

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 medicině

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 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	$\text{Bi}_4(\text{GeO}_4)_3$
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 (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 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) poškození. 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 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 nejnížší 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 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 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

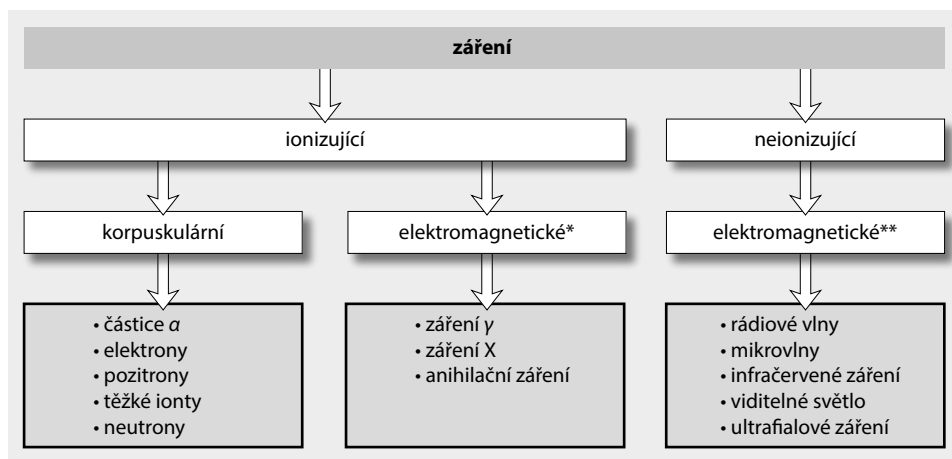
Každá **aplikace radiačních a jaderných technologií** v průmyslu, medicíně, výzkumu i v mnoha dalších oblastech je spojena s určitým škodlivým **ozářením osob** a může také vést k úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Za **normálních** (plánovaných) podmínek je potenciálně nepříznivý účinek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

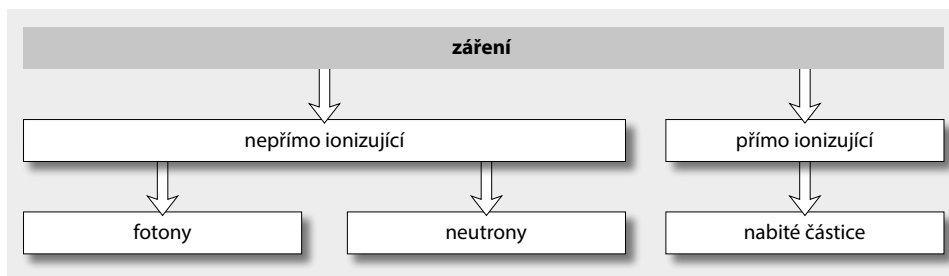
Obecně lze záření považovat za určitou specifickou formu energie, která se ze zdroje záření šíří do prostoru v podobě částic nebo vlnění. V zásadě rozeznáváme ionizující záření a neionizující záření (obr. 1.1). **Ionizující záření** se vyznačuje tím, že při interakcích s látkou ionizuje atomy této látky [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 2.10^{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 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 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 nabití 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 $1\ e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}\ C$. 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

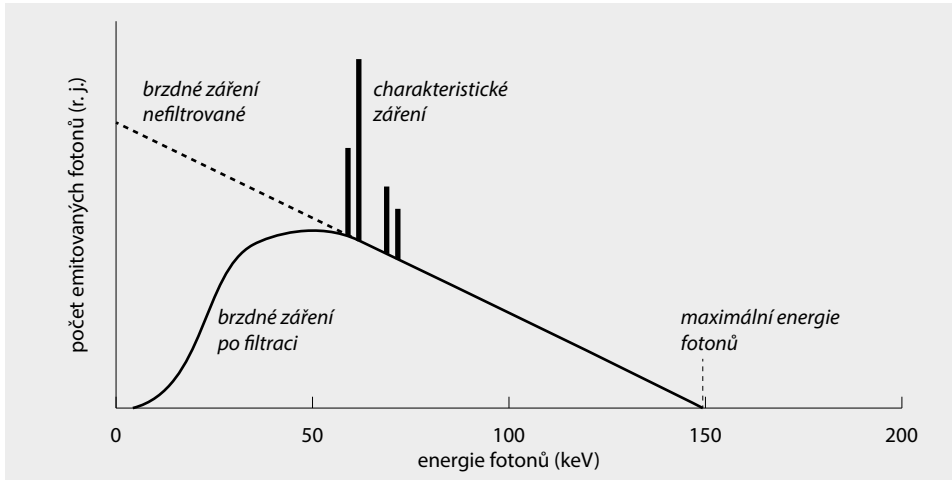
Druh částic	Hmotnost (kg)	Náboj (C)
alfa	$6,644\ 656 \cdot 10^{-27}$	$+3,204\ 353 \cdot 10^{-19}$
proton	$1,672\ 621 \cdot 10^{-27}$	$+1,602\ 176 \cdot 10^{-19}$
elektron	$9,109\ 383 \cdot 10^{-31}$	$-1,602\ 176 \cdot 10^{-19}$
pozitron	$9,109\ 383 \cdot 10^{-31}$	$+1,602\ 176 \cdot 10^{-19}$

