

## MINUCIÓZNA ANALÝZA APLIKÁCIÍ IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA A RÁDIONUKLIDOV

**Eubomír MÁTEL**

*Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká Fakulta, Katedra jadrovej chémie, Mlynská dolina, Pavilón. CH-1. 842 15 Bratislava, matel@fns.uniba.sk*

### ABSTRACT

Nuclear technology such as gamma-rays, electron beams and ion beams irradiation is widely used for the application in life science, sterilization, modification of bio-resources, food irradiation, sterile insect technique, degradation and cross linking of natural polymers, geosphere and the biosphere, mutation breeding, radioisotopes, etc. Contributing for human being, to supply foods and sustainable environment.

**Key words:** nuclear technology, nuclear medicine, food irradiation

### ÚVOD

Pod aplikáciou ionizujúceho žiarenia a rádionuklidov rozumieme procesy radiačnej technológie, ktoré sú založené na fyzikálnych a chemických zmenách vyvolaných ionizujúcim žiarením. Pozastavíme sa však len pri tých oblastiach, ktoré viac, alebo menej úzko súvisia s našim denným životom – priemyselné aplikácie. Sú to najmä oblasti nukleárnej medicíny, radiačného ošetrovania potravín, radiačnej sterilizácie. Okrajovo si povšimneme priemyselnú defektoskopiu, archeológiu, umenia a iné možné aplikačné oblasti.

### Medicína – nukleárna medicína - radiačná terapia

V roku 1895 W.C. Röntgen pri štúdiu elektrostatického výboja náhodne objavil neviditeľné žiarenie, ktoré spôsobovalo fluorescenciu v papieri pokrytom fluorescenčnou látkou – lúče X. Neskôr bolo zistené, že sú to elektromagnetické vlny s kratšou vlnovou dĺžkou než má viditeľné svetlo. V ďalších pokusoch bolo potvrdené, že röntgenové lúče, ktoré dostali pomenovanie po svojom objaviteľovi, vznikajú tiež keď katódové lúče, t.j. elektróny dopadnú na kovový materiál. Bolo zistené, že rôzne látky pre ne vykazujú rôznu prechodnosť a že spôsobujú sčernenie fotografickej emulzie t.j. pomocou nich je možné vytvárať obraz objektov. Fotóny vznikajúce röntgenovým žiarením pri prechode v atómovom obale majú energiu rádovo tisíce elektrónvoltov. Fotóny žiarenia gama vznikajúce pri prechodoch v atómovom jadre majú energiu mnohonásobne vyššiu. Prenikavosť žiarenia gama látkou je preto mnohonásobne vyššia. Terapiu pomocou zariadenia používajúcu zdroje  $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$  a röntgenové žiarenie možno označovať ako vonkajšiu.

V súčasnej dobe sa pozornosť pri diagnostike a liečení nádorových chorôb zameriava na zlepšenie diagnostiky a znižovanie dávok žiarenia – obmedzovanie nežiadúcich vedľajších účinkov žiarenia. V oblasti diagnostiky sa v posledných rokoch uplatňujú nové fyzikálne princípy a moderné techniky: jadrová magnetická rezonancia a pozitronová emisná tomografia. Zintenzívnenie použitej rádioterapie veľmi úzko súvisí s problémom účinku žiarenia – čo možno najmenšie vedľajšie účinky; aby dávka žiarenia bola absorbovaná v oblasti nádoru, resp. v čo najbližšom okolí. V prípade röntgenového žiarenia, alebo žiarenia gama podstatná časť žiarenia zasiahne tkanivo pred a za nádorom.

Preto sa k ožarovaniu začali využívať protóny alebo ióny. Zmenou ich energie možno významne ovplyvniť oblasť ktorú ožarujeme. Dávka žiarenia je z najväčšej časti absorbovaná v nádore a preto možno dosiahnuť zlepšenia účinnosti liečby a potlačenie vedľajších účinkov žiarenia. Počítačová tomografia (CT) používa röntgenové žiarenie, resp. žiarenie vysielané rádionuklidom priamo tele pacienta. Pozitronová emisná tomografia (PET) je založená na používaní rádionuklidov emitujúcich pozitrony. Rádionuklid sa aplikuje ako rádiofarmakum vhodným spôsobom pacientovi a sleduje sa nasledovné rozdelenie v tele pacienta (vnútorná terapia). PET - využíva interakciu pozitronu s látkou.

