

Jozef Kubinyi, Jozef Sabol, Andrej Vondrák

Principy radiační ochrany v nukleární medicině

a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami



Jozef Kubinyi, Jozef Sabol, Andrej Vondrák

Principy radiační ochrany v nukleární medicíně

a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude trestně stíháno.

**MUDr. Jozef Kubinyi, Ph.D., FEBNM, doc. Ing. Jozef Sabol, DrSc.,
MUDr. Andrej Vondrák**

PRINCIPY RADIAČNÍ OCHRANY V NUKLEÁRNÍ MEDICÍNĚ

a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami

Autoři:

MUDr. Jozef Kubinyi, Ph.D., FEBNM
doc. Ing. Jozef Sabol, DrSc.
MUDr. Andrej Vondrák

Recenze:

Ing. Jaroslav Ptáček, Ph.D.
MUDr. Ing. Milan Šimánek, Ph.D.

Vydání odborné knihy schválila Vědecká redakce nakladatelství Grada Publishing, a.s.

© Grada Publishing, a.s., 2018

Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2018

Cover Photo Markéta Panyová

Autorem obrázků 1.1, 2.1, 3.1., 4.1, 5.1, 6.2, 7.1, 8.1, 9.1, 10.4, 10.6, 10.8, 11.1, 11.10, 11.14a, 12.1., 14.1a, b, 14.2, 14.3, 15.1 a 16.1 je MUDr. David Zogala. Ostatní obrázky dodali autoři.

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 6999. publikaci

Odpovědný redaktor: Mgr. Marek Chvátal

Sazba a zlom: Helena Mešková

Počet stran 304 + 4 strany barevné přílohy

1. vydání, Praha 2018

Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a.s.

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků, což není zvláštním způsobem vyznačeno.

Postupy a příklady v této knize, rovněž tak informace o lécích, jejich formách, dávkování a aplikaci jsou sestaveny s nejlepším vědomím autorů. Z jejich praktického uplatnění ale nevyplývají pro autory ani pro nakladatelství žádné právní důsledky.

ISBN 978-80-271-2162-5 (pdf)

ISBN 978-80-271-0168-9 (print)

Obsah

| | |
|--|------------|
| Seznam zkratk a symbolů | 8 |
| Předmluva | 11 |
| Část 1 Fyzikální principy radiační ochrany | |
| Úvod | 17 |
| 1 Ionizující a neionizující záření | 18 |
| 2 Zdroje ionizujícího záření | 25 |
| 2.1 Základní pojmy | 25 |
| 2.2 Vlastnosti zdrojů ionizujícího záření | 25 |
| 2.3 Radioaktivní přeměna | 30 |
| 2.4 Aktivita | 32 |
| 2.5 Poločas přeměny | 33 |
| 2.6 Radionuklidy používané v nukleární medicíně | 36 |
| 3 Pole ionizujícího záření | 38 |
| 4 Interakce ionizujícího záření s látkou | 43 |
| 4.1 Charakteristika interakcí | 43 |
| 4.2 Interakce nabitých částic | 46 |
| 4.3 Interakce nepřímo ionizujícího záření | 52 |
| 5 Dozimetrie ionizujícího záření | 65 |
| 5.1 Základní aspekty | 65 |
| 5.2 Expozice | 65 |
| 5.3 Absorbovaná dávka a další související veličiny | 68 |
| 6 Veličiny v radiační ochraně | 82 |
| 6.1 Základní pojmy | 82 |
| 6.2 Kvantifikace stochastických účinků | 84 |
| 6.3 Kvantifikace deterministických účinků | 104 |
| 7 Biologické účinky ionizujícího záření | 107 |
| 7.1 Historické souvislosti | 107 |
| 7.2 Přímé a nepřímé účinky | 108 |
| 7.3 Jednotlivé fáze působení | 111 |
| 7.4 Stochastické a deterministické účinky | 112 |
| 8 Zásady radiační ochrany | 125 |
| 8.1 Koncepce radiační ochrany | 125 |
| 8.2 Mezinárodní doporučení a standardy | 132 |
| 8.3 Zajištění radiační ochrany | 137 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 9 | Měření a monitorování ionizujícího záření | 153 |
| 9.1 | Principy detekce záření | 153 |
| 9.2 | Detektory záření | 156 |
| 9.3 | Osobní integrální dozimetry | 169 |
| 9.4 | Elektronické osobní dozimetry | 176 |
| 9.5 | Specifické aspekty monitorování vnějšího a vnitřního ozáření | 179 |

