

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Viktorie Cahlíková

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Využití gama záření v medicíně

Bakalářská práce

2025

Viktorie Cahlíková

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Viktorie Cahlíková**
Osobní číslo: **C21018**
Studijní program: **B0531A130012 Farmakochemie a medicínální materiály**
Téma práce: **Využití gama záření v medicíně**
Téma práce anglicky: **Use of gamma rays in medicine**
Zadávací katedra: **Ústav organické chemie a technologie**

Zásady pro vypracování

- Literární rešerše zaměřená na popis gama záření a jeho srovnání s ostatními typy záření.
- Literární rešerše zaměřená na aplikace využívající gama záření.
- Výsledky zpracujte formou závěrečné práce v souladu se Směrnicí UPCE č. 7/2019 "Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací" v platném znění.

Rozsah pracovní zprávy: **dle potřeby**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:
veškerá dostupná odborná literatura

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Marek Bouška, Ph.D.**
Katedra polygrafie a fotofyziky

Datum zadání bakalářské práce: **28. února 2025**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2025**

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Miloš Sedlák, DrSc. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Využití gama záření v medicíně jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Viktorie Cahlíková v.r.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych vyjádřila své upřímné poděkování všem, kteří mě podporovali během zpracování této bakalářské práce. Velké díky patří mé rodině za jejich neustálou podporu, trpělivost a motivaci po celou dobu mého studia. Dále děkuji svým spolužákům, kteří mi byli oporou a pomáhali překonávat náročné chvíle. Zvláštní poděkování bych chtěla vyjádřit vedoucímu mé práce, doc. Ing. Marku Bouškovi, Ph.D., za cenné rady, odborné vedení a ochotu.

ANOTACE

Elektromagnetické spektrum představuje širokou škálu záření s různými fyzikálními vlastnostmi a pestrým využitím napříč vědeckými i průmyslovými obory. Gama záření, jakožto forma elektromagnetického záření s nejvyšší energií a nejkratší vlnovou délkou, zaujímá významné postavení zejména v oblasti výzkumu a medicíny. Jeho schopnost ionizace však může vést i k negativním dopadům na zdraví, včetně vzniku závažných onemocnění. V lékařství však našlo gama záření své uplatnění zejména při léčbě nádorových onemocnění – především prostřednictvím přístroje zvaného gama nůž, který představuje významný nástroj při neinvazivní léčbě mozkových nádorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetické záření, gama záření, ionizující záření, gama nůž, stereotaktická radiochirurgie, nádorová onemocnění, radiační ochrana

ANNOTATION

The electromagnetic spectrum represents a wide range of radiation with different physical properties and diverse applications across scientific and industrial fields. Gamma radiation, as the highest energy and shortest wavelength form of electromagnetic radiation, is particularly important in research and medicine. However, its ability to ionize can also lead to negative health effects, including the development of serious diseases. In medicine, however, gamma radiation has found its application in the treatment of cancer in particular through a device called the gamma knife, which is an important tool in the non-invasive treatment of brain tumours.

KEYWORDS

Electromagnetic radiation, gamma radiation, ionizing radiation, Gamma Knife, stereotactic radiosurgery, oncological diseases, shielding

Obsah

Seznam použitých obrázků a tabulek	10
Seznam zkratk	11
Úvod	12
Elektromagnetické záření	13
Definice elektromagnetického záření	13
Vlastnosti elektromagnetických vln	13
Rozdělení elektromagnetického spektra podle energie a vlnové délky	13
Druhy elektromagnetického záření	14
Rádiové vlny	14
Mikrovlny	15
Infračervené záření	16
Viditelné světlo	16
Ultrafialové záření	17
Rentgenové záření	17
Gama záření	18
Vlastnosti gama záření	18
Mechanismus vzniku gama záření	18
Gama záření v potravinářství	19
Výzkum pomocí gama záření	19
Aplikace gama záření v medicíně	20
Onkologická onemocnění	22
Radiace	22
Radiosenzitivita	23
Účinky radiace	24
Nenádorové onemocnění	24
Nádorové onemocnění	25
Prevence a ochrana před nadměrným ozářením	26
Léčebné metody	28
Gama nůž	29
Princip fungování gama nože	30
Průběh léčby pomocí gama nože	31
Radioaktivní zdroje gama nože	32
Modely gama nože	33

Další léčebné metody	35
Závěr	40
Seznam použité literatury	41

Seznam použitých obrázků a tabulek

Obrázek 1 - Přehled elektromagnetického záření.....	14
Obrázek 2 - Přenosný gama spektrometr.....	19
Obrázek 3 - PET skener.....	21
Obrázek 4 - SPECT skener.....	21
Obrázek 5 - Bezpečnostní značka radioaktivního záření	22
Obrázek 7 – Dozimetr	27
Obrázek 6 - Olověná vesta používaná jako ochrana proti radiaci	27
Obrázek 8 - Lars Leksell	29
Obrázek 9 - Princip účinku gama nože	30
Obrázek 10 - Schéma gama nože	31
Obrázek 12 - Pacient v gama noži modelu U	33
Obrázek 13 - Pacient s helmou uchycenou termoplastem před ošetřením gama nožem	34
Obrázek 11 - Otevřená zadní část gama nože modelu U	34
Obrázek 14 – Zákrok s použitím kryochirurgie	36
Tabulka 1 - Přehled vlnových délek a frekvence elektromagnetického spektra.....	14

Seznam zkratek

CT	Počítačová tomografie
EPR	Elektronová paramagnetická rezonance
Hpd	Hematoporfyrin
IČ	Infračervené záření
MRI	Magnetická rezonance
NMR	Nukleární magnetická rezonance
PET	Pozitronová emisní tomografie
SPECT	Jednofotonová emisní výpočetní tomografie
UCP	Unit Central Point
UV	Ultrafialové záření

Úvod

Tato bakalářská práce se věnuje studiu elektromagnetického záření, jeho fyzikálních vlastností a klíčovému využití. Zvláštní důraz je kladen na gama záření a jeho aplikace v diagnostických a terapeutických metodách. Práce je rozdělena do tří hlavních kapitol, které systematicky zkoumají různé aspekty tohoto tématu. První kapitola se zaměřuje na celé elektromagnetické spektrum, popisuje vlastnosti a rozmanité využití napříč různými odvětvími všech jednotlivých typů záření. Gama záření, které je díky své vysoké energii klíčové pro moderní lékařské technologie, je rozebráno nejpodrobněji. Druhá kapitola se zabývá problematikou ionizujícího záření, které nese potenciální zdravotní rizika, zejména vznik nádorových onemocnění. Dále je představeno, jakými metodami se před jeho škodlivými účinky musíme chránit. Třetí kapitola analyzuje léčebné metody onkologických onemocnění. Hlavní představitel, který využívá gama záření, je přístroj gama nůž, který představuje přesný a neinvazivní nástroj stereotaktické radiochirurgie pro léčbu nádorů a dalších patologických stavů mozku. Cílem práce je poskytnout ucelený přehled o fyzikálních principech těchto technologií, jejich klinických přínosech, omezeních a významu pro současnou medicínu. Práce rovněž zkoumá souvislosti mezi fyzikálními procesy a biologickými dopady záření, čímž přispívá k hlubšímu pochopení jejich role v diagnostice a terapii.

Elektromagnetické záření

Definice elektromagnetického záření

Energie záření je vyzařována, přenášena nebo pohlcována v podobě vln nebo vlnových délek ve formě částic. Tato energie se skládá z elektrických a magnetických sil, které při určitém narušení vytvářejí elektromagnetické záření [1].

Vlastnosti elektromagnetických vln

Vlnová délka je vzdálenost mezi dvěma body na vlně, které jsou ve stejné fázi oscilace. Značí se řeckým písmenem lambda (λ) a udává se v metrech [2]. Výpočet vlnové délky závisí na rychlosti vlny (v) a frekvenci (f), podle rovnice (1).

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

Frekvence je počet uskutečněných kmitů nebo cyklů kmitajícího objektu za sekundu. Mezinárodní jednotka pro frekvenci je Hertz (Hz) s rozměrem s^{-1} [1]. Výpočet frekvence elektromagnetických vln spočívá v podílu rychlosti vlny (v) a vlnové délky (λ), podle rovnice (2), [3].

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

Dalším měřítkem frekvence je perioda (T), která popisuje délku a dobu, za kterou vlna nebo signál dokončí jeden cyklus. Pokud je frekvence známa, lze periodu získat převrácenou hodnotou počtu cyklů za sekundu, podle rovnice (3), [3].

$$T = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Rozdělení elektromagnetického spektra podle energie a vlnové délky

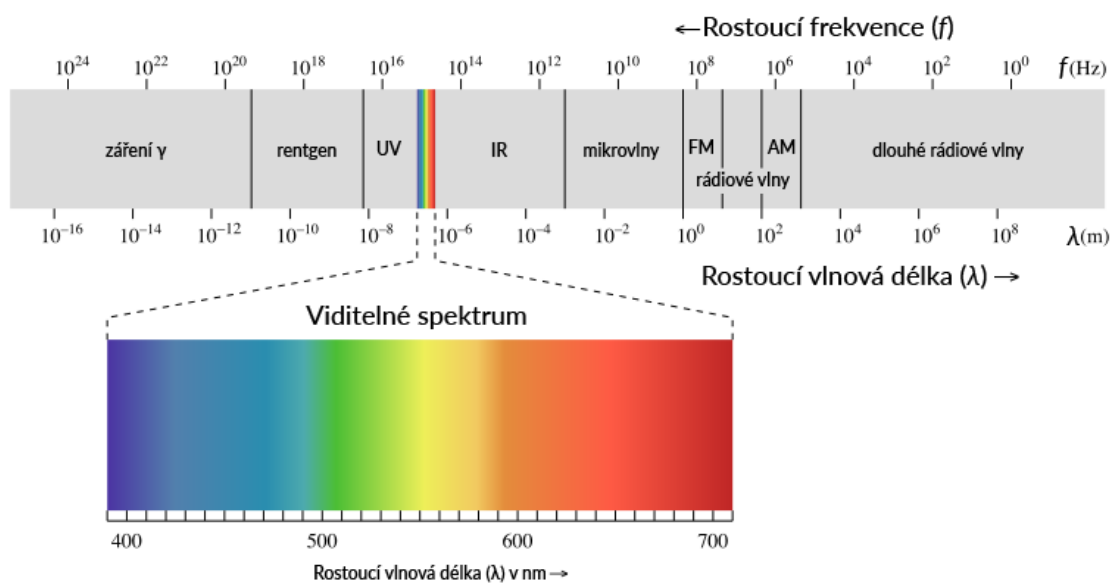
Elektromagnetické spektrum je uspořádaná posloupnost všech známých forem elektromagnetického záření, od nejkratších kosmických paprsků, gama záření, rentgenového záření, ultrafialového záření, viditelné záření, infračervené záření až po mikrovlny a další radiové vlny [4].

