

# Analýza bezpečnostných aspektov vybraných zdrojov ionizujúceho žiarenia

## Analysis of Safety Aspects of Selected Sources of Ionizing Radiation

Lukáš Lacko<sup>1</sup>, Jozef Babečka<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Vysoká škola bezpečnostného manažérstva, Košice

<sup>2</sup>Katolícka univerzita Ružomberok, Fakulta zdravotníctva

<sup>3</sup>Ústredná vojenská nemocnica SNP Ružomberok-FN, Klinika nukleárnej medicíny

<https://doi.org/10.54937/zs.2023.15.2.54-57>

### Abstrakt

Článok sa zaoberá analýzou zdrojov ionizujúceho žiarenia so zameraním sa na zdroje využívané v lekárskejších vedách. Približuje fyzikálne vlastnosti jednotlivých druhov ionizujúceho žiarenia a možnosti ochrany pred jeho negatívnymi účinkami na organizmus. Charakterizuje prírodné a umelé zdroje ionizujúceho žiarenia a popisuje technológiu využívanú pre generovanie umelého ionizujúceho žiarenia.

**Kľúčové slová:** Zdroje ionizujúceho žiarenia. Fyzikálne vlastnosti. Bezpečnosť.

### Abstract

Our article deals with the analysis of sources of ionizing radiation, focusing on sources in medical sciences. It describes the physical properties of individual types of ionizing radiation and the possibilities of protection against its negative effects on the body. It characterizes natural and artificial sources of ionizing radiation and describes the technology used to generate artificial ionizing radiation.

**Key words:** Sources of ionizing radiation. Physical properties. Safety.

### Ionizácia a ionizujúce žiarenie

Ak je elektrónu dodaná vyššia energia ako väzbová, elektrón sa z obalu odtrhne a dôjde k ionizácii atómu. Z atómu sa stáva kladne nabitý iont. Negatívne nabitý iont má viac elektrónov ako protónov. Ionizovaný atóm sa snaží opätovne dostať do neutrálneho stavu. Ak sa nachádza v jeho okolí dostatok elektrónov, dôjde k rekombinácii. Opätovné prijatie elektrónu je sprevádzané vyžiarovaním väzbovej energie. K ionizácii dochádza pri vzájomných nárazoch atómov alebo iných rýchlo pohybujúcich sa častíc ionizujúceho žiarenia. Zdrojom ionizujúceho žiarenia môžu byť prírodné rádionuklidy, umelé rádionuklidy alebo technické zariadenia v podobe urýchľovačov [1]. Celosvetovo v roku 2019 bol populačný štatistický súbor 8,1. Starnutie populácie kladie zvýšené nároky na ošetrovateľskú starostlivosť, sociálny systém, ale tiež na zabezpečenie zdravotnej starostlivosti, vrátane starostlivosti paliatívnej. V Čechách, podobne ako v ostatných európskych krajinách, je najčastejším miestom úmrtia nemocnica (58 %), liečebný ústav (9 %) a sociálne zariadenie (6 %), kde sa podmienčne v starostlivosť o seniorov podieľajú sestry [2].

### Rádioaktivita

Rádioaktivitu charakterizujeme ako proces, pri ktorom sa nestabilné jadro nuklidu samovoľne premieňa na jadro iného nuklidu, za vzniku ionizujúceho žiarenia. Jadro, ktoré sa premieňa nazývame materské jadro, vznikajúce jadro nazývame dcérske jadro. V prípade ak sa zmení počet protónov v jadre, dôjde k zmene prvku. Jedná sa o štatistický jav, pri ktorom môžeme určiť iba pravdepodobnosť s akou sa premenia jadrá daného rádionuklidu za jednotku času [2].

### Vybrané typy rádioaktívnej premeny:

#### Beta premena

Rádioaktívna premena  $\beta^-$  je spojená so zmenou počtu protónov v materskom jadre o jednotku. V prípade prebytku neutrónov sa neutrón mení na protón a dochádza ku vyžiarovaniu elektrónu a antineutrína.