Část 2 Specifické aspekty radiační ochrany v nukleární medicíně

| | | |
|--|--|-----|
| Úvod | 186 | |
| 10 Radiofarmaka | 188 | |
| 10.1 | Charakteristika a požadavky | 188 |
| 10.2 | Výroba radionuklidů pro přípravu radiofarmak | 190 |
| 10.3 | Příprava a podávání radiofarmak | 196 |
| 10.4 | Kontrola jakosti radiofarmak a přístrojů | 199 |
| 10.5 | Transport a skladování radiofarmak | 200 |
| 11 Zobrazovací metody a technika v nukleární medicíně | 203 | |
| 11.1 | Obecné aspekty | 203 |
| 11.2 | Gamakamery | 205 |
| 11.3 | SPECT a SPECT/CT kamery | 209 |
| 11.4 | PET skener | 211 |
| 11.5 | PET/CT skener | 213 |
| 11.6 | PET/MR skener | 214 |
| 12 Diagnostická vyšetření | 216 | |
| 12.1 | Cíle a principy vyšetření | 216 |
| 12.2 | Specifika vyšetření jednotlivých orgánů a tkání | 216 |
| 12.3 | Radiační zatížení obyvatel z vyšetření v nukleární medicíně | 230 |
| 13 Terapeutické aplikace radiofarmak | 235 | |
| 13.1 | Princip léčby pomocí radiofarmak | 235 |
| 13.2 | Radionuklidová terapie vybraných orgánů | 237 |
| 13.3 | Některé zásady radiační ochrany v terapii pomocí otevřených zářičů | 240 |
| 14 Zajištění radiační ochrany na pracovišti | 246 | |
| 14.1 | Základní dokumenty | 246 |
| 14.2 | Uspořádání pracoviště | 247 |
| 14.3 | Vymezení sledovaného a kontrolovaného pásma | 249 |
| 14.4 | Pracovníci odpovědní za kontrolu a dohled nad radiační ochranou | 253 |
| 14.5 | Program zajištění radiační ochrany | 253 |
| 14.6 | Monitorování osob a pracoviště | 255 |
| 14.7 | Likvidace radioaktivních odpadů | 256 |

| | |
|--|------------|
| 15 Ochrana pracovníků | 258 |
| 15.1 Obecné aspekty ochrany personálu v nukleární medicíně | 258 |
| 15.2 Celkové ozáření personálu na pracovištích nukleární medicíny | 262 |
| 15.3 Některá specifická opatření ke kontrole a optimalizaci ozáření pracovníků | 265 |
| 16 Zajištění ochrany pacientů v nukleární medicíně | 269 |
| 16.1 Zásady zajištění ochrany pacientů | 269 |
| 16.2 Požadavky na radiační ochranu pacientů | 272 |
| 16.3 Ochrana těhotných žen | 276 |
| 16.4 Specifická hlediska ochrany pacientů při PET/CT vyšetřeních | 277 |
| 16.5 Komunikace s pacientem a jeho informovaný souhlas | 280 |
| 17 Ochrana veřejnosti a dalších osob | 283 |
| 18 Požadavky na odbornou způsobilost pracovníků | 288 |
| 19 Trendy radiační ochrany v nukleární medicíně | 294 |
| Autoři | 296 |
| Rejstřík | 298 |
| Souhrn | 301 |
| Summary | 303 |

Seznam zkratk a symbolů

| | |
|---------------------------|---|
| a_M | hmotnostní aktivita (veličina) |
| a_S | plošná aktivita |
| a_V | objemová aktivita |
| A | ampér (jednotka) |
| A | aktivita (veličina) |
| A_d | aktivita dceřiného radionuklidu |
| A_m | aktivita mateřského radionuklidu |
| ADC | Analog to Digital Converter (analogově číslicový převodník) |
| ALARA | As Low as Reasonably Achievable (u ozáření: tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout) |
| ALI | Annual Limit on Intake (roční limit příjmu radionuklidu) |
| ARS | akutní radiační syndrom |
| AV ČR | Akademie věd České republiky |
| AZ | atomový zákon |
| BGO | $\text{Bi}_4(\text{GeO}_4)_3$ |
| Bq | becquerel (jednotka) |
| BSS | Basic Safety Standards (základní bezpečnostní standardy) |
| C | coulomb (jednotka) |
| Ci | curie (jednotka) |
| $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ | fluorid vápenatý aktivovaný europiem (scintilátor) |
| $\text{CaI}(\text{Na})$ | jodid vápenatý aktivovaný sodíkem (scintilátor) |
| CdTe | kadmium tellurid (scintilátor) |
| $\text{CsI}(\text{Tl})$ | jodid cesný aktivovaný thalliem (scintilátor) |
| CNS | centrální nervová soustava |
| CSOD | Celostátní služba osobní dozimetrie |
| CT | Computed Tomography (výpočetní tomografie) |
| CZT | CdZnTe (tellurid zinečnato-kademnatý) |
| ČL | Český lékopis |
| ČR | Česká republika |
| ČVUT | České vysoké učení technické v Praze |
| D | dávka (absorbovaná dávka) |
| D_T | dávka v orgánu nebo tkáni T (organová dávka) |
| D_{vzd} | dávka ve vzduchu |
| DDREF | Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor (faktor zohledňující příkon dávky) |
| DLP | Dose-Length Product |
| DNA | Deoxyribonucleic Acid (deoxyribonukleová kyselina) |
| E | energie |
| E | efektivní dávka |
| E_f | energie fotonu |
| EC | Electron Capture (elektronový záchyt) |
| EU | Evropská unie |
| eV | elektronvolt |
| F | fluor |
| FDG | fluorodeoxyglukóza |

