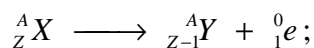
- Záření alfa



- Záření beta mínus



- Záření beta plus



- Zákon radioaktivní přeměny pro aktuální počet jader radioaktivní látky

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

- Poločas radioaktivního rozpadu v závislosti na rozpadové konstantě

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

- Zákon radioaktivní přeměny pro rychlost radioaktivního rozpadu

$$R = R_0 e^{-\lambda t};$$

- Rychlost rozpadu radioaktivní látky pomocí absorpce ozařované látky

$$R = R_0 e^{-\mu \cdot d},$$

- Vztah koeficientu absorpce a polovrstvy materiálu

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

- Aktivita radioaktivní látky

$$A = A_0 e^{-\lambda t}; A = -\lambda N; A_0 = -\lambda N_0.$$

Klíč



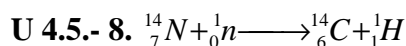
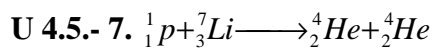
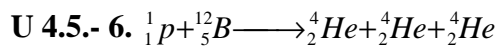
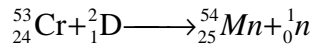
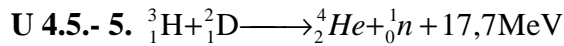
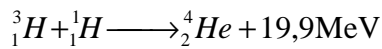
U 4.5.- 1. $Z = 15$; $A - Z = 31 - 15 = 16$; plně jsou obsazeny slupky K (2 elektrony) a L (8 elektronů); zbývajících 5 elektronů je na slupce M (ad elektronová konfigurace obalu atomu).

U 4.5.- 2. $F_e = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = 2,3 \cdot 10^{-8} \text{ N}$; $F_g = \kappa \cdot \frac{m_p m_e}{r^2} = 10,1 \cdot 10^{-48} \text{ N}$; $\frac{F_e}{F_g} = 2,3 \cdot 10^{39}$

Gravitační síla sice teoreticky mezi částicemi existuje, její velikost je ale vzhledem k velikosti Coulombovy elektrické síly zanedbatelná.

U 4.5.- 3. $E = 32m_0c^2 \Rightarrow E = \frac{32 \cdot 1,672 \cdot 10^{-27} (3 \cdot 10^8)^2}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cong 3 \cdot 10^{10} \text{ eV}$

U 4.5.- 4. $Q = 17,8 \text{ MeV}$



U 4.5.- 9. Podle MFCh tabulek ${}^{218}_{34}\text{Po}$.

U 4.5.- 10. $T = -\frac{\Delta t \cdot \ln 2}{\ln 0,8} \cong 372 \text{ s}$

U 4.5.- 11. $\Delta t = -\frac{T \cdot \ln 0,8}{\ln 2} \cong 58 \text{ s}$

U 4.5.- 12. $t' = 6 \text{ dní} = 5,184 \cdot 10^5 \text{ s}$; $R = 8,333 \text{ imp} \cdot \text{s}^{-1}$; $T = 46 \text{ dní} = 3,974 \cdot 10^6 \text{ s}$; $R' = ?$

$$R' = e^{\ln R \cdot \frac{\ln 2}{T} \cdot t'} \Rightarrow R' = 457 \frac{\text{imp}}{\text{min}}$$

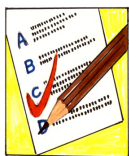
U 4.5.- 13. $R = R_0 e^{-\frac{\ln 2}{d'} \cdot d} = 354 \text{ imp/min}$.

U 4.5.- 14. $19,2 \cdot 10^{16}$

U 4.5.- 15. $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ V}$

U 4.5.- 16. Dráha částice beta je tenčí a delší.

U 4.5.- 17. $A_1 = -\lambda N_1 \wedge A_2 = -\lambda \frac{N_1}{2} \Rightarrow \frac{A_2}{A_1} = \frac{1}{2}$



TO 4.5.- 1. d)

TO 4.5.- 2. c)

TO 4.5.- 3. a)

TO 4.5.- 4. a)

TO 4.5.- 5. c)

TO 4.5.- 6. d)
TO 4.5.- 7. d)
TO 4.5.- 8. d)
TO 4.5.- 9. b)
TO 4.5.- 10. b)
TO 4.5.- 11. b)
TO 4.5.- 12. d)
TO 4.5.- 13. c)
TO 4.5.- 14. d)
TO 4.5.- 15. d)
TO 4.5.- 16. a)
TO 4.5.- 17. a), b)
TO 4.5.- 18. c)
TO 4.5.- 19. c)
TO 4.5.- 20. a)
TO 4.5.- 21. a)
TO 4.5.- 22. a)
TO 4.5.- 23. c)
TO 4.5.- 24. d)
TO 4.5.- 25. d)
TO 4.5.- 26. b)
TO 4.5.- 27. b)
TO 4.5.- 28. c)
TO 4.5.- 29. a), b)
TO 4.5.- 30. d)
TO 4.5.- 31. c)
TO 4.5.- 32. c)
TO 4.5.- 33. d)
TO 4.5.- 34. b)
TO 4.5.- 35. a)
TO 4.5.- 36. d)
TO 4.5.- 37. a), b), c), d)
TO 4.5.- 38. a), b), c), d)
TO 4.5.- 39. d)
TO 4.5.- 40. d)