

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

Bakalářská práce

Radiační bezpečnost v Mössbauerově spektroskopii

Autor	Zuzana Vanická
Vedoucí práce	Mgr. Vít Procházka, Ph.D.
Studijní obor	Nanotechnologie
Forma studia	Prezenční
Rok	2017

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

Jméno a příjmení autora	Zuzana Vanická
Název práce	Radiační bezpečnost v Mössbauerově spektroskopii
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce	Mgr. Vít Procházka, Ph.D.
Rok obhajoby práce	2017
Počet stran	38
Jazyk	Český
Abstrakt	<p>Mössbauerova spektroskopie patří mezi experimentální techniky používané ke studiu vlastností pevných látek. Poskytuje cenné informace o strukturním nábojovém a magnetickém uspořádání. Jako zdroj záření se pro Mössbauerovu spektroskopii používá radioaktivní materiál. Ionizující záření, které z něho vychází, má negativní vliv na živý organismus. Tato práce se věnuje radiační bezpečnosti v Mössbauerově spektroskopii. V rámci této práce byly z hlediska radiační bezpečnosti zhodnoceny pracovní postupy používané v laboratoři Mössbauerovy spektroskopie a následně byly navrženy opatření pro snížení radiační zátěže.</p>
Klíčová slova	Radiační bezpečnost, Mössbauerova spektroskopie, radiační pole, dávka

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author's first name and surname	Zuzana Vanická
Title	Radiation safety in Mössbauer spectroscopy
Type of thesis	Master
Department	Department of Experimental Physics
Supervisor	Mgr. Vít Procházka, Ph.D.
Year of presentation	2017
Number of pages	38
Language	Czech
Abstrakt	<p>Mössbauer spectroscopy belongs to experimental techniques which are used to determined hyperfine field in solid state. This techniqe offers important information on the structural charge and magnetic ordering in condense matter. A radioactive material is used as a source of radiation needed for Mössbauer experiments. Emiited ionizing radiation has a negative effect on human health. This thesis deals with radiation safety in Mössbauer spectroscopy. The work operation are review and its improvements are suggested in order to decrease the radiation dose.</p>
Keywords	Radiation safety, Mössbauer spectroscopy, radiation field, dose

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Víta Procházky, Ph.D., a že jsem použila zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

Podpis

Obsah

Úvod	6
1 Fyzikální základy radiační ochrany	7
1.1 Zdroje ionizujícího záření	7
1.2 Biologické účinky záření a jejich zdravotní projevy	8
1.3 Veličiny a jednotky	9
2 Radiační bezpečnost	15
2.1 Principy radiační bezpečnosti	15
2.2 Ochrana před ozářením	17
2.3 Legislativa	19
2.4 Monitorování	20
3 Radiační bezpečnost v Mössbauerově spektroskopii	22
3.1 Používané zdroje	22
3.2 Měření radiačního pole Mössbauerova spektrometru	26
4 Radiační dávky při manipulaci se zářičem	32
4.1 Výměna zářiče	32
4.2 Příprava radioaktivního vzorku	33
5 Hodnocení bezpečnostních opatření	35
Závěr	36
Seznam použitých zdrojů (literatura)	37
Seznam použitých symbolů a zkratk	38

Úvod

Mössbauerova spektroskopie patří mezi takzvané hyperjemné techniky, tedy experimentální metody umožňující měření hyperjemných polí. Tato technika poskytuje cenné informace o strukturním, nábojovém a magnetickém uspořádání pevných látek. Své využití našla v chemickém, biologickém i v materiálovém výzkumu. Nicméně jako zdroj záření, nezbytného pro měření, je využíváno radioaktivních materiálů emitujících ionizující záření. Působení ionizujícího záření poškozuje organickou tkáň a může způsobit nemoc z ozáření, rakovinu, genetické mutace nebo dokonce i smrt. Proto je potřeba se před ionizujícím zářením chránit a i při experimentech Mössbauerovi spektroskopie je nutné dbát na dodržování pravidel pro práci s ionizujícím zářením a zajistit radiační bezpečnost v laboratoři.

Tato práce hodnotí opatření pro zajištění radiační bezpečnosti v Laboratoři jaderných analytických metod na přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci. V rámci práce byla proměřena radiační pole kolem používaných Mössbauerovských spektrometrů. Byli odhadnuty efektivní dávky radiačních pracovníků při práci se spektrometrem. Dále pak byly odhadnuty radiační dávky, které obdrží obsluha spektrometru při charakteristických činnostech spojených s prováděním Mössbauerovských experimentů. Jednotlivé postupy jsou hodnoceny s ohledem na radiační bezpečnost. Používané postupy odpovídají požadavkům na radiační bezpečnost. V jednom případě je navrženo využití manipulační pomůcky pro manipulaci se zářičem pro snížení efektivní dávky.

První kapitola je věnována fyzikálním základům radiační ochrany, zde jsou popsány zdroje ionizujícího záření, biologické účinky ionizujícího záření a veličiny užívané v radiační ochraně.

Druhá kapitola se zabývá radiační bezpečností, principy radiační ochrany před ionizujícím zářením. V této kapitole jsou popsány základní způsoby ochrany.

Ve třetí kapitole je popsána laboratoř Mössbauerovy spektroskopie a radionuklidy, které se používají. Dále se kapitola zabývá radiačním polem MS a výsledky z měření radiačních polí v okolí dvou spektrometrů.

Ve čtvrté kapitole jsou odhadnuty efektivní dávky při manipulaci se zářiči.

Pátá kapitola je věnována hodnocení bezpečnostního opatření.

1 Fyzikální základy radiační ochrany

1.1 Zdroje ionizujícího záření

Jako ionizující záření jsou souhrnně označovány všechny druhy záření, které při průchodu látkou způsobují ionizaci atomů. Rozlišují se dva základní typy ionizujícího záření. Záření přímo ionizující, to je tvořeno elektricky nabitými částicemi (alfa, beta), které podél celé své dráhy ionizují přímo atomy látky a záření nepřímo ionizující. Zde se jedná o elektromagnetické záření (rentgenové, gama záření) a o neutrony, které ionizují látku nepřímo prostřednictvím sekundárních elektricky nabitých částic, [1],[2].

Záření alfa je tvořeno jádery helia uvolňovanými z atomových jader při jaderných přeměnách. Energetické spektrum je čárové, tedy zdroj vysílá jen určité energie záření. Záření beta je tvořeno elektrony vznikajícími při jaderných přeměnách. Je vyzařováno z atomových jader. Jeho energetické spektrum je spojité, tedy zdroj vysílá všechny energie záření. Rentgenové záření je elektromagnetické záření o krátkých až velmi krátkých vlnových délkách, které vzniká v elektronovém obalu atomů. A to buď přeskokem elektronů v elektronovém obalu, takzvané charakteristické rentgenové záření, nebo brzděním jiných nabitých částic, takzvané brzdné rentgenové záření. Charakteristické rentgenové záření má čárové energetické spektrum. Brzdné záření má spektrum spojité. Záření gama je rovněž elektromagnetické záření o krátkých až velmi krátkých vlnových délkách. Gama záření vzniká při jaderných přechodech, kdy jádra přechází do energeticky nižšího stavu za současné emise gama fotonu. Toto záření má čárové energetické spektrum, [1],[2].

Jako zdroje ionizujícího záření mohou sloužit různá zařízení, například rentgenka, urychlovače částic, jaderné reaktory a další. Zdroji ionizujícího záření jsou také radioaktivní materiály, které emitují ionizující záření při rozpadech jader.

Mössbauerova spektroskopie je jaderná analytická experimentální metoda, která využívá interakce jader s okolím ke zjišťování lokálního magnetického a nábojového uspořádání látky. Její princip je založen na rezonanční absorpci elektromagnetického záření. Jako zdroje tohoto záření se používají velké urychlovače částic, takzvané synchrotrony a radionuklidy vybraných jader. Tato práce je věnována radiační bezpečnosti na pracovištích, které využívají jako zdroj záření pro Mössbauerovu spektroskopii právě radionuklidy.

Jako nuklidy jsou označována jádra, která mají stejný počet protonů i neutronů. Jsou rozdělovány do dvou skupin, stabilní, s nekonečnou dobou života a nestabilní, podléhající samovolné radioaktivní přeměně, tedy vnějšími podmínkami neovlivnitelné změně jádra provázané emisí jedné nebo dokonce více částic. Nestabilní izotopy jsou označovány jako radionuklidy. Jejich počet je vyšší než stabilních

nuklidů. Díky radioaktivní přeměně jádro dosáhne energeticky výhodnějšího stavu. Základní charakteristikou každého radionuklidu je poločas rozpadu T , je to doba, za kterou se počet atomů daného radionuklidu zmenší na polovinu. Pro daný radionuklid je to konstanta a nelze ji nijak ovlivnit, [1].