| | |
|------------------|--|
| FWHM | Full Width at Half Maximum (celá šířka v poloviční výšce maxima) |
| GaAs | arsenid gallitý (polovodič) |
| Ge(Li) | germanium driftované lithiem (detektor) |
| GM | Geiger-Müllerův detektor |
| Gy | gray (jednotka) |
| Gy-Eq | gray-ekvivalent (jednotka) |
| h | hodina |
| H | dávkový ekvivalent |
| $H^*(d)$ | prostorový dávkový ekvivalent vztahující se k hloubce d |
| $H'(d, \Omega)$ | směrový dávkový ekvivalent vztahující se k hloubce d a vyznačenému směru |
| $H_p(d)$ | osobní dávkový ekvivalent vztahující se k hloubce d |
| H_T | ekvivalentní dávka (v orgánu nebo tkáni T) |
| HPGe | detektor ze superčistého germania |
| Hz | hertz (jednotka) |
| IAEA | International Atomic Energy Agency (MAAE) |
| ICRP | International Commission on Radiological Protection |
| ICRU | International Commission on Radiation Units and Measurements |
| ILO | International Labour Office |
| IRPA | International Radiation Protection Association |
| IXRPC | International X-ray and Radium Protection Committee |
| IZ | ionizující záření |
| J | joule (jednotka) |
| K | kerma (kinetic energy released in material) |
| K_{vzd} | kerma ve vzduchu |
| LD ₅₀ | dávka letální pro polovinu ozářených osob |
| LET | Linear Energy Transfer (lineární přenos energie) |
| LNT | Linear Non-Threshold (lineární bezprahový model) |
| LVR | lehkovodní výzkumný reaktor |
| MAAE | Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) |
| MIRD | Medical Internal Radiation Dose (metodika výpočtu vnitřního ozáření) |
| MR | magnetická rezonance |
| MZ ČR | Ministerstvo zdravotnictví České republiky |
| NaI(Tl) | jodid sodný aktivovaný talliem (scintilátor) |
| NEA | Nuclear Energy Agency (Agentura pro jadernou energii) |
| NM | nukleární medicína |
| NRS | Národní referenční standardy |
| NUVIA | NUVIA Dosimetry, s.r.o., Na Truhlářce 39/64, 180 00 Praha |
| OECD | Organization for Economic Cooperation and Development |
| OSL | Optically Stimulated Luminescence (opticky stimulovaná luminiscence) |
| PET | Positron Emission Tomography (pozitronová emisní tomografie) |
| PET/CT | hybridní skener PET v kombinaci s CT |
| PET/MR | hybridní skener PET v kombinaci s MR |
| Q | náboj |
| Q_F | jakostní faktor |
| r | rok |

| | |
|-----------|--|
| R | rentgen (jednotka) |
| RBE | Relative Biological Effectiveness (relativní biologická účinnost) |
| RO | radiační ochrana |
| S | brzdná schopnost |
| SPECT | Single Photon Emission Computed Tomography (jednofotonová emisní výpočetní tomografie) |
| SPECT/CT | hybridní skener SPECT v kombinaci s CT |
| SÚJB | Státní úřad pro jadernou bezpečnost |
| SÚRO | Státní ústav radiační ochrany |
| $T_{1/2}$ | poločas přeměny |
| T_b | biologický poločas přeměny |
| T_{ef} | efektivní poločas přeměny |
| TLD | termoluminiscenční dozimetr |
| ÚJF | Ústav jaderné fyziky |
| UNSCEAR | United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (Vědecký výbor OSN pro účinky atomového záření) |
| UV | ultraviolet (ultrafialové) |
| ÚNM VFN | Ústav nukleární medicíny Všeobecné fakultní nemocnice v Praze |
| VF | VF, a.s., Svitavská 588, 679 21 Černá Hora |
| VFN | Všeobecná fakultní nemocnice |
| w_R | radiační váhový faktor |
| w_T | tkáňový váhový faktor |
| W_i | energie potřebná pro vytvoření jednoho iontového páru ve vzduchu |
| WHO | World Health Organization (Světová zdravotnická organizace) |
| X | expozice (veličina) |
| Z | protonové číslo |
| ZIZ | zdroj ionizujícího záření |

Předmluva

Éra **nukleární medicíny** začala koncem 40. let minulého století a postupně se vyvinula v samostatnou medicínskou specializaci zabývající se diagnostikou a terapií pomocí otevřených zářičů. Nukleární medicínu, založenou na podání otevřeného radioaktivního zářiče do organismu vyšetřované či léčené osoby, charakterizují dva základní principy – stopovací princip (princip využívající detekci ionizujícího záření emitovaného z těla pacienta) a princip cíleného podání radioaktivní látky o dostatečné aktivitě k tomu, aby došlo k ozáření vymezeného objemu tkáně či orgánu k léčebným účelům.

