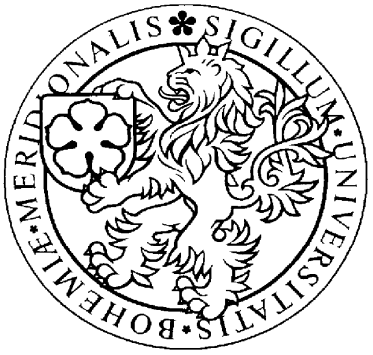
JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Zdravotně sociální fakulta



RADIAČNÍ FYZIKA

doplňkové texty pro posluchače kombinované formy studia
studijního programu "Ochrana obyvatelstva"

studijního oboru „Ochrana obyvatelstva se zaměřením na CBRNE"

Ing. Jiří Konečný, CSc.

ČESKÉ BUDĚJOVICE 2007

Cíl předmětu

Cílem je seznámit studenty s pochopením struktury fyziky jako celku a radiační fyziky jako důležité části této struktury.

Obsah předmětu

Přednášky:

Úvod do radiační fyziky (poznávací struktura radiační fyziky).

Potřebné poznatky z atomistiky, jaderné fyziky, kvantové fyziky a chemie.

Korpuskulární záření a elektromagnetické záření z pohledu aplikací ionizujícího záření, veličiny a jednotky radiační fyziky.

Zdroje ionizujícího a neionizujícího záření – přirozeně radioaktivní prvky, kosmické záření, umělé zdroje ionizujícího záření, zdroje neutronového záření, výroba a využití uměle radioaktivních prvků a látek.

Interakce ionizujícího a neionizujícího záření – fyzikální jevy při průchodu prostředím, interakce a absorpce korpuskulárního a elektromagnetického záření, účinky ionizujícího záření.

Detekce a měření ionizujícího záření – plynové detektory, scintilační detektory, detektory pevné fáze, typy měření v radiační fyzice.

Cvičení:

Potřebné aplikace radiační fyziky z hlediska matematického a statistického aparátu – rozpadový zákon, absorpční zákon, použití aparátu kvantové fyziky.

1 ÚVOD DO RADIAČNÍ FYZIKY

Klíčová slova: radiační fyzika, elementární částice, princip neurčitosti, modely atomu.

1.1 Předmět radiační fyziky

Radiační fyzika, tak jak ji budeme chápat, je mnohotvárný obor pokrývající poznání o přírodním i umělém ionizujícím záření, jeho vzniku a vlastnostech, interakci s látkou i o jeho využití.

1.2 Poznávání mikrosvěta

Okolní svět vnímáme svými smysly, vysvětlujeme svým rozumem a ovlivňujeme jej zpět svou činností. Je to svět naší denní zkušenosti, běžných rozměrů, časových intervalů, rychlostí a energií. O našem „běžném“ světě hovoříme jako o makrosvětě a platí v něm zákony klasické fyziky.

Kdybychom se dokázali zmenšit do velikosti mikrosvěta, vypadaly by naše životní zkušenosti zcela jinak a makrosvět by pro nás byl těžko pochopitelný. Nacházeli bychom zde mnoho jevů zcela odporujícím „zdravému rozumu“.

1.3 Svět molekul a atomů

Antičtí filozofové Demokritos (asi 460–370 let př. n. l.), Epikuros (341–270 let př. n. l.) a další vyšli z předpokladu, že látku není možné dělit do nekonečna a že musí existovat konečné, dále nedělitelné tvrdé částečky, atomy (řecky atomos = nedělitelný). Všechny jevy a změny, probíhající ve světě, připisovali jejich pohybu. Demokritos argumentoval tím, že kdyby látka byla neomezeně dělitelná, nezůstalo by nakonec nic, co by neslo vlastnosti látky. Vrcholným představitelem konkurenčního názoru, považujícího naopak látku za

dělitelnou neomezeně, se stal Demokritův krajan Aristoteles (384 – 322 př. n. l.) a bylo to jeho učení, které ovládlo celý středověk.

Z pozdějších atomistických snah stojí za zmínku první pokusy Boyleovy (1672 – 1691) a Newtonovy (1642 – 1727) interpretovat teplo jako vnitřní pohyb. Daniel Bernoulli (1700 – 1782) ztotožnil vzduch s "pružnou kapalinou", jejíž částice se "neobyčejně rychle pohybují v různých směrech". O několik let později (1745 – 1747) vytváří Michail Lomonosov (1711 – 1765) víceméně důsledný mikroskopický popis, z něhož vyplynula celá řada jak kvalitativních, tak kvantitativních závěrů. Přestože Lomonosov spojoval teplo pouze s rotačním a vibračním pohybem částic (jejich translaci vůbec neuvažoval), byl schopen vysvětlit například pružnost plynů.

Na základě skutečnosti, že krystaly téže látky vykazují tutéž symetrii, vyslovil Robert Hooke (1635 – 1703) domněnku, že jsou pravidelným vrstevnatým uspořádáním drobných částic. René Just Haüy (1743 – 1822) tuto představu podpořil empirickým zjištěním, že krystaly lze poměrně snadno štípat podél určitých význačných směrů. Postupné štípání krystalu na menší a menší části by mělo, podle něj, nakonec přivést k nejmenšímu stavebnímu bloku.

Chemický atomizmus poskytuje nepřímý důkaz existence atomů. Francouzský chemik Proust v r. 1799 zjistil při studiu reakcí vzniku oxidů a solí, že reagující látky se slučují jen v určitých hmotnostních poměrech a objevil tak chemický zákon stálých poměrů slučovacích.

Anglický chemik John Dalton (1766 – 1844) dále zjistil, že některé prvky se mohou slučovat i v několika různých poměrech (zákon násobných poměrů slučovacích).

Oba tyto zákony je možné vysvětlit tak, že látky se skládají z atomů o určitých hmotnostech a obě reagující množství mají stejný nebo násobný počet atomů. Tyto atomy prvků se pak sloučí v molekuly.

1.4 Přelom devatenáctého a dvacátého století

Představa před rokem 1920 byla následující: „Scénou“, na které vystupuje vesmír, je trojrozměrný geometrický prostor popsaný ještě Euklidem a věci se mění v prostředí, které nazýváme časem. Prvky vystupující na scéně jsou částice – atomy – které mají určité vlastnosti.

Zjistilo se ale, že zákony pro pohyb částic jsou nepřesné. Newtonovy zákony neplatí ve světě atomů. Věci se v malém měřítku chovají úplně jinak, než ve velkém měřítku.

Těsně po roce 1920 se datuje vznik kvantové mechaniky. Jednou ze zvláštností je, že vylučuje předpoklad, že částice má určitou polohu a určitou rychlost. Můžeme to zapsat touto rovnicí:

$$\Delta x \Delta p = \frac{h}{2\pi}$$

kde

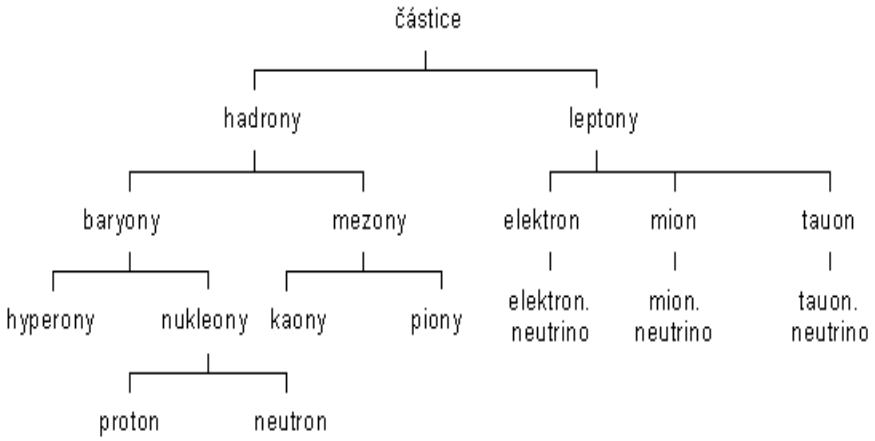
h	Planckova konstanta
Δx	neurčitost polohy
Δp	neurčitost hybnosti

Vysvětluje se tím velmi záhadný paradox: jsou-li atomy složeny z kladných a záporných nábojů, proč se záporný náboj prostě neusadí na kladném náboji? Kdyby elektrony byly v jádru, znali bychom přesně jejich polohu a princip neurčitosti by potom vyžadoval, aby měli velmi velkou (ale neurčitou) hybnost, tj. velmi velkou kinetickou energii. S takovou energií by se od jádra odtrhly.

1.5 Elementární a fundamentální částice

Původní představa, že základní stavební jednotkou je atom, musela být s poznáním vnitřní struktury atomu opuštěna a úlohu elementárních částic na jistou dobu převzaly elektron, proton a neutron. V kosmickém záření pak byly objeveny částice jako pozitron (antičástice elektronu), mezon μ a mezon pí. Od padesátých let, kdy byly uvedeny do provozu velké urychlovače částic, bylo pak objeveno mnoho dalších částic.

Dnes je známo přibližně sto různých částic a zhruba stejný počet antičástic. Název „elementární“ se pro částice udržuje z víceméně historických důvodů.



Částice se dělí na dvě skupiny – leptony (z řečtiny: lehký) a hadrony (z řečtiny: velký, silný). Dělícím kritériem je typ interakce, které mezi částicemi mohou působit – mezi leptony působí interakce slabá, mezi hadrony interakce silná.

Zhruba dvě stovky hadronů se dělí na mezony a baryony. Nejlehčí baryon je proton, o málo těžší je neutron. Tyto dva baryony se označují společným názvem nukleony, protože z nich jsou složena všechna atomová jádra. Baryony s hmotností větší než nukleony se nazývají hyperony.

1.6 Modely atomu

1.6.1 Thomsonův model

Prvním významným průnikem do struktury atomu byl objev elektronu (byl objeven v r. 1895 J. J. Thomsonem při studiu elektrických výbojů v plynech).

