

Obecný přehled radioaktivního záření a jeho zdrojů

Ve světě se můžeme setkat se čtyřmi základními druhy záření (α , β , γ a neutronové záření), které také můžeme rozdělit do dvou skupin: záření nabitých částic a neutrální záření. Mezi záření nabitých částic patří záření rychlých elektronů resp. pozitronů a záření těžkých nabitých částic. Záření, které není tvořeno nosiči elektrického náboje, můžeme rozdělit na elektromagnetické záření a záření neutronů. Rychlé elektrony resp. pozitrony vznikají při tzv. beta rozpadu atomového jádra, kdy v případě rozpadu β^- dojde k zachování nukleonového čísla, ale protonové číslo se zvýší o 1, změna náboje jádra je vyzářena v podobě elektronu. Naopak v případě β^+ rozpadu se rozpadne proton na neutron a pozitron, nukleonové číslo zůstane opět stejné, ale protonové číslo se zmenší o 1. Pozitron je vyzářen ven z jádra. Toto záření se nazývá zářením β . Se zářením těžkých nabitých částic se v přírodě nejčastěji setkáme jako se zářením α , při kterém je z jádra emitována tzv. α -částice, která je tvořena jádrem atomu helia tj. dvěma protony a dvěma neutrony. Dochází k němu při α -rozpadu, kdy se sníží nukleonové číslo původního atomu o 4 a protonové o 2. Základním rozdílem v účincích záření nabitých částic oproti neutrálnímu záření je interakce pomocí Coulombovských sil, viz kap. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [26].

Při štěpení jádra na 2 atomy lehčích prvků, které se nazývají štěpnými produkty, často dochází k emisi neutronů. Neutronové záření dále rozlišujeme na pomalé a rychlé neutrony. Mezi záření pomalých neutronů řadíme ty s energií od 10 eV do 20 MeV. Někdy jsou tyto neutrony označovány také jako tepelné. Jako rychlé neutrony jsou označovány neutrony s vyšší energií [26]. Posledním typem záření je elektromagnetické, které je tvořeno fotony v podobě elektromagnetických vln. Jako ionizující záření je považováno elektromagnetické záření s vlnovou délkou menší než 1 nm, čemuž odpovídá RTG záření, které bývá také nazýváno jako paprsky X. Elektromagnetické vlny s vlnovou délkou menší než 10^{-11} m nejčastěji řadíme k záření gamma, viz níže [30].

C.1 Základní pojmy používané při nakládání se zdroji ionizujícího záření

Radioaktivitou se rozumí jev, při kterém dochází k samovolnému rozpadu jader atomů nebo změně jejich vnitřního energetického stavu. Tyto rozpady se nazývají radioaktivní přeměnou a jádra vykazující tyto přeměny se nazývají radionuklidy [C1]. Radionuklidový zdroj záření je materiál nebo jeho vzorek, který je složen z většího množství radionuklidů. Základní veličinou, která popisuje vlastnosti radionuklidů ve zdroji, je aktivita. Ta je definována jako počet radioaktivních přeměn za jednotku času **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a je popsána vztahem (1). Jednotkou aktivity je 1 Becquerel [Bq], který je roven právě jedné radioaktivní přeměně za sekundu.

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda t, \quad (\text{C.1})$$

kde A je aktivita zdroje záření (zářiče), N je počet radionuklidů a λ je rozpadová konstanta [C1], což je tabulková hodnota pro jednotlivé radioaktivní izotopy jednotlivých prvků a vyjadřuje exponent v časové závislosti počtu původních jader radioizotopu:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (\text{C.2})$$

kde $N(t)$ je okamžitý počet radionuklidů původního izotopu a N_0 je počáteční počet radioaktivních jader. Protože hodnota aktivity je závislá na počtu radionuklidů, který se v čase následkem radioaktivních přeměn mění, resp. ubývá, byl odvozen parametr, který zůstává stejný po celou dobu využívání konkrétního zářiče. Tento parametr se nazývá poločas rozpadu a udává dobu, za kterou se rozpadne právě polovina jader původního radioizotopu. Vzájemný vztah mezi poločasem rozpadu a rozpadovou konstantou lze po dosazení odvodit ze vztahu (2) následovně [C1]:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad (\text{C.3})$$

Po zlogaritmování a následné úpravě dostaneme:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}, \quad (\text{C.4})$$

Dalším pojmem, který se vyskytuje v částicové fyzice, je izotop resp. radioizotop. Izotop je stav prvku s určitým počtem nukleonů, počet protonů je u všech izotopů daného prvku stejný. Radioizotop je izotop prvku, jehož jádra lze nazvat radionuklidy. Prvky, které jsou uvedeny v periodické soustavě prvků jako stabilní, mohou mít také variantu jako radioizotop.