Každé záření má svou vlastní energii, frekvenci a vlnovou délku. Tyto oblasti nejsou od sebe ostře ohraničeny a často se překrývají [1]. Stručný přehled je zobrazen v tabulce 1.

Tabulka 1 - Přehled vlnových délek a frekvence elektromagnetického spektra

Oblast	Vlnová délka	Frekvence
Rádiové vlny	> 1 mm	< 300 GHz
Mikrovlny	1 mm–30 cm	300 MHz–300 GHz
Infračervené záření	0,8–1000 μm	300 GHz–430 THz
Viditelné světlo	400 nm–700 nm	430 THz–750 THz
Ultrafialové záření	10 nm–380 nm	750 THz–30 PHz
Rentgenové záření	0,01 nm–10 nm	30 PHz–30 EHz
Gama záření	< 0,01 nm	> 30 EHz

Druhy elektromagnetického záření



Obrázek 1 - Přehled elektromagnetického záření [5]

Rádiové vlny

Rádiové vlny lze nejlépe vyjádřit jako energii, která byla vyslána do vesmíru. Tato energie existuje částečně ve formě elektrického a magnetického pole. Z tohoto důvodu se vlny nazývají elektromagnetické [3].

Ve vakuu se rádiové vlny šíří konstantní rychlostí, tzv. rychlosti světla. V zemské atmosféře se pohybují o něco pomaleji. Navíc se jejich rychlost mírně mění nejen se složením atmosféry, ale také s teplotou a tlakem. Směr, kterým se vlna šíří, je vždy kolmý na směr elektrického i magnetického pole. Směr šíření je vždy směrem od zářiče. Když vlna narazí na (zpětně) odražející objekt, směr jednoho nebo druhého pole se obrátí, čímž se změní směr šíření [3].

V analytické chemii se používá metoda nukleární magnetické rezonance, což je metoda založená na rezonanci spinů atomových jader v magnetickém poli. Využívá se k identifikaci a kvantifikaci chemických skupin, sledování změn struktury polymerů, včetně zesíťování, a ke studiu degradačních procesů. Díky citlivosti na chemické prostředí poskytuje NMR detailní informace o molekulární struktuře a morfologii materiálů. Patří mezi klíčové nástroje například při vývoji polymerů nebo farmaceutických přípravků [6].

Rádiové vlny jsou nejrozšířenějšími signály v elektronické komunikaci. Používají se v rozhlasovém a televizním vysílání, mobilních telefonech a signálech bezdrátových počítačových sítí, jako jsou Wi-Fi a Bluetooth. Rozsah frekvencí rádiových vln zahrnuje signály o velmi nízkých frekvencích až po signály o vysokých frekvencích, přičemž každý z nich má své vlastní přenosové vlastnosti [7].

Nízkofrekvenční signály se mohou šířit na velké vzdálenosti a nejsou závislé na přímé viditelnosti mezi přenosovými body. Vysoké frekvence jsou mnohem více závislé na přímé viditelnosti při přenosu a je méně pravděpodobné, že budou schopny přenosu přes budovy nebo přírodní překážky [7].

Mikrovlny

Mikrovlnami se rozumí elektromagnetické záření s dostatečně krátkou vlnovou délkou. Tímto termínem se rozumí záření nebo pole s frekvenčním rozsahem 300 MHz–300 GHz [8].

Jedna z analytických metod, které využívají mikrovlny, je elektronová paramagnetická rezonance (EPR). Tato metoda je klíčová pro studium paramagnetických částic, jako jsou ionty přechodných kovů, vzácných zemin, volné radikály a fotoexcitované tripletové stavy. Zejména ionty titanité, vanadičité, měďnaté, manganaté, železité, kobaltnaté a chromité jsou významné pro analýzu flexibilních porézních krystalických materiálů, protože často tvoří jejich základní strukturu. Tyto ionty slouží jako lokální magnetické sondy ke sledování mikroskopických strukturálních změn v těchto materiálech [9].

Dále se používají v komunikačních aplikacích krátkého dosahu mezi dvěma body, v satelitní komunikaci a v radarových aplikacích. Výhody použití mikrovln pro komunikaci spočívají v tom, že mají velkou šířku pásma a využívají technologii přímé viditelnosti, takže lze použít stejnou frekvenci, pokud se jejich cesty nekříží. Nevýhodou použití mikrovln pro komunikaci je, že vyžadují přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem a jsou ovlivněny faktory prostředí [7].

Mikrovlny se v lékařství používají k dezinfekci měkkých kontaktních čoček, zubních nástrojů, zubních protéz, mléka a močových katétrů pro intermitentní katetrizaci [10]. Intermitentní katetrizace je jednorázové vyprázdnění močového měchýře močovou cévkou. Tato metoda se používá při léčbě chronické močové retence [11].

Další využití nacházejí mikrovlny v domácích troubách, diatermické terapii, radarových zařízeních a mobilních telefonech [8].

Infračervené záření

Infračervené záření (IČ) je část magnetického spektra s vlnovými délkami v rozmezí 0,8–1000 μm . Rozsah infračervených vlnových délek se dělí na blízké infračervené, střední infračervené záření a vzdálené infračervené záření [4].

Infračervená spektroskopie se v potravinovém průmyslu stává více oblíbenou analytickou nedestruktivní metodou pro charakterizaci potravin, například při kontrole kvality, chemické analýze a monitorování procesů. Analýza výsledků z infračervené spektroskopie se provádí zakreslením infračervené absorpce do vzorku materiálu proti frekvenci. Vzniklé grafy jsou známé jako absorpční spektrum materiálu vzorku. Nicméně z tradičních důvodů se v IČ spektroskopii používá místo frekvence vlnové číslo. Kromě absorpčních spekter lze získat také transmisní spektra, která se používají v technikách IČ spektroskopické analýzy. Infračervená spektroskopie má určitá omezení, která závisí na povaze zkoumaných materiálů. Jedním z omezení je použití pouze u materiálů, které obsahují IČ aktivní molekuly, jež jsou schopny absorbovat IČ záření [12].

Viditelné světlo

Viditelné světlo je část elektromagnetického spektra s frekvencí v rozsahu 430–750 THz. Jeho nejvýznamnějším přirozeným zdrojem je Slunce, které nejen umožňuje vnímání okolního světa, ale také podporuje zásadní biologické procesy, jako je fotosyntéza, nezbytná pro růst rostlin

představujících základní složku potravy pro člověka. Kromě toho se viditelné světlo využívá v různých technických aplikacích, například při sušení materiálů nebo při výrobě solární energie [13], [14], [15].

Ultrafialové záření

Ultrafialové záření (UV) je elektromagnetická oblast s vlnovou délkou kratší než viditelné světlo, ale delší než měkké rentgenové záření. UV záření lze rozdělit na blízké UV záření s vlnovými délkami v rozsahu 380–200 nm, vzdálené (vakuové) UV záření s vlnovými délkami v rozsahu 200–10 nm a extrémní UV záření s vlnovými délkami v rozsahu 1–31 nm. Dále můžeme UV záření dělit podle účinku na zdraví člověka a prostředí na UV α (380–315 nm), které se také nazývá dlouhé vlny nebo „černé světlo“, UV β (315–280 nm), také nazývané střední vlny a UV γ (<280 nm), nazývané krátké vlny, které jsou germicidní [12].

UV záření vykazuje karcinogenní vlastnosti, které jsou nebezpečné pro živé organismy. Také se často používá ve spojení s viditelnou spektroskopií nebo fotometrií k určení existence fluorescence v daném vzorku a je široce využíváno jako analytická technika v chemii pro určování chemických struktur. UV záření se dále využívá jako účinný dezinfekční prostředek k úpravě pitné vody a studených pokrmů, dezinfekci povrchů zařízení a laboratorních prostor pro mikrobiální analýzu [12].

Rentgenové záření

Rentgenové záření vykazuje vlnovou délku 0,01–10 nm. Dělí se na záření s vysokou energií (krátkou vlnovou délkou), které se nazývá tvrdé rentgenové záření, a na záření s nízkou energií, (delší vlnovou délkou) nazývané měkké rentgenové záření [16].

Rentgenové záření vzniká, když se elektrony s vysokou rychlostí srazí s jakoukoli formou hmoty, ať už je pevná, kapalná nebo plynná. Platí, že čím vyšší je atomové číslo zvoleného cílového materiálu, tím vyšší je účinnost generování rentgenového záření. V praktických aplikacích generování rentgenového záření slouží jako terč pevný materiál s vysokým atomovým číslem, obvykle wolfram. Spojité paprsky mají v radiografii největší význam, protože vlnová délka každého rentgenového paprsku je částečně určena energií (rychlostí) elektronu, jehož srážka s terčem paprsek vyvolá. Zvýšením přiloženého napětí lze vyvolat rentgenové paprsky o kratších vlnových délkách a vyšší intenzitě [16].

Zajímavé využití rentgenového záření je metoda MicroCT scanning, která využívá rentgenového záření v oblastech medicíny, geologie a inženýrství pro nedestruktivní vytváření trojrozměrných geometrických tvarů a může poskytnout informace o vnitřních vlastnostech objektu [17].

Gama záření

Vlastnosti gama záření

Gama záření je elektromagnetické záření s extrémně krátkými vlnovými délkami, vyzařované jádry. Vlnové délky gama paprsků s nejvyšší energií jsou stále kratší než rentgenové paprsky, ale existuje oblast, kde se jejich vlnové délky překrývají. Rozdíl mezi nimi spočívá ve vzniku. Gama paprsky vznikají při změnách v jádrech atomů, zatímco rentgenové paprsky jsou generovány při procesech v elektronových obalech atomů. Díky své krátké vlnové délce je gama záření jedno z nejpronikavějších a dokáže ho zastavit pouze hustý materiál, jako je olovo. Vlnová délka a intenzita gama záření jsou určeny charakteristikami zdrojového izotopu a nelze je ovlivnit nebo změnit [16], [18].

Mechanismus vzniku gama záření

Gama záření vzniká rozpadem jader izotopů v důsledku jejich přirozené nestability. Izotopy jsou stejné chemické prvky, které se ale liší počtem neutronů v atomovém jádře, tím pádem mají stejné atomové číslo (počet protonů zůstává stejný), ale jinou atomovou hmotnost. Mezi známými prvky je více než 800 izotopů, z nich je asi 500 radioaktivních [16].