Elektrony mají záporný elektrický náboj a jsou více než 1000krát lehčí než elektricky neutrální atomy. V r. 1898 navrhl J. J. Thomson představu, podle níž jsou atomy miniaturní homogenní koule kladně nabité hmoty, do níž jsou vnořeny elektrony. Tento Thomsonův statický model atomu se nazýval též "pudinkový model", podle své podobnosti s anglickým pudinkem se zapečenými rozinkami.

1.6.2 Rutherfordův planetární model

Ernest. Rutheford (1871 - 1937), se svými spolupracovníky provedl v r. 1906 experiment s rozptylem částic alfa (o max. energii 7,7MeV, emitovaných přírodním radionuklidem ^{226}Ra a jeho rozpadovými produkty) při jejich průchodu tenkou zlatou fólií (tloušťky cca 3.10^{-4}mm, což odpovídá kolem 10^4 atomových vrstev). Podle Thomsonova modelu atomu se očekávalo, že většina částic alfa projde fólií buď přímo, nebo jen s malým rozptylem. Experiment však ukázal, že řada částic alfa se rozptýlila o velký úhel, některé byly dokonce odraženy do opačného směru. Aby se těžké částice alfa (jsou více než 7000krát těžší než elektron) takto rozptýlily, musely na ně uvnitř atomů působit velké síly, což by nebylo možné u Thomsonova modelu.

Rutheford navrhl obraz atomu složeného z velice drobného jádra, v němž je soustředěn kladný náboj a téměř veškerá hmotnost atomu, a z elektronů nacházejících se v určité (poměrně velké) vzdálenosti od jádra. Právě v blízkosti tohoto extrémně malého, těžkého a kladně nabitého jádra, kolem něhož jsou velmi vysoké intenzity elektrického pole, dochází k účinnému rozptylu těch alfa částic.

Tento model však byl v rozporu s klasickou elektrodynamikou. Každý elektron obíhající kolem jádra by měl vytvářet elektromagnetické pole, které by se projevovalo vyzařováním elektromagnetických vln, odnášejících kinetickou energii obíhajícího elektronu. Takto brzděný elektron by ve spirále obíhal stále blíže a blíže k jádru, až by elektron nakonec dopadl na jádro. Nic takového ovšem nepozorujeme.

1.6.3 Bohrův kvantový model

Nedostatek planetárního modelu atomu napravil r. 1913 dánský fyzik Niels Bohr, který doplnil původní planetární model atomu o tři důležité postuláty:

- Elektron nemůže kolem jádra obíhat po libovolných drahách, ale po pevně daných (kvantovaných) drahách s přesně určenými diskrétními hodnotami poloměru.
- Takové dráhy (elektronové orbity) jsou stacionární a elektron při oběhu na nich nevyzařuje elektromagnetické vlny.
- Pouze při přechodu elektronu na jinou kvantovou dráhu, v níž má elektron nižší energii, vyzáří atom foton, jehož energie se rovná úbytku energie elektronu.

Opačný přechod je možný jen tehdy, získá-li elektron potřebný rozdíl energie (buď nárazem jiné částice, nebo pohlcením fotonu s příslušnou energií). Bohrův model si s příslušnými modifikacemi svou platnost zachoval dodnes.

1.6.4 Kvantově mechanický model atomu

Je to zdokonalený Bohrův model, který vyřešil řadu jeho nedostatků. Tento model je převážně matematický, jehož názornost je značně omezena. Stav částice, popř. systému částic je vyjádřena pomocí veličiny vlnové funkce ψ a je možné je vypočítat pro zvláštní stavy podle Schrödingerovy rovnice.

1.7 Korpuskulárně-vlnový dualizmus

Elektron má mechanické i vlnové vlastnosti, říkáme, že má korpuskulárně vlnový dualismus. Záleží na pokusu, kterým se zjišťuje chování částice – fotony se mohou chovat jako částice s nulovou klidovou hmotností – jsou to kvanta světelné energie, elektrony zas mohou vykazovat vlnové vlastnosti – příkladem mohou být elektronové mikroskopy.

Otázky:

- Jaký byl vývoj představ o struktuře atomu.
- Rozdělení elementárních resp. fundamentálních částic.
- Jaký byl vývoj představ o modelech atomu.

2 EXPERIMENTY A OBJEVY POTVRZUJÍCÍ EXISTENCI MOLEKUL, ČÁSTIC A JEJICH STRUKTURU

Klíčová slova: kvantová hypotéza, elektromagnetické spektrum, Brownův pohyb.

2.1 Kvantová hypotéza

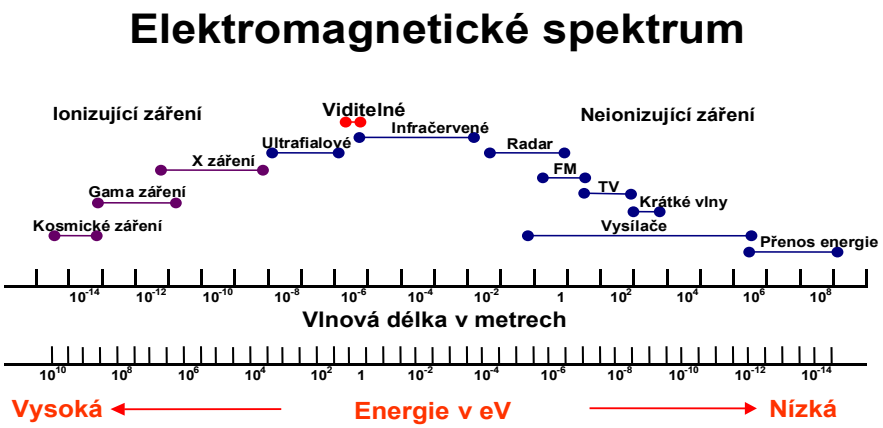
Částice, z nichž je vytvořená látka, na sebe působí vzájemnými silami. Tyto síly vysvětlujeme tak, že částice kolem sebe vytvářejí silová pole a jejich prostřednictvím působí na jiné částice. Mezi velmi důležité pole patří elektromagnetické, které se může šířit v podobě elektromagnetických vln jako záření. Ve vakuu se všechny elektromagnetické vlny šíří rychlostí světla c, při čemž platí známý vztah

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

kde

λ vlnová délka
ν kmitočet.

Podle vlnových délek rozlišujeme celé spektrum elektromagnetických vln:



Elektromagnetické záření vysílají všechna tělesa. Při dopadu na těleso se elektromagnetické záření může odrazit nebo pohltit. Důležitým případem je záření rovnovážné, které je nazýváno také zářením černého tělesa. Takové záření vzniká třeba v uzavřené dutině se zahřátými stěnami.

Bylo objeveno, že takové spektrum záření závisí pouze na teplotě tělesa, nikoliv na jeho chemickém složení nebo na jiných okolnostech experimentu. Spektrum tohoto záření je spojité, těleso vyzařuje na všech vlnových délkách, ale s různou intenzitou.

Vzájemnou závislost mezi energií rovnovážného záření na vlnové délce objevil až na základě kvantové hypotézy Max Planc (1858 – 1947). Kvantová hypotéza spočívala v tom, že záření vydávané a pohlcované jednotlivými atomy zahřátého tělesa nemůže mít libovolnou energii, ale je vždy vydáváno a pohlcováno v určitých dávkách – kvantech. Energie takového kvanta záření je úměrná jeho frekvenci při čemž platí:

$$E = h\nu$$

kde

E energie kvanta záření
h Planckova konstanta
ν frekvence záření.

Tímto objevem se datuje vznik kvantové fyziky.

2.2 Elektrony

V r. 1859 objevil Julius Plücker katodové paprsky, které vznikají ve výbojové trubici za silně sníženého tlaku. Pokusy bylo zjištěno, že tyto paprsky vyletují z katody, ionizují plyny, vyvolávají světélkování a zahřívají látky, roztáčejí malý lehký mlýnek, pronikají tenkým hliníkovým plíškem a odchylují se v elektrickém a magnetickém poli jako záporně nabité částice. Při dopadu na anodu vyvolávají rentgenové záření (Wilhem Conrad Rentgen, 1901). Posléze bylo vysloveno podezření, že rentgenové záření je vlastně elektromagnetické záření.

Na základě těchto a dalších pokusů vyslovil J.J.Thomson (1897) předpoklad, že katodové paprsky jsou proudem rychle letících záporně nabitých elektrických částic, jakýchsi „atomů elektřiny“, neboli elektronů.

2.3 Brownův pohyb

Názvem Brownův pohyb se označuje neustálý chaotický pohyb malých částeček (o průměru řádově 10^{-6} - 10^{-7} m) rozptýlených v kapalině nebo plynu. Tento jev objevil Robert Brown (1773 – 1858) při zkoumání vodní suspenze pylových zrnek mikroskopem.

Teoretickou a experimentální analýzu tohoto jevu provedl roku 1908 Jeanem Baptista Perina (1870 – 1942), který potvrdil molekulárně-kinetickou představu, kterou formulovala již řada badatelů před ním.

A atom se stal ústředním pojmem přírodovědy začínajícího dvacátého století.

Otázky:

- Jaký je vztah energie gama kvant a jejich frekvence.
- Popište elektromagnetické spektrum.
- Co je to Brownův pohyb a jaký je jeho základní význam.

3 INTERAKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ S LÁTKOU

Klíčová slova: Comptonův jev, fotoefekt, tvorba párů, interakce nabitých částic, interakce neutronů, účinný průřez.

3.1 Záření gama

Interakce záření gama s hmotným prostředím se výrazně odlišuje od interakce elektricky nabitých částic. Při průchodu prostředím uvolňují fotony elektricky nabité částice (elektrony), které tím získají energii dostatečnou k tomu, aby byly schopné prostředí ionizovat a excitovat. Záření gama náleží tedy do kategorie nepřímo ionizujícího záření. Záření gama interaguje s látkou fotoefektem, Comptonovým rozptylem a tvorbou párů elektron – pozitron.

3.1.1 Comptonův jev

Comptonův jev můžeme považovat za důkaz hmotného projevu fotonového záření. Byl podán až v roce 1922 Arthurem Comptonem (1982 – 1962), který experimentoval s rentgenovým zářením.