Elektrón počas svojho letu atómy excituje alebo ionizuje. Interakcie ho vychyľujú z priamočiarej dráhy. Doletí do vzdialenosti závislej na jeho energii a objemovej hmotnosti prostredia. Brzdí už v hĺbke 1-4 mm pri látkach podobných vode, v ťažkých kovoch nedosiahne väčšiu hĺbku než 0,1 mm. Pri prelete elektrónu prostredím môže vzniknúť brzdné žiarenie. Veľkosť vzniknutého žiarenia závisí na energii elektrónu a protónovom čísle prostredia. Neutrína sa veľmi ťažko detekujú, majú veľmi slabú interakciu a látkou len preletia.

Na odtienenie postačujú ľahké materiály, ako napríklad plexisklo, hrubé 5-10 mm s následnou tenkou vrstvou olova určeného na odtienenie brzdného žiarenia vznikajúceho v ľahkom materiáli. Samotné olovo nie je vhodné na použitie. Vzniká v ňom tvrdé a intenzívne brzdné žiarenie.

Ak sa v jadre nachádza prebytok protónov, protón sa mení na neutrón. Energetický rozdiel je vyžiarovaný ako pozitron  $\beta^+$ .

Pozitron  $e^+$  je antičasticou ku elektrónu. Vzniká pri interakciách častíc o veľkých energiách. Hmotnosť, spin a elektrický, opačne orientovaný náboj je rovnakej veľkosti. Pokiaľ sa nachádza v prostredí zaplnenom atómami alebo voľne pohybujúcimi sa časticami, zaniká v anihilačnej reakcii s elektrónmi. Pri interakcii sa premieňa na dva fotóny  $\gamma$  žiarenia, vyžiarené z miesta stretu v protihľadom smere, o energii 511 keV. Dej označujeme ako pozitronovú premenu  $\beta^+$ . Žiarenie má elektrický náboj, preto sa v magnetickom poli odchyľuje.

Odtienenie pozitronového žiarenia vykonáme opäť pomocou tenkej vrstvy ľahkého materiálu a vrstvy olova širokej najmenej 3 cm.

## Gama premena

Po vyžiarení  $\alpha$  alebo  $\beta$  častice sa jadro nemusí dostať do základného stavu, ale môže zostať excitované. Prebytočnej energie sa atóm zbavuje elektromagnetickým žiarením  $\gamma$ . Kvantá vyžiarenej energie sa šíria fotónmi. Pohybujú sa rýchlosťou svetla. Sú vlastníčkami energie, ktorú popisujeme vzťahom  $E=h \cdot \nu$  ( $h$  je Planckova konštanta a  $\nu$  je frekvencia elektromagnetickej vlny o vlnovej dĺžke  $c/\nu$ ). Energia žiarenia zodpovedá rozdielu dvoch energetických hladín.

Interakcia gama žiarenia s hmotou je založená na odovzdávaní kinetickej energie rýchlo kmitajúceho elektrického a magnetického poľa. Môže prebiehať fotoefektom, Comptonovým rozptylom alebo tvorbou elektrón- pozitronových párov v závislosti od hustoty prostredia a energie žiarenia gama. Všeobecne platí, že pri nízkych energiách dochádza k fotoefektu, pri stredných Comptonovmu rozptylu a pri energiách väčších než 1 MeV tvorbe elektrón- pozitronových párov.

Odtienenie žiarenia  $\gamma$  a X je zabezpečené materiálmi s veľkou objemovou hmotnosťou, ako sú olovo a wolfrám. Žiarenie s energiou do 100 keV odtieni už vrstva olova o hrúbke 2 mm. Ak je potrebná optická prehl'adnosť využíva sa olovené sklo s vysokým obsahom oxidu olova v tavive. Niekedy je výhodnejšie použiť materiál s nižšou tieniacou schopnosťou o väčšej hrúbke. Využitie takéhoto typu tienenia nastáva v prípade stavebných úprav na pracoviskách s ionizujúcim žiarením, kedy sa využíva väčšia stavebná šírka steny alebo hutnejšie stavebné materiály, ako sú napríklad betón s prímiesou barytu. Hrúbka je závislá na energii žiarenia, hustote materiálu a potrebe absorpcie [1].