Každý prvek s atomovým číslem vyšším než 82 má jádro, které má potenciál se rozpadnout kvůli své přirozené nestabilitě. Nejznámějším z těchto prvků je radium, které se používá jako přírodní radioaktivní zdroj. Radium a jeho dceřiné produkty uvolňují energii ve formě alfa paprsků (α záření). Jádra helia, která se skládají ze dvou protonů a dvou neutronů s dvojnásobným kladným nábojem, uvolňují paprsky beta (β záření), což jsou záporně nabitě částice s hmotností a nábojem stejným jako u elektronů, a paprsky gama (γ záření), které mají krátkovlnné elektromagnetické záření s nukleárním původem. Částice alfa i beta vykazují relativně zanedbatelnou pronikavou sílu, proto jsou pro radiografy užitečné právě paprsky gama (γ záření) [16].

Gama záření v potravinářství

Gama záření vykazuje vyšší energii než rentgenové záření, což mu umožňuje ionizovat hmotu a způsobovat poškození nebo zničení živých buněk. Tento jev je základem využití gama záření pro sterilizaci. Ozařování potravin gama paprsky je proces, při němž jsou potraviny vystavovány gama záření generovanému radioaktivním rozpadem izotopů kobaltu-60 (^{60}Co), který je synteticky vyráběn z kobaltu-59 (^{59}Co) nebo cesia-137 (^{137}Cs). Tento postup je široce využíván především pro sterilizaci a konzervaci potravin. Ozařování zpomaluje proces dozrávání ovoce a zeleniny, inhibuje klíčení cibulovin a hlíz, eliminuje škůdce v obilí, obilninách, čerstvém i sušeném ovoci a zelenině, a rovněž ničí bakterie v čerstvém mase [10], [15].

Výzkum pomocí gama záření

Gama-spektroskopie a neutronová spektroskopie jsou metody používané k průzkumu planetárních těles za účelem detekce vodíku. Množství vodíku může nepřímo naznačovat přítomnost vody (H_2O) nebo hydroxylových skupin (OH^-) v povrchové vrstvě tělesa, ale přepočítání množství vody závisí na modelu použitém pro analýzu [19].



Obrázek 2 - Přenosný gama spektrometr [20]

Technologie jako gama-spektrometr na Mars Odyssey dokáže detekovat vodík až do hloubky 1 metru, což je výhoda oproti vizuální a infračervené spektroskopii, která detekuje vodu pouze na povrchu. Nevýhodou je modelová neurčitost mezi množstvím vodíku a jeho hloubkou [19].

Aplikace gama záření v medicíně

Gama záření nachází široké uplatnění v medicíně, a to jak v oblasti léčby, tak v diagnostice. Radioterapie, což je metoda využívající ionizující záření, klíčovou součástí léčby rakoviny. Tato terapeutická metoda byla poprvé úspěšně aplikována ve 20. století a od té doby prošla velkým technologickým vývojem. V 50. letech 20. století byla zavedena kobaltová terapie, která umožnila cílené ničení hlubších nádorových buněk. Radioterapie se obvykle dělí na teleterapii, což je záření aplikované z vnějšího zdroje, brachyterapii, kdy je záření aplikováno v těle pacienta a radioizotopová terapii, která využívá radioaktivní izotopy k léčbě [21].

V diagnostice se gama záření využívá v metodách jako jsou scintigrafie, SPECT a PET. Scintigrafie je diagnostické vyšetření, při němž jsou radioizotopy aplikované interně a následně je vyzařované záření z těchto radioizotopů zachyceno pomocí gama kamer, které fungují jako externí detektory a umožňují tak získat obrazy. SPECT je diagnostická metoda využívaná k vytváření 3D zobrazení, kde jsou detekovány radioizotopy generující emisi jednotlivých fotonů, a to pomocí speciálních kamer. Radioizotopy, jako galium, jod, thallium, technecium, jsou aplikovány přímo do těla pacienta. PET je silná zobrazovací metoda, která umožňuje in vivo vyšetření funkcí lidského mozku. V minulosti byla PET používána především ve výzkumu, vzhledem k vysokým nákladům a komplikovanosti podpůrné infrastruktury, jako jsou laboratoře pro radiochemii, PET skenery a cyklotrony. V současnosti je široce využívána v klinické neurologii pro lepší pochopení patogeneze nemocí, pomáhá při diagnostice, sledování progresu onemocnění a hodnocení účinnosti léčby [22].

Od objevení teorie o původu nemocí způsobených mikroorganismy byly neustále vyvíjeny a hledány efektivní metody pro sterilizaci lékařských pomůcek. Mezi tyto pomůcky patří například lékařské nástroje, plastové rukavice, stehy, obvazy, jehly a injekční stříkačky. Tradiční metody ničení bakterií zahrnovaly použití suchého tepla, páry pod tlakem a silné chemikálie, jako je fenol a plynný ethylenoxid. Některé z těchto chemikálií však mohou být příliš agresivní pro vybavení určené k opakovanému použití a často jsou samotné látky nebezpečné. V poslední době se stále častěji využívají elektronové paprsky produkované urychlovačem, které se osvědčily jako preferovaná volba pro některé aplikace. Specifickou výhodou gama záření generované Co^{60} je jeho schopnost pronikat materiály. Produkt může být

uzavřen v plastovém obalu a následně ozařován, což zajišťuje jeho mikrobiologickou nezávadnost až do okamžiku, kdy je použit [23].



Obrázek 4 - SPECT skener [24]



Obrázek 3 - PET skener [25]

Onkologická onemocnění

Rakovina je souhrnný pojem pro širokou škálu onemocnění, která jsou obecně charakterizována neregulovaným růstem a diferenciací buněk, což je důsledkem specifických změn ve funkci jednoho nebo více genů. Různé formy rakoviny byly spojeny s vlivy znečištění životního prostředí, složení stravy jedince a radiací [4], [15].

Správné fungování lidského těla je podmíněno přesnou regulací buněčného dělení. Zatímco nepotřebné nebo poškozené buňky jsou eliminovány, jiné se dělí jen v míře nezbytné pro udržení tkáňové rovnováhy nebo opravu poškození. K rozvoji nádorového onemocnění dochází v případě narušení této rovnováhy a následného nekontrolovaného množení buněk, často již na úrovni jediné buňky. Přestože je lidské tělo denně vystavováno celé řadě vnitřních i vnějších rizikových faktorů, rozvoj nádoru je relativně vzácný díky složitému systému kontrolních mechanismů, které zajišťují udržení normální funkce organismu[26].

Radiace

Záření jaderného původu je vysoce energetické, což znamená, že každý typ záření má potenciál způsobovat biologické změny v tkáních a dalších materiálech. Radioaktivita se přirozeně nachází kolem nás. Vzniká interakcí vysokoenergetického kosmického záření nebo jako pozůstatek radionuklidů z doby vzniku Sluneční soustavy. Celkové účinky záření jsou určovány typem, energií a intenzitou záření, stejně jako podrobným složením materiálu, kterým prochází [27], [28].



Obrázek 5 - Bezpečnostní značka radioaktivního záření [29]

Radiosenzitivita

Lidský organismus tvoří komplexní soustava tkání a orgánů, které se liší svou citlivostí na ionizující záření, tento jev označujeme jako radiosenzitivitu. Při stejné absorbované dávce se biologické účinky záření v jednotlivých tkáních výrazně liší. Nejvyšší radiosenzitivitu vykazují tkáně s rychlým buněčným dělením nebo s nízkým stupněm diferenciací. Obecně lze sledovat klesající citlivost v následujícím pořadí: lymfatická tkáň, krvetvorné buňky, kostní dřev, epitelové buňky, nervová tkáň, mozková tkáň a nakonec svalová tkáň, která patří mezi nejodolnější [27], [30].

Ionizující záření má dva hlavní účinky na buňku, a to je buněčná smrt a změny v cytogenetických informacích [30].

Buněčná smrt (tzv. buněčná deplece) může nastat již během interfáze, tedy klidového stavu mezi dvěma buněčnými děleními. K tomu však dochází pouze při relativně vysokých dávkách ionizujícího záření, které způsobují rozsáhlé poškození buněčných struktur, včetně denaturace proteinů. Významnější roli však sehraává tzv. mitotická smrt, která nastává v důsledku poškození buňky během mitózy. V tomto případě buňka ztrácí schopnost dále se dělit, a to i při nižších dávkách záření, které by samy o sobě nestačily k její destrukci v interfázi. Tento mechanismus je nejvýrazněji patrný v rychle se dělících tkáních, jako jsou orgány podílející se na krvetvorbě, střevní epitel nebo vyvíjející se embryonální tkáň. [30].

Další závažnou formou buněčného poškození jsou genetické změny, které postihují DNA uloženou v chromozomech. Ionizující záření může vyvolat různé typy mutací, a to buď bodové (genové), nebo rozsáhlejší chromozomové aberace – v závislosti na typu a rozsahu poškození. Tyto mutace mohou být buď gametické, tedy zasahující pohlavní buňky a schopné přenášet změněnou genetickou informaci na potomstvo, nebo somatické, které postihují tělesné buňky a jejichž důsledky se projevují pouze u konkrétního jedince. Právě somatické mutace mohou sehraávat významnou roli v procesu vzniku nádorových onemocnění [30].

Organismus reaguje na poškození způsobené ionizujícím zářením aktivací přirozených obranných mechanismů, které zahrnují procesy buněčné opravy. Tyto reparativní mechanismy lze rozdělit na časnou reparaci a proliferaci. Časná reparace, probíhající v řádu několika hodin, obnovuje schopnost buňky dělit se a je zaměřena na přímou opravu poškozené buněčné struktury. Proliferace pak představuje obnovu tkáně prostřednictvím dělení přeživších buněk se

zachovanou mitotickou aktivitou, přičemž tento proces může trvat několik dnů až týdnů. Účinnost opravných mechanismů je však omezená – v případě rozsáhlejšího poškození může docházet k tzv. sekundární (atypické) reparaci, kdy je ztracená funkční tkáň nahrazena méně specializovaným pojivovým (fibrotickým) tkáním, což vede ke snížení funkčnosti daného orgánu [30].

Účinky radiace

V radiační toxikologii se rozlišují nádorové a nenádorové zdravotní efekty expozice ionizujícího záření [31].

Nenádorové onemocnění

Nenádorové radiační onemocnění tedy akutní expozice představuje krátkodobé, avšak velmi intenzivní působení ionizujícího záření na lidský organismus. Akutní expozice má deterministické účinky, což znamená, že k jejich vzniku dochází pouze při překročení určité prahové dávky a velikost poškození závisí na výši dávky. Tato expozice může být buď vnější nebo dokonce i vnitřní, která nastává požitím, vdechnutím, injekcí nebo absorpcí radioaktivních materiálů. Vysoké dávky záření působící v krátkém čase mohou způsobit závažné zdravotní problémy, jako je akutní radiační syndrom, předčasné stárnutí nebo dokonce smrt. [4], [32], [31].