Radioaktivní přeměna α je taková přeměna nuklidů, při které jádra vysílají částice α . Objevuje se u jader těžších než olovo. Rozpad β je nejrozšířenější typ radioaktivní přeměny. Rozlišují se tři typy rozpadů, rozpad β , rozpad β^- , rozpad β^+ a elektronový záchyt. Po radioaktivní přeměně bývá jádro zpravidla ve vzbuzeném (excitovaném stavu). Přejdem do základního stavu neboli deexcitací se vyzařuje energie ve formě γ záření, [1].

1.2 Biologické účinky záření a jejich zdravotní projevy

Skutečnost, že ionizující záření má negativní vliv na živý organismus je všeobecně známá. V následující kapitole bude stručně zmíněn mechanismus tohoto působení a také účinky jaké má ionizující záření na živý organismus.

Excitací atomů dochází ke změně elektronové struktury atomu, a tedy může dojít i ke změně vazeb daného atomu. Tímto mechanismem dochází k modifikaci biomolekul, které následně v organismu neplní správně svou funkci.

Účinky ionizujícího záření na buňku jsou dvojího druhu. Jedná se o smrt buňky, nebo změnu v genetické informaci. Ke smrti buňky dochází při ozáření buňky vyšší dávkou. Může být přímo usmrcena ve svém klidovém období, tedy mezi dvěma buněčnými děleními nebo se poškození neprojeví okamžitě, buňka přežije, ale ztratí schopnost dále se dělit, takzvaná mitotická smrt. Následně v ozářené tkáni dochází po určité době k poklesu počtu buněk. Mitotická smrt nastává při nižších dávkách. Smrtící účinky na buňku se nejvíce projevují v tkáních, v nichž probíhá rychlé buněčné dělení, například vyvíjející se zárodek, [2].

Z hlediska vztahu dávky a účinku rozlišujeme dva typy účinků, deterministické a stochastické.

Deterministické účinky jsou takové účinky, ke kterým dochází v důsledku smrti velkého množství ozářených buněk. Jejich závažnost roste s rostoucí dávkou a jsou to účinky prahové. To znamená, že se objeví až po překročení určité hraniční (prahové) hodnoty dávky. Ta je pro každý orgán jiná. Po překročení prahové dávky vzrůstá míra poškození. K účinku dojde tam, kde byla tkáň ozáření vystavena. Je rozdílné, zda je ozáření provedeno jednorázově, tedy v krátkém časovém intervalu nebo

během delšího časového období, tedy protahovaně. U protahovaných dávek je organismus odolnější. Jednotlivé tkáně a orgány jsou různě citlivé, mají různou radiosenzitivitu. U deterministických účinků platí, že zvláště vysokou radiosenzitivitu vykazují tkáně, v nichž probíhá rychlé buněčné dělení. K vyjádření deterministických účinků se užívá veličina ekvivalentní dávka. Mezi deterministické účinky patří akutní nemoc z ozáření, radiační poškození kůže, radiační poškození oční čočky, postižení fertility, [2], [3].

Stochastické účinky jsou účinky vyvolané mutacemi, tedy změnami v genetické informaci buňky. S velikostí dávky se nemění závažnost účinku u jednotlivce, ale zvyšuje se pravděpodobnost, že se účinek u daného jednotlivce projeví. Rozlišují se dva druhy, somatické účinky, které jsou vyvolány somatickými mutacemi, například různé formy rakoviny a genetické účinky, tedy poškození zárodečných buněk. Ty se projeví až u další generace. Stochastické účinky jsou účinky bezprahové, které se mohou projevit i při velmi nízkých dávkách. S rostoucí efektivní dávkou roste riziko výskytu. Nezáleží na tom, zdali byl organismus ozářen v krátkém nebo delším okamžiku. Ke vzniku nádoru nemusí dojít v ozářeném místě, proto se u efektivní dávky provádí sčítání ekvivalentních dávek v celém organismu s ohledem na pravděpodobnost vzniku nádoru v daném orgánu. U nádorů nelze rozeznat, čím byly způsobeny. Velikost poškození nezávisí na velikosti dávky. Stochastický účinek nevznikne bezprostředně po ozáření, ale může se projevit kdykoliv po ozáření. Pravděpodobnost vzniku stochastických účinků roste lineárně s dávkou. Mezi stochastické účinky patří například zhoubné nádory a genetická poškození a poškození plodu v těle matky, [2], [3].

Další dělení účinků ionizujícího záření je podle doby od ozáření, za kterou se daný účinek projeví. Časné účinky se projeví klinicky v krátkém čase po ozáření. Pozdní účinky se klinicky projeví za dlouhou dobu po ozáření. Projeví-li se účinky u ozářené osoby, jsou označovány jako somatické na rozdíl od genetických účinků, které se projeví až v dalších generacích, [2].

1.3 Veličiny a jednotky

Aby bylo možné nějakým objektivním způsobem sledovat a posuzovat účinky ionizujícího záření na organismy je potřeba zavést fyzikální veličiny popisující jak intenzitu ionizujícího záření, tak veličiny vyjadřující biologickou citlivost organismů.

Veličiny a jednotky užívané v radiační ochraně můžeme rozdělit do čtyř skupin. Veličiny charakterizující radionuklidové zdroje ionizujícího záření, pole ionizujícího záření, účinky ionizujícího záření na látku, biologické účinky ionizujícího záření, [2].

Základní veličinou charakterizující radionuklidové zdroje ionizujícího záření je aktivita A . Jedná se o střední počet samovolných jaderných přeměn v určitém množství radioaktivní látky dN , k nimž dojde za časový interval dt . Aktivita radioaktivní látky je tedy počet radioaktivních přeměn v daném množství za sekundu, tedy

$$A = dN/dt \quad (1)$$

Jednotka aktivity je becquerel (Bq). Někdy je používána starší jednotka Curie (Ci), kdy přepočet je dán vztahem

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq.} \quad (2)$$

Dále definujeme měrnou aktivitu a_m , což je aktivita na jednotku hmotnosti. Jednotka měrné aktivity je Bq/kg, tedy

$$a_m = A/m. \quad (3)$$

Plošná aktivita a_s je aktivita A na jednotku plochy S , tedy

$$a_s = A/S. \quad (4)$$

Jednotka plošné aktivity je Bq/m².

Objemová aktivita a_v je aktivita A na jednotku objemu V , tedy

$$a_v = A/V. \quad (5)$$

Její jednotka je Bq/m³.

Veličinou charakterizující pole ionizujícího záření je tok částic Φ_p . Jedná se o přírůstek počtu částic dN za jednotku času dt , tedy

$$\Phi_p = dN/dt. \quad (6)$$

Jednotka toku částic je s⁻¹.

Další veličinou je fluence částic Φ (hustota prošlých částic). Jedná se o počet částic dN , které vstoupily do koule s plošným obsahem da hlavního řezu, tedy

$$\Phi = dN/da \quad (7)$$

Jednotkou je m⁻².

Příkon fluence částic φ (hustota toku částic) je přírůstek fluence částic Φ za časový interval dt . Jednotka příkonu fluence částic je m⁻²/s.

Základní veličinou charakterizující účinky ionizujícího záření na látku je dávka D . Je to energie předaná ionizujícím zářením elementu látky $d\varepsilon$ o hmotnosti dm . Dávka je tedy definovaná vztahem

$$D = d\varepsilon/dm \quad (8)$$

Veličina slouží k posouzení účinků záření s ohledem na rizika vzniku deterministických poškození organismu. Jednotka dávky je gray (Gy).

Dávkový příkon je přírůstek dávky za jednotku času. Jeho jednotkou je Gy/s.

Pro nepřímo ionizující částice je užitečné zavést další konstantu. Tou je kerma K . Jedná se o součet počátečních kinetických energií všech elektricky nabitých částic uvolněných nepřímo ionizujícím zářením dE_k v uvažovaném objemu látky o hmotnosti dm , tedy

$$K = dE_k/dm. \quad (9)$$

Jednotkou je Gy.

Kermový příkon je přírůstek kermy za jednotku času. Jednotkou je Gy/s.

Ke starším jednotkám patří například expozice X , což je absolutní hodnota celkového elektrického náboje iontů jednoho znaménka $|dQ|$, vzniklých ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny elektromagnetickým zářením v objemovém elementu vzduchu o hmotnosti dm , tedy

$$X = |dQ|/dm. \quad (10)$$

Jednotkou expozice je coulomb na kilogram (C/kg).

Expoziční příkon je přírůstek expozice za jednotku času, jednotkou je A/kg.