## Zdroje ionizujúceho žiarenia

Zdroje ionizujúceho žiarenia delíme do dvoch základných skupín:

- **Prírodný zdroj ionizujúceho žiarenia**- je zdroj ionizujúceho žiarenia prírodného zemského alebo kozmického pôvodu.
- **Umelý zdroj ionizujúceho žiarenia**-je zdroj ionizujúceho žiarenia iný ako prírodný zdroj ionizujúceho žiarenia (definícia podľa NV SR 345/2006 Z.z.).

### Prírodné zdroje žiarenia

Prírodné žiarenie je súčasťou vesmíru a bolo na Zemi od jeho vzniku. Z fyzikálnej povahy jeho zdrojov vyplýva, že na počiatku bolo veľmi vysoké a postupne klesalo. Bolo jedným z motorov evolúcie. Medzi zdroje ionizujúceho žiarenia patria hviezdy a iné objekty vesmíru. Toto žiarenie dopadá na Zem ako primárne kozmické žiarenie. Toto žiarenie je vo veľkých nadmorských výškach vyššie, ako pri hladine mora. Kozmické žiarenie interakciou s atómami vzdušného obalu Zeme-atmosféry spôsobuje vznik sekundárneho žiarenia a kozmogénnych rádionuklidov.

Zdrojmi ionizujúceho žiarenia na Zemi sú prirodzené rádionuklidy vznikajúce rádioaktívnou premenou prvkov tvoriacich rozpadové rady: uránová, thóriová, plutóniová a aktíniová. Aj človek má od narodenia vo svojom tele niektoré rádionuklidy, ktoré spôsobujú ožiarenie ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{K}$ ). Žiarenie v niektorých miestnostiach planéty môže byť väčšie, ako v otvorenom priestore. Veľkú radiačnú záťaž predstavuje **Radón**<sup>222</sup> vychádzajúci zo zeme (ožiarenie vyvolávajú hlavne

jeho dcérske produkty). Prirodzené zdroje tvoria viac ako 80 % (v závislosti na mieste a nadmorskej výške) celkovej radiačnej záťaže populácie.

### Umelé zdroje žiarenia

Človek pri svojej činnosti vytvára mnohé umelé zdroje žiarenia. Tieto sa do životného prostredia začali dostávať od konca II. svetovej vojny. Patria sem jadrové reaktory a ich rádioaktívny odpad-produkty štiepenia paliva-**uránu**<sup>235</sup> alebo **plutónia**<sup>239</sup>, ktoré sú ukladané v krátkodobých a dlhodobých úložiskách vyhoreného paliva. Nešťastnou stránkou jadrovej energetiky sú pozostatky z úniku štiepných produktov (I, Cs, Rb a iné) pri **haváriách** jadrových zariadení (Three Mile Island,.. Černobyl', Fukushima).

Veľa rádionuklidov sa do ovzdušia dostáva aj z **tepelných elektrární**. Uhlie síce obsahuje veľmi málo rádionuklidov, ale pri jeho spaľovaní sa rádioaktívna koncentruje v popolčeku, ktorý uniká do životného prostredia. Paradoxne je táto hodnota vyššia, ako v okolí jadrovej elektrárne.

Produkty štiepenia sa na Zemi nachádzajú ako pozostatky **po výbuchoch atómových bômb** v roku 1945 (Hirošima a Nagasaki) a následných pokusoch s atómovými a vodíkovými bombami až do 70. rokov minulého storočia.

**Výroba umelých rádionuklidov** na medicínske a priemyselné použitie v **cyklotrónoch** a na medicínske použitie v **generátoroch a lineárnych urýchľovačoch**. Nielen v medicíne sa využívajú početné zdroje žiarenia ako röntgen, ktorý sa používa aj na defektoskopiu v priemysle.

**Medicínske zdroje** predstavujú najvýznamnejší podiel radiačnej záťaže populácie v krajinách s rozvinutým zdravotníctvom. Patria sem CT, angiografia a mamografia. Medzi liečebné zariadenia zaraďujeme lineárne urýchľovače, céziové a kobaltové gama ožarovače, Leksellov gama-nôž, protónové urýchľovače.

Relatívne malou časťou sa na medicínskych zdrojoch žiarenia podieľajú produkty na diagnostiku v nukleárnej medicíne-**rádiofarmaká**.