Syndrom akutní radiační nemoci se projevuje průjemem, zvracením, horečkou, vypadáním vlasů, slabostí a krvácením. Doba mezi expozicí a nástupem těchto příznaků je relativně spolehlivý ukazatel, kolik záření daná osoba absorbovala. Nižší dávky obvykle způsobují jen mírné změny. Dochází k izolovaným zlomům chromozomů a lehkým změnám v krevním obraze (např. pokles bílých krvinek), ale postižení mají velkou šanci na přežití. Při dávkách okolo 5 Gy dochází k těžkému poškození kostní dřeně, střev a vysokému riziku infekce. Bez léčby může smrt nastat během několika týdnů, ale při intenzivní lékařské péči je šance na uzdravení. Pokud je dávka ještě vyšší, postižení bývá fatální. Z důvodu akutního poškození centrální nervové soustavy a ztrátě kmenových buněk ve střevech, jejichž funkce je pro přežití nezbytná. V těchto případech je přežití velmi nepravděpodobné a úmrtí často přichází během několika hodin až dní [32], [31].

Nádorové onemocnění

Vedle radiosenzitivity, která se projevuje destrukcí tkáně a buněčnou smrtí, je možné rozlišit i různé vnímavosti orgánů a tkání na cytogenetické efekty, což se může projevit například vznikem nádorů. Nádorové onemocnění má dlouhou latenci, která se může projevit až po několika letech. Dochází k němu, pokud zásah záření poškodil klíčovou část DNA a tato chyba nebyla opravena dříve, než se buňka rozdělí. Zahájení rakovinového bujení závisí na pravděpodobnosti, jestli záření zasáhne ve správném místě a nenastane reparace buňky včas. I když je to nepravděpodobné, jediný zásah může vést ke vzniku nádoru. Z toho tedy plyne, že výskyt je náhodný a nezávislý na velikosti dávky. Vyšší dávka pouze zvyšuje pravděpodobnost výskytu. Takové účinky označujeme jako stochastické [30], [31].

Nádor můžeme definovat jako lokalizovatelný shluk buněk, které přesahuje normální množství potřebné pro růst opravu nebo funkci tkáně. Existují dva typy nádorů benigní a maligní. Benigní nádory jsou nezhoubné, dobře lokalizovatelné a netvoří metastázy. Naproti tomu maligní nádory jsou zhoubné a jsou charakterizovány ztrátou své specializace, rychlým růstem, pronikají do okolních tkání a tvoří metastázy. Rakovina je tedy postupný proces, který zahrnuje vznik, růst a metastatické šíření zhoubného nádoru – maligního novotvaru. Tato nemoc může postihnout jakýkoliv orgán, ale zvláště jsou ohrožené tkáně, které mají vysokou rychlost buněčného dělení [33].

Mezi závažné dlouhodobé důsledky ozáření patří genetické mutace, které se mohou projevit u potomků jedinců vystavených záření. Dědičné účinky záření jsou způsobeny tzv. gametickými mutacemi, k nimž dochází v jádrech pohlavních buněk. Vystavení ionizujícímu záření vede ke zvýšenému výskytu genetických změn oproti těm, které vznikají přirozenou cestou. Pokud dojde k mutaci genu, může být tato změna při buněčném dělení dále přenášena, a tím se zachovává i v dalších generacích. V důsledku nevhodné genetické výbavy často dochází k tomu, že zárodek zanikne ještě před uhnízděním nebo krátce po něm, což se může projevit jako neúspěšné oplodnění. V jiných případech sice dochází k vývoji embrya, ale těhotenství může skončit spontánním potratem, předčasným porodem, úmrtím novorozence krátce po narození nebo narozením dítěte s vážnou vrozenou vadou. Genetické příčiny představují přibližně 20–25 % případů samovolných potratů. Mezi možné následky genetických poruch patří například Downův syndrom. Záření může rovněž ovlivnit geneticky podmíněné rysy populace, jako je pohlavní poměr, tělesná výkonnost, mentální schopnosti či motorika [30].

Účinky ionizujícího záření na vyvíjející se zárodek závisí především na délce expozice a stadiu vývoje v době ozáření. V průběhu prvních tří týdnů po početí, kdy má zárodek nízký počet buněk a ty ještě nejsou specializované, vede závažné poškození obvykle k selhání implantace nebo k zániku oplodněného vajíčka. V tomto časném období se obvykle nevyskytují deterministické ani stochastické účinky. Nejvyšší citlivost na záření vykazuje zárodek mezi třetím a osmým týdnem vývoje, tedy v období embryogeneze, kdy dochází k intenzivnímu formování orgánů. V této fázi je výrazně zvýšené riziko vzniku vrozených vad v důsledku poruch organogeneze. Od čtvrtého týdne vývoje dále roste riziko vzniku maligních nádorů vyvolaných zářením, které se mohou manifestovat jak v dětství, tak v dospělosti. Úroveň tohoto rizika je srovnatelná s rizikem u dětí mladších deseti let, což znamená přibližně dvakrát až třikrát vyšší citlivost než u dospělé populace. V období od osmého do dvacátého pátého týdne těhotenství je plod zvláště citlivý na vznik mentální retardace v důsledku poškození centrálního nervového systému [30].

Prevence a ochrana před nadměrným ozářením

Účinky ionizujícího záření na lidské zdraví se neprojevují rovnoměrně napříč různými orgány a systémy. V rámci radiační ochrany je však nezbytné stanovit přesně definovaná kritéria, jejichž cílem je prevence závažných zdravotních následků v důsledku expozice záření. Tato kritéria musí vycházet ze systematického třídění biologických poznatků, což umožňuje kvantitativně posoudit rizika spojená s ozářením jednotlivce i celé populace [30].

Znalost biologických účinků ionizujícího záření představuje zásadní předpoklad pro formulaci principů a kritérií radiační ochrany. Na jejich základě je vytvářen systém limitů pro dávky záření určený jak pro pracovníky v riziku expozice, tak pro běžné obyvatelstvo. Tyto poznatky zároveň tvoří základ pro efektivní poskytování zdravotní péče v případech poškození organismu v důsledku ozáření. V případě pracovních úrazů spojených s expozicí ionizujícímu záření je nezbytné, aby osoby poskytující první pomoc měly základní orientaci v této problematice a dokázaly adekvátně reagovat na vzniklou situaci [30].

Ochrana proti ozářením je jakýkoli materiál nebo bariéra, která dokáže pohltit záření a slouží tak jako ochrana lidí, vybavení nebo pracovních prostor před škodlivým účinkem ionizujícího záření. Může to být také speciální zařízení v měřicích přístrojích, které zabraňuje tomu, aby rušivé záření ovlivňovalo výsledky měření. Tento princip se obecně označuje jako radiační stínění. Stínění může zahrnovat těžké oblečení a použití olova [4],[32].

Každý zaměstnavatel je povinen zajistit, aby každý pracovník, který přichází do styku se zářením, měl k dispozici vhodné ochranné prostředky. Pro tyto účely se používají olovněné zástěry a pevné bariéry, které slouží ke snížení intenzity záření. Olovo se dá nahradit částečně nebo úplně jinými materiály, které tlumí záření stejně dobře. Výhody náhrady jinými materiály spočívají v tom, že při likvidaci použitých zástěr nastává problém s toxicitou olova, která se tímto způsobem odstraní a také zástěry nejsou tak těžké a nezpůsobují jiné zdravotní problémy, jako například bolest zad. Tyto zástěry se laboratorně testují v prostředí odpovídající pracovním podmínkám, pro zjištění tzv. olovněného ekvivalentu [34].



Obrázek 7 - Olovněná vesta používaná jako ochrana proti radiaci [35]



Obrázek 6 – Dozimetr [36]

Další důležitou pomůckou pro ochranu před zářením je dozimetr, který slouží jako přístroj k zaznamenávání množství ionizujícího záření. Může být připevněný v místnosti nebo ho pracovníci nosí přímo na těle pod zástěrou, aby kontrolovali, zda prostředí a celý organismus jsou v přijatelném prostředí [4].

Léčebné metody

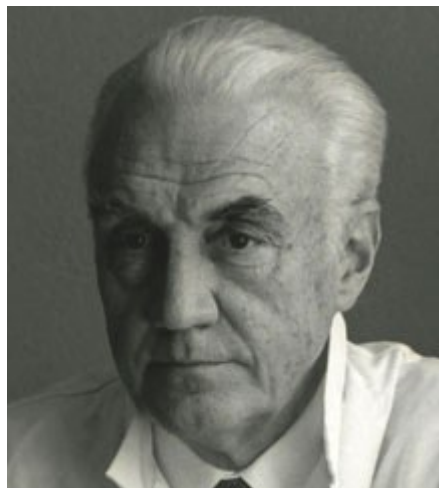
Podávání léčiva do specifického cíleného místa je koncept, který lze využít v řadě zdravotních potíží. Zejména v onkologických onemocněních je lokální chemoterapie pro léčbu zhoubných nádorů velmi vyhledávaná, ale také jedna z nejobtížnějších metod, která je po staletí hlavním cílem lékařského výzkumu [37].

Jsou zde kladené zvlášť vysoké nároky na přesnost u tzv. funkčních poruch – například poruch hybnosti, epilepsie, silných bolestí nebo psychiatrických onemocnění. Zde je velmi důležité zasáhnout přesně daný cíl, aniž by došlo k poškození okolí. Proto je naprosto zásadní, aby přístroj i celý zákrok splňoval nejpřísnější kritéria pro přesnost a preciznost [38].

Základní metodou pro léčbu onkologických onemocnění stále zůstává celková chemoterapie. Tato metoda zatěžuje celý organismus a má mnoho vedlejších účinků, které vedou k rozhodnutí, zda ji pacient vůbec může podstoupit nebo ji kvůli náročnosti pacient sám odmítne. Jako alternativní cílené metody k celkové chemoterapii jsou cílené molekulární terapie, minimálně invazivní ablace nádoru nebo cílené ozařování pomocí radioaktivních částic podané metodou gama nože [37].