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 vztažený 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



Obr. 1.3 Schematické znázornění vlastnosti spektra filtrovaného rentgenového záření; po průchodu filtrem se značně potlačí nízkoenergetická část brzdného záření

liší svou energií. Využití beta záření v nukleární medicíně je značné – vesměs pro terapeutické účely, kdy potřebujeme zničit určitý cílový objem tkáně. U většiny těchto zářičů maximální energie nepřekročí 1 MeV.

Existuje nemalá část radionuklidů těžkých prvků, jejichž jádra během radioaktivní přeměny emitují **záření alfa**, což jsou těžké nabitě částice obsahující **dva protony a dva neutrony**. Jejich význam v nukleární medicíně v dnešní době stoupá, protože mají vysoký letální efekt a mohou s výhodou v léčbě nahradit beta částice (více v kapitole o terapii v nukleární medicíně). V nukleární medicíně ale zatím nemáme využití pro **neutrony**, jejichž hmotnost je v podstatě stejná jako u protonů, ale jsou neutrální, tedy bez elektrického náboje.

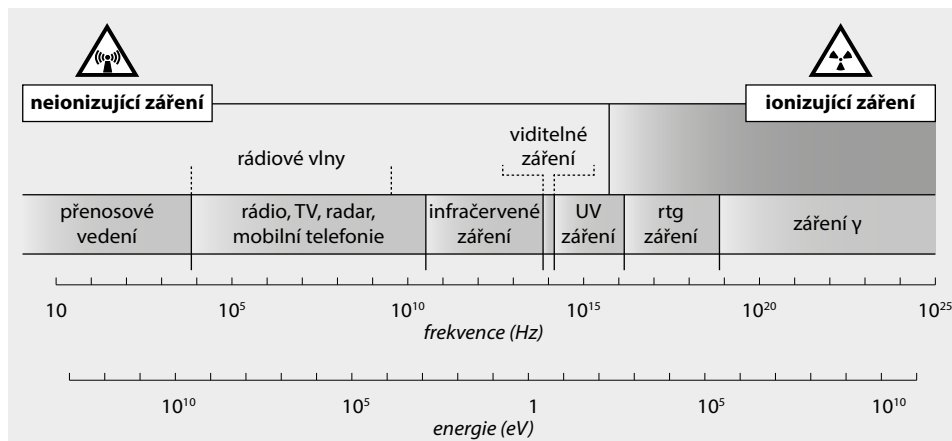
Zajištění adekvátní bezpečnosti osob se pochopitelně vztahuje i na ochranu před účinky neionizujícího záření, kde je potřeba brát v úvahu jeho specifické vlastnosti. Za neionizující záření považujeme především elektromagnetické vlnění o frekvencích, které odpovídají energiím fotonů s energií nedostatečnou k tomu, aby vyvolaly ionizaci v okolním prostředí. Fotony elektromagnetického záření s energií, která postačuje na ionizaci, už spadají do oblasti ionizujícího záření, které se vyznačuje přenosem energie prostřednictvím částic nebo elektromagnetických vln vlnové délky ≤ 100 nm anebo s frekvencí $\geq 3 \cdot 10^{15}$ Hz.

Viditelné záření tvoří poměrně úzkou část spektra elektromagnetického záření zahrnující vlnové délky λ od 400 nm (fialová barva) do 700 nm (červená barva), přičemž vztah mezi energií jednotlivých fotonů E a frekvencí f lze vyjádřit vztahem

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

kde $h = 6,6252 \cdot 10^{-34}$ J.s = 4,1 μ eV.GHz⁻¹ je Planckova konstanta, f je frekvence v jednotkách Hz (hertz) a $c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ je rychlost světla ve vakuu.

Neionizující záření se vyznačuje značně odlišnými vlastnostmi ve srovnání s ionizujícím zářením, zejména pokud jde o interakce s látkou včetně živých tkání. Charakteristika i některé aplikace neionizujícího záření jsou ilustrovány na obr. 1.4.



Obr. 1.4 Ilustrace souvislosti neionizujícího a ionizujícího elektromagnetického záření s ohledem na jeho vlnovou délku a energii fotonů (znázorněny jsou rovněž základní varovné symboly signalizující potenciální nebezpečí jednotlivých druhů záření)

Některé důležité vlastnosti a účinky neionizujícího záření lze stručně charakterizovat následujícím způsobem.