Při Comptonově rozptylu se jedná o interakci fotonů se slabě vázanými elektrony na vnějších slupkách atomů. Foton předá část své energie volnému elektronu a uvede jej do pohybu. Rozptýlený foton pak s nižší energií pokračuje v pohybu v odlišném směru. Comptonův rozptyl je převládajícím typem interakce záření gama středních energií s látkami o malém atomovém čísle (voda, tkáň aj.).

3.1.2 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev či fotoefekt je jev, který v roce 1887 poprvé popsal Heinrich Hertz. Pozoroval chování elektromagnetického vlnění při dopadu na povrch kovu. Při ozáření vzorku spektrem vlnění byly pohlceny krátké vlnové délky a přitom delší vlny ve spektru zůstaly. Pro krátké vlnové délky došlo k emisi elektronů z kovu. Počet těchto elektronů rostl s intenzitou vlnění. Jev byl ale pozorován jen pro krátké vlnové délky, pro velké délky vln jev nenastal ani při jakékoliv intenzitě.

Při fotoefektu předá foton záření gama veškerou svoji energii elektronu na některé z vnitřních slupek atomu. Tento elektron je z atomu uvolněn a jeho místo je zaplněno elektronem z vyšší slupky a přebytek energie je vyzářen v podobě fotonu charakteristického rentgenového záření. Pravděpodobnost fotoefektu se zmenšuje s rostoucí energií záření gama a roste s atomovým číslem materiálu; projevuje se tedy hlavně u fotonů s nižší energií a v látkách s vysokým atomovým číslem (např. ve stínícím materiálu Pb).

3.1.3 Tvorba párů

Třetím nejdůležitějším procesem interakce fotonů s látkou je tvorba párů elektron-pozitron, spojená se zánikem fotonu. Energie fotonu se spotřebovává jednak na klidovou energii obou vzniklých částic, jednak na jejich kinetickou energii. K procesu nemůže dojít bez přítomnosti třetí částice, kterou je zpravidla atomové jádro.

3.2 Nabité částice

Z celé široké oblasti nabitých částic se omezíme pouze na stabilní částice, tj. elektrony, protony a nabité částice složené z více nukleonů – z nich jsou pro nás důležité částice alfa. Nabité částice můžeme při tom rozdělit do dvou skupin – na elektrony a těžší nabité částice. Mechanizmy interakcí jsou v obou skupinách obdobné, avšak vzhledem k podstatnému rozdílu v hmotnostech interagujících částic existují rozdíly, které toto dělení opravňují.

3.2.1 Těžké nabité částice

Těžké nabité částice ztrácejí svoji energii převážně srážkami s obalovými elektrony atomů látky. Pokles jejich energie je následek řady excitačních a ionizačních procesů. Další dva procesy, které se obecně uplatňují při průchodu těžkých nabitých částic látkou, jsou rozptyl na jádrech atomů a buzení brzdného záření.

Vzhledem k tomu, že těžké nabité částice ztrácejí při ionizačních a excitačních procesech velmi rychle svoji energii, jejich dosah v prostředí je velmi malý. V plynech je např. dosah alfa částic řádově několik cm, ve tkáni μm až desítky μm.

3.2.2 Elektrony

Mechanizmy interakce elektronů s látkou jsou do značné míry podobné jako procesy interakce těžkých nabitých částic. Elektrony (částice beta) při průchodu prostředím ztrácejí svoji energii ionizací nebo excitací atomů a dále v důsledku brzdného záření. U kladných elektronů (pozitrony) dochází navíc k produkci fotonového záření při anihilaci párů elektron – pozitron.

Jelikož elektrony jsou ve srovnání s těžkými nabitými částicemi relativně malé a lehké, jsou rozptylovány s malými ztrátami energie a jejich dráha může být značně klikatá. Jejich dosah závisí na energii; záření beta s maximální energií 2 MeV má dolet ve vzduchu přibližně 8 m, ve vodě 1 cm a v hliníku 4 mm. Energie brzdného záření a výtěžek brzdného záření závisejí na atomovém čísle absorbující látky – u těžkých látek jsou výrazně vyšší než u látek lehkých.

3.3 Záření neutronové

3.3.1 Pružný rozptyl neutronů na jádrech

Pružný rozptyl je nejpravděpodobnějším typem interakce rychlých neutronů s látkou. Na základě klasické mechaniky si lze tento jev představit jako pružnou srážku dvou částic. Odražené jádro pak ztrácí svou energii v řadě ionizačních a excitačních procesů.

3.3.2 Nepružný rozptyl

Zejména při vyšších energiích neutronů může dojít k nepružnému rozptylu, co je jejich dočasný záchyt a následná emise jádrem. Odražené jádro je při tom v excitovaném stavu a emisí fotonu se dostává do základního stavu.

3.3.3 Jaderné reakce neutronů

Při jaderné reakci je neutron absorbován jádrem – tím se vytvoří složené jádro ve vzbuzeném stavu, které vyzáří excitační energii ve formě fotonu a neutron zůstává trvale součástí jádra. Při těchto reakcích dochází ke vzniku buď nového prvku, nebo izotopu některého přítomného prvku. Produkty těchto reakcí jsou velmi často radioaktivní.

3.4 Veličiny popisující interakci ionizujícího záření s látkou

Nyní popíšeme některé veličiny, které interakci charakterizují. Představme si tedy nejjednodušší typický proces: terčík složený z částic typu A je ozařován částicemi typu a. Při střetnutí těchto částic dojde k reakci typu:

$$A + a \rightarrow B + b$$

Kde B, resp. b jsou částice, které při této reakci vznikají.

Mírou pravděpodobnosti, že k takové reakci dojde, je veličina zvaná účinný průřez, zpravidla označován symbolem σ. Je definován jako podíl pravděpodobnosti, že pro danou terčovou entitu nastane určitá interakce, vyvolaná dopadem částic určitého druhu a energie, a fluence těchto částic. Jednotkou je m^2, často se ale používá jednotka barn, 1 b = 10^{-28} m^2

Účinný průřez se vztahuje na různé typy procesů. Mohou jimi být pružné rozptyly, jaderné reakce atd. Součet všech účinných průřezů odpovídajících různým reakcím a procesům mezi dopadající částicí daného druhu a energie a danou terčovou částicí se nazývá celkový (totální) účinný průřez σ_{tot}. Tato veličina je mírou pravděpodobnosti, že dojde k jakékoliv interakci mezi oběma částicemi.

Charakter účinných průřezů mají i veličiny, označované jako součinitele zeslabení. Za základní veličinu lze v tomto smyslu považovat lineární součinitel zeslabení μ (jednotkou je m^{-1}), který je jiným vyjádřením celkového makroskopického účinného průřezu Σ_{tot} pro odstranění částic ze svazku. Je definován vztahem

$$\mu = -\frac{1}{J}\frac{dJ}{dx}$$

kde

J hustota proudu částic ve svazku rovnoběžném se směrem x.

Tuto veličinu má smysl používat pouze pro nenabité částice, kde interakce vede k absorpci částice nebo jejímu rozptýlení ve svazku.

Otázky:

- Popište Comptonův jev.
- Popište fotoefekt.
- Popište tvorbu párů.
- Jaké jsou základní interakce nabitých částic s hmotou.
- Popište interakce neutronů s hmotou.
- Co je to účinný průřez.

4 STRUKTURA ATOMOVÉHO OBALU, MOLEKULY A CHEMICKÁ VAZBA

Klíčová slova: periodická soustava prvků, kvantově mechanický model atomu, Pauliho vylučovací princip, excitace atomů, vazby molekul.

4.1 Periodická soustava prvků

Roku 1829 Johann Döbereiner (1780 – 1849) přednesl svoji teorii o triádách prvků (skupiny o třech prvcích). Tak například jednu triádu tvořily kovy lithium, sodík a draslík, které reagují podobným způsobem. Dmitrij

Ivanovič Mendělejev (1834 – 1907) zjistil, že u prvků seřazených podle vzrůstající atomové hmotnosti se pravidelně opakují podobné vlastnosti. V několika případech však musel udělat výjimku a předřadit těžší prvek lehčímu. Roku 1869 publikoval Mendělejev poprvé periodický zákon, který tuto závislost vyjadřuje, a periodickou tabulku prvků, která je grafickým vyjádřením periodického zákona. V tabulce vynechal místa pro prvky, o kterých předpověděl, že budou objeveny později.

Dnes je známo, že prvky nejsou uspořádány podle relativní atomové hmotnosti, ale podle stoupajícího protonového čísla. To byl také důvod, proč musel Mendělejev předřadit těžší prvek lehčímu.

4.2 Bližší popis kvantově mechanického modelu atomu

Kvantová mechanika se sice skládá ze vztahů mezi pozorovatelnými veličinami, avšak princip neurčitosti radikálně mění definici „pozorovatelné veličiny“ v říši mikrosvěta. Podle principu neurčitosti nelze zároveň přesně změřit polohu a hybnost částice.

Jedním z největších úspěchů kvantově mechanického modelu atomu bylo úplné vysvětlení stavby elektronových obalů atomů prvků, jejich periodických vlastností a atomových spekter. Víme, že v každém kvantovém stacionárním stavu má atom určitou energii a elektrony se mohou nacházet s určitou pravděpodobností v jednotlivých bodech prostoru v okolí jádra atomu. Místa nejpravděpodobnějšího výskytu elektronů se znázorňují geometrickým útvarem, který označujeme jako atomový orbital. Tento model je převážně matematický, jehož názornost je značně omezena. Stav částice, popř. systému částic je vyjádřena pomocí veličiny vlnové funkce ψ a je možné je vypočítat pro zvláštní stavy podle složitého matematického aparátu (Schrödingerovy rovnice).

Kvantový stacionární stav elektronu můžeme v tomto modelu popsat třemi kvantovými čísly.

Hlavní kvantové číslo n nabývá hodnot n = 1, 2, 3, … a určuje energii příslušného stacionárního stavu atomu.

Vedlejší (orbitální) kvantové číslo l nabývá hodnot l = 0, 1, 2, … (n-1) a určuje tvar atomového orbitalu v prostoru. Je zvykem označovat vedlejší kvantové číslo písmeny s, p, d, f g, … takže například zápis 3d odpovídá stavu n = 3, l = 2.

