GRADA

Jozef Kubinyi, Jozef Sabol, Andrej Vondrák

Principy radiační ochrany v nukleární medicíně

a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami

GRADA®

Jozef Kubinyi, Jozef Sabol, Andrej Vondrák

Principy radiační ochrany v nukleární medicíně

a dalších oblastech práce s otevřenými radioaktivními látkami

Grada Publishing

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 zkratek 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 zkratek 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	$Bi_4(GeO_4)_3$
Bq	becquerel (jednotka)
BSS	Basic Safety Standards (základní bezpečnostní standardy)
C	coulomb (jednotka)
Ci	curie (jednotka)
CaF_2(Eu)	fluorid vápenatý aktivovaný europiem (scintilátor)
CaI(Na)	jodid vápenatý aktivovaný sodíkem (scintilátor)
CdTe	kadmium tellurid (scintilátor)
CsI(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 (orgánová 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 Luminiscence (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 Effectivenes (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 patřičným 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 sestry a radiologické asistenty, kteří provádějí vlastní vyšetření a musí s pacientem manipulovat. Dokonce ani pracovníci recepce a úklidu se nevyhnou byť malým dávkám záření, protože pacienti po vyšetření a odpady jsou nějakou dobu zdrojem záření. Expozice personálu ionizujícímu 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. Patřičná 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 zářičů. 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 nesouvisejí. 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 Ptáčkovi, 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 Podzimkovi, 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

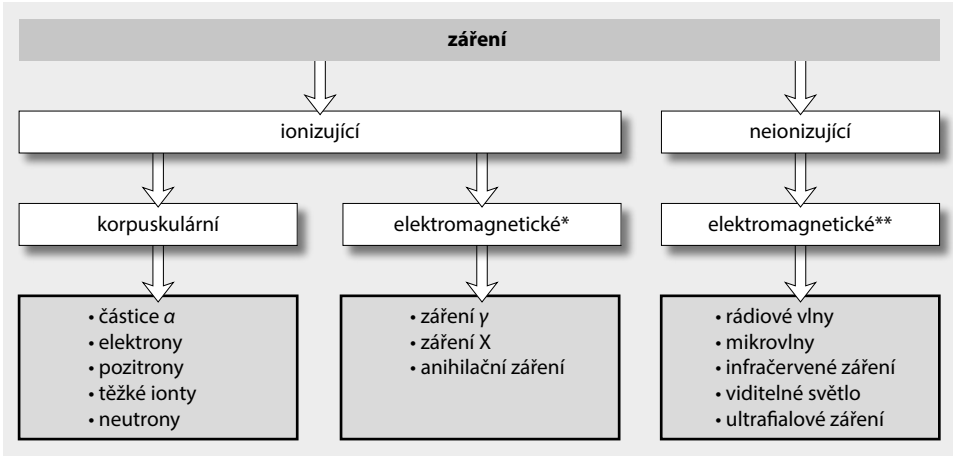
Každá ***aplikace radiačních a jaderných technologií*** v průmyslu, medicíně, výzkumu i v mnoha dalších oblastech je spojena s určitým škodlivým ***ozářením osob*** a může také vést k úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Za ***normálních*** (plánovaných) podmínek je potenciálně nepříznivý 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 tkání, 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

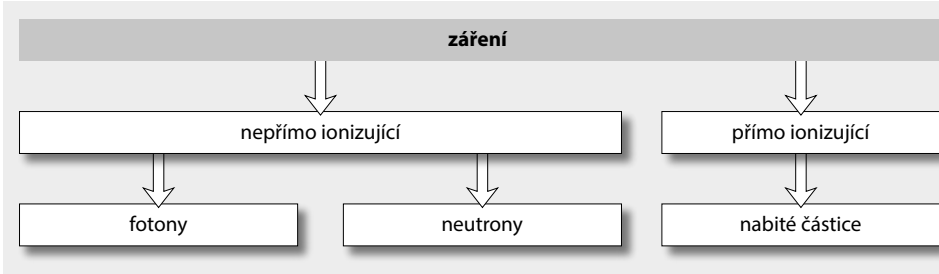
Obecně lze záření považovat za určitou specifickou formu energie, která se ze zdroje záření šíří do prostoru v podobě částic nebo vlnění. V zásadě rozeznáváme ionizující záření a neionizující záření (obr. 1.1). ***Ionizující záření*** se vyznačuje tím, že při interakcích s látkou ionizuje atomy této 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 nabité 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 2.10^{15} Hz a **frekvence pod 2.10^{15} Hz)*

Ionizující záření lze rozdělit do dvou skupin: ***přímo ionizující záření*** a ***nepřímo ionizující záření*** (obr. 1.2). Za přímo ionizující záření považujeme nabité částice, zatímco mezi nepřímo ionizující záření patří zejména elektromagnetické záření (fotony) a neutrony. Nabité 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 ***mezní úroveň***, která nepředstavuje žádné významnější ***riziko*** (resp. toto riziko je srovnatelné s rizikem z jiných pracovních činnosti nebo každodenního života, tj. toto riziko se považuje za akceptovatelné, protože je více než vyváženo 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 nepřímo ionizujícího záření, tj. neutronů a elektromagnetického záření o energii větší než 5 keV (brzdné záření, charakteristické záření, záření gama a anihilační záření), které se nevyznačují žádným nábojem, jsou nabité částice charakterizovány záporným nebo kladným nábojem. Do přímo 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 $1\ e \simeq 1{,}602.10^{-19}$ 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.