- **Ultrafialové záření (UV)** má široký rozsah energie fotonů a může být někdy zvláště nebezpečné, protože nejsou prakticky žádné bezprostřední symptomy nadměrného ozáření. Mezi zdroje UV záření patří Slunce, svářecí oblouky a UV lasery. Toto záření může poškozovat zrak a je také spojováno se vznikem melanomu kůže.
- **Viditelné záření** se vyznačuje touto částí frekvencí elektromagnetického spektra, kterou vnímáme naším zrakem v různých barvách. Nadměrné viditelné záření může poškodit oči a kůži.
- **Infračervené záření** se projevuje svými tepelnými účinky především na kůži a očích. Při nadměrném vystavení tomuto záření se dostavuje pocit tepla a bolesti. Zdroje infračerveného záření zahrnují nejrůznější pece, tepelné lampy a IR lasery.
- **Mikrovlnné záření** je absorbováno v blízkosti kůže, zatímco **radiofrekvenční záření** může být absorbováno v celém těle. Při dostatečně vysokých intenzitách může přivodit poškození tkáně zvýšením teploty, což může být v medicíně využito pro ničení např. jaterních metastáz. Mezi tyto zdroje záření patří rozhlasové a telekomunikační vysílače a také mobilní telefony. Vliv mobilních telefonů na zdraví je zřejmě zanedbatelný, jinak při jejich masovém využívání by se případné zdravotní účinky již projevy, což se dosud v epidemiologických studiích nepotvrdilo.
- **Nízkofrekvenční elektromagnetické záření** o frekvenci 50 Hz je generováno elektrickým vedením, elektroinstalací a elektrickými spotřebiči a zařízeními. Běžnými zdroji intenzivního nízkofrekvenčního záření jsou především indukční pece a elektrické vedení vysokého napětí.

Zvláštní kategorií zdrojů neionizujícího záření představují **lasery** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Lasery obvykle emitují optické záření (UV, viditelné světlo, IR), jehož koherentní vlnění vykazuje shodnou fázi, směr šíření i vlnovou délku a lze je soustředit do vysoce intenzivního paprsku. Takto usměrněný proud mnoha fotonů může přenášet velké množství energie, kterou lze využít v některých medicínských aplikacích. Nejčastěji se využívá tepelná energie předaná mikroobjemu tkáně (laserová destrukce tkáně, laserové řezání a svařování tkání apod.).

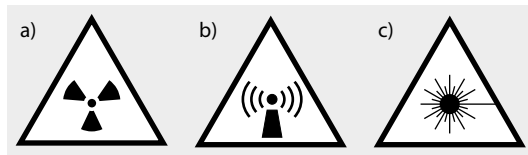
Princip funkce laseru je založen na stimulované (vynucené) emisi záření, která se vyznačuje vysokou koherencí, vysokou monochromatickostí a nízkou divergencí. S ohledem na časový režim dělíme lasery na kontinuální, impulzní a kvazikontinuální. Vlastní provedení laseru závisí na skupenství látky aktivního prostředí, které může být pevnolátkové, plynové, kapalinové nebo polovodičové. Mezi hlavní parametry laseru řadíme vlnovou délku záření, výkon paprsku, modulační frekvenci paprsku (u pulzních laserů) a tvar paprsku.

Účinek laseru závisí na jeho intenzitě, resp. výkonu. Při nízké intenzitě dochází pouze k ohřevu tkáně, zatímco při vyšším výkonu se projevuje kontrakce měkkých tkání a při nejvyšších intenzitách může dojít i k odumírání buněk (laserový paprsek lze použít jako skalpel). Mezi výhody laserové techniky patří rovněž šetrnost a bezpečnost při operacích, kde se s výhodou projevuje absence infekce v ráně.

Práce s laserem nese s sebou také rizika poškození zdraví, a proto i zde, podobně jako při práci se zdroji ionizujícího záření, se musí dodržovat přísná bezpečnostní opatření. Hlavním rizikem je možnost poškození zraku. Některé lasery pracují na frekvencích, které nejsou okem vnímány, a tak takové nebezpečí není snadno rozeznatelné. Vzhledem k tomu, že laserové záření je koherentní a vyznačuje se nízkou divergencí, je jeho paprsek soustředěn na velmi malou plochu sítnice. Tím může dojít k přehřátí určitého bodu, což může vést k trvalému poškození zraku.

Stejně jako je tomu v ochraně před škodlivými účinky před ionizujícím zářením, což bude podrobněji diskutováno v další části této publikace, je třeba přijmout a respektovat opatření přijatá pro zajištění náležité ochrany zdraví i před neionizujícím zářením [5, 6].

Na pracovištích se zdroji záření, které by mohlo mít negativní dopad na zdraví, se používá výstražných symbolů (obr. 1.5).