Další veličinou, která charakterizuje radioaktivní záření, je energie. Ačkoliv fyzikální jednotkou energie je 1 Joule [J], což je odvozená jednotka, která lze vyjádřit pomocí základních jednotek [$\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$], ve spojitosti s částicovou fyzikou a radioaktivním zářením se nejčastěji setkáme s jednotkou elektronvolt [eV]. Hlavním důvodem pro použití této jednotky bylo to, že hodnota 1 Joule byla pro potřeby částicové fyziky příliš vysoká. Vztah mezi těmito jednotkami je dán následovně:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad (\text{C.5})$$

1 eV je definován jako kinetická energie, kterou získá elektron urychlený rozdílem elektrického potenciálu o jeden Volt. Energie elektromagnetického záření lze vypočítat pomocí vztahu:

$$E = h\nu, \quad (\text{C.6})$$

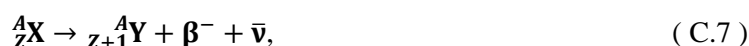
kde h je Planckova konstanta a ν je frekvence.

C.2 Stručný přehled zdrojů záření

Tato kapitola popisuje zdroje záření popsané v [26], včetně rovnic.

C.2.1 Zdroje rychlých neutronů

Nejvýznamnějším zdrojem rychlých elektronů v přírodě je **β -rozpad**. Při něm je elektron uvolněn přímo z jádra rozpadem neutronu na proton, elektron a antineutrino, což platí v případě rozpadu β^- . V opačném případě tedy při β^+ rozpadu se proton rozpadne na neutron, pozitron a neutrino. Tyto rozpady lze zapsat pomocí vztahů (7) a (8).



kde X reprezentuje prvek před rozpadem jeho izotopu a Y reprezentuje prvek, který vznikl jaderným rozpadem. Energetické spektrum β -částic je spojité až k maximální hodnotě dané původním radionuklidem.

Dalším zdrojem elektronů je tzv. **vnitřní konverze**, při které dochází k neradiačnímu přenesení energie z emitovaných fotonů γ -záření na elektrony v atomovém obalu. Na jejich místa se dostanou elektrony z vyšších vrstev obalu. Tyto elektrony jsou mono-energetické a jejich energie je dána vrstvou, ze které byly vyraženy. Energii vyražených elektronů lze stanovit pomocí vztahu:

$$E_{e^-} = E_{ex} - E_{vaz}, \quad (\text{C.9})$$

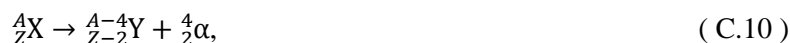
kde E_{ex} představuje energii uvolněnou při excitaci jádra. Tato energie se přímo přenesou do jednoho z orbitalů, odkud se uvolní elektron, jehož výsledná energie je menší o jeho vazebnou energii (E_{vaz}).

Posledním přírodním zdrojem rychlých elektronů jsou tzv. **Augerovy elektrony**. Tyto elektrony jsou emitovány, pokud RTG záření, které vznikne při rekonstrukci atomového obalu, předá energii elektronům z atomového obalu a ty jsou emitovány.

K další emisi elektronů dochází při interakcích, viz kap. 3. Dále se můžeme setkat s umělými zdroji elektronů, kterými jsou urychlovače částic resp. elektronů. Energetická spektra urychlených elektronů jsou dána parametry urychlovačů. Například urychlené elektrony vyvedené z urychlovače Mikrotron MT25 jsou striktně monoenergetické, což je dáno fyzikálními vlastnostmi urychlovače [C3].

C.2.2 Zdroje těžkých nabitých částic

Nejčastěji dochází k emitování těžkých nabitých částic v přírodě při **α -rozpadu**. Při tomto rozpadu je z jádra atomu emitována tzv. α -částice, která je shodná s jádrem atomu helia. Alfa rozpad popisuje následující vztah:



kde X a Y představují, stejně jako ve vztazích 7 a 8, prvek jehož izotop se rozpadl na alfa částici a nuklid výsledného prvku. Alfa zářiče se typicky využívají pro kalibraci a testování detektorů těžkých iontů.

Dalšími zdroji těžkých nabitých částic jsou nuklidy, u kterých dochází ke **spontánnímu štěpení**. Vzniklé ionty jsou typicky větší než částice α a bývají označovány za štěpné fragmenty. Ke spontánnímu štěpení dochází u prvků s vysokým atomovým číslem, typicky u prvků pocházejících původně ze štěpení uranu. Tyto prvky tvoří tzv. uranovou řadu a nazývají se transurany. Jako příklad lze uvést izotop prvku Cf-252.