### Reaktor

Zariadenie slúžiace na regulovanú reťazovú štiepnu reakciu sa nazýva **jadrový reaktor**. Aby mohla reakcia v reaktore bez problémov prebiehať, musí byť dodané nadkritické množstvo látky. Dynamika štiepnej reakcie, ako pomer novovzniknutých neutrónov a neutrónov spotrebovaných pri reakcii, je označovaná neutrónovým multiplikačným faktorom  $k$ . Pri  $k < 1$  reakcia zaniká,  $k=1$  reakcia prebieha rovnomerne,  $k > 1$  reakcia prebieha lavínovite, má explozívny charakter. Spomalenie, udržanie neutrónov v požadovaných rýchlostiach a celkovú intenzitu reakcie má na starosti moderátor. Najlepšími moderátormi sú látky z ľahkým jadrom, hlavne grafit, prevedený v tvare tyčí, alebo voda, ktoré sa zasúvajú do reaktoru, respektíve, obmýva palivové články a slúži aj ako chladivo. Ak chceme reakciu opätovne urýchliť tyče sa vytiahnu. V momente keď dosiahne multiplikačný faktor hodnotu  $k=1$  musí byť prebytok neutrónov pohltentý absorptorom. Celá štiepna reakcia sa odohráva v aktívnej zóne. Býva obklopená reflektorom, vrstvou materiálu, ktorý odráža neutróny. Reakcia je sprevádzaná vysokými teplotami, preto je nutné štiepny materiál intenzívne chladieť a odvádzať teplo pomocou chladiaceho okruhu. V závislosti na

type reaktoru môžeme chladiace okruhy rozdeliť na primárne a sekundárne. Sekundár nepriamo spojený s primárnym okruhom, ktorý je v styku s palivovými článkami, odvádza teplo do vonkajšieho prostredia. V prípade jadrových elektrární je tvorený parogenerátorom.

## Urýchľovač

V laboratórnych podmienkach slúžia na umelé urýchlenie častíc, pomocou silných magnetických a elektrických polí, urýchľovače a jadrové reaktory. Urýchľovačom dokážeme urýchliť elektrický nabitú časticu. Samotné urýchlenie primárnych častíc spôsobuje elektrické pole alebo premenlivé magnetické pole, ktoré indukuje pole elektrické. Zmena dráhy častice je vykonaná pomocou magnetických polí. Sekundárne častice s vysokou energiou bez náboja a krátko žijúce častice získavame sekundárnymi interakciami urýchlených častíc na terčíku v závislosti na jeho type a type primárne urýchlených častíc. V najjednoduchšom prípade je zdrojom urýchľovaných častíc ionizačná trubica, obsahujúca zriedený plyn, kde vo výboji medzi katódou a anódou, pri napätí až desiatky kilovolt, sú odvádzané ióny elektródou do urýchľovacieho systému. Ako zdroj elektrónov slúži žhavená katóda vybavená urýchľujúcimi a fokusujúcimi anódami podobnými ako u obrazovky. Rovnakú úlohu môže vykonať aj mriežka pre elektronickú reguláciu toku elektrónov. Momentálne sú vo vývoji laserové zdroje, v ktorých je emisia generovaná silnými impulzmi dopadajúcimi na terčík. Terčík môže byť vonkajší, umiestnený mimo urýchľovacieho systému a zväzok častíc je vyvedený von z urýchľovacej trubice alebo vnútorný nainštalovaný priamo v systéme. Terčík je vo všeobecnosti miesto určené ku interakcii častíc. Môže byť nahradený interakčnou oblasťou, kde sa častice so zrovnateľnými kinetickými energiami stretávajú v collideroch, teda v proti sebe namierených dráhach. Častice sa po zrážke takmer zastavia. Celá ich energia je využitá na vzájomnú interakciu a tvorbu nových častíc, čo v prípade terčíkov nie je možné vzhľadom na to, že pri dopade častíc na terčík je veľká časť energie premenená na teplo, ktoré ohrieva terčík a je nutné ho schladzovať. Oblasť vzájomných interakcií je vybavená zložitým detekčným systémom umožňujúcim podrobnú analýzu. Celý systém urýchľovania je umiestnený v evakuovanej trubici obsahujúcej elektródy, rezonátory a samotné častice.[2]