Obr. 1.5 Mezinárodní výstražné symboly označující místa, kde se pracuje a) se zdroji ionizujícího záření, b) se zdroji neionizujícího záření a c) s laserovým zářením

Literatura

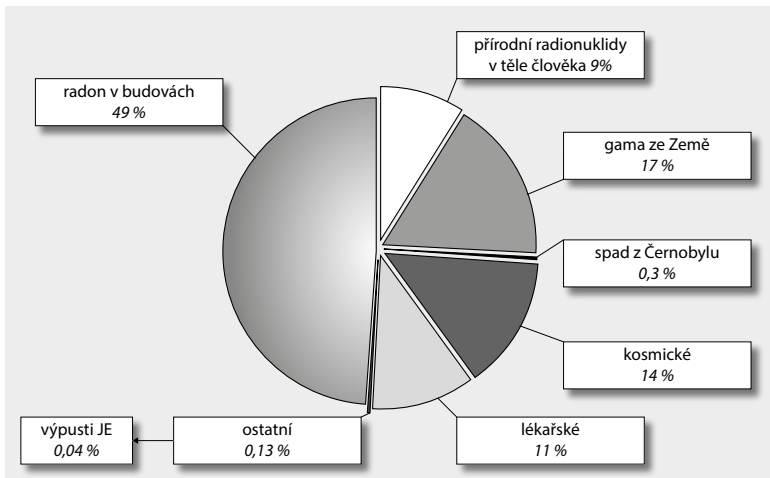
- [1] PODZIMEK F. *Radiologická fyzika*. Praha: ČVUT v Praze, 2015.
- [2] SABOL J., ŠÍN R. Radiační a nukleární ohrožení. In: Šín R. a kol. *Medicína katastrof*. Praha: Galén, 2017.
- [3] KUPKA K., ŠAMAL M., KUBINYI J. *Nukleární medicína*. Praha: Nakladatelství P3K, 2016.
- [4] SEIDL Z. et al. *Radiologie pro studium v praxi*. Praha: Grada Publishing, 2012.
- [5] Nařízení vlády ze dne 5. října 2015 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Sbírka 291/2015, částka 120/2015. Dostupné na WWW (cit. 2017-05-12): <<https://www.epravo.cz/top/zakony/sbirka-zakonu/narizeni-vlady-ze-dne-5-rijna-2015-o-ochrane-zdravi-pred-neionizujicim-zarenim-20758.html>>.
- [6] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/25/ES o minimálních požadavcích na bezpečnost a ochranu zdraví před expozicí zaměstnanců rizikům spojeným s fyzikálními činiteli (optickým zářením z umělých zdrojů). Dostupné na WWW (cit. 2017-05-12): <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32006L0025>>.

2 Zdroje ionizujícího záření

2.1 Základní pojmy

V našem životním prostředí jsme nepřetržitě vystaveni působení ionizujícího záření, které pochází jednak z **přírodních zdrojů** a z **kosmického záření** (na tyto zdroje máme pouze částečný vliv) a jednak z **umělých zdrojů** využívaných v různých aplikacích včetně medicíny, průmyslu, vědy a v dalších oblastí. V těchto aplikacích, které jsou nesporně přínosem pro člověka i společnost, musíme počítat také s jejich důsledky v podobě přídavného ozáření osob a zamoření životního prostředí. Proto veškeré aplikace s využitím ionizujícího záření podléhají přísné kontrole s cílem minimalizovat jejich nepříznivý dopad.

Pokud jde o přírodní radiační pozadí, jeho příspěvek představoval ještě asi před 30 lety více než 85 % celkového průměrného ozáření obyvatel (obr. 2.1) [1]. V současné době v důsledku zejména enormního **nárůstu lékařských aplikací** ionizujícího záření roste ve vyspělých zemích světa včetně České republiky podíl lékařského ozáření. Dnes toto ozáření již dosahuje úrovně ozáření z přírodních radiačních zdrojů [2].



Obr. 2.1 Přehled jednotlivých příspěvků k průměrnému ozáření obyvatelstva od přírodního pozadí (radon a thoron, kosmické záření, interní záření a terestriální záření) a různých aplikací využívajících radiační a jaderné technologie (situace před 30 lety)

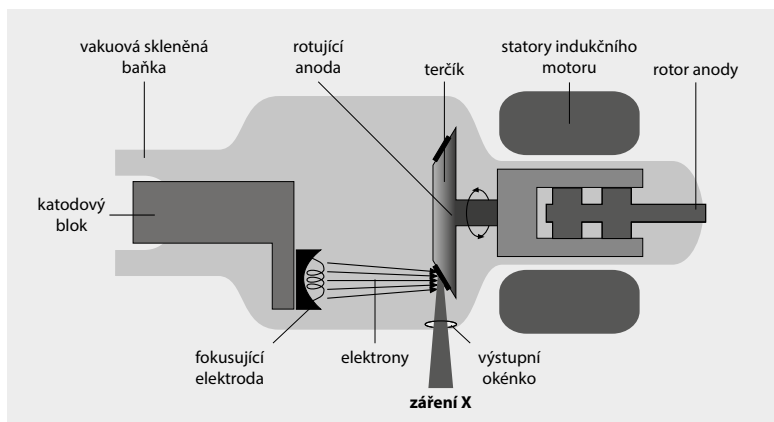
2.2 Vlastnosti zdrojů ionizujícího záření

Principiálně lze **zdroje ionizujícího záření**, které mají význam pro nukleární medicínu, zařadit do následujících tří hlavních skupin:

- otevřené radionuklidové zářiče (radiofarmaka);
- radiační generátory (rentgenky, urychlovače);
- jaderné reaktory.