Magnetické kvantové číslo m nabývá hodnot m = 0, ±1, ±2, ±3, …, ±l, pro dané l tedy 2l + 1 hodnot, a určuje orientaci atomového orbitalu v prostoru.

Experimenty s chováním atomů v magnetickém poli ukázaly, že kvantových stavů elektronů je ve skutečnosti dvojnásobný počet. Elektron vlastně představuje malý magnet, který se ve vnějším magnetickém poli může orientovat dvojím způsobem – ve směru vektoru magnetické indukce a proti němu. Tuto vlastnost elektronu označujeme jako spin, protože připomíná rotaci. Dvě opačné orientace elektronu v magnetickém poli se budou ale lišit i energií, a proto je můžeme popsat čtvrtým kvantovým číslem, tzv. spinovým magnetickým kvantovým číslem m_s, který nabývá hodnot $m_s = \pm ½$.

V normální konfiguraci atomu vodíku je elektron ve svém nejnižším kvantovém stavu. Jak je to ale u složitějších atomů? Je například všech 92 elektronů atomu uranu ve stejném kvantovém stavu, jako kdyby elektrony kroužily na jedné Bohrově dráze? To je velmi nepravděpodobné. Jedním z příkladů je rozdíl v chemických vlastnostech některých prvků, jejichž atomová struktura se liší jen o jediný elektron. Kdyby všechny elektrony v atomu byly pohromadě v jednom a témž kvantovém stavu, rozdíl pouze v jednom elektronu by nemohl způsobit tak velké rozdíly v chemickém chování.

- Pauliho vylučovací princip říká, že žádné dva elektrony v atomu nemohou existovat ve stejném kvantovém stavu.

Dva elektrony se tedy musí lišit nejméně v jednom kvantovém čísle, takže v téže kvantové dráze mohou současně obíhat nejvýše dva elektrony s opačnými spiny.

4.3 Excitace atomů

Existují dva hlavní mechanizmy, jimiž lze excitovat atom na jeho energetickou hladinu nad jeho základním stavem a poskytnout mu tak možnost k vyzařování. Jedním takovým mechanizmem je srážka atomu s jinou

částicí, při níž je část jejich společné kinetické energie pohlcena atomem; atom excitovaný tímto způsobem se vrací v průměru za 10^{-8} s do svého základního stavu emisí jednoho nebo více fotonů. Praktickým příkladem jsou neonové reklamy a rtuťové lampy.

Jiný mechanizmus excitace nastává, když atom pohltí světelný foton, jehož energie je právě taková, aby mohla vzbudit atom na vyšší energetickou hladinu. Prochází-li bílé světlo, které obsahuje celé spektrum vlnových délek, vodíkovým plynem, pohlcují se fotony těch vlnových délek, jež odpovídají přechodům mezi energetickými hladinami. Takto excitované atomy vodíku pak téměř ihned zpětně vyzařují svou excitační energii.

4.4 Vazby molekul

Co se bude dít, když k sobě budeme přibližovat dva atomy. Mohou nastat tři krajní případy:

- Vznikne kovalentní vazba. Jedna nebo více dvojic elektronů potom patří společně dvěma atomům; jde o tzv. sdílení elektronů. Vyjádřeno řečí kvantové mechaniky, pravděpodobnost výskytu elektronů je největší poblíž spojnic jader obou atomů. Příkladem je vodíková molekula H_2 jejíž dva elektrony patří společně dvěma protonům.

- Vznikne iontová vazba. Jeden nebo více elektronů může přejít z jednoho atomu do druhého, a takto vzniklé kladné a záporné ionty se navzájem přitahují. Příkladem je molekula NaCl, kde existuje vazba mezi ionty Na^+ a Cl^-, a nikoli mezi atomy Na a Cl.

- Nevznikne žádná vazba. Jestliže se elektronové struktury dvou atomů překrývají, tvoří dohromady jeden fyzikální systém a podle vylučovacího principu nemohou v takovém systému být dva elektrony ve stejném kvantovém stavu.

Kovalentní a iontová vazba jsou tedy dva hraniční typy chemické vazby, mezi kterými je celá řada přechodných vazeb, které se více nebo méně přibližují jednomu z hraničních typů.

Otázky:

- Periodická soustava prvků a její význam.

- Popište kvantově mechanický model atomu.

- Jaký je průběh excitace atomů.

- Vyjmenujte a stručně popište základní chemické vazby molekul.

5 ATOMOVÉ JÁDRO

Klíčová slova: jaderné síly, stabilita atomových jader, kapkový model jádra, slupkový model jádra.

5.1 Jaderné síly

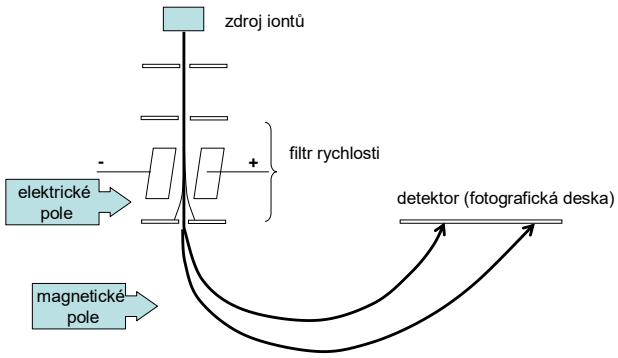
Protony a neutrony jsou v atomovém jádru stěsnány ve velmi malém prostoru a dá se proto očekávat, že zde mezi protony bude silné elektrostatické odpuzování. Kdyby nukleony nesvazovala nějaká síla, nemohlo by jádro vůbec držet pohromadě. Tyto síly nazýváme jaderné síly.

Jaderné síly se uplatňují jen v oblasti jádra a mluvíme o nich jako o silách krátkého dosahu. Jaderné síly se projevují mezi nukleony pouze při vzdálenostech $r <= 1{,}5 \cdot 10^{-15}$m. Pro vzdálenosti $r <= 0{,}4 \cdot 10^{-15}$m jde o síly odpudivé, nad tyto vzdálenosti o síly přitažlivé.

5.2 Hmotnost jádra

Jádro atomu obsahuje téměř veškerou jeho hmotu a ze znalosti hmotnosti atomů lze odvodit mnoho informací o vlastnostech jader. Atomové hmoty můžeme měřit zařízením nazývaným hmotnostní spektrometr (princip hmotnostního spektrometru je znázorněn na následujícím obrázku.

Princip hmotového spektrometru



Ze zdroje iontů se kladné ionty urychlují elektrickým polem. Tyto ionty obvykle letí různým směrem a mají různou rychlost. Dvojice štěrbin kolimuje svazek iontů, jež potom procházejí filtrem rychlosti. Filtr rychlosti se vytváří homogenními elektrickými a magnetickými poli, která jsou kolmá navzájem a ke svazku. Štěrbinu na druhém konci filtru rychlosti pak dosáhnou jen ionty, které se pohybují stejným směrem a mají stejnou rychlost. Pak ionty vstupují do magnetického pole a sledují kruhové dráhy, jejichž poloměr je úměrný rychlosti iontů, hmotnosti iontů a velikosti elektrických a magnetických sil. Po změření poloměru kruhové dráhy můžeme zjistit hmotnost iontu.

Atomové hmotnosti se vztahují k neutrálním atomům, nikoli jen k jádrům. Je zvykem je vyjadřovat v hmotnostních jednotkách u tak, že hmota nejrozšířenějšího typu uhlíkového atomu je podle definice přesně 12,0000 u:

$$1\ u = 1{,}6604.10^{-27}\ g$$

Počátkem minulého století bylo objeveno, že ne všechny atomy daného prvku mají stejnou hmotnost. Příčinou je to, že obvykle jsou prvky složeny z více tzv. izotopů. Izotopy jsou atomy chemického prvku, které mají stejný počet protonů, ale rozdílný počet neutronů, tedy stejné atomové číslo (Z) ale rozdílné hmotnostní číslo (A). Název pochází z řecké předpony iso- (stejno-) a topos (místo), protože v periodické tabulce se nacházejí na stejném místě.

Rozdílné hmotnosti mají logicky i tzv. izotopické molekuly, které se liší tím, že obsahují různé izotopy určitého prvku, jako např. $^{1}H_2{}^{16}O$ a $^{2}H_2{}^{16}O$, nebo $^{235}UF_6$ a $^{238}UF_6$. Z molekulové fyziky je známo, že řada vlastností molekul závisí na jejich hmotnosti. Tak např. při určité teplotě T se molekuly s těžším izotopem pohybují pomaleji.

Tak těžká voda má bod tání $3{,}82^0$C a bod varu $101{,}42^0$C oproti obyčejné vodě která má bod tání 0^0C a bod varu 100^0C (při normálním tlaku vzduchu).

5.3 Stabilita atomových jader

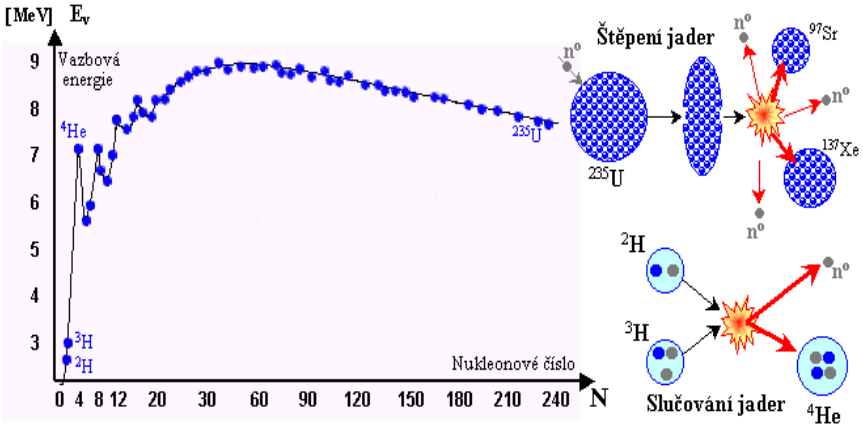
Stabilita atomových jader je odrazem jejich velmi složité vnitřní struktury. Zjednodušeně lze říci, že mezi vazebnou energií jader a jejich stabilitou je přímá souvislost. Jádra s největší vazebnou energií na nukleon obvykle nejeví tendenci k rozpadu nebo sdružení s jinými jádry. Atomy tvořené těmito jádry označujeme jako stabilní. Jinak je tomu u atomů, jejichž vazebná energie na nukleon není největší.