Pozitrón, ktorý vznikne pri rádioaktívnej premene rádionuklidu, po prechode krátkej dráhy v látke (niekoľko mm) interaguje s elektrónom. Pri tejto interakcii pozitron a elektrón zaniknú a následne sú vyžiarené v opačnom smere dva fotóny (každý s energiou 511 keV). Dva fotóny s danou hodnotou energie pohybujúce sa v opačnom smere možno súčasne (v koincidencii) registrovať detektormi umiestnenými okolo sledovaného miesta. Vyhodnotením koincidenčného merania možno získať informáciu o mieste, kde anihilácia páru elektrón-pozitron nastala. Výsledkom detekčného procesu a ďalšieho zapracovania je obraz priestorového rozloženia podaného rádionuklidu. Využíva rádionuklidy  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$ . S jej pomocou možno určiť polohu a rozmer nádoru, pričom sa dosahuje má veľmi dobré priestorové rozlíšenie. Zariadenia – systémy pozitronovej emisnej tomografie sa označujú ako PET kamery. (Celotelová pozitronová emisná tomografia s PET kamerou, vyšetrený trup od bázy lebečnej po inčini). Súčasťou maximálnej ceny výkonu sú náklady na rádionuklid a dopĺňujúce snímání PET kamerou – 67 000.- Sk. Pozitronová emisná tomografia s PET kamerou vybranej časti tela – mozgu, srdca alebo inej časti tela. Súčasťou ceny - maximálnej výkonu sú náklady na rádionuklid a dopĺňujúce snímání PET kamerou – 49 000.- Sk)

Liečenie pomocou zväzkov protónov sa začalo v roku 1954. V súčasnej dobe sa protónová terapia uskutočňuje v rade miest na celom svete. Protónové zväzky sa uplatňujú najmä pri liečení nádorov uložených v hĺbke. Presné priestorové nastavenie pomocou úzkeho zväzku protónov sa zvyčajne uskutočňuje predchádzajúcim veľmi presným skenovaním oblasti nádoru. Úspech zaznamenalo napr. liečenie nádorov oka.

Ťažké ióny - nový nástroj pre liečenie. Zväzky ťažkých iónov sú v súčasnej dobe najúčinnším nástrojom pre liečenie hlboko uložených nádorov. Dôvodom je priebeh veľkosti dávky, ktorú odovzdávajú na svojej dráhe v prostredí. Poškodenie nádorových buniek ťažkými iónmi na konci ich dosahu je zvyčajne nevratné, takže dochádza k ich úplnému zničeniu. Vhodné sú napríklad ióny uhlíku, ktoré pozdĺž časti dráhy (pred nádorom) spôsobia len dočasné škody na bunkách, zatiaľ v oblasti dosahu je miera zničenia podstatná.

Bórová terapia -  $^{10}\text{B}$  (n,  $\alpha$ )  $^7\text{Li}$ .

Jej podstata je v nasledovnom: pacientovi sa podá zlúčenina obsahujúca bór, selektívne koncentrujúca sa v nádore, nasleduje ožiarenie pomalými neutrónmi,  $\alpha$  - častice a jadra  $^7\text{Li}$  ničia nádorové bunky a okolie zostáva neporušené. Používajú sa deriváty boránov. Použitie hlavne na nádory mozgu a zhubné melanomy.

**Rádionuklid** možno definovať ako zlúčeniny obsahujúce špecifický rádionuklid, ktoré sa používajú na diagnostické a terapeutické účely. Používajú sa rádionuklidy s krátkou dobou polpremeny najmä :  $^{32}\text{P}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{197}\text{Hg}$ ,  $^{201}\text{Th}$ ,  $^{203}\text{Hg}$ . Väčšina rádionuklidov vyrobených v cyklotróne má krátku dobu polpremeny. To umožňuje vykonávať opakované skenovania na jednom subjekte v ten istý deň a tiež minimalizuje dobu, počas ktorej bude pacient vystavený žiareniu. Značným problémom však je, že tieto rádionuklidy musia byť vyrábané v blízkosti miesta aplikácie ako napr.  $^{15}\text{O}$  s dobou polpremeny 2.03 min, čo znamená, že sa cyklotrón musí nachádzať priamo v nemocnici. Vzhľadom na vysokú cenu týchto zariadení je to však vo väčšine prípadoch nemožné. V prípade rádionuklidu s rádionuklidom  $^{18}\text{F}$ , ktorý má dobu polpremeny 109.8 min, je možná preprava aj na veľké vzdialenosti.

Pri pozitronových žiaričoch nesie zabúdať na možné sprievodné gama fotóny, ktoré môžu spôsobiť ďalšiu záťaž na pacienta.

