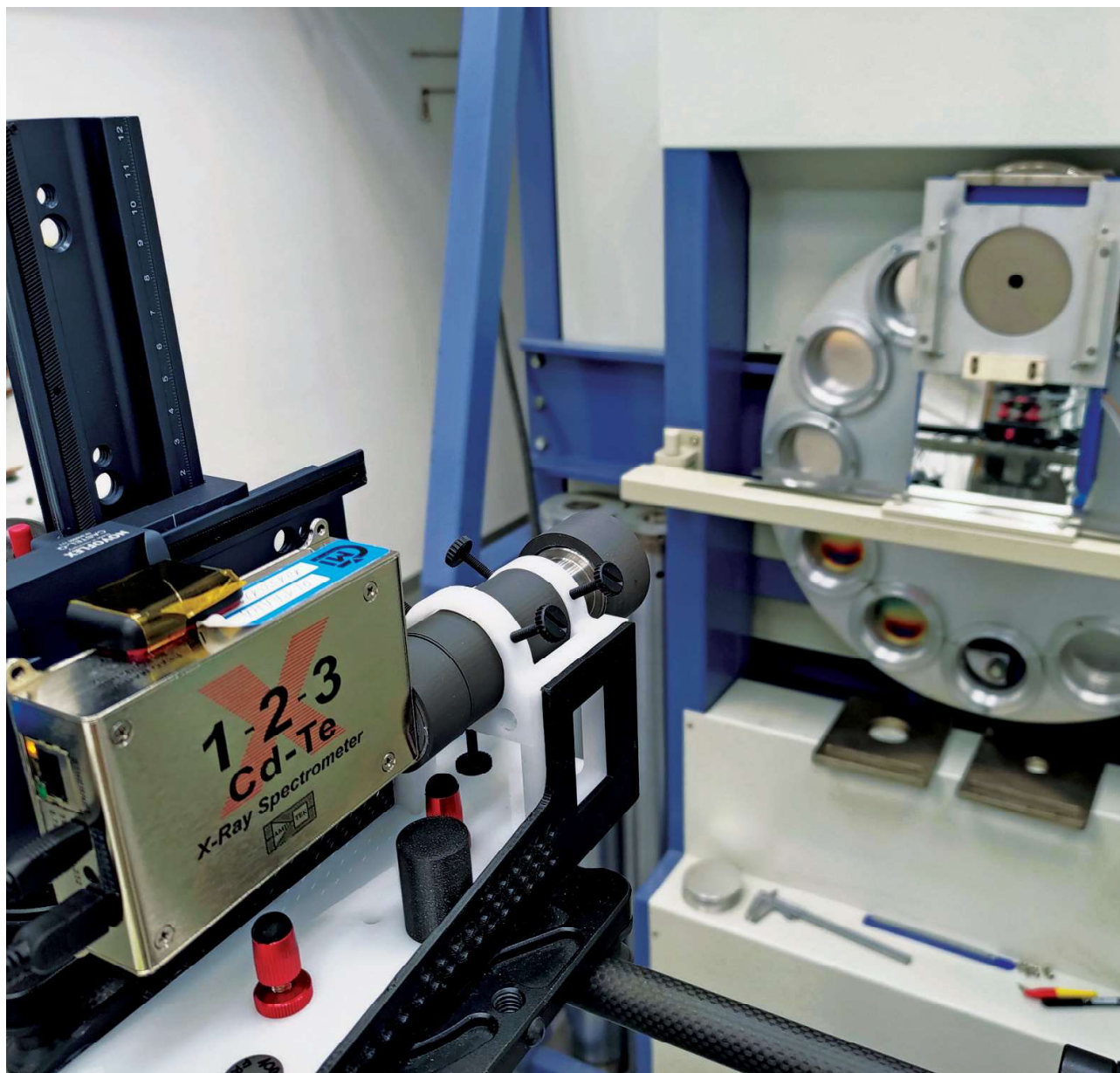


TEMATICKÁ PŘÍLOHA č. 1/2025

Metrologie ionizujícího záření

METROLOGIE

ČASOPIS PRO METROLOGII,
ZKUŠEBNICTVÍ
A TECHNICKOU NORMALIZACI



METROLOGIE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

*Český metrologický institut
Státní ústav jaderné, chemické a biologické
ochrany, v. v. i.*