Významnou úlohu má u každého atomového jádra i poměr čísel N a Z. Stabilní přírodní nuklidy obsahují vyvážený a velmi málo proměnný počet neutronů a protonů. Pro většinu nuklidů platí, že N je 1,0 až 1,6 Z. U jader nejlehčích prvků má poměr N:Z hodnotu 1 :1. Se vzrůstajícím atomovým číslem prvku vzniká a stále stoupá přebytek neutronů nad protony, až u nejtěžších jader nabývá poměr N:Z hodnoty 3:2. Dalším faktorem, který rozhoduje o stabilitě atomového jádra je sudost a lichost čísel N a Z.

5.4 Vazebná energie

Při přesných měřeních bylo zjištěno, že klidová hmotnost atomového jádra všech známých nuklidů je menší, než součet hmotností jednotlivých nukleonů. Tento rozdíl nazývaný hmotnostní schodek (defekt), je možné vysvětlit pomocí Einsteinova vztahu mezi hmotností a energií. Mezi volnými nukleony působí přitažlivé jaderné síly. Při vzniku jádra z nukleonů je vykonána kladná práce, která se projeví úbytkem celkové energie soustavy. Stejnou energii je jádru třeba dodat, chceme-li soustavu opět rozložit na volné nukleony. Tuto energii nazýváme vazební energie jádra.

Vazebná energie na jeden nukleon jako funkce hmotnostního čísla



Jaderné vazebné energie jsou překvapivě velké

5.5 Základní modely jádra

5.5.1 Kapkový model

Tento model patří k nejjednodušším a nejstarším modelům jádra. Vychází pouze z makroskopických vlastností atomových jader a představuje si jádro jako kapku nestlačitelné kapaliny, která je tvořena protony a neutrony. Pro příklad molekuly v kapce kapaliny interagují jen se svými nejbližšími sousedy, stejně jako nukleony v jádře v důsledku krátkého dosahu jaderných sil (proto je celková vazebná energie zhruba úměrná počtu nukleonů).

Zatímco velikost přitažlivých sil, jimiž nukleony na sebe vzájemně působí, je značná, jejich dosah je tak malý, že každá částice uvnitř jádra interaguje jedině se svými nejbližšími sousedy. Pro pochopení některých vlastností jádra je užitečná analogie s kapalinou.

5.5.2 Slupkový model (hladinový model)

Existuje rozsáhlý experimentální materiál, podle něhož nukleony v jádru prvotně interagují s obecně silovým polem spíše než přímo jeden s druhým. Taková situace připomíná elektrony v atomu, kde jsou dovolené jen některé kvantové stavy a žádný stav nemůže být obsazen více než dvěma elektrony.

Slupkový model předpokládá na rozdíl od kapkového různé kvantové stavy jednotlivých nukleonů pohybujících se ve výsledném průměrném poli ostatních nukleonů v určitých hladinách (slupkách). Tyto hladiny jsou uspořádány podobně jako ve vnějším obalu atomu. V každé hladině může být jen určitý počet protonů a neutronů (1, 2, 3, 5…). Při plně obsazených hladinách je stabilita jádra největší. Tímto slupkový model dobře popisuje, proč je u některých izotopů poločas přeměny značně rozdílný i přesto, že se svými hmotnostními čísly příliš neliší.

Otázky:

- Význam jaderných sil.
- Stabilita atomových jader.
- Co je vazebná energie.
- Popište kapkový model jádra.
- Popište slupkový model jádra.

6 RADIOAKTIVITA

Klíčová slova: přeměna beta, přeměna alfa, přeměna gama, aktivita, fyzikální poločas rozpadu.

6.1 Příčina radioaktivity

Z více než dvou tisíc známých nuklidů je jen 266 stálých. Ostatní, ať se nacházejí v přírodě nebo vznikají jadernými reakcemi, se více nebo méně rychle samovolně přeměňují na jiný nuklid, tj. jsou radioaktivní. Empiricky bylo zjištěno, že jádra jsou stálá, tj. nepodléhají radioaktivní přeměně jen při určitém poměru mezi počtem neutronů a protonů (N/Z). U stabilních lehkých jader (Z <=20) je tento poměr roven jedné, případně o málo větší než jedna, u těžších jader se dále zvětšuje až do 1,52 u nejtěžšího stabilního nuklidu ^{209}Bi.

Vzniklé produkty přeměny vždy nesou určitou kinetickou energii.

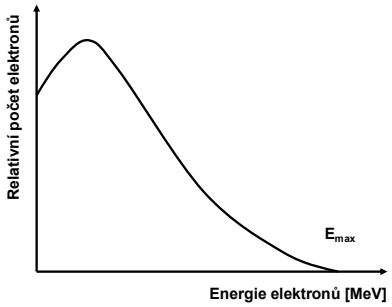
Tři skupiny radioaktivních přeměn

- přeměny, při nichž se mění Z při konstantním A (přeměny beta, pozitronová, elektronový záchyt)
- přeměny, při nichž se současně mění Z i A (přeměna alfa, emise nukleonů, samovolné štěpení)
- přeměny způsobené deexcitací jádra, při nichž se mění pouze energetický obsah jádra (okamžitá a zpožděná emise záření gama, vnitřní konverze).

6.2 Přeměna beta minus

Bylo zjištěno, že energie elektronů při přeměně beta daného nuklidu se mění spojitě od nuly do maximální hodnoty T_{max} charakteristické pro daný nuklid. Maximální energie odnášená elektronem při rozpadu je rovna energetickému ekvivalentu rozdílu hmot mateřského a dceřiného jádra. Energetické spektrum je spojité až do hodnoty maximální energie, která je pro daný nuklid charakteristická:

Energetické spektrum elektronů z rozpadu beta jádra



Přeměna beta nastává u jader, které mají nadbytek neutronů. Jako příklad můžeme uvést:

$$^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + \beta^{-} + \nu_{e}$$

Je-li nadbytek neutronů v jádru radioaktivního nuklidu větší, jedna přeměna nestačí ke vzniku stabilního jádra. Ke vzniku stabilního jádra je potřeba dvou nebo více následných přeměn beta minus:

6.3 Pozitronová přeměna

Vyskytuje se u radionuklidů připravených jadernými reakcemi. Je charakteristická pro jádra s nadbytkem protonů. Jeden z protonů se mění na neutron a z jádra je emitován pozitron a elektronové antineutrino.

6.4 Elektronový záchyt

Je to další typ přeměny, kterým se jádro zbavuje nadbytku protonů – proton v jádru se mění na neutron zachycením orbitálního elektronu ze slupky K nebo L (záchyt K, nebo L).

$$^{1}_{1}p + e^{-} = ^{1}_{0}n + \nu$$

Tento typ přeměny se vyskytuje jak u přírodních (^{40}K), tak uměle připravených radionuklidů.

Po elektronovém záchytu v atomu zůstává vakance ve slupce K nebo L, která se vzápětí zaplní přeskokem elektronu z vyššího orbitalu. Přitom se vyzáří fotony rentgenového záření charakteristického pro daný atom, které lze využít pro měřící účely.

6.5 Přeměna alfa

Protože přitažlivé síly mezi nukleony jsou krátkodosahové, je celková vazebná energie jádra přibližně úměrná jeho hmotovému číslu A, tj. počtu nukleonů v jádře. Odpudivé elektrostatické síly mezi protony však mají neomezený dosah a celková destruktivní energie v jádře je přibližně úměrná Z^2. Jádra obsahující více než 210 nukleonů jsou tak velká, že krátkodosahové jaderné síly, jež drží tato jádra pohromadě, sotva stačí vyrovnat vzájemné odpuzování jejich protonů. Rozpad alfa nastává u těchto jader jako prostředek zvyšování jejich stability zmenšováním jejich velikosti.

6.6 Samovolné štěpení

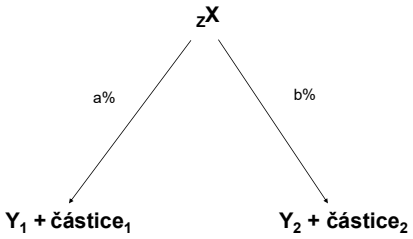
U mnoha nuklidů s vysokým počtem protonů a elipsoidním tvarem jádra existuje i další možnost snížení protonového čísla – rozštěpení na dvě menší jádra za uvolnění dvou nebo tří neutronů.

6.7 Větvené přeměny

Některá radioaktivní jádra splňují hmotnostní podmínky pro dva typy radioaktivní přeměny, tzn., že se mohou přeměňovat jedním či druhým způsobem, z nichž každý má určitou pravděpodobnost. U velkého souboru atomů

se to projeví příslušným procentickým zastoupením obou dějů. Jde o tzv. větvenou přeměnu. Každý z obou dějů probíhá svou vlastní rychlostí a celkový úbytek nuklidů je řízen rychlejším dějem.

Schéma větvené přeměny



Příklad:

alfa/beta rozpad – vyskytuje se u těžkých nuklidů, např. v radioaktivních řadách:

$$^{212}Bi \rightarrow alfa(66{,}3\%) + ^{208}Tl, beta(33{,}7\%) + ^{212}Po$$

Některé nuklidy podléhají i třem přeměnám.

6.8 Přeměna gama a vnitřní konverze

Jádro vzniklé radioaktivní přeměnou se velmi často vyskytuje v excitovaném stavu. Následuje pak reorganizace nukleonů do energeticky výhodnějšího stavu – deexcitace jádra. Nadbytečné energie se jádro zbavuje nejčastěji emisí jednoho nebo více fotonů elektromagnetického záření gama. Emitované fotony mají vždy určitou energii, záření je čárové (podobně jako u alfa záření).

6.9 Definice potřebných jednotek

6.9.1 Rychlost radioaktivní přeměny a aktivita

U radionuklidových zdrojů se množství radioaktivní látky charakterizuje aktivitou A; touto veličinou se rozumí poměr dN/dt, kde dN je střední počet samovolných jaderných přeměn z daného energetického stavu v určitém množství radioaktivní látky, k nimž dojde za časový interval dt (N označuje počet radioaktivních atomů, t označuje čas, d znamená nekonečně malý přírůstek uvažované veličiny).