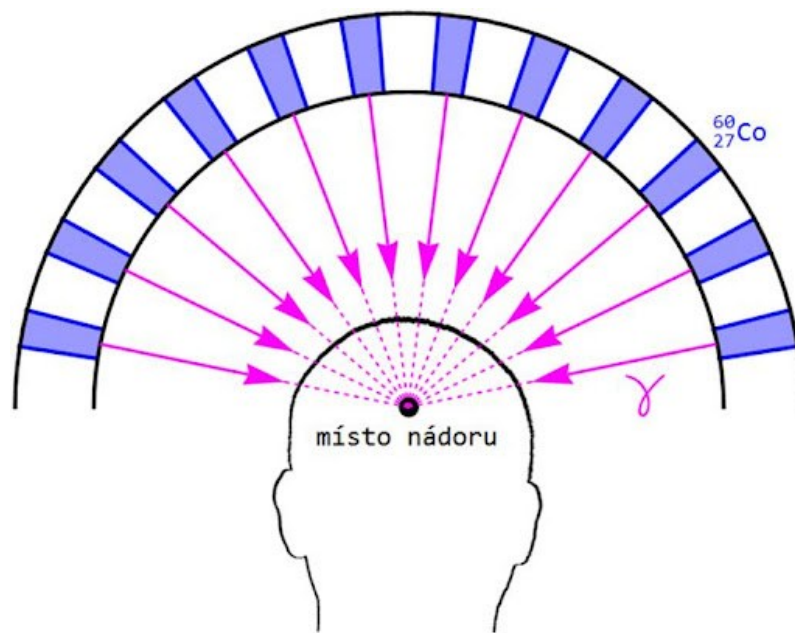
Gama nůž

Přístroj Elekta Gamma Knife® je specializované zařízení pro stereotaktickou radiochirurgii, které bylo vyvinuto v roce 1968 švédským neurochirurgem Larsem Leksellem [39].



Obrázek 8 - Lars Leksell [40]

Gama nůž je specializovaný přístroj určený k přesnému ozáření malých oblastí mozku. Umožňuje provádění radiochirurgie, tedy odstranění nebo poškození patologické tkáně bez nutnosti otevřené operace. Na rozdíl od klasické radioterapie využívá více paprsků gama záření produkovaného radioaktivním kobaltem-60 ($^{60}_{27}\text{Co}$). Tyto paprsky jsou soustředěny do jednoho společného bodu s velmi vysokou přesností, což umožňuje zásah přesně určeného místa v mozku bez poškození okolní zdravé tkáně. Tento přístroj umožnil velmi přesné doručení jednorázové vysoké dávky gama záření do různých míst uvnitř lebky pomocí pevně umístěných zdrojů ^{60}Co , které jsou zaměřeny do jednoho bodu [39], [38].

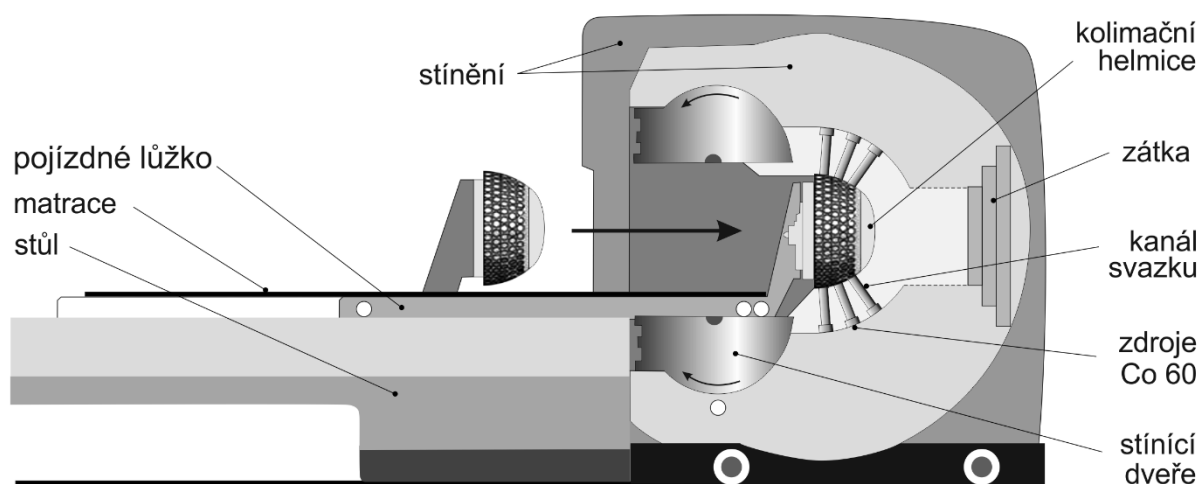


Obrázek 9 - Princip účinku gama nože [41]

Princip fungování gama nože

Celý systém se skládá z ozařovacích jednotek se stolem, stereotaktického rámu a počítačového systému pro plánování ozařovací dávky. Radioaktivní zdroje jsou uloženy v ochranném bloku z litiny [38].

V zářičové jednotce se nachází 201 zdrojů ^{60}Co , které jsou rozmístěny v polokulovitém uspořádání. Gama paprsky z těchto zdrojů se sbíhají do tzv. centrálního bodu přístroje (Unit Center Point – UCP), který se nachází 40 cm od každého zdroje. Tento bod plní podobnou funkci jako izocentrum u klasických ozařovacích zařízení. Právě do tohoto bodu musí být během léčby přesně umístěn pacient s postiženým cílovým místem [39].



Obrázek 10 - Schéma gama nože [42]

Aby mohl přístroj gama nůž splňovat náročné požadavky radiochirurgie, musí být jeho technické provedení velmi přesné. Mezi klíčové podmínky patří možnost zarovnání cílového bodu s centrálním bodem zařízení s přesností do 0,5 mm. Přesné zacílení je zajištěno pomocí tříosého souřadnicového systému stereotaktického rámu Leksell®. Každý zdroj má při nové instalaci aktivitu přibližně 1100 GBq a dohromady vytvářejí rychlost dávkování asi 3 Gy za minutu v centrálním bodě [39], [38].

Každý paprsek je během své cesty do cíle dvakrát kolimován. Nejprve pomocí primárního kolimátoru a následně jednou ze čtyř sekundárních kolimátorových helem. Tyto helmy obsahují vždy 201 wolframových kolimátorů, které určují průměr výsledného paprsku v UCP. K dispozici jsou čtyři velikosti otvorů - 4 mm, 8 mm, 14 mm, 18 mm. Aby bylo možné co nejlépe přizpůsobit dávku tvaru cílové léze, využívají se různé kombinace průměrů otvorů, zaslepení vybraných kanálků (plugging), doby ozáření a pozic hlavy pacienta. Každá konkrétní kombinace těchto čtyř parametrů se v terminologii gama nože označuje jako „shot“ (záběr)[39].

Zařízení Gamma Knife bylo využito pro léčbu stovek tisíc pacientů po celém světě a patří mezi nejpřesnější a nejlépe ověřené metody stereotaktické radiochirurgie [39].

Průběh léčby pomocí gama nože

Léčba pomocí gama nože probíhá ve čtyřech krocích. Na hlavu pacienta se upevní stereotaktický rám, následuje pořízení zobrazovacích snímků, které určí přesnou polohu cílové tkáně. Dále se naplánuje léčba a probíhá samotné ozařování. Ozáření je bezbolestné a trvá jen několik minut [38].

Na výslednou přesnost má vliv i kvalita zobrazovacích metod. Například moderní MRI dosahuje rozlišení 1 mm a CT až 0,5 mm. Díky tomu je možné zasáhnout i velmi malé mozkové struktury [38].

Rychle se dělící buňky jsou na záření citlivější než buňky, které se dělí pomalu. V mozku jsou nejcitlivější buňky výstelky cév a podpůrné gliové buňky. Neurony, které se již nedělí, jsou vůči záření poměrně odolné. Proto je možné zničit patologickou tkáň bez výrazného rizika pro zdravé nervové buňky [38].

Gama nůž se používá k léčbě cévních malformací mozku, benigních i maligních nádorů, trigeminální neuralgii, která se projevuje jako silný bolestivý stav, Parkinsonově chorobě nebo dokonce obsedantně kompulzivní poruchy [38].

Tento zákrok se většinou provádí ambulantně a účastní se ho tým složený z neurochirurga, neuroradiologa, radiačního onkologa, lékařského fyzika a zdravotní sestry. V některých zemích je ze zákona povinná přítomnost odborníka na radiační ochranu [38].

K upevnění hlavy pacienta se používá tzv. stereotaktický rám Leksell G. Kůže na hlavě se nejprve znecitliví v místě, kde budou připevněny čtyři fixační šrouby. Rám zůstává na hlavě po celou dobu zákroku a zajišťuje maximální přesnost. Během nasazování rámu se pro přidržení často používá i suchý zip [38].

Ve výjimečných případech může rám zůstat na hlavě i přes noc – například při vícefázové léčbě nádorů. U některých pacientů je potřeba rám nasadit opakovaně ve stejné poloze (např. při léčbě epilepsie). Díky speciálnímu přídavnému systému je možné rám znovu přesně připevnit i po několika týdnech nebo měsících [38].

Radioaktivní zdroje gama nože

Zdrojem záření jsou malé válcovité pelety ^{60}Co , které jsou bezpečně uzavřeny ve vícevrstvých kovových kapslích z nerezové oceli a hliníku. Každý zdroj obsahuje 12 až 20 těchto pelet a přispívá rovnoměrně k celkové aktivitě přístroje [38].

Radioaktivní izotop ^{60}Co vzniká v jaderném reaktoru a při svém rozpadu uvolňuje dva gama fotony, dostatečně silné k proniknutí do mozkové tkáně. Jeho poločas rozpadu je 5,26 let, což znamená, že po této době se dávková rychlost sníží na polovinu. Z tohoto důvodu se doporučuje výměna zdrojů přibližně každých 7 až 10 let [38].

Při průchodu tkání záření vyvolává tzv. Comptonův jev, při kterém vzniká nízkoenergetický foton a elektron. Kvůli tomuto jevu vzniká kolem paprsku „polostín“ široký přibližně 1,5 mm, který nelze dále zmenšit [38].