Pro výpočet nebo odhad dávky je užitečný vztah mezi dávkou a aktivitou příslušného radioizotopu. Dávku D ve vzdálenosti r od radionuklidového zdroje, kde A je aktivita, Γ je dávková konstanta a t je doba ozařování, vypočítáme pomocí vzorce

$$D = \Gamma \frac{A}{r^2} t \quad (11)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že dávka klesá s druhou mocninou vzdálenosti.

Stejná dávka různých druhů záření má různý dopad na biologické organismy. Tuto skutečnost je nutno při úvahách o radiační bezpečnosti zohledňovat a proto se vztahem

$$H = D \cdot Q \quad (12)$$

zavádí veličina nazývaná dávkový ekvivalent H , kde D je dávka v uvažovaném bodě tkáně a Q je jakostní činitel, který právě vyjadřuje rozdílnou biologickou účinnost různých druhů záření. Jednotkou je sievert (Sv).

Je to měřitelná veličina a hodnoty jakostního činitele jsou funkcí lineárního přenosu energie. K měření této veličiny se používají dozimetry.

Bezprahové stochastické účinky ionizujícího záření na organismy lépe než dávka D popisuje jiná veličina a to je ekvivalentní dávka H_T . Ta je definována jako střední dávka v orgánu nebo tkáni způsobená daným druhem záření D_T násobená radiačním váhovým faktorem pro daný druh záření w_R .

Tedy

$$H_T = w_R \cdot D_T \quad (13)$$

Jednotkou je Sv. Radiační váhový faktor je konstanta, která vyjadřuje relativní biologickou účinnost daného druhu ionizujícího záření vzhledem k elektromagnetickému záření. Hodnoty pro jednotlivé druhy záření jsou uvedeny v tabulce 1, [2].

Druh (energie) záření	w_R
Fotony	1
Elektrony, miony	1
Neutrony, méně než 10 keV	5
Neutrony, 100 keV až 2 MeV	20
Neutrony, 2 MeV až 20 MeV	10
Neutrony, víc než 20 MeV	5
Protony, víc než 2 MeV	5
Částice alfa, těžká jádra, štěpné fragmenty	20

Tabulka 1: Hodnoty radiačního váhového faktoru pro jednotlivé druhy záření. Upraveno z [2].

Veličinou, která zohledňuje různou biologickou senzitivitu orgánů je efektivní dávka E . Je to součet ekvivalentních dávek v jednotlivých orgánech nebo tkáních H_T , vynásobených příslušnými tkáňovými váhovými faktory w_T ,

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (14)$$

Jedná se o koeficienty zohledňujícími různou citlivost orgánů a jsou uvedeny v tabulce 2. Součet všech tkáňových faktorů je jedna. Jednotkou efektivní dávky je Sv. Tato veličina vyjadřuje průměrnou dávku na člověka s ohledem na to, který orgán byl zasažen více a který méně. Taková průměrná hodnota je zavedena proto, aby bylo možné objektivně srovnávat menší podprahové dávky a hodnotit rizika vzniku stochastických účinků při ozáření, [2].

Tkáň nebo orgán	w_T
Gonády	0,2
Červená kostní dřeň	0,12
Tlusté střevo	0,12
Plíce	0,12
Žaludek	0,12
Močový měchýř	0,05
Mléčná žláza	0,05
Játra	0,05
Štítná žláza	0,05
Kůže	0,01
Povrch kostí	0,01
Ostatní orgány a tkáň	0,05

Tabulka 2: Hodnoty tkáňových váhových faktorů. Upraveno z [2].

Pro vyjádření rizik vzniku stochastických účinků se využívá efektivní dávka, zatímco pro posouzení deterministických účinků je používána dávka. Tam, kde chceme posoudit stochastické účinky, je nutné odhadnout efektivní dávku například ze znalosti použité aktivity nebo na základě měření dávkového ekvivalentu pomocí dozimetrů.

2 Radiační bezpečnost

Ionizující záření našlo během desetiletí od jeho objevení celou řadu využití v průmyslu, medicíně, fyzice, chemii, biologii a dalších odvětvích. Kvůli škodlivým účinkům je nutné zavádět při použití ionizujícího záření řadu opatření a omezení, aby nedošlo k nebezpečnému ozáření pracovníků nebo celé populace.

2.1 Principy radiační bezpečnosti

Cílem radiační bezpečnosti a ochrany je vyloučení deterministických účinků a zamezení vzniku stochastických účinků na společensky přijatelnou míru. Vyloučení deterministických účinků znamená, že tyto účinky vůbec nenastanou. Snížení pravděpodobnosti vzniku stochastických účinků na společensky přijatelnou míru znamená, že bude optimalizována ochrana před ionizujícím zářením tak, že za normálních podmínek nesmí být překročeny základní limity, [2].

Principy radiační ochrany před ionizujícím zářením jsou obecnými podmínkami pro vykonávání činností vedoucích k ozáření, činností souvisejících s využíváním jaderné energie a zásahů ke snížení ozáření. V současné době jsou uváděny čtyři základní principy, [2].

- Princip zdůvodnění
- Princip optimalizace
- Princip limitování
- Princip fyzické bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření

- Princip zdůvodnění

Každý, kdo provádí činnost vedoucí k ozáření, musí dbát na to, aby činnost byla řádně odůvodněna přínosem, který vyváží rizika, která při těchto činnostech vznikají nebo mohou vznikat, [2].

Mělo by se užívat následující analýzy ztrát a přínosů pro zásadní rozhodování při uvádění do praxe činností způsobujících expozici ionizujícím zářením. Při analýze ztrát a přínosů se může čistý přínos ze zaváděné činnosti způsobující ozáření uvažovat jako

$$B = V - (P + X + Y), \quad (15)$$

kde B je čistý přínos vyplývající z činnosti, V je hrubá hodnota výsledku činnosti zahrnující hodnotu výrobku a postižitelné společenské a jiné přínosy, P představuje položku výdajů na výrobu se zahrnutím ztrát pro společnost z netradiční újmy a nákladů na ochranu proti neradiačním rizikům, X jsou náklady na radiační ochranu a Y jsou ztráty odpovídající újmě z ozáření, které jsou způsobeny danou činností. Vyčíslení všech členů rovnice je velmi složitým a obtížným úkolem. Jednodušší je tedy takzvané relativní vyhodnocení, [2], [4].

- Princip optimalizace

Každý, kdo provádí činnost vedoucí k ozáření, je povinen dodržovat takovou úroveň radiační ochrany, aby riziko ohrožení života, životního prostředí a zdraví osob bylo tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při uvážení společenských a hospodářských hledisek. Prováděcí předpis stanoví organizační, technické požadavky a také směrné hodnoty ozáření, které se považují za dostatečné k prokázání rozumně dosažitelné úrovně, či postup jak jinak tuto úroveň prokázat. Směrnou hodnotou se rozumí ukazatel či kritérium, které je vodítkem pro posouzení opatření v radiační ochraně, jeho překročení či nesplnění indikuje podezření, že není radiační ochrana optimalizována, [2], [4].

Princip optimalizace je v angličtině označován jako princip ALARA, je to zkratka výrazu: „As-Low-As-Reasonably-Achievable“. Můžeme to přeložit jako: „ozáření má být tak nízké, jak je rozumně možné“. Tento princip je používán v jaderné energetice. A můžeme ho vyjádřit také jako: „dosáhni nejnižšího ozáření při použití dostupných ochranných prostředků“, [2].

Radiační ochrana se považuje za optimalizovanou tehdy, kdy v důsledku dané činnosti za normálních podmínek roční efektivní dávka u žádného z radiačních pracovníků nepřekročí hodnotu 1 mSv a roční efektivní dávka u žádné jiné osoby nepřekročí 50 μ Sv a na pracovišti IV. kategorie nesmí současně překročit kolektivní efektivní dávku 1 Sv, [2].

- Princip limitování

Každý, kdo provádí činnost vedoucí k ozáření, je povinen omezovat ozáření osob tak, aby celkové ozáření způsobené možnou kombinací nepřesáhlo v součtu stanovené limity. Limity ozáření jsou závazné kvantitativní ukazatele, jejichž překročení není přípustné. Základní limity ozáření jsou rozděleny do tří skupin, obecné limity, limity pro radiační pracovníky a limity pro učně a studenty. Číselné hodnoty limitů ozáření jsou uvedeny v tabulce 3, [2], [4].

	Limity		
	obecné	pro radiační pracovníky	pro učně a studenty
Efektivní dávka za rok (mSv)	1	50 (20)	6
Efektivní dávka za 5 za sebou následujících let (mSv)	5	100	/
Efektivní dávka v oční čočce za rok (mSv)	15	150	50
Průměrná ekvivalentní dávka v 1 cm kůže za rok (mSv)	50	500	150
Ekvivalentní dávka na ruce od prstů až po předloktí a na nohy od chodidel až po kotníky za rok (mSv)	/	500	150

Tabulka 3: Tabulka hodnot limitů pro určité skupiny. Upraveno z [5].