Aktivitu tedy můžeme vyjádřit vztahem

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

Jednotkou aktivity je s-1, pro níž se používá název becquerel (Bq). Násobnými jednotkami jsou např. kBq, MBq, GBq. Vztáhneme-li aktivitu na jednotkovou hmotnost zářiče, dostaneme měrnou aktivitu (jednotka $Bq.kg^{-1}$). U plošných zdrojů se používá plošná aktivita (jednotka $Bq.m^{-2}$), u objemových zdrojů objemová aktivita ($Bq.m^{-3}$).

Aktivita A radionuklidu klesá exponenciálně s časem t podle vztahu

$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

kde

A_0 aktivita radionuklidu v čase t = 0

λ přeměnová konstanta

6.9.2 Fyzikální poločas radionuklidu

Lze snadno odvodit, že

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

kde

$T_{1/2}$ je fyzikální poločas radionuklidu
λ přeměnová konstanta

Za dobu jednoho fyzikálního poločasu rozpadu se rozpadne polovina radioaktivních nuklidů v radioaktivní látce. Za další fyzikální poločas přeměny se rozpadne polovina z původní poloviny radioaktivních nuklidů a tak dále.

6.9.3 Hmotnost radioaktivního nuklidu:

Radionuklid o hmotnosti m (g) obsahuje $N=mN_A/Ar$ atomů.

Pro hmotnost radionuklidu o aktivitě A platí vztah

$$m = \frac{A}{\lambda}\frac{A_r}{N_A}$$

kde

N_A Avogadrova konstanta = $6{,}023.10^{23}$ atomů/1 gmol
A_r relativní nuklidová hmotnost

6.10 Rozpadový zákon

Radioaktivní přeměna způsobuje, že radioaktivních atomů postupně v čase ubývá. Základní zákon radioaktivních přeměn říká, že za dostatečně krátký časový interval se přemění vždy stálá část z přítomného počtu (N) atomů radioaktivního nuklidu:

$$\frac{1}{N}\frac{dN}{dt} = \lambda$$

Tato stálá část se označuje jako přeměnová konstanta λ (rozměr s^{-1}). Tak například hodnota $\lambda = 1.10^{-3} s^{-1}$ znamená, že se v souboru atomů daného radionuklidu každou vteřinu přemění jedna tisícina z přítomného počtu radioaktivních atomů. Přeměnová konstanta je charakteristickou veličinou pro daný radionuklid.

Otázky:

- Jaká je hlavní příčina radioaktivity.
- Popište přeměnu beta.
- Popište přeměnu alfa.
- Popište přeměnu gama.
- Definujte co je to aktivita, jednotky.

- Co je fyzikální poločas rozpadu.

7 ZDROJE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Klíčová slova: kosmické záření, kosmogenní radionuklidy, přírodní radionuklidy, umělé zdroje radioaktivity.

7.1 Kosmické záření a kosmogenní radionuklidy

Do zemské atmosféry nepřetržitě vstupuje z vesmírného prostoru tok částic s vysokou energií. Toto záření se označuje jako primární složka kosmického záření. Skládá se z protonů (85%), jader helia (12,5%), a menšího množství elektronů a těžších jader prvků od lithia až po železo.

Jen malá část primární složky kosmického záření pronikne celou atmosférou až na zemský povrch. Větší část zaniká v atmosféře v tříštivých reakcích s atomovými jádry. Při tom vznikají protony, neutrony, lehká jádra (deuterium, tritium), a fotony. Tyto částice tvoří sekundární složku kosmického záření.

Kosmogenní radionuklidy vznikají v zemské atmosféře jadernými reakcemi. Nejvýznamnější je ^{14}C, vzniká převážně reakcí $^{14}N(n, p)^{14}C$, v menší míře z kyslíku reakcí $^{16}O(p, t)^{14}C$. V atmosféře se ^{14}C rychle oxiduje na $^{14}CO_2$, fotosyntézou se dostává do rostlin, odtud potravinovým řetězcem do lidského organizmu.

Méně významné je kosmogenní tritium, které v atmosféře vzniká reakcemi $^{16}O(n, t)^{14}N$, $^{16}O(p, t)^{14}C$, $^{14}N(p, t)^{12}N$ a $^{14}N(n, t)^{12}C$. V atmosféře se oxiduje na vodu. Objemová aktivita kosmogenního tritia ve srážkové vodě závisí na zeměpisné šířce. Největší je u pólů (5 Bq/l), nejmenší na rovníku (0,06 Bq/l), v našich zeměpisných šířkách je přibližně 0,6 Bq/l.

7.2 Přírodní radionuklidy v zemské kůře

Zemská kůra obsahuje asi 30 radionuklidů s poločasem rozpadu větším, než 10^9 roků. Významné jsou však jen tři: ^{232}Th a ^{238}U se svými produkty a izotop draslíku ^{40}K. Aktivita ^{40}K v zemské kůře je vyšší než aktivita všech ostatních přírodních radionuklidů dohromady.

Uran a thorium jsou v malých množstvích obsaženy v půdách a ve všech horninách. Uvádí se, že 1 kg zemské kůry obsahuje průměrně 6 mg uranu (70 Bq/kg) a 12 mg thoria (50 Bq/kg).

7.3 Umělé zdroje radioaktivity

Existují v podstatě tři zdroje umělého radioaktivního záření:

- Zkoušky jaderných zbraní
- Lékařské aplikace
- Využití jaderné energie ve vědě a technice.

Otázky:

- Podstata a původ kosmického záření.
- Co jsou kosmogenní radionuklidy.
- Přírodní radionuklidy a jejich výskyt.
- Umělé zdroje radioaktivity a při jakých činnostech vznikají.

8 JADERNÉ REAKCE (OBECNÉ ZÁKONITOSTI)

Klíčová slova: energie jaderných reakcí, typy jaderných reakcí.

8.1 Potřebné definice

Vhodný způsob vyjádření pravděpodobnosti, že dopadající částice bude jistým způsobem interagovat s částicemi terče, představuje pojem účinného průřezu. Předpokládejme, že máme terčík z nějakého materiálu o ploše A o tloušťce dx. Obsahuje-li materiál n atomů na jednotkový objem, je v terčíku celkem nAdx jader. Každé jádro daného materiálu má pro nějakou konkrétní interakci účinný průřez σ, takže úhrnný účinný průřez všech jader v terčíku je nAσdx. Je-li v bombardujícím svazku N dopadajících částic, je počet dN těchto částic, jež interagují s jádry v terčíku, dán vztahem:

$$-\frac{dN}{N} = \frac{nA\sigma dx}{A} = n\sigma dx$$

Pro terčík konečné tloušťky platí:

$$N = N_0 \exp(-n\sigma x)$$

Počet částic, které v terčíku interagovaly je:

$$N_0 - N = N_0(1 - \exp(-n\sigma x))$$

8.2 Typy jaderných reakcí

Jaderné procesy jsou děje probíhající při srážkách ionizujících částic s atomovými jádry. Mohou je působit jak přímo, tak i nepřímo ionizující částice všech druhů, fotony počínaje a těžkými ionty konče. Největší význam mají jaderná reakce, které vedou k přeměně jader látky, se kterou se ionizující záření střetává.

Rozmanitost jaderných reakcí je taková, že není možné napsat jejich obecné vyjádření. Nejčastější schéma jaderné reakce je následující

$$A + a \rightarrow B + b + Q$$

kde

A	libovolné terčové jádro
a	částice, která s ním vstupuje do interakce
B	jádro vzniklé jako výsledek interakce
b	částice emitovaná při reakci
Q	energie reakce

Navíc i v mezích obecného schématu vyjádřeného uvedenými rovnicemi dochází běžně k tomu, že jedna a tatáž bombardující částice a vyvolá na stejném terčovém jádru A řadu různých reakcí. Relativní zastoupení jednotlivých procesů je závislé na energii bombardující částice.

8.3 Energie jaderné reakce

Energetické zabarvení jaderné reakce Q závisí na tom, zda produkty reakce mají v součtu menší nebo větší klidovou hmotnost než interagující částice. Pro jadernou reakci

$$X_1 + X_2 \Rightarrow X_3 + X_4$$

platí:

$$\Delta m = m(X_3) + m(X_4) - \left[m(X_1 + m(X_2) \right]$$
$$Q = -931,5\Delta m \quad \left[MeV \right]$$

Je-li $\Delta m < 0$, je $Q > 0$ a reakce je exoergická,

je-li $\Delta m > 0$, je $q < 0$ a reakce je endoergická. Taková reakce vyžaduje dodání energie. Tu musí přinést částici ve formě své kinetické energie.

Otázky:

- Jaké jsou hlavní typy jaderných reakcí.
- Energetické zabarvení jaderné reakce a jeho význam.

9 ŠTĚPNÉ REAKCE A JEJICH PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ

Klíčová slova: štěpné reakce, řetězové reakce, využití štěpných reakcí.

Průmyslové využití energie štěpení jádra je založeno na štěpné jaderné reakci. Obecně lze mnoho jader štěpit různými částicemi, mají-li dostatečnou energii. Pro jadernou energetiku má však význam pouze štěpení nuklidů ^{235}U (jeho obsah v uranu je 0,722%) a ^{239}Pu účinkem neutronů:

$$^{235}U\,(nebo\,^{239}Pu) + {}^{1}_{0}n \rightarrow \left[{}^{A+1}X \right]^{SL} \rightarrow {}^{A1}_{Z1}Y_1 + {}^{A2}_{Z2}Y_2 + i\,{}^{1}_{0}n + Q$$

Pravděpodobnost reakce (účinný průřez) závisí na energii neutronů. Ta je nejvyšší při malé energii. Prvním stádiem reakce je záchyt neutronu a vznik složeného jádra. Složené jádro, jak již víme, je vždy vysoce excitované a často má více možností rozpadu.

Nejpravděpodobnější je nesymetrické štěpení, kdy z jader Y_1 a Y_2 je jedno lehčí a jedno těžší. Ve skupině lehčích štěpných produktů nalezneme např. ^{90}Sr, ^{91}Y, ^{95}Zr, ^{103}Ru, ve skupině těžších produktů ^{133}Xe, ^{137}Cs, ^{140}Ba, ^{144}Ce.