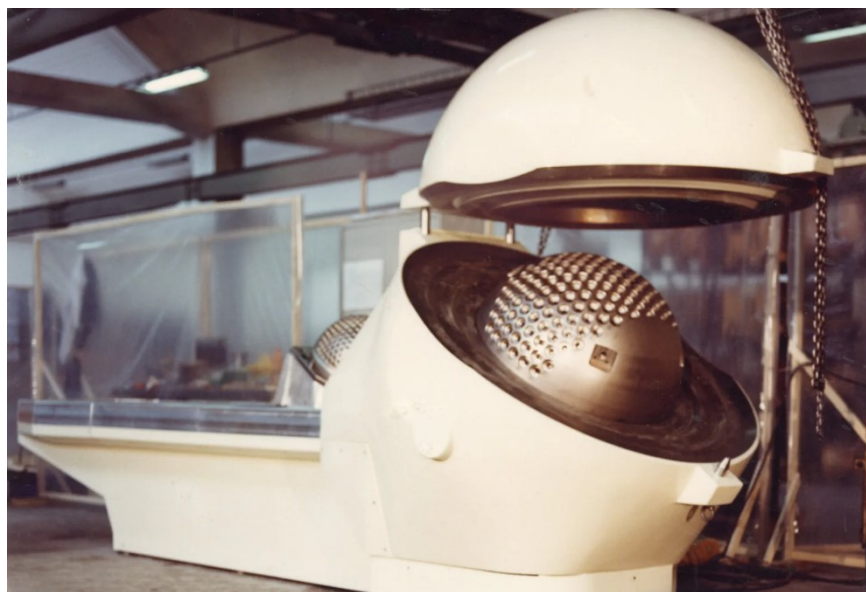
Radioaktivní zdroje jsou rozmístěny po obvodu polokulovité části přístroje, tzv. centrálního tělesa. Paprsky z těchto zdrojů jsou vedeny kuželovitými kanálky – první část je z wolframu, druhá z olova. Třetí část kanálku tvoří tzv. kolimátorová helma, která se nasadí na ošetrovací stůl během léčby a propojí se s centrálním tělesem [38].

Modely gama nože

Jak se postupně zvyšovala zkušenost s používáním gama nože, začalo být zřejmé, že některé konstrukční prvky zbytečně prodlužují dobu léčby a činí celý proces únavným. Zejména šlo o dva časově náročné úkony: výměnu helmy a její zapojování. Tyto technické detaily sice byly součástí standardního postupu, ale v praxi představovaly značnou komplikaci [43].

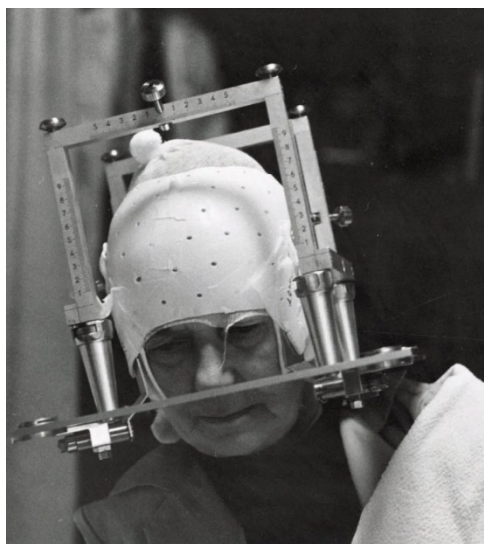


Obrázek 11 - Pacient v gama noži modelu U [44]



Obrázek 13 - Otevřená zadní část gama nože modelu U [44]

Ve všech modelech gama nože od druhého prototypu až po modely C byly paprsky směřovány skrz speciální helmu, připevněnou ke stolu, na kterém pacient ležel. Existovaly čtyři různé helmy s kolimátory o průměrech 4, 8, 14 a 18 mm, které bylo třeba měnit podle požadované velikosti ozářeného svazku. Tyto helmy byly těžké a neskladné, uchovávaly se ve speciálních držácích a k hlavové části stolu se přesouvaly pomocí mechanického zařízení. V některých případech výměna helmy a správné nastavení polohy pacienta trvalo déle než samotné ozařování. Tyto skutečnosti významně přispěly k potřebě technického zjednodušení a automatizace, které přinesly až novější generace gama nožů [43].



Obrázek 12 - Pacient s helmou uchycenou termoplastem před ošetřením gama nožem [44]

Model B gama nože vznikl v roce 1987 kvůli byrokratickým překážkám, které znemožnily dovoz nejnovější verze přístroje do USA. Tento model měl helmu s vnitřním průměrem 33 cm a kruhové uspořádání kolimátorů, což odstranilo některé výhody předchozího modelu U, například možnost ozařovat pacienta v poloze na břiše. Významnou změnou bylo nahrazení hydraulického systému pohybu stolu elektrickými motory, které stůl posouvaly přímo do ozářené části, což výrazně zjednodušilo mechaniku a provoz přístroje. Naopak nevýhodou byla ztráta některých ergonomických výhod a možností polohování pacienta, které nabízely předchozí modely [43].

Na přelomu 90. let a počátku 21. století došlo k významné změně v praxi gama nože, kdy se mozkové metastázy staly častou indikací a vyžadovaly složité a rychlé ošetření. Stávající helmy s otvorem 33 cm často neumožňovaly přístup ke všem ložiskům během jednoho ozařování, a proto bylo potřeba více prostoru uvnitř kolimátorů.

Model Gamma Knife Perfexion tuto výzvu řešil větším prostorem a inovacemi – zátěžování (plugging) bylo řízeno softwarem s možností vnitřního ovládání bez nutnosti manuální výměny helmy a kolimátory bylo možné měnit automaticky. Díky tomu mohl být pacient ošetřen bez dalších zásahů týmu, pouze stisknutím tlačítka, což výrazně zjednodušilo a zrychlilo léčbu. Model Perfexion představuje zcela nový design gama nože, který přináší významné inovace oproti předchozím verzím. Namísto tradiční helmy využívá dutou wolframovou masu s 192 vyvrtanými kolimátorovými kanály, rozdělenými do osmi pohyblivých sektorů, které obklopují hlavu pacienta. Celkem obsahuje 24 zdrojů záření a tři velikosti kolimátorů – 4, 8 a 16 mm. Tento systém umožňuje více prostoru, lepší komfort pro pacienta a výrazně rychlejší léčbu díky eliminaci nutnosti měnit helmy či kolimátory manuálně. Před komerčním nasazením prošel rozsáhlým testováním, které potvrdilo jeho schopnost efektivně a rychle ozařovat jakékoliv místo v lebce, což usnadňuje práci lékařům a zároveň zvyšuje pohodlí pacientů [43].

Další léčebné metody

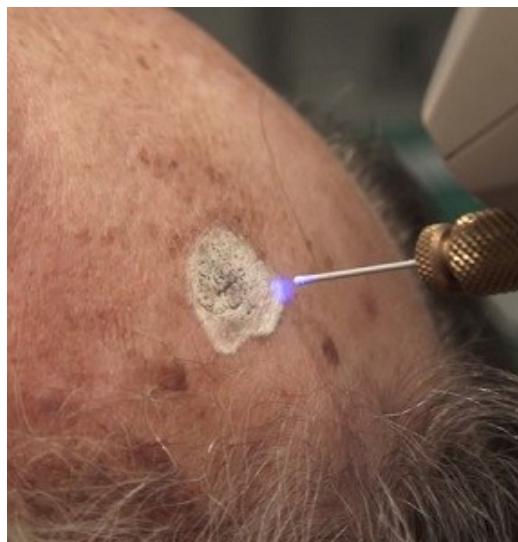
Současné možnosti léčby rakoviny spadají do pěti hlavních kategorií: chirurgie, radioterapie, chemické látky, biologické látky a buněčné terapie. Výběr a potenciální přínos těchto různých možností se výrazně liší v závislosti na konkrétním typu rakoviny a na schválených standardech péče, které byly klinicky ověřeny. Chirurgická resekce je běžně používaný přístup k odstranění nádorového útvaru, jehož historie sahá staletí do minulosti, ale dnes se posouvá do oblasti robotiky. Pokud lze tímto způsobem odstranit veškeré nádorové tkáně, zůstává chirurgická

resekce nejlepší metodou k dosažení úplného vyléčení. Chirurgická resekce se často používá k redukci objemu nádoru buď před, nebo po radioterapii nebo chemické léčbě. Tyto přístupy mohou v některých případech přinášet vynikající výsledky, například u germinálních nádorů varlat [45].

Chirurgie

Lékař pomocí gama nože dokáže odstranit tkáň podobně jako při použití jiných nástrojů, jako je kryochirurgie nebo laser. Rozdíl spočívá v tom, že účinek záření nenastává ihned, ale s určitým zpožděním, stejně jako případné vedlejší účinky [38].

Kryochirurgie je metoda zaměřená na selektivní úplné zničení určité oblasti tkáně v těle. Používá se k odstranění nebo destrukci odumřelé nebo nemocné tkáně. Nejeftektivnější je při léčbě lézí, k nimž je snadný přístup zvenčí, což umožňuje mechanické umístění kryosondy nebo aplikaci kryogenní kapaliny ve formě spreje. Mezi nejběžněji uznávané aplikace kryochirurgie patří léčba kožních, slizničních a gynekologických lézí, rakoviny jater a tachyarytmií v kardiochirurgii. Další účinné, ale méně běžné použití zahrnuje léčbu hemoroidů, rakoviny ústní dutiny, prostaty, anální oblasti, kostních nádorů, závratí, odchlípení sítnice a viscerálních nádorů [46].



Obrázek 14 – Zákrok s použitím kryochirurgie [47]

Lasery dnes hrají důležitou roli v lékařské diagnostice i chirurgii. Pro diagnostiku se často používá metoda laserem indukované fluorescence, která umožňuje rozlišit zdravou a nemocnou tkáň podle rozdílů ve spektrálním záření. Po podání chemického roztoku hematoporfyrinu

(Hpd), která se hromadí v nádorových buňkách, je možné je detekovat pomocí modrého laseru, protože rakovinné buňky následně fluoreskují [48].

V chirurgii slouží lasery k přesnému řezání a ničení tkání. Mezi výhody patří menší krvácení, méně bolesti, možnost práce pod mikroskopem, použití endoskopů a nižší riziko infekce, protože nejsou potřeba mechanické nástroje. Lasery také umožňují "svažování" cév a některé zákroky lze řídit počítačem [48].

Radioterapie a radiochirurgie

Radioterapie a radiochirurgie jsou dvě příbuzné, avšak odlišné metody léčby nádorových onemocnění, které se liší především přesností, způsobem aplikace a rozsahem využití. Radioterapie je častěji používaná metoda, která se aplikuje opakovaně v průběhu několika týdnů. Je méně přesná, a proto může docházet k poškození okolní zdravé tkáně, avšak její výhodou je širší využití, protože se hodí pro léčbu většiny typů nádorů. Typickým příkladem zařízení pro radioterapii je lineární urychlovač. Oproti tomu radiochirurgie představuje velmi přesný způsob ozařování, který se obvykle provádí v menším počtu sezení a minimalizuje poškození okolní tkáně. Její využití je však omezeno na dobře ohraničené nádory, nejčastěji v mozku, páteři nebo játrech. Mezi hlavní metody radiochirurgie patří GammaKnife® a CyberKnife® [39], [45].