Základní limity ozáření se nevztahují na ozáření z přírodních zdrojů, lékařské expozice, havarijního ozáření. Což znamená, že limity ozáření se nevztahují na ta ozáření, která nejdou lidskou činností efektivně omezovat, [2].

- Princip fyzické bezpečnosti zdrojů ionizujícího záření

Zdroje ionizujícího záření musí být zabezpečeny tak, aby nad nimi nemohlo dojít ke ztrátě kontroly za předvídatelných podmínek. Fyzická bezpečnost zdrojů ionizujícího záření obsahuje požadavky jako, zábranu odcizení a přístupů k nim nebo manipulaci s nimi nepovolaným osobám, trvalé sledování zdroje a hlášení ztráty, předávání zdroje jen držitelům platného povolení, dobrý technický stav zdrojů a soustavná kontrola, [2].

2.2 Ochrana před ozářením

Proti ozáření se můžeme chránit vhodnými pracovními postupy a různými ochrannými pomůckami. Při snižování ozáření se uplatňují tři základní způsoby ochrany, ochrana vzdáleností, časem a stíněním, [2].

- Ochrana vzdáleností

Jelikož dávka klesá s druhou mocninou vzdálenosti, snažíme se být co nejdále od zářiče (zdroje ionizujícího záření). Při manipulaci se zářičem to je možné dosáhnout používáním pomůcek, jako jsou pinzety, manipulátory, chemické kleště a další. Ochrana vzdáleností se používá při skladování i transportu. Obal, v němž je zářič uložen, bývá velký. Dávku v dané vzdálenosti od zdroje ionizujícího záření je možno odhadnout výpočtem, dávkový příkon klesá úměrně vzdálenosti umocněné na druhou, vzorec 11, [2].

- Ochrana časem

Dávka, kterou pracovník během činnosti obdrží je dána součinem doby práce a dávkovým příkonem v daném prostředí. Zmenšíme-li dobu, potom bude i výsledná dávka menší. Co nejkratší dobu práce se zářičem nebo práce v jeho okolí lze dosáhnout účelnou organizací práce. Pracovník se nesmí zdržovat v blízkosti zářiče, když to není nutné a musí se snažit o co nejkratší dobu práce se zářičem, [2].

- Ochrana stíněním

Ochrana stíněním je základním a všeobecně známým způsobem ochrany. Princip ochrany stíněním spočívá ve vložení vrstvy, která pohltí část energie ionizujícího záření mezi zdroj a cílovou oblast, tedy prostor, kde se pohybují lidé. Podle druhu záření se určuje materiál stínící vrstvy. Záření alfa odstíní list papíru. Záření beta odstíní olovo, plexisklo, hliník o různých tloušťkách. Záření gama odstíní olovo, wolfram, uran, [2].

Ochrana před kontaminací radionuklidy

Na některých pracovištích, mimo jiné v laboratořích emisní MS, je potřeba manipulovat s otevřeným radionuklidovým zdrojem, například s radioaktivním roztokem nebo práškem. V takovém případě hrozí pronikání radionuklidů do organismu. Radioaktivní látky se do organismu mohou dostat různými cestami, požitím, vdechnutím, proniknutím kůží či sliznicemi. Kritická cesta, je ten způsob pronikání radionuklidu do organismu, který pro daný radionuklid v dané situaci způsobuje největší riziko poškození organismu. Biogenní radionuklidy, jsou izotopy prvků, které se usazují v lidském organismu. Kritické orgány, jsou orgány, ve kterých se tyto biogenní radionuklidy kumulují. Kritické

orgány jsou radionuklidy více postižené. Způsob ochrany před vnitřní kontaminací radionuklidy spočívá v zabránění jejich proniknutí do lidského těla některou z kritických cest. Při kontaminaci radionuklidem je tělo v přímém kontaktu se zářičem, a tedy vzdálenost od zářiče je minimální (nulová). Proti ozáření není možné použít stínění a jediný způsob, jak snížit radiační dávku, je rychlá a účinná dekontaminace, [2].

Na pracovištích s otevřenými zářiči se klade důraz na používání osobních ochranných prostředků, odpovídajících ochranných pomůcek a dodržování dalších bezpečnostních pravidel. Těmi jsou zejména: zářiče se nesmí brát do rukou, radioaktivní roztoky se nepipetují ústy, člověk s otevřeným poraněním má zakázaný vstup na pracoviště, používání digestoří, zákaz konzumace jídla a nápojů na pracovišti, zákaz kouření, kontrolování povrchové kontaminace, [2].

V případě nalezení povrchové kontaminace je místo dekontaminováno, tedy provedeno odstranění radioaktivní látky z povrchu. Při dekontaminaci radionuklidy nezlikvidujeme, ale pouze je přemístíme, na jiné méně škodlivé místo, například sklad radioaktivního odpadu, [2].

2.3 Legislativa

Využívání ionizovaného záření upravuje zákon o Mírovém využití, takzvaný **Atomový zákon**, zákon č. 263/2016 Sb. V něm jsou řešeny veškeré činnosti související s využíváním jaderné energie, používáním zdrojů ionizujícího záření a ochranou životního prostředí i osob před účinky ionizujícího záření. Také upravuje povinnosti při přípravě a provádění zásahů vedoucích ke snížení přírodního ozáření a ozáření v důsledku radiačních nehod. Upravuje podmínky pro nakládání s radioaktivním odpadem a určuje výkon státní správy a dozoru. Ten je zajišťován **státním úřadem pro jadernou bezpečnost** (SÚJB). Jeho úkolem je vykonávat státní dozor nad jadernou bezpečností, fyzickou a radiační ochranou a havarijní připravenost a kontroluje dodržování povinností podle Atomového zákona. Vydává povolení k výkonu činností, oprávnění k činnostem. Schvaluje dokumentaci, seznamy, podmínky, limity, havarijní plán a řád, vymezení kontrolovaného pásma. Sleduje a posuzuje stav ozáření, usměrňuje ozáření osob. Vede státní evidenci držitelů povolení, zdrojů ionizujícího záření a evidenci ozáření osob. Ustavuje odborné a státní zkušební komise, které ověřují zvláštní odborné způsobilosti vybraných pracovníků. Předsedou SÚJB jsou jmenováni inspektoři jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, [2], [6].

Podle zákona se pracoviště, kde se vykonávají radiační činnosti, kategorizují podle ohrožení zdraví a životního prostředí ionizujícím zářením na I., II., III. a IV. kategorie. Pracoviště I. kategorie jsou

například pracoviště s drobným typově neschváleným zdrojem ionizujícího záření, s měřicím zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zářič. Pracoviště II. kategorie jsou například pracoviště s jednoduchým zdrojem, s mobilním defektoskopem s uzavřeným radionuklidovým zářičem, s mobilním ozařovačem s uzavřeným zářičem. Pracoviště III. kategorie je například pracoviště s urychlovačem částic, radioterapeutické pracoviště se zařízením obsahujícím uzavřený radionuklidový zářič, pracoviště pro těžbu a zpracování uranové rudy. Pracoviště IV. kategorie je například jaderné záření, úložiště radioaktivních odpadů, sklad vyhořelého jaderného paliva, [2].

2.4 Monitorování

Na pracovištích, kde je ionizující záření využíváno se zpravidla zavádí takzvané monitorování. Tedy cílené měření veličin charakterizujících pole záření, ozáření osob a zaznamenávání a hodnocení výsledků těchto měření pro účely usměrňování ozáření. Smyslem monitorování není jen ověření požadavků limitování ozáření, ale také prokazování, že radiační ochrana je optimalizována a provoz pracoviště i zdrojů záření je bezpečný. Musí umožňovat včasné zjištění odchylek od běžného provozu (havárie, nehody). Monitorování se navrhuje jako soustavné a to ještě jako nepřetržité nebo pravidelné a jako operativní, tedy při nějaké specifické činnosti, [2].

Zavádí se monitorování pracoviště, osobní monitorování a monitorování výpusť a okolí.

Monitorování se podle typu praxe zavádí jako soustavné, to je spojeno s danou praxí, pravidelné, v určitých dobách se opakuje a cílem je potvrzovat bezpečné podmínky, operativní, prováděné při činnosti, cílem je zhodnotit a zajistit přijatelnost z hlediska systému limitování a podmínek povolení praxe, [1].