Základem pro vyšetřování a léčebné aplikace v nukleární medicíně je tzv. **stopovací princip** („tracer principle“), objevený Georgem de Hevesym (Nobelova cena 1943). Hevesy studoval metabolické procesy u rostlin i zvířat pomocí radioaktivních izotopů. Část stabilních izotopů nahradil malým množstvím radioaktivních izotopů, což mu umožnilo sledovat požadovaný děj. Nukleární medicína využívá stopovacího principu ke **sledování regionální fyziologie a biochemie** uvnitř organismu pomocí přístrojů snímajících záření radionuklidem značeného farmaka (radiofarmaka) z těla vyšetřovaného. Na stejném základě, ale pro naprosto jiný účel se obdobný princip využívá k radionuklidové terapii, při které se radiofarmakum záměrně dostává do cílového objemu tkáně, který je zapotřebí ozářit vysokou dávkou.

Současná moderní nukleární medicína je jedinečná tím, že poskytuje informaci o stavu pacienta, která nemusí být snadno získána nebo není vůbec dosažitelná jinými diagnostickými metodami. Je to proto, že nukleární medicína zkoumá spíše funkci, průběh metabolických procesů a různé jiné fyziologické aktivity v těle a nezaměřuje se primárně na anatomii a strukturu vyšetřovaných částí organismu. Při mnoha onemocněních dochází k funkčním patologickým změnám mnohem dříve, než se objeví strukturální (morfologické) postižení. V širších souvislostech dnes pak mluvíme o molekulárním zobrazování, které se rovněž vyznačuje využitím stopovacího principu, ale nemusí využívat vždy jenom radionuklidy (například funkční magnetická rezonance). Vztah nukleární medicíny k strukturálním (zejména radiodiagnostickým) zobrazovacím metodám je komplementární, tj. vhodně se doplňují – což lze dobře demonstrovat na vzniku hybridního zobrazování. Vyšetření v nukleární medicíně ale přináší z hlediska radiační ochrany hned několik problémů.

Předně je třeba si uvědomit, že efektivní detekční účinnost diagnostických přístrojů je nízká, protože na rozdíl od cíleného transmisního záření (využívaného v radiodiagnostice nebo radioterapii) se emitované záření šíří všemi směry a snímáme jenom jeho malou část dopadající na detektor. Pokud bychom mohli snímat všechny fotony, které vznikají rozpadem radionuklidu, mohli bychom aplikovat vyšetřovanému mnohem menší aktivity a současně bychom dosahovali lepšího prostorového rozlišení při vyšetření. Množství informace vyjádřené v zachycených impulzových signálech v nukleární medicíně se pohybuje jenom v řádech statisíců, zatímco v radiodiagnostice je řádově v milionech. To je pro diagnostickou nukleární medicínu zásadní limitace, která současně znemožňuje dále snižovat aplikovanou aktivitu. Tento problém ovlivňuje zejména úroveň radiační zátěže pacienta, kterému musíme aplikovat dostatečné množství radiofarmaka, aby záznam z vyšetření bylo možné kvalitně vyhodnotit.

Dalším souvisejícím problémem je nemožnost zcela uchránit personál od účinků záření. Zatímco v radiodiagnostice lze až na výjimky zcela eliminovat ozáření personálu (transmisní záření prochází tělem vyšetřovaného pacienta v době, kdy je personál

v bezpečné vzdálenosti a za patričním stíněním), **v nukleární medicíně je zdrojem záření** jednak samotný **pacient** a jednak **radiofarmakum** a s oběma je personál ve styku. Takže všichni zdravotničtí pracovníci, kteří se účastní procesu vyšetření, jsou vystaveni záření a při každém vyšetření obdrží určitou dávku záření. Počínaje farmaceutem, který radiofarmakum připravuje, přes fyzika, který provádí měření, lékaře aplikujícího radiofarmakum pacientovi až po zdravotní sestru a radiologické asistenty, kteří provádějí vlastní vyšetření a musí s pacientem manipulovat. Dokonce ani pracovníci recepce a úklidu se nevyhnou být malým dávkám záření, protože pacienti po vyšetření a odpady jsou nějakou dobu zdrojem záření. Expozice personálu ionizujícím záření na nukleární medicíně nelze nikdy snížit na nulu. Tato skutečnost plyne také ze známého faktu, že záření gama nelze nikdy úplně odstínit, lze jej pouze zeslabit příslušným stíněním. Z uvedeného plyne mimořádná důležitost radiační ochrany (a její znalosti) pro všechny pracovníky nukleární medicíny.

Pacient, který je vyšetřován nebo léčen pomocí radiofarmaka, je tedy vždy vystaven působení záření. Vždy je však nutné hledat cesty, které povedou k optimalizaci neboli minimalizaci ozáření na co nejnižší hodnotu. Na druhé straně musíme aplikovat dávky záření, které nám umožní získat příslušnou diagnostickou informaci v požadované kvalitě nebo požadovaný terapeutický efekt (při maximálním šetření zdravých tkání).