Pro oblast nukleární medicíny mají zásadní význam zejména **radiofarmaka**, což jsou specifické chemické sloučeniny značené vhodným radionuklidem. Z obecného hlediska hrají důležitou roli také urychlovače nabitých částic a jaderné reaktory, kde se vyrábějí příslušné radionuklidy, které jsou součástí radiofarmak. Distribuce radiofarmaka v těle pacienta je zachycena tzv. gama kamerami, které mohou pracovat také v 3D režimu jako SPECT gama kamery; v případě pozitronových radiofarmak jde o PET kamery. V poslední době bylo zaznamenáno zvýšené nasazení hybridních technologií v podobě kombinace SPECT s CT skenery různého typu či PET/CT, popř. také PET/MR. Přitom CT skenery zlepšují anatomické informace a vhodně doplňují poznatky získané pomocí SPECT a PET zobrazení a umožňují korekci zeslabeného záření.

V zařízeních počítačové tomografie se důmyslným způsobem používá **rentgenového záření**, k jehož produkci slouží rentgenka. Její principiální uspořádání je na obr. 2.2.

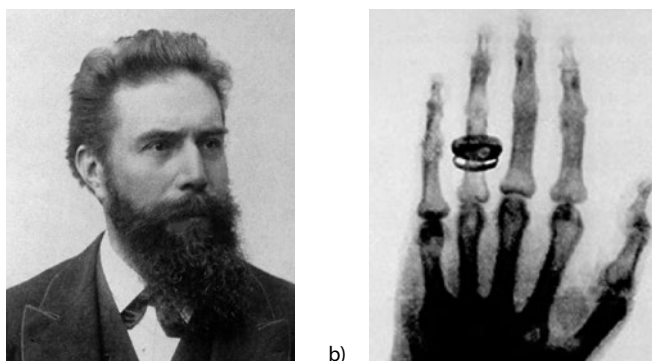


Obr. 2.2 Typické provedení rentgenky s vyznačením jednotlivých součástí

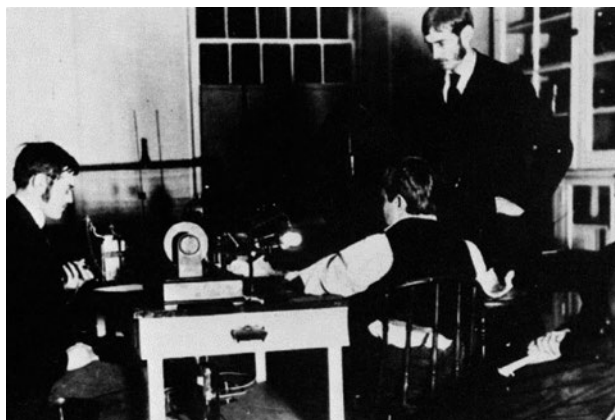
Rentgenka (rentgenová lampa) je v podstatě evakuovaná trubice se žhavenou katodou jako zdrojem elektronů a masivní kovovou anodou, na kterou dopadají urychlené elektrony. V nejjednodušším provedení se rentgenka skládá z katody a anody, obě tyto elektrody jsou zataveny ve vakuově těsné, obvykle skleněné baňce.

Objev rentgenového záření W. C. Röntgenem na sklonku roku 1895 ve Würzburgu (Německo) měl zásadní význam pro radiologii (obr. 2.3). Je neuvěřitelné, jak se zpráva o objevu tohoto záření (tehdy záření X) rozšířila do světa a jak rychle se začalo využívat v diagnostice. Tak např. již 3. února 1896, tři měsíce po převratném vynálezu, se uskutečnilo jedno z prvních vyšetření pomocí rentgenky v USA (obr. 2.4).

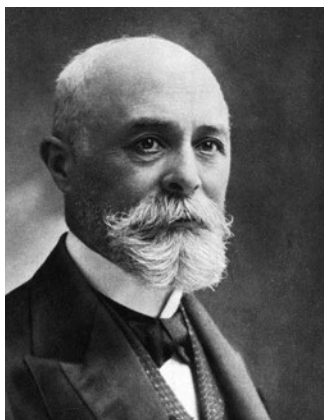
Nukleární medicína se opírá zejména o specifické využití radionuklidů ve formě radiofarmak. Historie radionuklidů je jednoznačně spojena s radioaktivitou, kterou v roce 1896 objevil H. Becquerel v Paříži (obr. 2.5a). K objevu přírodní radioaktivity došlo více méně náhodou při studiu fluorescence. Práce vědců se potom soustředila na intenzivní studium nestabilních přírodních nuklidů, což později vedlo k dalším významným objevům, mezi které bezesporu patří objev radia a polonia M. Curie-Sklodowskou a jejím manželem P. Curiem v roce 1898 (obr. 2.5b).