## Praktické využitie urýchľovačov:

### 1. Analýza iónovým zväzkom (Ion Beam Analysis, IBA)

Metóda IBA umožňuje merať hĺbkové koncentrácie, s rozlíšením od nm až po  $\mu\text{m}$ , použitím fokusovaného zväzku iónov, a tým zisťovať rôzne vlastnosti štruktúry, ako sú hustota a morfológia. Jedná sa hlavne o aplikácie určené na vývoj nových materiálov, sledovania znečistenia životného prostredia a biomedicínskeho výskumu. Využitie nájdú aj v geológii a archeológii. Najcitlivejšie a najefektívnejšie techniky IBA využívajú odborníci v polovodičovom priemysle a leteckom priemysle na určovanie obsahu vodíka v čípoch a zvaroch. Pomocou technológie analýzy iónovým zväzkom je možné kvantifikovať množstvo znečistenia životného prostredia, aerosólov, kvapalín a pôd, stanoviť obsah toxických látok v ovzduší a v živom tkanive.

### 2. Urýchľovačová hmotnostná spektrometria (Accelerator Mass Spectrometry, AMS)

V porovnaní IBA je technológia AMS ešte komplikovanejšia. Používa sa na najcitlivejšie stopovacie analýzy. Ako príklad môžeme opäť uviesť polovodičový priemysel, v ktorom je používaná na detekovanie železa v kremíku, ktoré spôsobuje problémy vo výrobe submikrónových čipov. AMS je jedna z najrýchlejších metód uhlíkovej analýzy. Metóda prenikla aj do farmaceutického priemyslu v oblasti stopovania biologických systémov.

### 3. Modifikácia materiálov iónovým zväzkom

Modifikácia materiálov prebieha pomocou urýchľovačov nazývaných aj implementátory. Za pomoci iónového zväzku môžeme dotovať tenkú vrstvu iónmi, čo spôsobí zmenu štruktúry alebo vlastností povrchu materiálu. Úprava má opodstatnenie u polovodičov, integrovaných obvodov, pri zvyšovaní životnosti kovových nástrojov. Potenciál modifikácie nie je doposiaľ plne využitý.

### 4. Produkcia rádionuklidov- rádiofarmák

Rádionuklid je nestabilný (rádioaktívny) nuklid podliehajúci samovoľnej rádioaktívnej premene. Rádiopharmakum, ako špecifická forma rádionuklidu, bude popísaná v samostatnej kapitole.[14]

### 5. Hadrónová terapia

Pri konvenčných ožarovacích metódach sa najviac energie fotónových zväzkov  $\beta$  žiarenia odovzdáva tkanivám na povrchu a v malých hĺbkach ľudského tela. Prechodom cez telo dochádza ku exponenciálnemu poklesu energie. V prípade hlboko uložených nádorov sa dostavuje len oslabený fotónový zväzok a pokračuje ďalej až za tumorové tkanivo. Dochádza ku poškodzovaniu okolitých tkanív.

Jedným z typov hadrónovej terapie je protónová terapia. Protóny pri vstupe do tela ionizujú len veľmi málo cca 30 % dávky. Hneď čo začne protón brzdiť, ionizačné účinky rastú, až dosiahnu svojho maxima na konci dráhy, takmer 70 % energie, v úzkej hĺbkovej oblasti Braggovho píku. Po dosiahnutí požadovanej vzdialenosti, dávka prudko klesá k nule. Tkanivá za tumorom nie sú ionizované. Protón je v porovnaní s elektrónom, pri prechode atómami vychýľovaný len minimálne. Pomocou pridelennej energie je možné presne nastaviť hĺbku Braggovho maxima. Vzhľadom na to, že protón nesie kladný náboj, koordinácia jeho pohybu v horizontálnom a vertikálnom smere prebieha pomocou magnetického poľa. Protóny v bode vyžiarovania produkujú krátkodobé rádionuklidy, využiteľné na PET scan miesta nádoru a kontrolu správneho zamerania lúčov bez potreby ďalších rádiopharmák.[3]

## Rádiopharmaka

Rádiopharmakum je definované ako akýkoľvek liečivý prípravok pre lekárske účely, pripravený k použitiu, obsahujúci jeden alebo viac včlenených rádionuklidov. Je určený k diagnostickým alebo terapeutickým účelom. Základné zloženie rádiopharmák pozostáva z farmaka, zvoleného podľa distribúcie, chovania sa v organizme a špecifického vzťahu ku orgánu alebo tkanivu, v ktorom sa musí vychytávať alebo vylučovať a rádionuklidu [4].