### Radiačné ošetrenie potravín

Na začiatku tejto aplikácie bolo ožarovanie potravín schválené na elimináciu, resp. sterilizáciu prítomných škodcov a parazitov, k predĺženiu „životnosti“ potravín, k inhibícii predčasného klíčenia.

Ožarovanie potravín možno považovať za veľmi účinné opatrenie proti bakteriálnym patogénom vrátane *Escherichia coli* O157:H7, salmonelám, kampylobakteriám a listériám, a tiež proti parazitom, ako sú toxoplazmy a trichinely. Štandardná dávka žiarenia však nelikviduje toxíny a príony, t.j. ožiarenie nezabráni ich neskoršej kontaminácii.

Podľa čl. 3 odst. 2 smernice 1999/2/ES môžu byť potraviny ožarované len vo schválených ožarovacích zariadeniach, ktoré sú schválené príslušnými inštitúciami členských štátov. Sú schválené ožarovacie zariadenia v 10 štátoch EU v ktorých sa ožarujú napr.:

- sušené aromatické byliny, korenie, zeleninové ochucovacie prípravky (napr. Artim spol. s.r.o. - ČR),
- krevety, žabie stehienka, vajcia, sušené ovocie, škrob, plazma, mäso, hotové jedlá, arabská guma a kazein (IBA Mediris S.A. - Belgicko, Holandsko a Francúzsko),
- sušená zelenina, korenie, semená guarany, rastlinné suroviny (Gamma Service Produktbestrahlung GmbH, Radeberg, a Beta-Gamma Service GmbH&Co. KG, Wiehl, Isotron Deutschland GmbH, Allershausen - Nemecko),
- korenie, zelenina, sušené huby, byliny (Ústav jaderné chémie a technológie, Varšava a Ústav aplikované radiační chemie, Technická univerzita Lodž - Poľsko),
- potraviny (Veľká Británia),
- korenie, sušená zelenina a ovocie, byliny (Maďarsko).

Na ožarovanie potravín sa používajú hlavne zdroje so žiarením:

- gama žiarenie rádionuklidov  $^{60}\text{Co}$  a  $^{137}\text{Cs}$ ,
- röntgenové žiarenie o energii menej ako 5 MeV,
- urýchlené elektróny s energiou menej ako 10 MeV.

Absorbovaná dávka žiarenia je v intervale 2 – 25 kGy. Radiačne ošetrené potraviny musia byť opatrené značkou (obr. 1):



### Obr. 1 Radiačné ošetrenie umeleckých a historických pamiatok

Využíva biologických účinkov ionizujúceho žiarenia na hmyz a mikroorganizmy. Používa sa hlavne žiarenie gama, ako zdroj  $^{60}\text{Co}$ . Veľkou výhodou je skutočnosť, že cenné umelecké a historické vlastnosti sa zachovávajú, radiačný postup nezanecháva žiadne ekologicky nebezpečné zostatky, účinok je okamžitý a existuje možnosť ošetrenia rôznorodých predmetov (Roztoky u Prahy).

### Radiačná sterilizácia

Výhody radiačnej sterilizácie pred ostatnými druhmi sterilizácie sú predovšetkým:

- možno sterilizovať i teplotne labilné materiály,
- výrobky môžu byť sterilizované v konečnom obale,
- možnosť okamžitého použitia vysterilizovaných výrobkov. Použitý proces nevyvoláva žiadnu sekundárnu reakciu,
- dozimetricky sledovaná, v každom okamžiku preukázaná spôsobilosť procesu sterilizácie. Štandardne je s ožarovaným materiálom dodávaný protokol o obdržanej sterilizačnej dávke, ktorá je zmluvne garantovaná v hodnote min. 25 kGy.

Napr. ožarovňu spoločnosti BIOTER, a.s. ČR možno využiť ku sterilizácii zdravotných prostriedkov, ožarovaniu muzeálnych exponátov, úprave plastov, sfarbenie skla (nastáva pri ožiarení dávkami rádovo  $10^3$  Gy, pričom sa vytvárajú poruchy - farebné centrá, ktoré spôsobujú absorpciu vo viditeľnej oblasti - napr. NaCl - žltá, KCl - fialová, KBr - modrá. Sfarbenie skla a trvanlivosť sfarbenia sú závislé od zloženia skla a absorbovanej dávky žiarenia). Do tejto skupiny možno zaradiť tiež účinky ionizujúceho žiarenia na hmyz – radiačnú sterilizáciu, resp. hubenie hmyzu (mucha tse-tse). (Spoločnosť BIOSTER, a.s., ČR. je v prevádzke od roku 1973. Technologické zariadenie je dodané firmou Atomic Energy of Canada, v súčasnosti Nordion International, jedným z svetových výrobcov ožarovacích zariadení. Ako zdroj používa izotop  $^{60}\text{Co}$ ).