C.2.3 Zdroje elektromagnetického (ionizujícího) záření

Fotonové ionizující záření se rozděluje podle energie, ale také i podle místa odkud vylétá. Pokud je původem elektromagnetického záření jádro atomu, můžeme hovořit o **záření γ** . Toto záření může následovat po β -rozpadu jádra. Po rozpadu izotopu tímto způsobem je nově vzniklé jádro atomu excitováno a při jeho de-excitaci dojde k uvolnění energie z jádra prostřednictvím fotonu γ . Toto záření je monoenergetické. Dále také může být vybuzeno γ -záření jako následek jaderné reakce. Při reakci jádra atomu s α -částicí se uvolní neutron a vzniklý nuklid je excitován. Následně při jeho de-excitaci dojde k uvolnění fotonu γ . Obdobným způsobem může být vybuzeno záření gamma i po reakci s neutronem nebo vysokoenergetickým fotonovým zářením. Na základě těchto reakcí jsou založeny prvkové analýzy, které se nazývají Neutronová aktivační analýza [C3] a Fotonová aktivační analýza [C4].

Další typ fotonového záření vzniká při anihilaci pozitronů vzniklých při rozpadu β^+ a nazývá se **anihilační záření**. Při β^+ rozpadu je z jádra atomu emitován pozitron, který následně reaguje s elektronem v elektronovém obalu. Tato reakce se nazývá anihilace a dochází při ní k přeměně elektronu a pozitronu na energii, která je uvolněna v podobě 2 fotonů s energií 511 keV, které mají opačný směr. Energie 511 keV odpovídá klidové energii elektronu i pozitronu. Tento jev se využívá např. v pozitronové emisní tomografii.

Při interakcích elektronů s hmotou typicky s prvky s vysokým atomovým číslem vzniká k **brzdnému záření**, které i když je emitované monoenergetickými elektrony, má spojité spektrum, které je zobrazeno na obr. 2, viz kap. 3.

Pokud je narušena normální konfigurace elektronů v orbitalech, jedná se o tzv. excitovaný stav. Při něm dochází k následné rekonstrukci atomového obalu, při níž dojde k uvolnění energie, která je vyzářena v podobě **charakteristického Röntgenova záření**. Při radioaktivní přeměně jádra může dojít ke vzniku charakteristického záření excitováním atomového obalu dvěma způsoby: při záchytu elektronu z rozpadu jádra a při rekonstrukci obalu po vnitřní konverzi. Dále může dojít ke vzniku charakteristického záření po externím ozáření, kdy dojde vlivem působení vnějšího ionizujícího záření k excitaci atomového obalu.

Posledním nezmíněným typem fotonového ionizujícího záření je tzv. **synchrotronové záření**, které vzniká pohybem energetických elektronů v magnetickém poli. Toto záření často vzniká jako parazitní jev na urychlovačích částic.

C.2.4 Zdroje neutronů

Jedním ze způsobů, kterým mohou být emitovány neutrony, je **spontánní štěpení**. Při něm bývají kromě samotných štěpných fragmentů uvolněny také neutrony. Příkladem může být izotop prvku Cf-252, který je nerozšířenějším neutronovým zářičem založeným na principu spontánního štěpení. Energetické spektrum neutronů emitovaných spontánním štěpením je spojité.

Dalším zdrojem neutronů jsou radioizotopové zdroje založené na **reakci (α , n)**, při kterém dojde následkem reakce α -částice s jádrem atomu např. berylia k uvolnění neutronu. Tento příklad lze popsat vztahem:



Radioizotopové zářiče založené na této reakci obsahují alfa zářič, který je obalen beryliovým terčem.

Dále lze získat neutrony využitím **foto-neutronových zdrojů**, kde se nejčastěji používá radioizotopový gama zářič s vhodným terčem. Jako terč se často používá Be-9 nebo H-2. Také je možné pro emisi neutronů využít **reakce urychlených nabitých částic**. Mezi ně se využívá reakce deuterium s deuteriem nebo s tritiem. Dále lze k získání neutronů využít reakce (γ , n), (γ , 2n) apod.

Seznam literatury použitý pouze v této příloze

- [C1] ULLMANN, V., Aplikace ionizujícího záření. In: *Astronuklfyzika.cz* [online]. Ullman, V., [cit. 11.9.2021]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadMetody.htm>

- [C2] STÁTNÍ ÚŘAD RADIAČNÍ OCHRANY, V.V.I., Úvod, Radiační ochrana, Základní pojmy. In: suro.cz [online] Praha, SÚRO, v.v.i. [cit. 22.9.2021] dostupný z <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/zakladni-pojmy>
- [C3] BELOV, A. G., CHVÁTIL, D., SIMANE, C. ET AL., Electron and gamma bremsstrahlung beams of JINR and CTU microtrons, Czechoslovak Journal of Phys., vol. 50, (2000) 385-386
- [C4] MIZERA, J., ŘANDA, Z., Instrumental neutron and photon activation analyses of selected geochemical reference materials, J. Radioanal. Nucl. Chem. 284 (2010) 157-163