Monitorováním daného pracovního prostředí se získávají podklady k posouzení optimalizace radiační ochrany a jsou ověřovány, zda podmínky i nadále odpovídají podmínkám vydaného povolení k nakládání se zdroji ionizujícího záření. Také jestli je včas zajištěna radiační nehoda. Když dojde ke změnám, tak se program monitorování aktualizuje. Pravidelné monitorování povrchové kontaminace se zavádí na pracovištích s otevřenými radionuklidovými zářiči, [1].

Osobní monitorování slouží k určení individuálního vnitřního i zevního ozáření osob. Rozlišují se dvě kategorie osob pracujících se zdroji ionizujícího záření, A a B. Do kategorie A patří pracovníci, kteří nakládají se zdroji ionizujícího záření, mohou za běžného provozu nebo předvídatelných odchylek od něho obdržet efektivní dávku 6 mSv ročně nebo ekvivalentní dávku na oční čočku, kůži a končetiny převyšující 3/10 ročního limitu závažných nestochastických účinků. Radiační pracovníci

kategorie A jsou pod pravidelnou lékařskou kontrolou a jsou sledovány osobní dávky. Kategorie B jsou ostatní pracovníci, [1].

Na pracovištích kontrolovaného pásma, kde se nesleduje individuální ozáření, držitel povolení musí zabezpečit monitorování pracovního prostředí, [1].

Tam, kde dochází k zneškodňování radioaktivních odpadů vypouštěním nebo kde je možnost úniku do okolí, musí být monitorování výpustí a okolí. Vypouštěné radioaktivní látky musí mít určitou stanovenou aktivitu. Hlavním cílem monitorování výpustí a okolí je zamezení ozáření obyvatelstva, [1].

Monitorování ozáření osob a pracovního prostředí se určuje pomocí dozimetrů. Pro osobní monitorování se nejčastěji využívají filmové, termoluminiscenční, fotoluminiscenční nebo neutronové dozimetry, [1].

Pro snazší kontrolu a zajištění bezpečnosti zdrojů a osob se zavádí dva stupně ochrany a zabezpečení pracovišť se zdroji ionizujícího záření.

Kontrolované pásmo se na pracovištích se zdroji ionizujícího záření vymezuje tak, aby regulací pohybu osob, vytvořením ochranných bariér nebo stavebními úpravami, režimem práce, rozsahem monitorování a dalšími jinými opatřeními přiměřenými používaným zdrojům a způsobům nakládání s nimi bylo zajištěno, že se zdroji ionizujícího záření budou nakládat pouze osoby k tomu odborně i zdravotně způsobilé, poučené o možném riziku práce a že důsledky případné radiační nehody zůstanou co nejvíce omezeny. Kontrolované pásmo se vymezuje tam, kde by efektivní dávka mohla být vyšší než 6 mSv ročně a kde by ekvivalentní dávka mohla být vyšší než 3/10 základních limitů pro radiační pracovníky. Kontrolované pásmo se vymezuje tam, kde se očekává, že příkon dávkového ekvivalentu ze zevního ozáření bude v průměru za rok při běžném provozu zdroje vyšší než 2,5 μ Sv/h. Dále se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená. Způsob vymezení kontrolovaného pásma je schvalován SÚJB. Na vchodech se kontrolované pásmo označuje znakem radiačního nebezpečí a upozorněním: Kontrolované pásmo se zdroji ionizujícího záření, vstup nepovolaným osobám zakázán, [2].

Sledované pásmo se na pracovištích, kde se vykonávají radiační činnosti, vymezuje tam, kde se očekává, že za běžného provozu či za předvídatelných odchylek od něj, by ozáření mohlo překročit obecné limity. Sledované pásmo se většinou vymezuje na všech kategoriích pracoviště a nevymezuje se, pokud by jeho rozsah nepřesáhl vymezení kontrolovaného pásma. Dále se vymezuje jako ucelená a jednoznačně určená část pracoviště, zpravidla stavebně oddělená. Na vchodech se sledované pásmo označuje znakem radiačního nebezpečí a upozorněním: Sledované pásmo se zdroji ionizujícího záření. Ve sledovaném pásmu se zajišťuje pouze monitorování pracoviště, pokud není stanoveno jinak, [2].

3 Radiační bezpečnost v Mössbauerově spektroskopii

Cílem této práce je prověřit pracovní postupy v laboratoři jaderných analytických metod. Na tomto pracovišti jsou využívány jak otevřené tak uzavřené zdroje ionizujícího záření. Experimentální techniky, které se zde využívají, jsou například emisní Mössbauerova spektroskopie, transmisní Mössbauerova spektroskopie a porušené úhlové korelace. Laboratoř je umístěna ve dvou budovách a to na adrese 17. listopadu 12 v Olomouci, označovaná jako laboratoř Envelopa, a na adrese Šlechtitelu 21 v Olomouci, označovaná jako laboratoř Holice.

3.1 Používané zdroje

Jako zdroje se používají zářiče ^{57}Co , $^{119\text{m}}\text{Sn}$, ^{22}Na . Příklad zářiče ^{57}Co pro Mössbauerovu spektroskopii je na obrázku 1. Radionuklidy mají různé konstanty gama, jejich hodnoty jsou v tabulce 4. Z tabulky 4 je zřejmé, že nejnebezpečnější je zářič ^{22}Na .

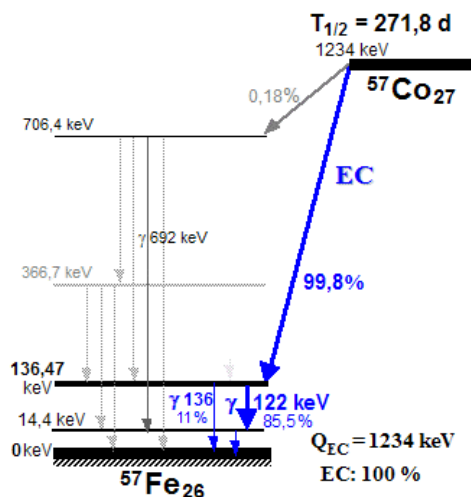
Konstanta gama Γ [mSv/h/MBq v 1 metru]		
^{57}Co	$^{119\text{m}}\text{Sn}$	^{22}Na
$4,09 \cdot 10^{-5}$	$2,789 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-4}$

Tabulka 4: Hodnoty konstanty gama pro určité radionuklidy.



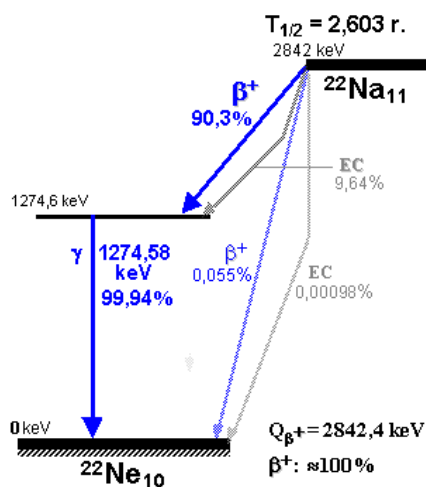
Obrázek 1: Zářič, zleva vrchní strana a zprava spodní strana zářiče, zašroubovává se do MS.

Na obrázku 2 je znázorněno rozpadové schéma ^{57}Co . Tento nuklid podléhá elektronovému záchytu. Po něm přechází na ^{57}Fe v excitovaném stavu a následně přechází do základního stavu za současné emise gama záření o energii 136 eV, 122 eV a 14.4 eV. Současně jsou generovány konverzní elektrony a charakteristické rentgenové záření železa.



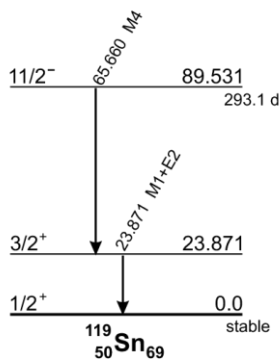
Obrázek 2: Rozpadové schéma ^{57}Co . Upraveno z [7].

Na obrázku 3 je znázorněno rozpadové schéma ^{22}Na . ^{22}Na se s poločasem 2,6 roků přeměňuje dominantně beta⁺ radioaktivitou (90%, $E_{\text{bmax}}=500\text{keV}$) a částečně elektronovým záchytem (10%) na ^{22}Ne v excitovaném stavu 1275keV. Při deexcitaci jsou emitovány fotony gama o téže energii 1275keV. Jen v 0,056% probíhá přeměna na základní stav ^{22}Ne .



Obrázek 3: Rozpadové schéma ^{22}Na . Upraveno z [7].

Na obrázku 4 je znázorněno rozpadové schéma ^{119m}Sn .