V poslední době se ve světě i u nás věnuje mimořádná pozornost **zajištění adekvátní radiační ochrany** ve všech oblastech používání radiačních a jaderných technologií včetně nukleární medicíny, která již nezanedbatelným způsobem přispívá k **ozáření populace**. Jak známo, obyvatelstvo je neustále vystaveno působení přírodního radiačního pozadí, které v České republice je kolem 3 mSv efektivní dávky za rok. Přitom u nás, stejně jako i v dalších vyspělých zemích, v důsledku nárůstu použití ionizujícího záření v medicíně dochází postupně ke zvýšení průměrné efektivní dávky pocházející z těchto aplikací. Zatímco ještě před asi 30 lety byl podíl ozáření obyvatelstva z diagnostických aplikací menší než 15 %, dnes lékařské ozáření v některých zemích již překročilo úroveň přírodního pozadí. Proto je zapotřebí ve všech oblastech používání radiačních a jaderných technologií zavést a dodržovat přísná opatření zaměřená na ochranu všech osob před nežádoucím a nezdůvodněným ozářením. V tomto smyslu je nezbytně nutné důsledně i na pracovištích nukleární medicíny dodržovat platné předpisy a vyhlášky SÚJB, které vesměs vycházejí z posledních mezinárodních doporučení, zejména z doporučení ICRP a bezpečnostních standardů EU a IAEA. K tomu, aby veškeré postupy potřebné k zajištění adekvátní radiační ochrany byly dodržovány, je nutné, aby příslušní pracovníci lékařského i nelékařského zaměření byli řádně odborně připraveni.

Předkládaná publikace by měla posloužit především pracovníkům, kteří v oblasti nukleární medicíny zodpovídají za radiační ochranu. Kromě přehledu fyzikálních základů, což je předmětem první části publikace, jsou v druhé části diskutovány také příslušné klinické aspekty, jejichž porozumění a pochopení souvislosti s ozářením jsou důležitým předpokladem k zajištění odpovídající úrovně radiační ochrany na pracovišti.

Obsah první částí monografie je zaměřen na poměrně podrobný popis fyzikálních principů radiační ochrany včetně aktuálních veličin potřebných na kvantifikaci radiačních zdrojů, pole záření a interakce záření s látkou i veličin, bez nichž se neobejdeme v dozimetrii a hlavně v samotné ochraně před zářením. Definice a interpretace těchto veličin je prezentována plně v souladu s posledními mezinárodními doporučeními a standardy. Od fyzikálních základů se postupně přechází k biologickým účinkům

záření a k současně pojímané filozofii a úloze, kterou radiační ochrana sehrává ve všech oblastech nukleární medicíny. Na to navazuje přehled příslušných předpisů na zajištění radiační ochrany v medicíně, kde je důraz kladen na splnění závazných požadavků vyplývajících z optimalizace ozáření a zejména na vyhovění příslušným dávkovým limitům a specifickým referenčním úrovním. Patříčná pozornost je věnována také měření a monitorování záření pro potřeby nejen samotné radiační ochrany, ale také pro účely kontroly jakosti v nukleární medicíně.

Druhá část publikace je věnována aktuálním specifickým aspektům radiační ochrany pro určité konkrétní potřeby nukleární medicíny, kde se vychází z popisu vlastností radiofarmak a principů a funkce používané zobrazovací techniky. Z hlediska radiační ochrany jsou uvedeny nejčastější diagnostické a terapeutické postupy nukleární medicíny s důrazem na možnost snížení ozáření pacienta. Na tyto kapitoly navazuje prezentace problematiky spojené se zajištěním radiační ochrany na pracovišti se speciálními aspekty, které se týkají ochrany pracovníků, pacientů a dalších osob včetně ochrany obyvatelstva jako celku. Součástí této části jsou také požadavky na odbornou způsobilost pracovníků s důrazem na jejich připravenost pro implementaci všech závazných opatření směřujících k minimalizaci ozáření osob i ochranu životního prostředí v důsledku používání otevřených záříčů. Poslední kapitola stručně shrnuje očekávané trendy a další vývoj nukleární medicíny, zejména pokud jde o kontrolu a optimalizaci ozáření osob v této oblasti.

Ve snaze o komplexnost jsme v publikaci uvedli rovněž řadu údajů, které nebudou stěžejní pro všechny kategorie čtenářů. Informace, kterou bude potřebovat radiologický fyzik, lékař, radiologický asistent nebo jiný pracovník, se může lišit, což souvisí se specifickou náplní jejich práce. Je proto na uvážení uživatele této knihy, které části jsou pro něj důležité a které s jeho konkrétním zaměřením tolik nesouvisí. Doufáme ale, že všichni zmiňovaní odborníci v knize najdou dostatek potřebných informací o radiační ochraně, která jim dále pomůže snížit radiační rizika a zátěž zářením v jejich práci.