Při každém štěpení se uvolňuje několik neutronů, nejčastěji dva nebo tři. To má pro průmyslové získávání energie zásadní význam. Tyto neutrony se označují jako okamžité, nebo štěpné.

Skutečnost, že při štěpení jader ^{235}U resp. ^{239}Pu vzniká více neutronů, než se na štěpení spotřebuje, umožňuje realizaci tzv. řetězové reakce. Řetězová reakce může v zásadě probíhat dvojím způsobem. Pokud se v soustavě ponechají všechny neutrony, jejich počet časem velmi rychle vzroste a během okamžiku se uvolní veškerá energie. Tato situace nastává v explosivních štěpných procesech. V jaderném reaktoru probíhá řetězová reakce řízeně. Je ustaven takový stav, že ze vznikajících neutronů lze k dalšímu štěpení využit jen jeden.

K vyjádření podmínky pro udržení řetězové reakce slouží multiplikační faktor k, který je definován jako průměrný počet neutronů existujících na konci každé generace, které připadají na jeden neutron generace předcházející. Nutná podmínka pro udržení řetězové reakce je k=1. Soustava, která vyhovuje tomuto kritériu, se nazývá kritická. Je-li k<1, je soustava podkritická, při k>1 je nadkritická. Pro řízení reaktoru má zásadní význam existence zpožděných neutronů.

Otázky:

- Co je to štěpná reakce a jak probíhá.
- Co je to řetězová reakce a její praktický význam.

10 JADERNÁ SYNTÉZA A JEJÍ PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ

Klíčová slova: syntéza jader, využití termonukleární energie.

Při štěpení těžkých jader (^{235}U, ^{239}Pu) se energie uvolňuje, protože vznikají jádra s větší střední vazebnou energií nukleonu, tj. jádra se stabilnější jadernou strukturou. Podobně lze očekávat zisk značné energie v takových vzájemných reakcích lehkých jader, při kterých vzniká jádro ^{4}H (to jsou ^{1}H, ^{2}H, ^{3}H, ^{3}He, ^{6}Li, ^{7}Li). Je tomu právě proto, že mezi lehkými jádry má právě toto jádro obzvlášť vysokou střední vazebnou energii a tedy nejstabilnější jadernou strukturu. Takových reakcí lehkých jader je známo více než třicet. Pro praktické využití však zatím přichází v úvahu jen reakce mezi deuteriem a tritiem. (reakce DT):

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \Rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 17,58 \quad MeV $$

Ze všech reakcí probíhá nejsnadněji a uvolňuje se při ní značné množství energie. Energetický potenciál této reakce je obrovský: reakcí jednoho gramu směsi D a T (1:1) se uvolní stejné množství energie jako při spálení 8 tun ropy. Více energie se uvolňuje v reakcích ^{3}H(d, p)^{4}He (18,4 MeV) a ^{6}Li(d,α)^{4}He (22,4 MeV), které však mají mnohem menší účinné průřezy.

Reakce DT a podobné reakce se běžně uskutečňují v laboratorních podmínkách pomocí urychlovačů částic. Pro výrobu energie je však tento způsob zatím nepoužitelný, protože v urychlovačích je výtěžek reakce nízký a množství uvolněné energie mizivé.

Aby ale bylo možné termonukleární energii získávat plynule a ve velkém množství, je nutné udržet horké plazma v určitém omezeném prostoru. Po tu dobu současně plazma nesmí přijít do styku s okolními konstrukčními materiály reaktoru, protože by se plazma okamžitě ochladilo.

Otázky:

- Podmínky vzniku syntézy jader.
- Možné způsoby využití jaderné syntézy k výrobě elektrické energie.

11 PRINCIPY DETEKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Klíčová slova: kalorimetrie, filmová dozimetrie, detekce s využitím ionizačních vlastností záření, polovodičový a scintilační princip detekce, detekce neutronů.

11.1 Kalorimetrie

Pomocí kalorimetrů lze měřit tepelné efekty různých fyzikálních, chemických nebo biologických pochodů. V oblasti ionizujícího záření je známo, že téměř všechna kinetická energie ionizujícího záření částic se přemění v teplo.

Podstata stanovení aktivity pomocí kalorimetrů spočívá v tom, že energie, uvolněná při radioaktivním rozpadu, se plně nebo částečně pohltí v absorbátoru kalorimetru. Na základě měření tepelné energie Q_T lze potom určit aktivitu. Často se místo tepelné energie měří tepelný výkon.

Kalorimetrické metody se málo rozšířily a to zejména pro jejich nízkou citlivost. Metoda umožňuje měření aktivity radionuklidů o aktivitě vyšší než 10 MBq.

11.2 Fotografické metody

11.2.1 Filmová dozimetrie

Nejjednodušším využitím fotografické detekce ionizujícího záření jsou filmové dozimetry. Základem filmového dozimetru je fotografický film, světlotěsně zabalené do černého papíru. Ionizující záření prochází obalem filmu a

ve fotoemulzi vytváří latentní obraz, který se vyvoláním zviditelní. Optická hustota zčernání filmu, kterou lze vyhodnocovat fotometricky, je pak mírou integrálního množství záření, které se ve vrstvě filmu absorbovalo během expozice; indikuje tím i dávku záření.

11.2.2 Jaderné fotoemulze pro detekci stop částic

Pro studium vlastností částic je užitečné zachytit fotograficky dráhu jejich pohybu v látce. Pro detekci stop částic je na film nebo skleněnou destičku nanesena fotografická emulze o relativně velké tloušťce (cca 0,1-1 mm) a vysokém obsahu halogenidu stříbra v želatině. Vnikne-li do této emulze rychlá nabitá částice, zanechává podél dráhy svého pohybu ionizační stopu.

11.3 Termoluminiscence

Ozáření dielektrické pevné látky ionizujícím zářením může vést k zachycení uvolněných elektronů nebo děr v lokálních poruchách mřížky, které mají povahu elektronových nebo děrových pastí. Pokud je hloubka těchto pastí (tj. energetický rozdíl mezi vodivostním pásmem a pastí) dostatečná, zachycené nosiče náboje v nich setrvávají po takovou dobu, dokud není nějakým vnějším působením zvýšena pravděpodobnost jejich úniku. Jednou z možností jak jim dodat dostatečnou energii k opuštění pasti, je ohřev dané látky.

11.4 Ionizační princip detekce

Využívá se ionizačních účinků záření v plynech. Vnikne-li částice záření do detektoru, ionizuje podél své dráhy plynovou náplň a vzniká mnoho kladných iontů a elektronů. Ty se rychle pohybují k příslušné elektrodě a plynová náplň se na okamžik stane vodivá. Každá částice tak vyvolá krátký proudový impuls. Ten je ještě v samotném detektoru zesílen, protože nesymetrická konstrukce elektrod vytváří v blízkosti anody velmi intenzivní elektrické pole. V něm se elektrony urychlí natolik, že samy vyvolávají další ionizaci plynu.

11.5 Polovodičový princip detekce

Funkce polovodičových detektorů je založena na elektrických vlastnostech p/n rozhraní. Detektor je tvořen křemíkem nebo germaniem typu p nebo n, na němž je vytvořena vrstva polovodivého materiálu opačného typu. Vloží-li se na detektor vysoké napětí tak, že záporná polarita je připojena k materiálu p a kladná k n, migrují volné nosiče náboje vlivem elektrického proudu k příslušným elektrodám. Na rozhraní p/n tím vzniká určitý prostor s vysokým odporem, protože je v něm velmi malá koncentrace volných nosičů náboje. Vnikne-li částice záření do citlivé oblasti, vytvoří ionizací podél své dráhy páry elektron-díra. Takto vzniklé nosiče migrují k příslušným elektrodám, což se projeví, podobně jako u plynových detektorů, vznikem krátkého proudového impulsu, který se opět převádí na puls napěťový.

11.6 Scintilační princip detekce

Scintilační detektory ionizujícího záření jsou založeny na vlastnosti některých látek reagovat světelnými záblesky (scintilacemi) na pohlcení kvant ionizujícího záření. Ty se pak elektronicky registrují pomocí fotonásobičů. Velikost výstupního impulzu je přímo úměrná energii dopadajícího záření. Látky vykazující takovou vlastnost se nazývají scintilátory. Nejstarším používaným scintilátorem je sirník zinečnatý aktivovaný stříbrem ZnS(Ag), který byl používán do stínítek skiaskopických rentgenových přístrojů. Pro účely detekce záření se však nejčastěji používá jodid sodný aktivovaný thaliem – NaI(Tl), ve formě monokrystalu.

Přesné změření aktivity beta-radioaktivního preparátu, zvláště pak nízkoenergetického záření beta, je velice obtížné. V tomto případě se využívá metoda kapalných scintilátorů. Při práci s kapalnými scintilátory se měřená radioaktivní látka přidává přímo do roztoku scintilátoru. Energie záření beta je předávána nejprve molekulám rozpouštědla. Excitační energie těchto molekul se pak přenáší na molekuly vlastní scintilační látky, které při deexcitaci emitují fotony viditelného světla. Úlohu registrace a zesílení signálu pak opět přebírá fotonásobič.

11.7 Metody detekce neutronů

Pro detekci neutronů se využívají především následující metody:

- Metoda odražených jader: využívá srážek (pružných interakcí) rychlých neutronů s lehkými jádry, především jádry vodíku (protony), které jsou při srážkách urychlovány a vyvolávají pak v látce ionizaci – mohou být pak detekovány obvyklými detektory.

- Metoda jaderných reakcí: neutrony při vstupu do určitých jader vyvolávají jaderné reakce, při nichž je emitováno ionizující záření, jež se detekuje. Nejčastěji se používají reakce: ^{10}B(n, alfa)^{7}Li, ^{4}He(n, p)^{3}H, ^{6}Li(n, alfa)^{3}H, ^{113}Cd(n, gama)^{114}Cd. Při praktické realizaci se příslušné "terčíkové" materiály implantují přímo do detektorů, aby vznikající sekundární ionizující záření mohlo být bezprostředně detekováno.