ÚVOD	2
Ing. Jan Rusňák Ph.D.	
1. Přehled veličin používaných v oboru ionizujícího záření	3
Ing. Ludmila Štemberková	
2. Historie a budoucnost metrologie radonu a jeho produktů přeměny	6
Mgr. Petr Otáhal, Ph.D. Ing. Josef Vošahlík Ing. Eliška Fialová	
3. Informace o proběhlém mezinárodním porovnání v oblasti metrologie radionuklidů pro medicínskou praxi	10
Ing. Kristýna Kohoutová Ing. Jana Sochorová	
4. Nové možnosti v oblasti spektrometrie neutronů	11
Ing. Jan Rusňák Ph.D.	
5. Spektrometrie rentgenových svazků	19
Ing. Jaroslav Šolc, Ph.D. Mgr. Jana Šmoldasová Ing. Vladimír Sochor Ing. Ludmila Štemberková	
6. Vývoj a testování programu ovládajícího modul VPP01 pro zefektivnění metody etalonáže veličiny emise plošných radionuklidových zdrojů	27
Ing. Mariana Zika, MBA Mgr. Martin Kačur Ing. Karolína Grexová	
7. Evropské metrologické sítě v oblasti ionizujícího záření	29
Ing. Petr Kovář	
8. Budoucnost metrologického výzkumu v oblasti ionizujícího záření	30
Ing. Jan Rusňák Ph.D.	
ZÁVĚR	32

METROLOGY OF IONISING RADIATION

*Czech Metrology Institute
National Institute for Nuclear, Chemical and Biological
Protection*

INTRODUCTION	2
Ing. Jan Rusňák Ph.D.	
1. Overview of Quantities Used in the Field of Ionising Radiation	3
Ing. Ludmila Štemberková	
2. History and Future of Metrology of Radon and Its Conversion Products	6
Mgr. Petr Otáhal, Ph.D. Ing. Josef Vošahlík Ing. Eliška Fialová	
3. Information about the Completed International Comparison in Radionuclide Metrology for Medical Practice	10
Ing. Kristýna Kohoutová Ing. Jana Sochorová	
4. New Opportunities in Neutron Spectrometry	11
Ing. Jan Rusňák Ph.D.	
5. X-Ray Beam Spectrometry	19
Ing. Jaroslav Šolc, Ph.D. Mgr. Jana Šmoldasová Ing. Vladimír Sochor Ing. Ludmila Štemberková	
6. Development and Testing of the VPP01 Module Control Program to Improve the Method of Standardisation of the Surface Radionuclide Source Emission Quantity	27
Ing. Mariana Zika, MBA Mgr. Martin Kačur Ing. Karolína Grexová	
7. European Metrology Networks in the Field of Ionising Radiation	29
Ing. Petr Kovář	
8. The Future of Metrological Research in the Field of Ionising Radiation	30
Ing. Jan Rusňák Ph.D.	
Conclusion	32

ÚVOD

Ing. Jan Rusňák Ph.D.

Český metrologický institut

Metrologie ionizujícího záření (IZ) je velmi specifickým oborem, který v národních metrologických institutech v zemích o velikosti České republiky objevíme jen zřídka. Důvodů, proč má v Česku tento obor své pevné místo, je několik. Kromě potřeb jaderné energetiky a zdravotnictví existují i důvody historické. Výroba standardních radionuklidových zdrojů v Českém metrologickém institutu (ČMI) navazuje na tradici Ústavu pro výzkum, výrobu a využití radioizotopů (ÚVVVR), který byl pokračovatelem Státního radiologického ústavu, založeného v roce 1919 a jehož nejslavnějším ředitelem byl akademik František Běhounek, žák Marie Curie-Sklodowské. Koneckonců na počátku úspěšné vědecké dráhy Marie Curie-Sklodowské byl jáchymovský smolinec, z nějž mladá fyzikarka izolovala první gram rádia.