Je naší milou povinností poděkovat recenzentům MUDr. Ing. Milanu Šimánkovi, Ph.D., primáři Oddělení nukleární medicíny NP v Pelhřimově, a Ing. Jaroslavu Ptáčkoví, Ph.D., vedoucímu Oddělení lékařské fyziky a radiační ochrany FNOL v Olomouci, za jejich konstruktivní připomínky, které nepochybně přispěly ke zvýšení kvality předkládané monografie. Autoři také děkují doc. Ing. Františku Podzimekovi, CSc., Ing. Daniele Skibové, Ph.D., a Ing. Janě Hudzietzové za jejich pečlivé prohlédnutí rukopisu a cenné postřehy, které rovněž napomohly ke zlepšení publikace.

V Praze, 16. 4. 2018

Autoři

Část 1

Fyzikální principy radiační ochrany

Úvod

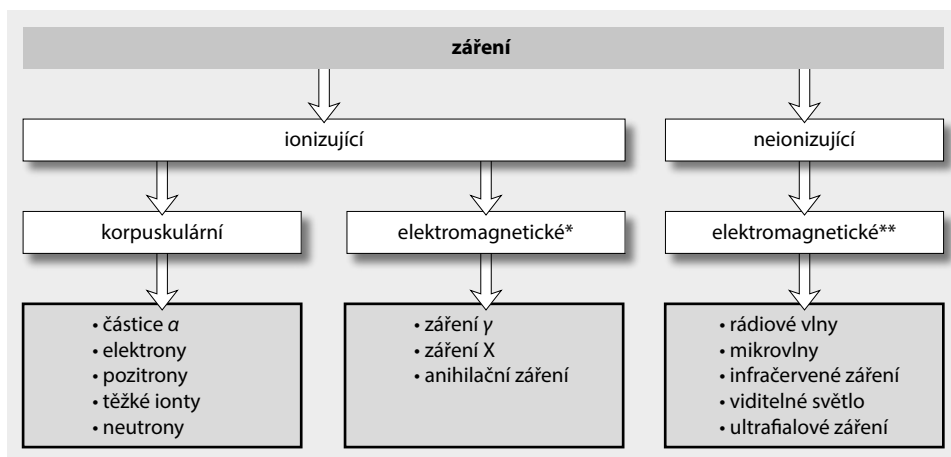
Každá *aplikace radiačních a jaderných technologií* v průmyslu, medicíně, výzkumu i v mnoha dalších oblastech je spojena s určitým škodlivým **ozářením osob** a může také vést k úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Za **normálních** (plánovaných) podmínek je potenciálně nepříznivý účinek ozáření, resp. radioaktivní kontaminace tak nízký, že takové riziko lze považovat za **triviální**, protože je vesměs srovnatelné s jinými druhy rizik, kterým jsme vystaveni v běžném životě včetně různých pracovních činností. Aby se zajistila adekvátní ochrana osob a životního prostředí, je nezbytné postupovat v souladu s příslušnými předpisy a standardy. Plnění těchto požadavků na radiační ochranu se musí neustále odpovídajícím způsobem monitorovat a ověřovat. K tomu slouží zejména speciální detektory, dozimetry a jiné senzory nebo čidla ionizujícího záření, které musí být, spolu s příslušnými dalšími vyhodnocovacími přístroji, koncipovány tak, aby umožnily získat potřebnou informaci o ozáření nebo radioaktivní kontaminaci.

Výsledek jakéhokoliv měření nebo monitorování prováděného pro potřeby radiační ochrany má cenu pouze tehdy, jestliže je prezentován ve formě **relevantní veličiny**, která musí být jednoznačně a rigorózně definována. Proto je nesmírně důležité, aby odezvy monitorovacích přístrojů nebo dozimetrů bylo možné interpretovat a přisoudit určité specifické veličině. Veličiny používané pro účely **radiační ochrany** představují celou řadu těch, které zahrnují především vlastnosti zdrojů záření a radiačního pole, charakter interakcí záření s látkou a výsledky těchto procesů, které umožňují stanovit absorpci energie záření v látce. Tímto způsobem lze stanovit nejenom samotnou absorbovanou energii záření v živé tkáni, ale i další parametry záření, které mají rozhodující význam pro ocenění možných **biologických účinků** záření na lidský organismus nebo jeho jednotlivé orgány či tkáně.

Z těchto důvodů se proto v první části předkládané monografie kromě vlastních principů a zásad radiační ochrany věnuje zvláštní pozornost zavedení příslušných veličin a jednotek, s nimiž se v této oblasti pracuje. Je při tom důležité rozlišit mezi čistě fyzikálními veličinami a veličinami, které byly definovány pro kvantifikaci biologických účinků záření.