## Radiačné datovanie

Využíva doby polpremeny rádionuklidov a skúma sa pomer medzi stabilným izotopom a rádioaktívnym, materským a dcérsnym.

V archeológii sa používa najmä uhlíková metóda, ktorá je založená na časovej zmene aktivity kozmogénneho rádionuklidu  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5730$  rokov), resp. narušenie rovnovážneho množstva medzi tvorbou a premenou. Zo zostatkovej mernej aktivity  $^{14}\text{C}$  v náleze možno určiť vek organickej látky (drevo, textil, koža a pod.). Možnosti určenia veku predmetov sú v intervale 20 000 - 50 000 rokov. V poslednej dobe sa meria miesto rádioaktivity absolútny obsah zostatkového  $^{14}\text{C}$  pomocou urýchľovacej hmotnostnej spektrometrie. Výhoda tejto metódy je v množstve analyzovanej vzorky (cca 0,05 mg). Uhlíkovú metódu sa použila tiež na určenie veku vôd (podzemných), organizmov, turínskeho plátna, zvitkov od Mŕtveho mora, obrazov a pod.

## Geológia a kozmológia - geochronológia

Metóda draslík – argón  $^{40}\text{K}$  ( $T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^{10}$  rokov). Po zatuhnutí taveniny nemôže vznikajúci  $^{40}\text{Ar}$  unikáť → možno určiť dobu od zatuhnutia. V izolovanom argóne sa obsah  $^{40}\text{Ar}$  stanoví pomocou hmotnostnej spektrometrie. Datovanie hornín, predmetov vzniknutých z taveniny môže udávať hodnoty  $(2 - 5) \cdot 10^9$  rokov.

Často sa používa tiež metóda rubidium – stronciová  $^{87}\text{Rb}$  ( $T_{1/2} = 4,7 \cdot 10^{10}$  rokov) -  $^{87}\text{Sr}$ .

## Rádionuklidy ako izotopové indikátory

### Označené zlúčeniny

- chémia, biochémia (mechanizmus reakcií, metabolické procesy, výmenné reakcie, difúzne procesy, stanovenie merných povrchov ...)

### Indikátory

- chemické a biochemické analýzy (rádioimunoanalýza)
- biologické analýzy (migrácia živočíchov, prenosi potravy a živín;  $^{32}\text{P}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{42}\text{K}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{14}\text{C}$ )
- lekárska diagnostika (rádiofarmaká  $^{123}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{127}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{157}\text{Dy}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{198}\text{Au}$ ,  $^{201}\text{Tl}$  ...)
- hydrológia ( $^{58}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$  vo forme  $\text{Co}(\text{CN})_6^{3-}$ ;  $^{60}\text{Co}$  a  $^{51}\text{Cr}$  ako komplexy s EDTA;  $^3\text{H}$ )
- priemysel (netesnosti  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ )

Požiarne hlásiče ( $\text{Am-241}$ ; 37 kBq)

Odstraňovanie statickej energie ( $\text{Po-210}$ ; 18 MBq)

Svetelné zdroje (napr. hodinky, buzoly, meracie prístroje, signalizačné zdroje, H-3, Ra-226, Kr-85, Pm-147)

Rádionuklidové batérie (ponorky, kardiostimulátory, družice, vesmírne sondy;  $^{238}\text{PuO}_2$ ;  $^{90}\text{SrTiO}_3$ )

## Ďalšie priemyselné aplikácie:

- defektoskopia  
používa sa hlavne na vyhľadávanie povrchových a vnútorných chýb zvarovaných materiálov, napr. kontrola kvality zvarov ropovodov a plynovodov –  $^{192}\text{Ir}$ ,
- meranie hrúbky materiálu v kontinuálnej prevádzke pomocou žiarenia beta, napr. valcovne, plasty,
- hladinomery  
určovanie výšky hladiny (rôzne zoslabenie signálu na detektore ako dôsledok prechodu žiarenia kvapalinou alebo vzduchom),
- sledovanie pohybu a distribúcie hmoty v rôznych technologických zariadeniach ako napr. miešanie v rotačných peciach - cementárne, homogenita skla, optimalizácia prietokov vody, opotrebovanie predmetov v automobilovom priemysle, sledovanie čistoty,
- plastikársky a gumársky priemysel,
- čistenie odpadových vôd.