Oba moderní systémy stereotaktické radiochirurgie a stereotaktické radioterapie využívají lineární urychlovače, které je doplněny o zvýšenou přesnost otočné konstrukce a stolu, speciální kolimaci, fixační zařízení pro hlavu nebo tělo, pokročilé zobrazovací technologie a plánovací software. Tyto systémy umožňují přesné zacílení na malé nádory nejen v mozku, ale také například v plicích, játrech či páteři, přičemž ozařování probíhá pomocí více svazků z různých úhlů nebo dynamickým pohybem otočné konstrukce a stolu. Mezi známé platformy tohoto typu patří Novalis Tx® a XKnife® (Integra Radionics). CyberKnife® využívá odlišný přístup – 6MV lineární urychlovač je namontován na robotickém rameni, které se pohybuje po předem definovaných neizocentrických trajektoriích kolem pacienta. Na každé dráze robot zastavuje v řadě uzlů, odkud může vysílat záření pod různými úhly. Celkově lze využít až 1 200 různých směrů paprsku, přičemž konkrétní dávka v jednotlivých uzlech je určena individuálním léčebným plánem. Tento přístup umožňuje vysoce přesné ozáření nádoru s minimálním dopadem na zdravou tkáň [39].

Chemické a biologické látky

Radiační, chemoterapeutické a biologické léčebné strategie se zaměřují na různé fáze mitózy, které představují zranitelná místa nádorových buněk. Mitóza v somatických buňkách probíhá jako sled přesně regulovaných dějů. U dospělých jedinců většina buněk zůstává v klidovém, nedělícím se stavu nazývaném fáze G0. Po obdržení stimulu k dělení buňka opouští fázi G0 a vstupuje do buněčného cyklu, který vede ke vzniku dvou identických dceřiných buněk. Nejprve probíhá fáze G1, během níž buňka roste a připravuje se na replikaci DNA. Následuje syntetická fáze S, v níž dochází ke zdvojení genetické informace. V další fázi G2 pokračuje buněčný růst a buňka se připravuje na závěrečnou fázi mitózy. Samotná mitóza, označovaná jako fáze M, zahrnuje rozdělení duplikovaných chromozomů a vznik dvou nových dceřiných buněk. Během mitózy dochází k několika po sobě jdoucím procesům – nejprve se chromatin kondenzuje do zřetelných chromozomů (profáze), poté se chromozomy uspořádají do roviny dělení pomocí mikrotubulů (metafáze), následuje oddělení sesterských chromatid mikrotubuly (anafáze) a nakonec probíhá fyzické rozdělení buňky do dvou dceřiných buněk (telofáze) [45].

Chemoterapeutika a biologické látky jsou obvykle vybírány tak, aby působily toxicky ve specifických fázích buněčného cyklu. Například antimetabolity, jako je metotrexát, inhibují syntézu DNA a cílí na buňky v S fázi, zatímco látky jako vinkové alkaloidy specificky blokuje M fázi díky své schopnosti inhibovat tvorbu dělicího vřeténka. Analogy pyrimidinu a purinu fungují tak, že inhibují syntézu nukleových kyselin nebo se začleňují do DNA a tím narušují děje probíhající v S fázi; cytarabin inhibuje DNA polymerázu a gemcitabin se zabudovává do DNA a narušuje její syntézu. Antracykliny, jako je doxorubicin, se vkládají mezi vlákna DNA (interkalují) a ovlivňují funkci topoizomerázy II, čímž blokuje replikaci DNA. Většina chemoterapeutik však nerozlišuje mezi nádorovými buňkami a zdravými buňkami s vysokou rychlostí dělení, jako jsou buňky vlasových folikulů, epitelu střeva, krvetvorné buňky nebo buňky imunitního systému. Z tohoto důvodu tyto léčby často vedou k vedlejším účinkům, jako je alopecie (vypadávání vlasů), těžké průjmy a život ohrožující anémie [45].

Regenerativní medicína

Regenerativní medicína je moderní interdisciplinární obor, který propojuje materiálové vědy, buněčnou biologii a tkáňové inženýrství a nabízí značný potenciál pro opravu nebo náhradu poškozených buněk a tkán. Významnou součástí této oblasti je buněčná terapie, která se zaměřuje na ovlivnění nemocí jak v počátečních, tak i pokročilých stádiích, ačkoliv zatím

nepřináší jednoznačné výsledky pro obnovu plné funkce orgánů. Přesto vykazuje značný terapeutický potenciál, zejména při léčbě degenerativních onemocnění, jako jsou diabetes mellitus, kardiovaskulární choroby, poruchy endometria či degenerace chrupavek a meziobratlových plotének. Významný pokrok byl zaznamenán také v oblasti protinádorových vakcín využívajících embryonální kmenové buňky, které dokáží stimulovat imunitní systém k rozpoznání a likvidaci nádorových buněk, především u rakoviny tlustého střeva. Jejich kombinace s vícevrstevnými uhlíkovými nanotrubicemi dokonce zvyšuje účinnost této odpovědi a vede k inhibici růstu nádorů u experimentálních modelů. Protinádorová léčiva však často čelí problémům jako je nízká rozpustnost, rychlý metabolismus či špatná stabilita, což omezuje jejich účinnost a zvyšuje toxicitu. Proto se intenzivně vyvíjejí nové přístupy, včetně využití alternativních léčiv a přírodních látek s podporou nanotechnologií. Nanoalternativní terapie umožňují cílené doručování léčiv do nádoru, minimalizují poškození zdravých buněk a zvyšují terapeutický efekt. Klíčovým trendem je vývoj inteligentních multifunkčních systémů, které kombinují pasivní cílení, aktivní cílení a efekt citlivosti na podněty. Pasivní cílení využívá tzv. EPR efekt, což znamená efekt zvýšené propustnosti a zadržování, aktivní cílení probíhá pomocí ligandů navázaných na receptory nádorových buněk a efekt citlivosti na podněty, který reaguje na změny v nádorovém mikroprostředí jako pH, teplota či enzymy. Tyto systémy umožňují řízené uvolňování léčiva přesně tam, kde je potřeba, čímž zvyšují účinnost terapie, zlepšují průnik léčiva do nádorových buněk a zároveň minimalizují vedlejší účinky [49], [50], [51].

Závěr

Tato bakalářská práce se komplexně zabývala elektromagnetickým zářením se zvláštním zaměřením na gama záření, jeho fyzikální vlastnosti, mechanismy vzniku a široké spektrum aplikací v praxi. Hlavním cílem bylo analyzovat charakteristiku gama záření, jeho využití v různých odvětvích, zejména v léčbě onkologických onemocnění, a zhodnotit přínosy a rizika spojená s jeho používáním. Práce rovněž zkoumala prevenci a ochranu před nadměrnou expozicí radiace, která může přispět k rozvoji nádorových onemocnění.

Analýzou elektromagnetického spektra bylo potvrzeno, že gama záření, díky své vysoké energii a krátké vlnové délce, představuje klíčový nástroj v různých odvětvích. V potravinářství nachází uplatnění při sterilizaci a konzervaci, zatímco v medicíně je nepostradatelné při diagnostice a léčbě. Zvláštní pozornost byla věnována gama noži, neinvazivní metodě umožňující přesné zacílení nádorů bez poškození okolních zdravých tkání. Práce popsala princip fungování gama nože, jeho historický vývoj, radioaktivní zdroje a moderní modely, které zvyšují efektivitu a bezpečnost léčby. Výsledky analýzy podtrhují význam této technologie pro zlepšení kvality života pacientů s onkologickými onemocněními.

Práce rovněž upozornila na rizika spojená s expozicí gama záření, včetně potenciálního vlivu na vznik nádorového bujení. Z tohoto důvodu byla zdůrazněna důležitost důsledných bezpečnostních opatření pro pacienty i zdravotnický personál.

Závěrem lze konstatovat, že gama záření představuje významný nástroj moderní vědy a medicíny. S pokračujícím vývojem technologií a prohlubováním poznatků o jeho mechanismu působení lze očekávat další zlepšení bezpečnosti a účinnosti jeho aplikací. Tato práce tak může sloužit jako základ pro další zkoumání potenciálu gama záření a přispět k rozvoji medicínských a potravinářských technologií.

Seznam použité literatury

- [1] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, Refrigerating a Inc. (ASHRAE) AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *2021 ASHRAE® Handbook - Fundamentals (I-P Edition)* [online]. B.m.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 2021. ISBN 978-1-947192-89-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEZ2/ashrae-handbook-fundamentals/ashrae-handbook-fundamentals>
- [2] SCHASCHKE, Carl. *Dictionary of Chemical Engineering* [online]. B.m.: Oxford University Press, 2014. ISBN 978-0-19-965145-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDCE00021/dictionary-chemical-engineering/dictionary-chemical-engineering>
- [3] STIMSON, Dave, George W., Griffiths, Hugh D., Baker, Chris J., Adamy. *Stimson's Introduction to Airborne Radar (3rd Edition)* [online]. B.m.: Institution of Engineering and Technology (The IET), 2014. ISBN 978-1-61353-022-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSIARE004/stimson-s-introduction/stimson-s-introduction>
- [4] CLEVELAND, Christopher, Cutler J., Morris. *Dictionary of Energy (Expanded Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-08-096491-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDEEE0001/dictionary-energy-expanded/dictionary-energy-expanded>
- [5] Světlo: Elektromagnetické vlnění, spektrum a fotony (článek). *Khan Academy* [online]. [vid. 2025-06-06]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecna-chemie/xefd2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xefd2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- [6] ZOU ET AL., Caineng. *Unconventional Petroleum Geology (2nd Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-812234-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpUPGE0002/unconventional-petroleum/unconventional-petroleum>
- [7] WESTCOTT, Jean Riescher, Sean, Westcott. *Basic Electronics - Theory and Practice (4th Edition)* [online]. B.m.: Mercury Learning and Information, 2023. ISBN 978-1-68392-958-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBETP0001/basic-electronics-theory/basic-electronics-theory>
- [8] LOZHEN, Constantin, Steli, Bolintineanu. *Electrical Product Compliance and Safety Engineering, Volume 2* [online]. B.m.: Artech House, 2021. ISBN 978-1-63081-838-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEPCSEV03/electrical-product-compliance/electrical-product-compliance>
- [9] KITAGAWA, Susumu. *Flexible Metal-Organic Frameworks - Structural Design, Synthesis and Properties* [online]. B.m.: Royal Society of Chemistry (RSC), 2024. ISBN 978-1-83916-452-1. Dostupné