1 Ionizující a neionizující záření

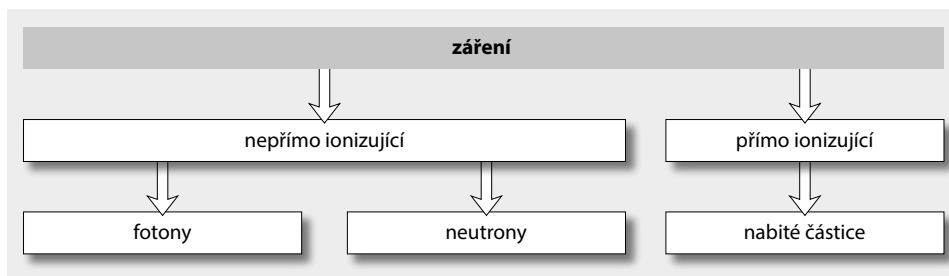
Obecně lze záření považovat za určitou specifickou formu energie, která se ze zdroje záření šíří do prostoru v podobě částic nebo vlnění. V zásadě rozeznáváme ionizující záření a neionizující záření (obr. 1.1). **Ionizující záření** se vyznačuje tím, že při interakcích s látkou ionizuje atomy této látky [1, 2]. Při ionizaci dochází k vyražení jednoho z vnějších elektronů původně neutrálního atomu, který se potom stává kladným iontem. Ionizující záření se vyskytuje v podobě částic nebo fotonů elektromagnetického záření s dostatečnou energií k tomu, aby sekundární nabitě částice uvolněné těmito fotony při interakcích v absorbátoru byly schopny ionizovat prostředí.



Obr. 1.1 Rozdělení záření do dvou základních skupin: ionizující a neionizující záření (frekvence nad asi $2 \cdot 10^{15}$ Hz a **frekvence pod $2 \cdot 10^{15}$ Hz)

Ionizující záření lze rozdělit do dvou skupin: **přímo ionizující záření** a **nepřímo ionizující záření** (obr. 1.2). Za přímo ionizující záření považujeme nabitě částice, zatímco mezi nepřímo ionizující záření patří zejména elektromagnetické záření (fotony) a neutrony. Nabitě částice interagují s prostředím v celém průběhu své dráhy, a tak se jejich **dosah** vyznačuje určitou konkrétní délkou (v závislosti na energii částic a vlastnostech částic a také složení látky). Nepřímo ionizující záření (např. fotony záření gama) na své dráze interaguje s prostředím v izolovaných událostech s určitou pravděpodobností, která souvisí především s jeho energií a vlastnostmi prostředí. Proto zde nelze hovořit o dosahu či doběhu jednotlivých částic, nýbrž pouze o jejich **zeslabení** po průchodu určité vrstvy dané látky.

Ionizující záření i neionizující záření nacházejí významné uplatnění v mnoha užitečných aplikacích, z nichž řada by se jinak nedala realizovat. Bez ionizujícího záření se neobejdou zejména některá důležitá **diagnostická** vyšetření v **nukleární medicíně**. Nezanedbatelnou roli hraje ionizující záření také při **léčbě** pacientů, především u onkologických onemocnění. Rozšířené je rovněž využití ionizujícího záření v průmyslu a zemědělství a také ve vědě a výzkumu, kde se s výhodou uplatňují nejrůznější aplikace radiačních a jaderných technologií včetně využívání jaderné energie pro mírové



Obr. 1.2 Charakteristika ionizujícího záření podle způsobu ionizace

účely (jaderné elektrárny, výzkumné jaderné reaktory atd.). U veřejnosti je vesměs negativně vnímáno použití (resp. zneužití) jaderné energie během válečných konfliktů nebo havárie jaderných elektráren. Odtud pramení často u obyvatelstva strach ze všeho, kde se vyskytují slova „atomový“, „jaderný“ nebo „nukleární“.

Obecně je ionizující záření pro všechny živé organismy určitým způsobem škodlivé. Musíme si však uvědomit, že žijeme v prostředí, kde jsme neustále vystaveni působení **přírodního radiačního pozadí**, které se zde vyskytuje od samotného počátku existence lidstva. Na druhé straně všude tam, kde člověk může přijít do kontaktu se zářením a je **záměrně ozářen nad rámec přírodního pozadí**, je nezbytné zajistit jeho náležitou ochranu a bezpečnost.

Za tímto účelem byla přijata celá řada předpisů, vyhlášek a zákonů, které upravují využití záření v jednotlivých oblastech lidské činnosti tak, aby nedošlo k nežádoucímu poškození zdraví pracovníků se zářením nebo obyvatel. Tyto předpisy umožní využívání nesporně přínosných aplikací zdrojů ionizujícího záření, ale současně zabezpečí, aby ozáření nepřekročilo určitou **mezí úroveň**, která nepředstavuje žádné významnější **riziko** (resp. toto riziko je srovnatelné s rizikem z jiných pracovních činností nebo každodenního života, tj. toto riziko se považuje za akceptovatelné, protože je více než vyváжено přínosy, které s sebou nesou radiační aplikace). Navíc se v dnešní době bezpečnostní pravidla týkají nejenom zajištění ochrany osob před zářením, ale i zabezpečení zdrojů záření před jejich potenciálním zneužitím pro teroristické účely.