- Metoda štěpení: využívá toho, že neutrony způsobují při vstupu do těžkých jader (urany a transurany) jejich rozštěpení, přičemž vznikají silně ionizující fragmenty. Štěpný materiál se např. nanáší v tenké vrstvě na elektrody ionizační komory.

- Metoda aktivace: je založena na tom, že zachycení neutronu neaktivním jádrem může vést ke vzniku radioaktivního jádra. Toto jádro pak při své radioaktivní přeměně vysílá ionizující záření (beta a gama, které se detekuje).

Otázky:

- Kalorimetrické metody.
- Princip detekce pomocí filmů.
- Ionizační metody.
- Polovodičové a scintilační metody detekce.
- Způsoby detekce neutronů.

12 VÝROBA A VYUŽITÍ RADIONUKLIDŮ

Klíčová slova: kinetika radioaktivní přeměny, radioaktivní rovnováha, generátory radionuklidů.

12.1 Kinetika hromadění radioaktivního produktu radioaktivní přeměny

Uvažujme, že nuklid Y vzniká přeměnou mateřského nuklidu X a sám je radioaktivní.

Platí:

$$\frac{dN_Y}{dt} = \lambda_X N_X - \lambda_Y N_Y$$

řešením této rovnice dostáváme:

$$N_Y = N_{X,0} \frac{\lambda_X}{\lambda_Y - \lambda_X} (e^{-\lambda_X t} - e^{--\lambda_Y t})$$

12.2 Trvalá radioaktivní rovnováha

Jestli je ve dvojici radioaktivních nuklidů X (mateřský) a Y (dceřiný) poločas přeměny velmi velký a současně mnohem větší než poločas nuklidu dceřiného, lze veličinu $N_{X,0}$ pokládat v reálném čase za konstantní. Pro tento případ platí:

$$A_Y = A_{X,0}(1 - e^{-\lambda_Y t})$$

Sledujeme-li dvojici nuklidů X, Y dostatečně dlouho, pak platí:

$$A_Y = A_{X,0}$$

V přírodě jsou příkladem trvalé radioaktivní rovnováhy radioaktivní řady.

12.3 Přechodná radioaktivní rovnováha

Jestliže mateřský nuklid X má sice větší poločas přeměny než dceřiný nuklid Y, avšak oba poločasy jsou srovnatelné, je situace jiná. Lze ji popsat rovnicí:

$$A_Y = A_X \frac{\lambda_Y}{\lambda_Y - \lambda_X}$$

Tj. poměr A_Y/A_X zůstává konstantní. Je to stav přechodné radioaktivní rovnováhy. Hodnota A_Y po dosažení maxima nezůstává stálá, ale klesá, a to rychlostí, která je řízena pomalejší přeměnou nuklidu X.

12.4 Generátory radioaktivních nuklidů

Principu trvalé a přechodné radioaktivní rovnováhy lze využít k jednoduchému získání nuklidů s krátkým poločasem přeměny v zařízeních, které se nazývají radionuklidový generátor.

Příklady:

^{99}Mo (67 h)	→	^{99m}Tc(5,9 h)	→	Al_2O_3/NaCl
^{68}Ge (288 dní)	→	^{68}Ga (68 min)	→	SnO_2/HCl
^{82}Sr (25 dní)	→	^{82}Rb (78 s)	→	katex/NaCl
^{113}Sn (115 dní)	→	^{113m}In (1,7 h)	→	ZrO_2/zředěná kyselina

Prakticky významná je skutečnost, že dceřiný radionuklid lze získávat opakovaně, protože po eluci se začíná na koloně znovu hromadit.

12.5 Průmyslová výroba radioaktivních nuklidů

Nejčastěji ozařováním terče neutrony v jaderném reaktoru. Toky neutronů tam jsou 10^{12} – 10^{13} neutronů/s/cm^2. Terčový materiál musí být odolný vůči teplu a vysokým dávkám záření a pokud možno i chemicky jednoduchý, aby v terči neprobíhaly jaderné reakce s dalšími prvky. Nejvhodnější jsou kovy a oxidy. Terčový materiál se zatavuje do křemenných nebo polyetylenových ampulí, aby se při ozařování mechanicky nerozptyloval. Ampule se ještě vkládají do hliníkových pouzder.

Otázky:

- Kinetika radioaktivní přeměny.
- Generátory radionuklidů.
- Výroba radionuklidů v jaderném reaktoru.

13 NĚKTERÉ DALŠÍ APLIKACE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Klíčová slova: datování, ozařování potravin, aktivační analýza.

13.1 Datování pomocí radioaktivity

13.1.1 Datování pomocí kosmogenních radionuklidů

Nejznámější z těchto metod je uhlíková metoda. Je založena na časové změně aktivity izotopu ^{14}C. Tento izotop se neustále tvoří v horních vrstvách atmosféry jadernou reakcí $^{14}N(n, p)^{14}C$. působením neutronů z kosmického záření. Atomy ^{14}C se během minut až hodin oxidují na CO_2. Ten se mísí s oxidem uhličitým v atmosféře a spolu s ním je přijímán rostlinami a následně potravním řetězcem dalšími organizmy a jednak se rozpouští ve vodách oceánů. Radioaktivní přeměnou beta se množství ^{14}C také snižuje a výsledkem je rovnováha Tak v jednom gramu uhlíku živé hmoty nastává 15,3 přeměn za minutu ^{14}C. Od okamžiku, kdy nějaký živý organizmus v minulosti odumřel, další ^{14}C již nepřijímal a jeho aktivita začala klesat. Tak lze určit stáří materiálu organického původu (uhlíky z ohniště, textil, kůže …).

13.1.2 Jaderná geochronologie – určování stáří nerostů

Jaderná geochronologie využívá jevu hromadění radionuklidů v krystalech. Předpokladem je, aby nerost obsahoval alespoň malé množství radioaktivního nuklidu s dlouhým poločasem přeměny., srovnatelným se stářím nerostu. Od okamžiku krystalizace nerostu nemůže produkt přeměny z krystalické fáze unikat. Stanovíme-li v nerostu současný obsah obou nuklidů, lze určit stáří nerostu z rovnice

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{N_Y}{N_X} + 1\right)$$

kde

N_Y počet atomů vytvořených po uplynutí doby t
N_X počet atomů původního nuklidu

Nejpoužívanější je metoda draslík-argonová, která využívá přeměny ^{40}K (T=1,27.1010 roků) na ^{40}Ar. Draslík je v nerostech velmi rozšířen, obsah ^{40}K se určí z celkového obsahu draslíku a procentického obsahu ^{40}K. který je 0,012%. Pro stanovení obsahu ^{40}Ar je nutno vzorek zahřát na teplotu 2 000 °C aby se atomy ^{40}Ar mohly z krystalické mřížky uvolnit a obsah ^{40}Ar se stanoví hmotnostní spektrometrií. Metoda dává pro stáří pozemských minerálů hodnoty $(2 - 3).10^9$ roků, pro měsíční horniny a kamenné meteority hodnoty kolem $4,5.10^9$ roků.

13.2 Ozařování potravin

Hlavním důvodem použití ionizujícího záření k ošetření potravin je dosažení takových parametrů produktu, které jsou jiným způsobem jinak obtížně zajistitelné, jako například snížení počtu patogenních organizmů, omezení kažení, redukci ztrát vznikajících předčasným zráním, rašením nebo klíčením, k dezinfekci a dezinsekci.

Není dovoleno používat ozařování potravin jako náhražku jinak zajistitelných hygienických podmínek. Legislativa přesně říká, jaké druhy potravin se smí ozařovat a jaké dávky záření mohou být použity.

Ošetření potravin a surovin ionizujícím zářením nesmí být použito v kombinaci s chemickým ošetřením, které má stejný účel.

Dávka ionizujícího záření musí být omezena na nejnižší nutnou míru, která je přiměřená ukazateli, pro který je potravina nebo surovina ošetřena ozářením, uvedenému v příloze k vyhlášce.

13.3 Sterilizace

Sterilizace materiálů

- zdravotnický materiál, injekční stříkačky, nástroje, protézy, obvazy atd. se ozářením zbaví bacilů a jiných škodlivých mikroorganismů

- výhoda: může se sterilizovat jednak materiál už neprodyšně uzavřený (záření pronikne obalem), jednak se mohou sterilizovat materiály, které nelze ošetřit klasicky, např. horkým vzduchem nebo vyvařením.

13.4 Aktivační analýza

Neutronová aktivační analýza je vysoce citlivá metoda analýzy chemického složení látek, založená na záchytu neutronů v jádrech zkoumané látky, čímž vznikají radioaktivní jádra. Ozářením zkoumaného vzorku neutrony tak dochází ke vzniku radionuklidů (k "aktivaci" vzorku), načež spektrometrickou analýzou energií a intenzit emitovaného záření (především gama) aktivovaného vzorku lze stanovit příslušný radionuklid a zpětně "dohledat" i jemu odpovídající (neaktivní) výchozí nuklid obsažený ve vzorku; s použitím vhodné kalibrace též jeho obsah (koncentraci) ve zkoumaném materiálu.

Otázky:

- Princip datování pomocí radioaktivity.

- Způsoby ozařování potravin, význam a rizika.

- Metody aktivační analýzy.

14 LITERATURA

14.1 Knižní literatura

[lit1.] BEISER, A.: *Úvod do moderní fyziky,* Academia, Praha, 1975

[lit2.] HÁLA, J.: *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie,* Konvoj, Brno 1998

[lit3.] ŠEDA, J. a kol.: *Dozimetrie ionizujícího záření,* SNTL, Praha 1983

[lit4.] ŠTOLL, I.: *Fyzika mikrosvěta,* Prometheus, Praha 2002

14.2 Internetové odkazy

[int1.] http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

[int2.] http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html

[int3.] http://scienceworld.wolfram.com/

[int4.] http://theory.uwinnipeg.ca/physics/index.html

[int5.] http://vega.fjfi.cvut.cz/

[int6.] http://www.citycollegiate.com/index.htm

[int7.] http://www.shodor.org/UNChem/basic/atom/

[int8.] http://www.sweb.cz/AstroNuklFyzika/Fyzika-NuklMed.htm