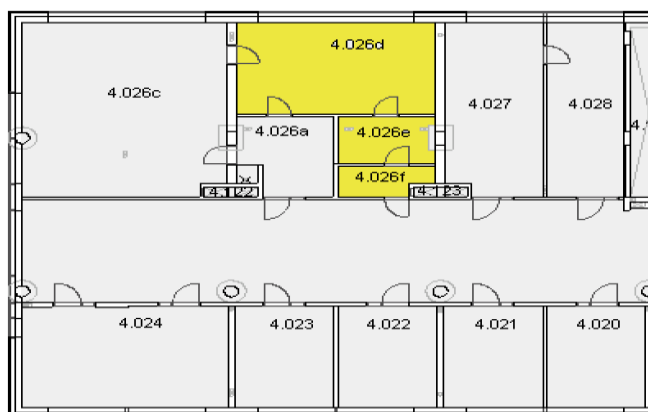
Obrázek 4: Rozpadové schéma ^{119m}Sn . Převzato z [8].

Laboratoř Envelopa (E)

Laboratoř je umístěna v prostorách budovy přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci na ulici 17. listopadu 12. Laboratoř je tvořena třemi místnostmi. Místnost 4.026d je určena jako pracovní místnost, ve které je vymezeno sledované pásmo, v místnosti je plánováno umístění spektrometru a pracovní místo pro manipulaci s otevřenými radionuklidovými zříči (ORZ). Místnost 4.026e je sklad uzavřených radionuklidových zříčů (URZ) a ORZ. Místnost je součástí sledovaného pásma. Místnost 4.026f je sklad radioaktivního odpadu a je také součástí sledovaného pásma. Plánek místností je uveden na obrázku 5 a 6.



Obrázek 5: Plán celé podlažní budovy Envelopa (E).



Obrázek 6: Detailní pohled s označením místností laboratoře Envelope (E).

Laboratoř Holice (H)

Laboratoř je umístěna v přízemí v prostorách Vědeckotechnického parku Univerzity Palackého v Olomouci, Blok C, na adrese Šlechtitelů 21, 783 71 Olomouc.

Sledované pásmo je vymezeno v místnostech 1.26, 1.27, 1.36, 1.16, 1.35, 1.35a, 1.35b. Místnost 1.27 je určena jako pracovní místnost pro přípravu vzorků s využitím ORZ. Místnost je vybavena chemickou digestoří. Místnosti 1.26, 1.27, 1.36 jsou určeny pro spektrometrická měření. Místnost 1.35a je sklad URZ a ORZ v době, kdy neprobíhá jejich přímé použití. Místnost 1.35b je sklad radioaktivního odpadu.



Obrázek 7: Plán přízemí budovy Holice (H).



Obrázek 8: Detailní pohled s označením místností laboratoře Holice (H).

3.2 Radiační pole Mössbauerova spektrometru

Aby bylo možné posoudit rizika spojená s provozem Mössbauerovských spektrometrů, ve kterých jsou použity uzavřené zdroje ^{57}Co je nutné v první řadě znát radiační pole kolem těchto zařízení. To nám následně umožní odhadnout efektivní dávku, kterou pracovník laboratoře obdrží během standardního provozu laboratoře.

Radiační pole nám určí dávkové příkony ve vhodně stanovených bodech okolo spektrometru. Chceme zjistit bezpečné místo, v kterém mohou pracovníci pracovat, aniž by dostali velkou radiační. V rámci této práce byly proměřeny dva spektrometry. Spektrometr E v laboratoři jaderných analytických metod v budově přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, na adrese 17. listopadu 12 a spektrometr H v laboratoři Vědeckotechnického parku Univerzity Palackého v Olomouci, Blok C, na adrese Šlechtitelů 21. Radiační pole bylo proměřeno dozimetrem (Thermo scientific, RadEye B20 - víceúčelový měřicí přístroj).

Postup měření radiačního pole

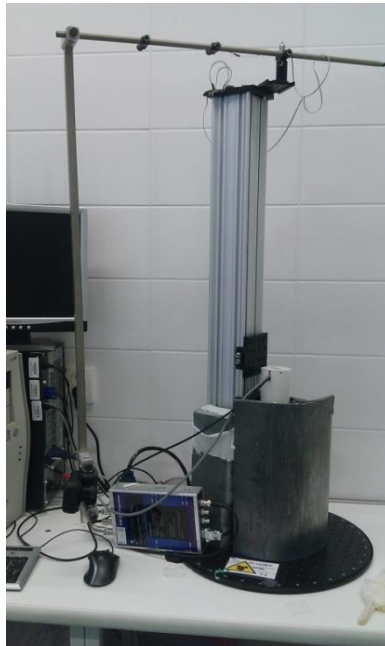
Spektrometr E je znázorněn na obrázku 9. Ve vzdálenosti 44,5 cm od osy spektrometru byl v závislosti na úhlu a výšce od roviny umístění zářiče ^{57}Co změřeny příkony dávkového ekvivalentu. Data byla akumulována po dobu jedné minuty. Naměřená data jsou uvedena v tabulce 5. Obrázek 10 znázorňuje

radiační pole kolem spektrometru E. Vzdálenost bodů od středu vyjadřuje hodnotu příkonu dávkového ekvivalentu. Umístění bodů v obrázku je dáno polohou detektoru v prostoru. V obrázku jsou znázorněny příkony dávkového ekvivalentu pro různé vzdálenosti rovin kolmých k ose spektrometru a roviny, ve které leží vzorek.

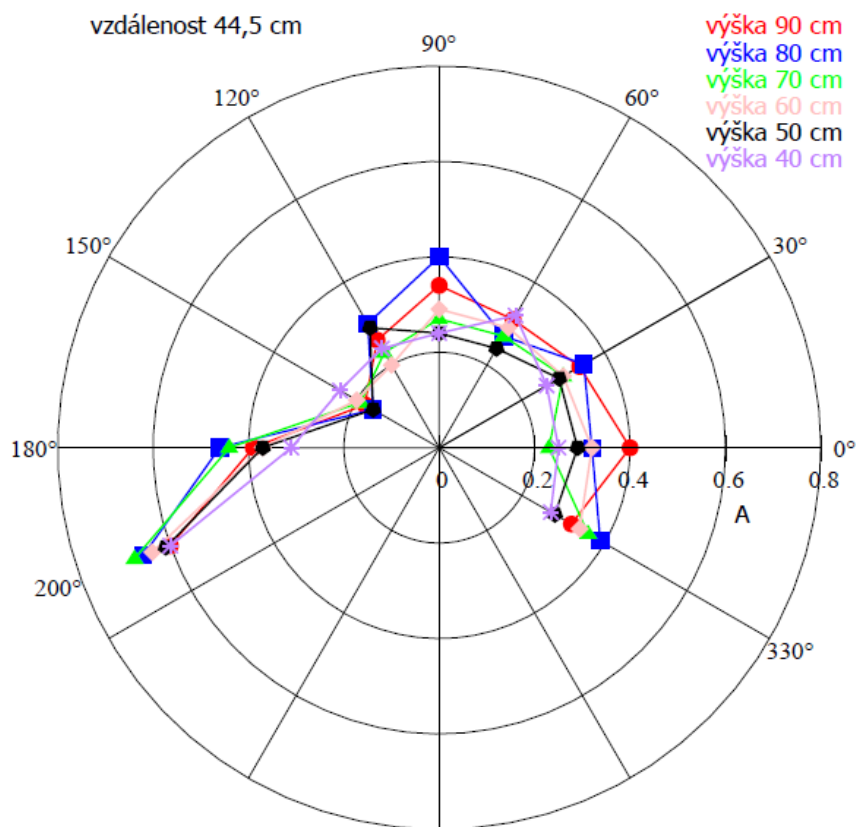
Měření bylo provedeno se zářičem o aktivitě 17,6 MBq. Z obrázku je zřejmé, že uhlové rozložení radiačního pole není homogenní a je značně ovlivněno olověným stíněním kolem spektrometru.

Vzdálenost 44,5 cm	Výška [cm]					
	90	80	70	60	50	40
Úhel [°]	Příkon dávkového ekvivalentu [$\mu\text{Sv/h}$]					
0	0,40	0,32	0,23	0,32	0,29	0,25
30	0,34	0,35	0,30	0,30	0,29	0,26
60	0,31	0,27	0,27	0,29	0,24	0,32
90	0,34	0,40	0,27	0,29	0,24	0,24
120	0,26	0,30	0,23	0,20	0,29	0,24
150	0,18	0,16	0,19	0,20	0,16	0,24
180	0,39	0,46	0,44	0,37	0,37	0,31
200	0,60	0,66	0,68	0,64	0,61	0,60
330	0,32	0,39	0,36	0,34	0,28	0,27

Tabulka 5: Hodnoty dávkového ekvivalentu v okolí spektrometru E.



Obrázek 9: Mössbauerův spektrometr E.