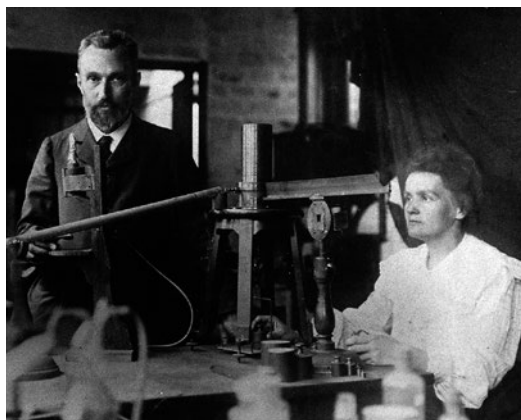
Obr. 2.3 Pohled do historie: a) objevitel rentgenového záření W. C. Röntgen, b) výsledek jeho první diagnostické aplikace



Obr. 2.4 Fotografie dokládající diagnostické využití rentgenového záření v USA již po třech měsících od jeho objevu [3]



a)



b)

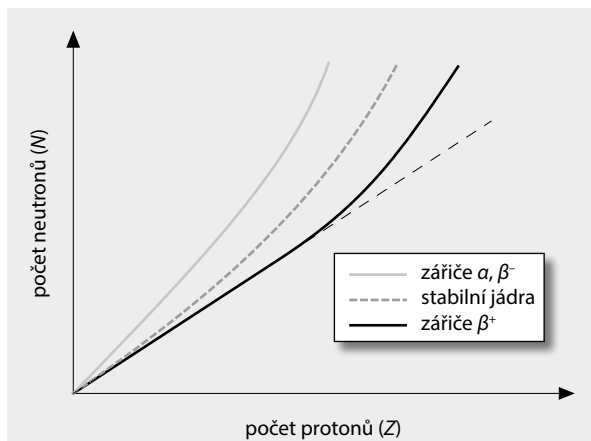
Obr. 2.5 Osobnosti, které stály u zrodu objevu radioaktivních prvků: a) H. Becquerel, b) P. Curie a M. Curie-Sklodovská

Radioaktivita je fyzikální jev, který souvisí s přeměnou (rozpadem) nestabilních jader na jádra jiného prvku, přičemž při každé přeměně dochází k emisi jedné nebo více částic nebo fotonů. Jak známo, jádro atomu obsahuje určitý počet protonů (Z) a neutronů (N). Výjimkou je jádro vodíku tvořené pouze jedním protonem. Součet protonů a neutronů představuje nukleonové číslo (A). Obecně každý nuklid lze jednoznačně zapsat ve formě:

$${}^N_ZX, \text{ např. } {}^{99m}_{43}\text{Tc} \text{ nebo } {}^{131}_{53}\text{I}.$$

Při psaní se zápis obvykle zjednodušuje na tvar Tc-99m, resp. I-131, protonové číslo se zpravidla neuvádí, neboť přímo souvisí se symbolem prvku.

Ukázalo se, že stabilita jader do značné míry závisí na poměru N/Z . Tuto skutečnost dokumentuje obr. 2.6. Jak je vidět, jádra s přebytkem neutronů mají tendenci emitovat částice beta minus a také částice alfa. Nižší hodnoty poměru N/Z jsou charakteristické pro nestabilní jádra, které se vyznačují přeměnou beta plus.



Obr. 2.6 Grafická prezentace stability atomových jader prvků v závislosti na poměru počtu neutronů a protonů pro uvedené zářiče

Pro **chemický prvek** je charakteristický počet protonů. Počtu protonů Z v jádře odpovídá počet elektronů obíhajících kolem jádra. Tento počet elektronů je směrodatný pro chemické vlastnosti prvků.

Každý prvek může mít několik různých podob – nuklidů. **Nuklid** je atom s přesně určeným počtem protonů a neutronů v jádře. V přírodě se vyskytují prvky většinou jako směsi nuklidů. Např. uhlík se nachází v podobě směsi nuklidu ${}^{12}\text{C}$ a nuklidu ${}^{13}\text{C}$ a ${}^{14}\text{C}$. Nuklidy jednoho prvku se nazývají **izotopy** (například ${}^{235}\text{U}$ a ${}^{238}\text{U}$). Přitom všechny izotopy daného prvku mají stejné chemické vlastnosti. Jádra jednotlivých izotopů se obvykle liší svou stabilitou. **Radionuklid** je nestabilní nuklid, podléhající samovolné radioaktivní přeměně.

Celkem je známo **118 prvků**, v přírodě se však z nich vyskytuje pouze 94, další byly vyrobeny uměle. Všechny prvky se v souladu se svými vlastnostmi dají systematicky

uspořádat do periodické tabulky prvků. Dosud je známo na **3000 izotopů**, z nichž je **266 stabilních**. Z velkého počtu radionuklidů využití v praxi nacházejí jen některé, a to nejen s ohledem na částice emitované při přeměně, ale zejména na jejich poločas přeměny (podrobněji v další části této kapitoly).