V reaktoroch, aktiváciou tepelnými neutrónmi, sa pre klinické využitie vyrábajú rádionuklidy jód  $^{125}\text{I}$ , chróm  $^{51}\text{Cr}$ , železo  $^{59}\text{Fe}$  atď. Najdôležitejším reaktorovým materským rádionuklidom je  $^{99}\text{Mo}$ .

Systém rádionuklidového generátoru, obsahujúci materský rádionuklid, s pomerne dlhým časom premeny, umožňuje chemickým alebo fyzikálnym postupom separovať dcérske rádionuklid s kratším polčasom, na prípravu rádiofarmák, priamo na pracoviskách nukleárnej medicíny. Najrozšírenejším typom generátoru je chromatografický využívaný aj v prípade  $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Eluačná kolóna je vyrobená z vysoko čistého oxidu hlinitého, ktorý je osadený molybdénom  $^{99}\text{Mo}$  sodným premieňajúcim sa s polčasom  $T_{1/2} = 66,2$  hod. na technécium  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ . Dcérske rádionuklid sa z kolóny vymýva izotonickým roztokom chloridu sodného do evakuovanej sterilnej liekovky vo forme technecistanu sodného ( $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ ). Technécium sa z kolóny vymýva veľmi ľahko, vzhľadom na jeho slabú väzbu na oxid hlinitý. Molybdén zostáva pevne viazaný.

V cyklotrónoch sa vyrábajú rádionuklidy ako  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$  pre zobrazovacie metódy jednofotónovej emisnej tomografie (SPECT) a  $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$  a  $^{15}\text{O}$  pre pozitronové zobrazovacie systémy (PET). Tekuté rádionuklidy sa vyrábajú z ožiarených terčov, ktoré sa následne rozpúšťajú v kyselinách alebo v alkalických rozpúšťadlách [5].

Výroba rádiofarmák musí podliehať, podobne ako u ostatných liekov, zásadám smernice o správnej výrobní praxi SVP (Good Manufacturing Practice-GMP). Zásady sa týkajú farmaceutickej výroby, pracovníkov, pracovných priestorov a zariadení, hygieny práce, spracovávaných surovín, jednotlivých operácií, označovania, dokumentácie, skladovania, transportu rádioaktívnych prípravkov a likvidácie ich odpadov. Dôležitou súčasťou je aj kontrola kvality rádiofarmák, v podobe stanovenia aktivity, rádionuklidovej čistoty, rádiochemickej čistoty, sterility, bezpyrogénosti a prípadne toxicity [6]

## Literatúra

1. Podzimek F. Rádiologická fyzika. CVUT v Prahe, 2015
2. Kupka K., Samal M., Kubinyi J., Nukleární medicína. Praha: Nakladatel'stvo P3K, 2016.
3. Andreo P. et al. Fundamentals of ionizing radiation dosimetry. 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2017.
4. Bereta, Martin, et al. The Benefits of Nuclear Cardiology Examinations Using Cardiac SPECT Gamma Camera. In: *2023 14th International Conference on Measurement*. IEEE, 2023. p. 60-62. <https://doi.org/10.23919/MEASUREMENT59122.2023.10164545>
5. Cherry S.R., Sorenson J.A., Phelps M. E. Physics in nuclear medicine. Philadelphia (USA): Elsevier 2012.
6. Klement C., a kol. Mimoriadne udalosti vo verejnom zdravotníctve. Banská Bystrica: PRO 2011.

## Kontakt:

Ing. Lukáš LACKO, MSc., MPH  
 Vysoká škola bezpečnostného manažérstva  
 Košťova 2373/1  
 040 01 Košice  
 e-mail: lukas.l@gmail.com