Obrázek 10: Radiační pole okolo pracujícího spektrometru E, vzdálenost od středu grafu znázorňuje hodnotu příkonu dávkového ekvivalentu v $\mu\text{Sv/h}$ (A) s ohledem na úhel kolem spektrometru. Výška je vztažena ke stojanu, ve kterém je Mössbauerův spektrometr uchycen.

Odhad dávky radiačního pracovníka v blízkosti spektrometru

Z naměřených hodnot byla vypočítána efektivní dávka (součet ekvivalentních dávek v jednotlivých orgánech, tkáních (H_T), vynásobených příslušnými tkáňovými váhovými faktory (w_T)). Pro případ, že radiační pracovník stojí u spektrometru. Pro výpočet byl použit vztah (14). Zjištěná efektivní dávka je $E = 3,0435 \cdot 10^{-7}$ Sv/h. V případě že by se pracovník v tomto místě nacházel celý rok nepřetržitě, potom by obdržel efektivní dávku 2,6 mSv. Nicméně za běžného provozu laboratoře se pracovník v tomto místě zdržuje maximálně tři hodiny týdně, což odpovídá dávce 0,5 μ Sv. I v případě, že by byl použit zářič s aktivitou 1850 MBq, dávka by nepřekročila 0,4 mSv.

Spektrometr H je znázorněn na obrázku 13. Neboť spektrometr má rotační symetrii, vystačí proměření příkonu dávkového ekvivalentu pouze v jedné rovině procházející podél spektrometru. Pro ostatní řezy jsou pak příkony dávkového ekvivalentu shodné. V tomto případě je použito jiné znázornění, a sice z naměřených dávkových příkonů byly vypočítány ekvi-radiační plochy, které jsou vyneseny do obrázků. Obrázky tak znázorňují vzdálenost od spektrometru, ve které je určený příkon dávkového ekvivalentu. Výsledky byly získány se zářičem s celkovou aktivitou 287,5 MBq.

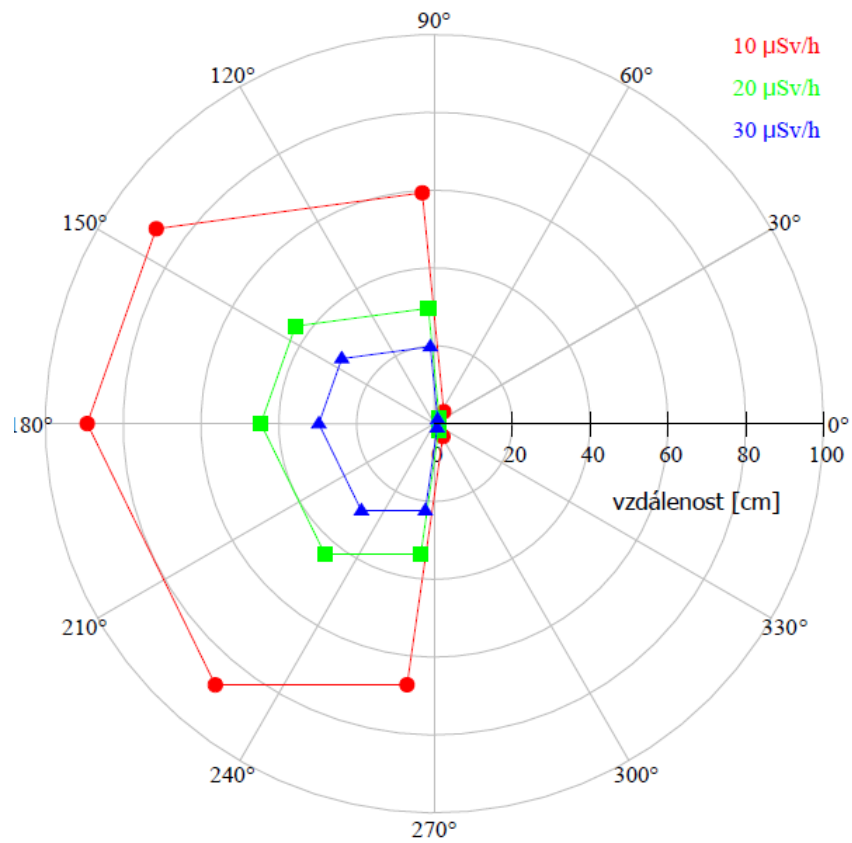
Pro otevřený spektrometr jsou vyneseny do obrázku 12 tři ekvi-radiační plochy, a sice pro příkony dávkového ekvivalentu 10, 20 a 30 μ S/h.

Pro uzavřený spektrometr jsou vyneseny do obrázku 14 dvě ekvi-radiační plochy, a sice pro příkony dávkového ekvivalentu 0,2 a 0,5 μ S/h.

V tomto případě bylo radiační pole proměřeno i okolo „otevřeného“ spektrometru se zářičem ^{57}Co . Z důvodu toho, že pro některé aplikace je potřeba mít MS otevřený, například měření zpětného rozptylu bylo důležité proměřit radiační pole otevřeného spektrometru. Tím rozumíme takové uspořádání, kdy zářič je umístěn na pohybovém zářní, ale není zakryt stínící trubicí s detektorem. Pohybové zařízení se zářičem je na obrázku 11.



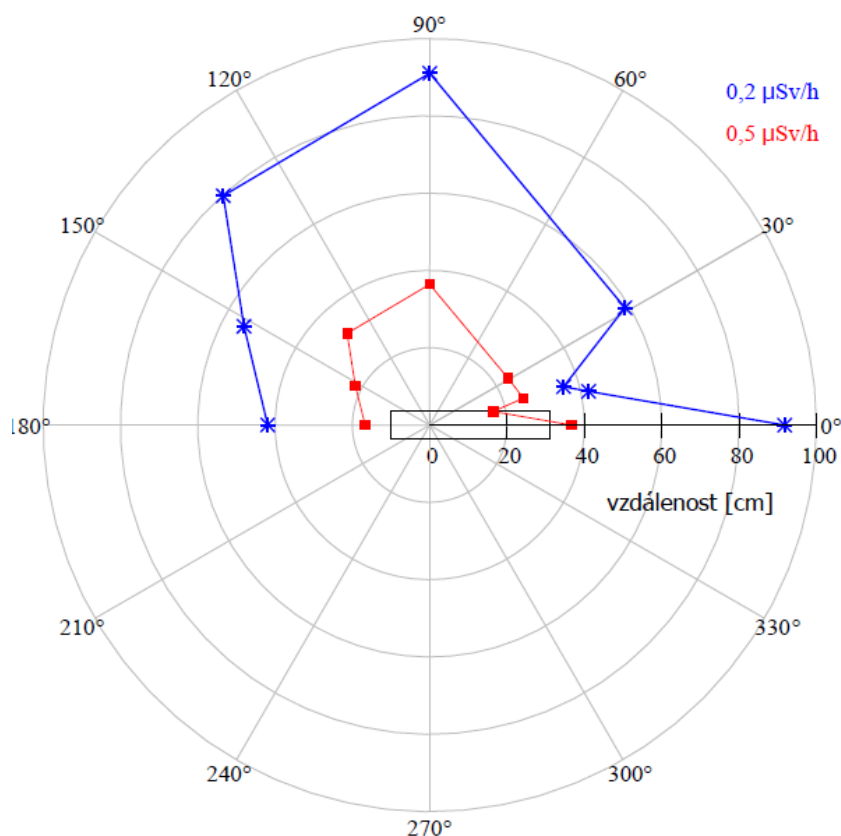
Obrázek 11: Pohybové zařízení se zářičem.



Obrázek 12: Graf znázorňující několik ekvi-radiačních ploch okolo spektrometru, s dávkovými příkony 10, 20 a 30 $\mu\text{Sv/h}$. (Jak daleko má člověk stát, aby dostal dávkový příkon 10, 20 a 30 $\mu\text{Sv/h}$.)



Obrázek 13: Uzavřený tubus Mössbauerova spektrometru.



Obrázek 14: Graf znázorňující několik ekvi-radiačních ploch okolo spektrometru, s dávkovými příkony 0,2 a 0,5 $\mu\text{Sv/h}$. (Jak daleko má člověk stát, aby dostal dávkový příkon 0,2 a 0,5 $\mu\text{Sv/h}$.)

V případě uzavřeného spektrometru je dávkový příkon v okolí spektrometru velice nízký, ve vzdálenosti asi 80 cm už je příkon dávkového ekvivalentu srovnatelný s přirozeným pozadím. Proto i tento spektrometr je stíněný dostatečně a není nutné zavádět dodatečná opatření radiační bezpečnosti.

V případě spektrometru otevřeného jsou již dávky podstatně vyšší, a proto v tomto případě je vždy nutné doplnit takto provozovaný spektrometr o dodatečné stínění. Tím může být například 4 mm vrstva olověného stínění, které sníží dávku na trojnásobek původní úrovně, a tedy sníží radiační zátěž na přijatelnou úroveň.