Radionuklidy jsou produkovány jako nevyhnutelný důsledek jaderného štěpení (těžká jádra se rozštěpí na dva lehčí fragmenty) a termonukleární fúze (slučování lehkých jader). Proces jaderného štěpení vytváří širokou škálu štěpných produktů, z nichž většina jsou radionuklidy. Další radionuklidy mohou být extrahovány z ozářeného jaderného paliva a okolních struktur, kde vznikají aktivační produkty.

Umělé radionuklidy se vyrábějí v jaderných reaktorech, urychlovačích částic nebo se získávají z radionuklidových generátorů.

- Radionuklid může být cíleně vyroben v jaderném reaktoru, do nějž se vloží vhodný neradioaktivní materiál (terč) a ten se po nějakou dobu (hodiny až dny) ozařuje tokem neutronů. Nebo se může radionuklid oddělit ze zbytků vyhořelého jaderného paliva v reaktoru (tab. 2.1).
- Urychlovače částic, např. cyklotrony, mohou vhodnými urychlenými nabitými částicemi (tab. 2.1) bombardovat výchozí prvek (terč), který se potom transformuje na příslušný radionuklid. Tímto způsobem lze s výhodou připravit zejména pozitronové zářiče (např. ¹⁸F).
- Další možností pro získání radionuklidů, především těch s krátkým poločasem přeměny, je použití tzv. radionuklidových generátorů. Tyto generátory obsahují mateřský radionuklid, který se přeměňuje na dceřiný radionuklid. Přitom mateřský radionuklid, který se vyrábí v jaderném reaktoru, má delší poločas přeměny než dceřiný radionuklid. Typickým příkladem je ^{99m}Tc, nejrozšířenější radionuklid v nukleární medicíně, který se získává z ⁹⁹Mo vyrobeného v reaktoru.

Tab. 2.1 *Základní možnosti produkce radionuklidů*

Zařízení na výrobu	Svazek částic	Produkovaný radionuklid
jaderné reaktory	neutrony	vyšší zastoupení neutronů
urychlovače částic	protony deuterony částice alfa těžké ionty	nižší zastoupení neutronů

Vzhledem k tomu, že pomocí jaderného reaktoru a cyklotronu se vyrábí převážná část radionuklidů, které slouží k výrobě radiofarmak, zmíníme se na tomto místě alespoň stručně o principu jejich funkce.

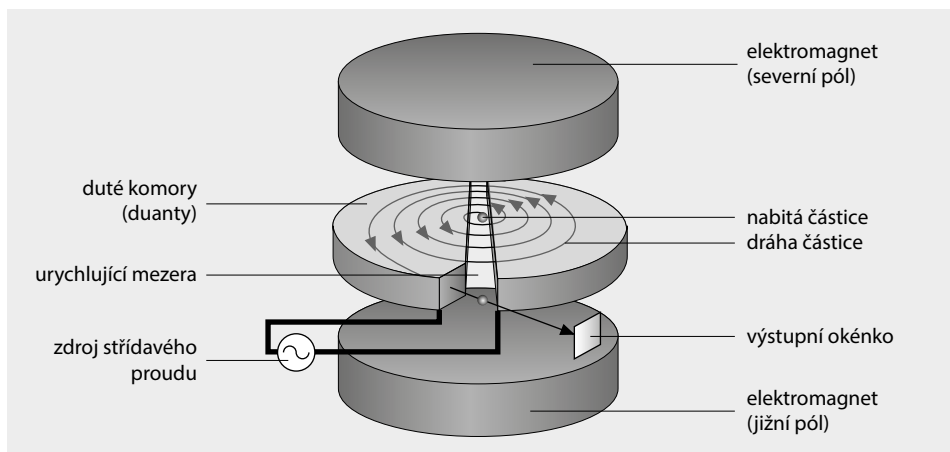
Ačkoliv jaderné reaktory slouží v jaderných elektrárnách především k výrobě elektrické energie, účelově se konstruují také reaktory, které se využívají k výrobě radionuklidů, jejichž potřeba pro aplikace v nukleární medicíně neustále roste. V jaderném reaktoru dochází pohlcením neutronu ke štěpení těžkých atomových jader (obvykle izotopu uranu ²³⁵U) na dvě nebo více lehkých jader, přičemž se uvolní část vazební energie ve formě kinetické energie štěpných produktů. Štěpení probíhá absorpcí neutronu v jádru atomu a při štěpení se uvolní několik dalších neutronů.

Aby tyto neutrony mohly štěpit další jádra atomů, zpomalují se na tepelnou energii interakcí s látkami o nízké molekulové hmotnosti. Aby nedošlo k nekontrolovanému štěpení jader (a následné havárii reaktoru), pohlcuje se přebytek neutronů regulačními tyčemi obsahujícími kadmium nebo bor, které mají vysokou schopnost absorbovat tepelné neutrony.