Na rozdíl od nepřímě ionizujícího záření, tj. neutronů a elektromagnetického záření o energii větší než 5 keV (brzděné záření, charakteristické záření, záření gama a anihilační záření), které se nevyznačují žádným nábojem, jsou nabitě částice charakterizovány záporným nebo kladným nábojem. Do přímě ionizujícího záření spadají především elektrony, pozitrony, protony, částice alfa a těžké ionty, což jsou vlastně atomy, kterým ve vnějším elektronovém obalu schází jeden nebo více elektronů. Srovnání těchto částic podle uvedených parametrů je v tab. 1.1.

Proton je základní stavební částice atomového jádra a nese náboj $+1e$. Částice alfa (záření alfa), kterou tvoří dva protony a dva neutrony, je charakterizována nábojem $+2e$. Elektrony (také někdy nazývané negatrony) jsou nositeli záporného elementárního náboje e , přičemž $1 e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} C$. Hmotnost pozitronů odpovídá hmotnosti elektronu a jejich náboj je také stejný, ale opačného znaménka.

Elektrony a pozitrony emitované nestabilními jádry atomů (zářiči beta) se obvykle označují jako částice beta (záření beta), přičemž symbol β^- reprezentuje elektrony, zatímco označení β^+ reprezentuje pozitrony.

Při průchodu látkou se pozitrony chovají v zásadě stejně jako elektrony, avšak pozitron na konci své dráhy, když se jeho energie blíží nule, anihiluje (zanikne). Tak např. u pozitronů emitovaných radionuklidem ^{18}F s maximální energií kolem 0,6 MeV se jedná o délku dráhy ve vodě na úrovni 0,2 mm s maximem kolem 2,4 mm. Anihilace je jev, při kterém se spojí pozitron s volným elektronem (nebo obecně částice a antičástice), přičemž obě původní částice zanikají a vyzáří se energie v podobě dvou anihilačních fotonů (letících od sebe v opačném směru), každého o energii 511 keV. Tohoto jevu se využívá v pozitronové emisní tomografii (PET) [3, 4].

Tab. 1.1 Hmotnost a náboj důležitých nabitých částic

| Druh částic | Hmotnost (kg) | Náboj (C) |
|-------------|-----------------------------|------------------------------|
| alfa | $6,644\ 656 \cdot 10^{-27}$ | $+3,204\ 353 \cdot 10^{-19}$ |
| proton | $1,672\ 621 \cdot 10^{-27}$ | $+1,602\ 176 \cdot 10^{-19}$ |
| elektron | $9,109\ 383 \cdot 10^{-31}$ | $-1,602\ 176 \cdot 10^{-19}$ |
| pozitron | $9,109\ 383 \cdot 10^{-31}$ | $+1,602\ 176 \cdot 10^{-19}$ |

Rentgenové záření v souladu s místem svého vzniku může mít charakter **brzdného záření** nebo **charakteristického záření**. Brzdné záření vykazuje **spojité** spektrum a vzniká brzděním (projevujícím se postupnou ztrátou energie) energetického elektronu v blízkosti atomových jader okolního prostředí (zdrojem je např. rentgenka CT skenerů). Na druhé straně energetické spektrum fotonů charakteristického záření se vyznačuje **diskrétní** povahou a souvisí s energií mezi energetickými úrovněmi elektronů v obalu atomu. Při interakci ionizujícího záření může dojít k vyražení vázaného elektronu ze slupky blíže k jádru atomu. Volné místo po takovém elektronu se hned zaplní elektronem z vyšší slupky a výsledkem je vyzáření fotonu charakteristického záření o energii odpovídající rozdílu energetických hladin příslušných slupek.

Ilustrace typického případu **generování rentgenového záření** je na obr. 1.3, kde je schematicky znázorněno energetické spektrum rentgenového spojitého a charakteristického záření (napětí na rentgence 150 kV, wolframový terčik, filtrace). Na svislé ose grafu je vyneseno počet fotonů rentgenového záření vztahený na jednotkový interval energie. Přitom z hlediska vlastností fotonového záření a jeho interakce s látkovým prostředím vůbec nezávisí na původu tohoto záření. Pro interakci má rozhodující význam pouze energie fotonového záření.

Důležitý druh fotonového záření představuje **záření gama** vysílané jádry nestabilních atomů. Jeho spektrum je **monoenergetické** a unikátní pro každý radionuklid emitující toto záření. Rozsah energií záření gama je od několika desítek keV do několika jednotek MeV.

Značná část radionuklidů patří do skupiny beta zářičů, které ze svých jader emitují **částice beta** se **spojitým** spektrem (často doprovázené i emisí kvant záření gama), kde je stěžejním parametrem maximální energie částic. Přitom v některých případech jsou radioaktivní přeměny doprovázeny více různými částicemi, resp. fotony, které se