- z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFMOFSDS1/flexible-metal-organic/flexible-metal-organic>
- [10] MCKEEN, Laurence. *Effect of Sterilization Methods on Plastics and Elastomers (4th Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2018. ISBN 978-0-12-814511-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpESMPEE01/effect-sterilization/effect-sterilization>
- [11] Intermitentní katetrizace a použití moderních katetrů. *Lepší péče* [online]. [vid. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://www.lepsipecze.cz/urologie-cevkovani/intermitentni-katetrizace-pouziti-modernich-katetru>
- [12] KUTZ, Myer. *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering (3rd Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2019. ISBN 978-0-12-814803-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHFDFME01/handbook-farm-dairy-food/handbook-farm-dairy-food>
- [13] BOLJANOVIC, Vukota. *Applied Mathematical and Physical Formulas (2nd Edition)* [online]. B.m.: Industrial Press, 2016. ISBN 978-0-83 11-3592-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAMPFE001/applied-mathematical/applied-mathematical>
- [14] CHRISTIE, Robert M. *Colour Chemistry (2nd Edition)* [online]. B.m.: Royal Society of Chemistry (RSC), 2015. ISBN 978-1-84973-328-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCCE00009/colour-chemistry-2nd/colour-chemistry-2nd>
- [15] SERVICE, International Food Information. *Dictionary of Food Science and Technology (2nd Edition)* [online]. B.m.: International Food Information Service (IFIS Publishing), 2009. ISBN 978-1-4051-8740-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDFSTE001/dictionary-food-science/dictionary-food-science>
- [16] SINGH, Ramesh. *Applied Welding Engineering - Processes, Codes, and Standards (3rd Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2020. ISBN 978-0-12-821348-3. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAWEPCSE3/applied-welding-engineering/applied-welding-engineering>
- [17] KURTZ, Steven M. *UHMWPE Biomaterials Handbook - Ultra-High Molecular Weight Polyethylene in Total Joint Replacement and Medical Devices (3rd Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-323-35401-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpUHMWPE0S/uhmwpe-biomaterials-handbook/uhmwpe-biomaterials-handbook>
- [18] N/A. *Engineering Design Handbook - Environmental Series, Part Four - Life Cycle Environments: (AMCP 706-118)* [online]. B.m.: U.S. Army Materiel Command, nedatováno. ISBN N/A. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEDHESPF5/engineering-design-handbook-26/engineering-design-handbook-26>

- [19] SCHUBERT, Gerald. *Treatise on Geophysics, 11 Volume Set (2nd Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2015. ISBN 978-0-444-53802-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTGVSE002/treatise-geophysics-11/treatise-geophysics-11>
- [20] GS-512i Přenosný Gama Spektrometr. *SatisGeo* [online]. [vid. 2025-06-06]. Dostupné z: <https://satisgeo.com/cs/spectrometers/gs-512i-portable-gamma-ray-spectrometer/>
- [21] GRACE, Arghya, Andrews Nirmala, Sonar, Prashant, Bhardwaj, Preetam, Chakravorty. *Handbook of Porous Carbon Materials* [online]. B.m.: Springer Nature, 2023. ISBN 978-981-19-7187-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHPCM000K/handbook-porous-carbon/handbook-porous-carbon>
- [22] RASHID, Saqib, Mamoon, Goyal, Vishal, Bashir, Ali Kashif, Hakak. *Medical Imaging Informatics - Machine Learning, Deep Learning and Big Data Analytics* [online]. B.m.: Institution of Engineering and Technology (The IET), 2024. ISBN 978-1-83953-743-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMIIMLDL1/medical-imaging-informatics/medical-imaging-informatics>
- [23] MURRAY, Keith E., Raymond L., Holbert. *Nuclear Energy - An Introduction to the Concepts, Systems, and Applications of Nuclear Processes (7th Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2015. ISBN 978-0-12-416654-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpNEAICS07/nuclear-energy-an-introduction/nuclear-energy-an-introduction>
- [24] *Symbia Evo* [online]. [vid. 2025-06-06]. Dostupné z: <https://www.siemens-healthineers.com/cz/molecular-imaging/spect-and-spect-ct/symbia-evo>
- [25] PET scan. *nhs.uk* [online]. 24. říjen 2017 [vid. 2025-06-06]. Dostupné z: <https://www.nhs.uk/tests-and-treatments/pet-scan/>
- [26] WYPYCH, George. *Handbook of Plasticizers (4th Edition)* [online]. B.m.: ChemTec Publishing, 2023. ISBN 978-1-77467-022-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHPE00051/handbook-plasticizers/handbook-plasticizers>
- [27] KNIEF, Ronald Allen. *Nuclear Engineering - Theory and Technology of Commercial Nuclear Power (2nd Edition)* [online]. B.m.: American Nuclear Society (ANS), 2014. ISBN 978-0-89448-458-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpNETTCNP1/nuclear-engineering-theory/nuclear-engineering-theory>
- [28] *OSEL.CZ* [online]. [vid. 2025-04-08]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/13034-nova-rozsahla-studie-rizika-nizkych-davek-radiace.html>
- [29] *Pozor! Radioaktivní záření ISO 7010 | KRIŽAN - safetyshop* [online]. [vid. 2025-06-06]. Dostupné z: <https://www.safetyshop.cz/produkt/tabulka-pozor-radioaktivni-zareni/>

- [30] Účinky záření na lidský organismus. *Produkty* [online]. [vid. 2025-04-07]. Dostupné z: <https://csu.gov.cz/produkty/ucinky-zareni-na-lidsky-organismus>
- [31] HARBISON, Giffe T., Raymond D., Bourgeois, Marie M., Johnson. *Hamilton & Hardy's Industrial Toxicology (6th Edition)* [online]. B.m.: John Wiley & Sons, 2015. ISBN 978-0-470-92973-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHHITE002/hamilton-hardys-industrial/hamilton-hardys-industrial>
- [32] MCALEENAN, David A. O., Ciaran, Oloke. *ICE Manual of Health and Safety in Construction (2nd Edition)* [online]. B.m.: ICE Publishing, 2015. ISBN 978-0-7277-6010-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpICEMHS01/ice-manual-health-safety/ice-manual-health-safety>
- [33] SAARELA, Maria. *Functional Foods - Concept to Product (2nd Edition)* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978-1-84569-690-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFFCPE001/functional-foods-concept/functional-foods-concept>
- [34] N/A. *Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Medical Procedures: (Report No. 168)* [online]. B.m.: National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), 2011. ISBN 978-0-9823843-6-7. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRDMFGIM5/radiation-dose-management/radiation-dose-management>
- [35] *Lightweight Lead Vest / Skirt Guardian Lead Apron* [online]. [vid. 2025-06-06]. Dostupné z: <https://www.rehabmart.com/product/lightweight-lead-vest-skirt-guardian-lead-apron-52043.html>
- [36] *Digitální dozimetr/Detektor Beta, Gama a Rentgenového záření RM-9000 - Špionážní a detektivní technika* [online]. [vid. 2025-06-06]. Dostupné z: <https://www.agentshop.cz/ostatni/digitalni-dozimetr-detektor-beta--gama-a-rentgenoveho-zareni-rm-9000/>
- [37] LEONDES, Cornelius T. *Medical Imaging Systems Technology - Modalities* [online]. B.m.: World Scientific, 2005. ISBN 978-981-256-992-9. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMISTM001/medical-imaging-systems-5/medical-imaging-systems-5>
- [38] LINDQUIST, Christer. Gamma knife radiosurgery. *Seminars in Radiation Oncology* [online]. 1995, 5(3), Stereotactic Radiosurgery, 197–202. ISSN 1053-4296. Dostupné z: [doi:10.1016/S1053-4296\(05\)80017-7](https://doi.org/10.1016/S1053-4296(05)80017-7)
- [39] N/A. *Second Primary Cancers and Cardiovascular Disease After Radiation Therapy: (NCRP Report No. 170)* [online]. B.m.: National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), 2011. ISBN 978-0-9823843-9-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSPCCDAR2/second-primary-cancers/second-primary-cancers>

- [40] Lars Leksell. *Oncopedia* [online]. [vid. 2025-06-09]. Dostupné z: <https://www.oncopedia.wiki/key-players/lars-leksell>
- [41] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006 [vid. 2025-06-09]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/1663-gama-nuz>
- [42] *David Zoul: Radiace, která léčí – část třetí* [online]. [vid. 2025-06-09]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2021_26_rad.php
- [43] GANZ, Jeremy C. Changing the gamma knife. In: *Progress in Brain Research* [online]. B.m.: Elsevier, 2014 [vid. 2025-05-20], s. 117–125. ISBN 978-0-444-63520-4. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63520-4.00013-2
- [44] *A company grows up | Our Story | Cancer Care | Elekta* [online]. [vid. 2025-06-09]. Dostupné z: <https://www.elekta.com/company/about-us/story/a-company-grows-up/>
- [45] PARK, Kinam. *Biomaterials for Cancer Therapeutics - Evolution and Innovation (2nd Edition)* [online]. B.m.: Elsevier, 2020. ISBN 978-0-08-102983-1. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBCTEIE02/biomaterials-cancer-therapeutics/biomaterials-cancer-therapeutics>
- [46] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, Refrigerating a Inc. AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *2022 ASHRAE® Handbook - Refrigeration (I-P Edition)* [online]. B.m.: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE), 2022. ISBN 978-1-955516-07-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpR1DU3HS3/ashrae-handbook-refrigeration/ashrae-handbook-refrigeration>
- [47] *Kryochirurgie - kdy se dá použít? | Rehabilitace.info* [online]. [vid. 2025-06-09]. Dostupné z: <https://www.rehabilitace.info/zdravotni/kryochirurgie-kdy-se-da-pouzit/>
- [48] KHARE, R.P. *Fiber Optics and Optoelectronics* [online]. B.m.: Oxford University Press, 2004. ISBN 978-0-19-566930-5. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFOO0000R/fiber-optics-optoelectronics/fiber-optics-optoelectronics>
- [49] GOPI, Matej, Sreerag, Balakrishnan, Preetha, Bračić. *Biopolymers in Nutraceuticals and Functional Foods* [online]. B.m.: Royal Society of Chemistry (RSC), 2023. ISBN 978-1-83916-781-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBNFF0001/biopolymers-in-nutraceuticals/biopolymers-in-nutraceuticals>
- [50] NOH, Sandra van, Insup, Wang, Xiumei, Vlierberghe. *Injectable Hydrogels for 3D Bioprinting* [online]. B.m.: Royal Society of Chemistry (RSC), 2021. ISBN 978-1-78801-883-8. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIHDB0009/injectable-hydrogels/injectable-hydrogels>
- [51] CHANG, Thomas Ming Swi. *Selected Topics in Nanomedicine* [online]. B.m.: World Scientific, 2014. ISBN 978-981-4472-85-2. Dostupné

z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSTN00001/selected-topics-in-nanomedicine/selected-topics-in-nanomedicine>