Hlavní části typického výzkumného jaderného reaktoru, který provozuje Centrum výzkumu Řež (CVŘ), jsou na obr. 2.7 (viz barevnou přílohu). Z reaktoru je vyvedeno několik kanálů neutronů, které slouží k ozařování vhodných materiálů, kde potom dochází k produkci příslušných radionuklidů.

V současné době se řada krátkodobých radionuklidů pro přípravu radiofarmak vyrábí pomocí **cyklotronu**, který představuje cyklický vysokofrekvenční urychlovač. Cyklotron slouží k urychlování těžkých nabitých částic pomocí vysokofrekvenčního elektrického pole. Jeho použití se datuje od 30. let minulého století, kdy E. Lawrence postavil jeho první funkční prototyp.

Cyklotron (obr. 2.8) se skládá ze tří hlavních částí: velmi silného elektromagnetu, zdroje napětí o vysoké frekvenci a urychlovací komory s párem dutých elektrod (duantů). Urychlované nabitě částice se přitom pohybují uvnitř dutých urychlovacích elektrod svou setrvačností, přičemž jejich trajektorie jsou zakřivovány magnetickým polem, které působí kolmo na rovinu dráhy částic. Vlastní urychlování probíhá pouze v mezeře mezi duanty. Urychlená částice získává po mnoha obězích kinetickou energii až 50 MeV.



Obr. 2.8 Princip funkce urychlování nabitých částic v cyklotronu (na základě [5])

2.3 Radioaktivní přeměna

Každá samovolná **radioaktivní přeměna (rozpad)** v atomovém jádře může probíhat několika způsoby s různou pravděpodobností. V praktických případech většinou stačí uvažovat schéma přeměny jádra, k níž dochází s největší pravděpodobností, která je udávána v procentech z celkového počtu všech přeměn. Nejčastější druh přeměny nestabilního jádra je přeměna alfa (mateřským jádrem je emitována částice alfa, která je tvořena dvěma protony a dvěma neutrony), přeměna beta (jádre

je emitována částice beta minus neboli elektron), přeměna beta plus (emise částice beta plus neboli pozitron) a také přeměna, při níž se energeticky excitované jádro dostává do stabilního nebo metastabilního stavu emisí záření gama (izomerický přechod). Zvláštním případem přeměny je záchyt orbitálního elektronu atomovým jádrem (elektronový záchyt).

Základní typy radioaktivní přeměny z hlediska mateřského nuklidu (X) a vzniklého dceřiného nuklidu (Y):

Přeměna α : ${}^A_ZX = {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\alpha$

Přeměna β^- : ${}^A_ZX = {}^A_{Z+1}Y + \beta^- + \nu_{ea}$

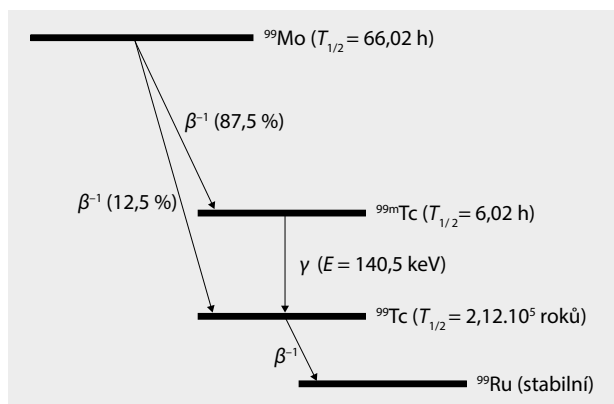
Přeměna β^+ : ${}^A_ZX = {}^A_{Z-1}Y + \beta^+ + \nu_e$

Přeměna γ : ${}^A_ZX^* = {}^A_ZY + \gamma$

Elektronový záchyt: ${}^A_ZX + e = {}^A_{Z-1}Y + \nu_e$

Přitom ν_{ea} je antineutrino a ν_e neutrino, což jsou částice s určitou energií (specifickou pro danou přeměnu), nulovou hmotností a zanedbatelnou ionizační schopností. Zatímco fotony a částice alfa vykazují čárové spektrum, charakterizované určitou energií (E_γ), částice beta a pozitrony mají spojitě energetické spektrum. Zde je důležitým parametrem maximální energie částic ($E_{\beta\max}$) a také střední energie, která odpovídá přibližně 1/3 maximální energie.

Elektronový záchyt představuje přeměnu, při níž jádro pohltí elektron z obalu atomu. V závislosti na slupce, ze které byl elektron zachycen, hovoříme následně o záchytu K, L atd. Uvolněné místo v elektronovém obalu zaujímá elektron z vyšší slupky a nadbytečná energie se vyzáří ve formě charakteristického záření (monoenergetického), které však v některých případech může vyrazit elektron z vyšší elektronové orbity (Augerův elektron).



Obr. 2.9 Přeměnové schéma ${}^{99}\text{Mo}$, který je výchozím produktem ${}^{99m}\text{Tc}$, jehož přeměna se nazývá izomerická transformace (přechod ze vzbuzeného stavu do základního vyzářením fotonu gama)