## Situácia na Slovensku – realita a plány

Možno hovoriť len o nukleárnej medicíne a projekte vybudovania Cyklotrónového centra SR (začiatkom bolo uznesenie vlády SR č. 434/1996, ktorým bol schválený strategický zámer vytvoriť Cyklotrónové laboratórium v rámci Slovenského metrologického ústavu z prostriedkov zadĺženosti Ruskej federácie voči Slovenskej republike. Celkovo bolo do 31.12.2006 preinvestovaných 5 037 mil. SK). Cyklotrónové centrum SR sa od začiatku buduje ako národné centrum (uznesenie vlády SR 660/1999) – báza urýchľovačových technológií pre zábery rezortu školstva, hospodárstva, obrany, zdravotníctva, životného prostredia a regionálneho rozvoja, ďalších orgánov ústrednej štátnej správy – Úradu jadrového dozoru SR a Úradu pre normalizáciu, metrologiu a skúšobníctvo SR a Slovenskej akadémie vied. Praktické využívanie v centre sústredených technológií bolo v dôsledku toho zamerané predovšetkým na zdravotníctvo a vybrané oblasti priemyslu. 16. októbra 2000 bolo uvedené do prevádzky diagnostické „Pracovisko pozitronovej emisnej tomografie CC SR“, v Onkologickom ústave sv. Alžbety, s. r. o. v Bratislave a 27. 03. 2003 „Pracovisko nukleárnej medicíny CC SR“, zriadené v Ústrednej vojenskej nemocnici SNP“ v Ružomberku. V roku 2004 uzneseniami vlády č. 1003/2004 a 1195/2004 bola vytvorená akciová spoločnosť so 100 % účasťou štátu – BIONT, a. s. Hlavnou náplňou BIONT, a. s. je vývoj, výroba a využitie rádiofarmák značkových krátkožijúcimi rádioizotopmi emitujúcimi pozitrony. Základom je laboratórium cyklotrónu Cyclone 19/8, ktoré umožňuje rutinnú výrobu štyroch najčastejšie používaných PET rádioizotopov ( $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$  a  $^{15}\text{O}$ ) ako aj experimentálnu prípravu celého radu ďalších izotopov. Vyrobené rádiofarmaká sa okrem distribúcie odberateľom, priamo na mieste zhodnocujú na oddelení nukleárnej medicíny, ktoré je vybavené modernými diagnostickými zariadeniami PET/CT a SPECT/PET/CT - tomografmi využívajúcimi na zobrazovanie nádorových ochorení, popri röntgenovom žiarení i krátkožijúce rádiofarmaká.

Hlavným cieľom druhej etapy budovania centra metrologie (2006-2008) urýchľovačov je: výroba izotopov určených pre rádiodiagnostiku nových izotopov, pre rádioterapiu a hadrónová (protónová a neutrónová) terapia onkologických ochorení a priemyselné aplikácie. V terapeutickom pavilóne „J“ bude umiestnený cyklotrón DC-72.

Centrum studenej elektrónovej sterilizácie, plánované vybudovať v rámci CC SR, bude prvé v Slovenskej republike. Je určené na zavádzanie nových priemyselných aplikácií elektrónových urýchľovačov do národného hospodárstva. Je zamerané prioritne na sterilizáciu jednorazových striekačiek, ihliel a rôznych iných výrobkov a materiálov používaných v zdravotníctve. Počíta sa tiež s možnosťou ožarovania rozličných potravinových ingerencií. Projekt počíta s umiestnením i druhého, väčšieho elektrónového urýchľovača s výkonom zväzku do 100 kW, určeného na sieťovanie plastov. Unikátnym využitím cyklotrónu DC-72 je možnosť vlastnej výroby polymérnych jadrových membrán a na ich základe aj vlastnej výroby nanofiltrov používaných na úpravu pitnej vody.

Centrum metrologie urýchľovačov - tretia etapa (2007-2010). Protónový terapeutický komplex.

## ZÁVER

Cieľom prehľadu aplikácií ionizujúceho žiarenia a rádionuklidov nebolo vyčerpať všetky možné varianty aplikácií ani podrobný popis ich princípu. Poukazujú však na jednu dôležitú skutočnosť a to, že bez využitia špecifických vlastností ionizujúceho žiarenia a rádionuklidov sa v súčasnej dobe nezaobídeme.