4 Radiační dávky při manipulaci se zářičem

4.1 Výměna zářiče

Činnost, která přináší největší riziko zvýšené radiační dávky, je zejména výměna vzorků ve spektrometru a výměna zářiče ve spektrometru. Dále příprava vzorků pro emisní Mössbauerovu spektroskopii.

Při výměně zářiče je potřeba otevřít MS vyšroubovat z pohybového zařízení zářič a našroubovat nový zářič. Při výměně zářiče se zohledňuje vzdálenost od zářiče, aktivita zářiče, druh zářiče a doba, za kterou se zářič vymění. Bylo vypočítáno několik dávek, které pracovník dostane. Mění se podle doby trvání výměny a také podle různé aktivity zářiče. Výpočet byl proveden pro zářiče ^{57}Co a $^{119\text{m}}\text{Sn}$ a pro časy 3 s, 10 s a 18 s. Byl použit vzorec (11). Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6 pro ^{57}Co a v tabulce 7 pro případ $^{119\text{m}}\text{Sn}$.

Kobalt - ^{57}Co				
Aktivita A [MBq]	Čas t [s]	Vzdálenost r [m]	Gama konstanta Γ [mSv/h/MBq v 1 metru]	Výsledek dávky D [mSv]
1850	3	3×10^{-3}	$4,09 \times 10^{-5}$	6,9780
	10			22,6995
	18			42,0361
113,336	3			0,4275
	10			1,3906
	18			2,5752
17,613	3			0,0664
	10			0,2161
	18			0,4002

Tabulka 6: Znáznorňuje výsledky dávky pro určité aktivity a časy a pro prvek ^{57}Co .

Cín – ^{119m}Sn						
Aktivita A [MBq]	Čas t [h]	Vzdálenost r [m]	Gama konstanta Γ [mSv/h/MBq] v 1 metru]	Výsledek dávky D [mSv]		
1850	3	3×10^{-3}	$2,789 \cdot 10^{-5}$	4,7583		
	10			15,4790		
	18			28,6647		
138,85	3					0,3571
	10					1,1618
	18					2,1514
24,706	3					0,0635
	10					0,2067
	18					0,3828

Tabulka 7: Znázorňuje výsledky dávky pro určité aktivity a časy a pro prvek ^{119m}Sn .

Z hodnot dávek uvedených v tabulkách 6 a 7 je zřejmé, že dávka při výměně zářiče je poměrně vysoká, nepřekračuje sice limity pro radiační pracovníky, nicméně překračuje obecné limity. Tato manipulace sice probíhá zpravidla maximálně dvakrát za rok, ale i tak je potřeba nalézt účinná opatření na snížení dávky.

4.2 Příprava radioaktivního vzorku

Při přípravě radioaktivního vzorku a manipulaci s ním bylo odhadnuto, jak velkou dostane pracovník dávku. Byl odhadnut čas, aktivita zářiče (^{57}Co) a vzdálenost pracovníka od vzorku. Byl použit vzorec (11). Při přípravě radioaktivního vzorku se používají pipety, obrázek 15 a vzorek se připravuje v zapnuté digestoři.

Aktivita A [MBq]	Čas t [h]	Vzdálenost r [m]	Gama konstanta Γ [mSv/h/MBq v 1 metru]	Výsledek dávky D [mSv]
0,7	0,25	0,3	$4,09 \times 10^{-5}$	$7,95 \times 10^{-5}$

Tabulka 8: Znázorňuje odhad dávky při přípravě radioaktivního vzorku.

Jelikož ruka je k zářiči nejbliže, byla vypočítána ještě pravděpodobnostní dávka, kterou dostane ruka. K výpočtu byl použit vzorec (11).

Aktivita A [MBq]	Čas t [h]	Vzdálenost r [m]	Gama konstanta Γ [mSv/h/MBq v 1 metru]	Výsledek dávky D [mSv]
0,7	0,25	0,05	$4,09 \times 10^{-5}$	$2,86 \times 10^{-3}$

Tabulka 9: Znázorňuje odhad dávky v ruce při přípravě a manipulaci se vzorkem.



Obrázek 15: Pipety sloužící k přípravě radioaktivního materiálu.

5 Hodnocení bezpečnostních opatření

Radiační pole vyjadřuje radiační dávky v místě MS. U spektrometru E je z výpočtu zřejmé, že efektivní dávka $3,0435 \cdot 10^{-7}$ Sv/h je nízká a i v případě neustálého sezení u Mössbauerova spektrometru dostaneme nízkou dávku. Limit je splněn, i když pracovník sedí u Mössbauerova spektrometru neustále, protože je dávka nižší než stanovené limity. Místo okolo Mössbauerova spektrometru je bezpečné místo a není potřeba jinak místo zajišťovat.

Spektrometr H, který je uzavřený, je bezpečný. Otevřený spektrometr je méně bezpečný a je potřeba ho zajistit stíněním a dávka v 0,5 metru bude dávka bezpečná. Na základě absorpční schopnosti olova byla stanovena minimální tloušťka stínění na 3 mm.

Nejkritičtější situace je v případě manipulace se zářičem, nejčastěji při jeho výměně, kdy je dávka poměrně vysoká. Při častějších výměnách zářiče by nastal problém z důvodu velkého ozáření, proto je potřeba využívat radiačních pomůcek, které sníží dávku a nebezpečí bude menší nebo žádné. Pomocí takzvaného meče, obrázek 16, byla manipulace se zářičem vyzkoušená a na šroub se zářič našroubuje bez potíží. Bez použití meče vycházela dávka přibližně 22,7 mSv a při použití meče vyházi dávka přibližně $3,3 \cdot 10^{-3}$ mSv. Příprava radioaktivního vzorku se připravuje pipetou, obrázek 15, která je dlouhá přibližně 24 cm, tím se zajistí minimalizace kontaminace radionuklidem a využitím olověné vesty a ochranného límce na krk je příprava radioaktivního vzorku zcela bezpečná.



Obrázek 16: Pinzeta (meč) k zachycení a manipulaci vzorku nebo zářiče.

Závěr

V rámci této práce byla proměřena radiační pole u Mössbauerova spektrometru a byly odhadnuty dávky při typických činnostech, jako je příprava radioaktivních vzorků a výměna zářiče. Byly zhodnoceny postupy, při kterých dochází k většímu nebezpečí ozáření. Výsledky měření a odhadů radiačních dávek ukazují, že většina pracovních postupů je bezpečná a není nutné zavádět dodatečná bezpečnostní opatření. To se ale netýká výměny zářiče, a proto byla navržena opatření pro manipulaci se zářičem. Při testech v souvislosti s konstrukcí nových pohybových zařízení v Mössbauerově spektrometru může být manipulace se zářičem častější, proto je nutné pro manipulaci se zářičem používat ochranný meč, tím dojde k podstatnému snížení efektivní dávky.

Seznam použitých zdrojů (literatura)

- [1] Principy a praxe radiační ochrany, Kolektiv autorů: editor Vladislav Klener, 1. Vydání, Praha: Azin CZ, 2000, 80-238-3703-6
- [2] Radiační ochrana pro vybrané pracovníky s významnými průmyslovými zdroji, unit – školení, konference, semináře, Ing. Jiří Filip, Lektoroval: RNDr. Zdeněk Rozlívka, 2. přepracované vydání 2006
- [3] <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/biologicke-ucinky-ionizujiciho-zareni>, ze dne 11.3.2017
- [4] <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/principy-radiacni-ochrany> , ze dne 13.3.2017
- [5] <http://www.lf.upol.cz/menu/struktura-lf/kliniky/klinika-nuklearni-mediciny/pedagogicka-cinnost/fyzikalni-zaklady-zobrazovani-v-nuklearni-medicine-a-radiacni-ochrana/radiacni-ochrana/radiacni-ochrana-pracovniku/> , ze dne 24.3.2017
- [6] https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Atomovy_zakon_20150107.pdf, ze dne 27.3.2017
- [7] <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>, ze dne 4.5.2017
- [8] https://www.google.cz/search?q=119m+Sn&rlz=1C1CHZL_csCZ681CZ681&espv=2&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiB1vfNmQ7TAhXDPxQKHWqsCIMQ_AUIBigB&biw=1242&bih=602#tbm=isch&q=119m+Sn+decay+scheme&imgc=2sDk92npiYTfWM;, ze dne 4.5.2017

Seznam použitých symbolů a zkratk

MS Mössbauerův spektrometr, Mössbauerova spektroskopie

SÚJB Státní úřad pro jadernou bezpečnost

ORZ Otevřený radionuklidový zdroj

URZ Uzavřený radionuklidový zdroj