stal se jeho součástí i Inspektorát ionizujícího záření. Ten sídlil v nově postavené budově v areálu ÚVVVR v Radiové ulici a jeho personální základnu tvořili jak bývalí zaměstnanci ÚVVVR, tak také pracovníci z jiných institucí, například Akademie věd či Tesly Přemysleni. Prubířským kamenem nového inspektorátu se stala dostavba jaderné elektrárny Temelín, respektive metrologické zabezpečení jejího havarijního a provozního radiačního monitorovacího systému. Hybrid vzniklý naroubováním amerických komponent do původního ruského systému měl do funkčního celku daleko, a teprve v rámci pečlivých metrologických testů, studií a schvalovacích procesů byly nedostatky identifikovány a po náročných vyjednáváních s dodavateli a výrobcí i postupně odstraňovány. Po vstupu ČR do EU se otevřela možnost účasti výzkumných pracovníků v mezinárodních evropských výzkumných projektech, díky čemuž se urychlila implementace nových postupů a technologií, usnadnila se výměna know-how, ale na druhé straně také prudce narostla administrativní zátěž nejen administrativních, ale také vědeckých pracovníků. Nyní, na konci 1. čtvrtiny 21. století, můžeme konstatovat, že ČMI se v oblasti výzkumu metrologie ionizujícího záření drží na evropské špičce.

Tento historický vývoj se odráží i v organizační struktuře. Inspektorát ionizujícího záření se před necelou desítkou let sice stal součástí oblastního Inspektorátu Praha, ale jeho tři hlavní oddělení zůstala zachována – oddělení primární metrologie IZ, oddělení legální metrologie IZ a oddělení výroby radionuklidových zdrojů. Práce chemiků z oddělení výroby radionuklidových zdrojů je pokračováním v odkazu Státního radiologického ústavu a kromě rutinních laboratorních činností obnáší i výzkum a vývoj nových výrobních postupů a měřicích metod. Příkladem je zefektivnění metody etalonáže veličiny emise plošných radionuklidových zdrojů, o kterém pojednává článek Ing. Mariana Ziky.

Ačkoliv výroba zdrojů radonu spadá do portfolia oddělení výroby radionuklidových zdrojů, jeho metrologie je zajišťována laboratořemi Státního úřadu pro jadernou, chemickou a biologickou ochranu (SÚJCHBO). Jsem proto velmi rád, že kolegové ze SÚJCHBO byli ochotni přispět velmi čtivým článkem o historii a současnosti měření radonu v České republice.

Legální metrologie je nejvíce spjata s jadernou energetikou a zdravotnictvím. Měření v komínkách jaderných elektráren, skladech vyhořelého paliva či na palubě reaktoru, nekonečné vstupní a výstupní prohlídky do a z elektrárny, to je tvrdý chléb, který metrologové z tohoto oddělení zakoušejí. Neméně náročnou činností je pak ověřování a kalibrace měřidel na pracovištích nukleární medicíny. To obvykle obnáší detailní načasování a koordinaci velkého množství lidí, neboť je potřeba s krátkodobými radionuklidy objet v co nejkratším čase co nejvíce pracovišť. A když se k tomuto stresu přidají obtíže s nákupem výchozího radioaktivního materiálu pro výrobu referenčních zdrojů, pramenících z ruského embarga a zdlouhavých výběrových řízení, je jasné, že tuto práci zvládne jen málokdo. V této příloze bohužel nebyl prostor

CERTIFIKÁT čis. 3047
o množství radia-prvku

obsaženého v praeparátu, který jest majetkem ministerstva veřejných prací v Praze
a byl přinesen do St. radiologického ústavu panem E. Primusem dne 28. srpna 1935.

Popis praeparátu.

Předložený praeparát jest uzavřen v platinoiridiové tubě, délky 20,0 mm průměru 3,3 mm, o síle stěny 1,0 mm o vyrytou značkou B 162.

Praeparát obsahuje podle sdělení p. doručitele síran radnatý.

Metoda měření.

Měření děje se pomocí paprsků gamma tak, že se praeparát porovnává s etalonem St. radiologického ústavu. Nemli praeparát v radioaktivní rovnováze, odvozí se maximální intenzita záření výpočtem z několika měření.

Výsledky měření.

Maximální intenzita paprsků gamma pronikajících obalem praeparátu jest 8,90
miligramu radia-prvku.

Korekce na absorpci paprsků gamma.

Korekčním výpočtem bylo nalzeno, že absorpce paprsků gamma v praeparátu samotném a jeho obalu obnáší 12,9 % paprsků gamma vycházejících z praeparátu.

Množství radia-prvku.

Z provedených měření plyne, že praeparát obsahuje: 10,22 mg, t.j.
deset celých dvacet dvě setiny
miligramu radia-prvku čili 14,56 miligramu síranu radnatého.

Poznámky: 1. Přesnost měření je $\pm 0,5$ % výsledné hodnoty.
2. Správnost zjištěného obsahu radia v předloženém praeparátu je ± 1 % výsledné hodnoty za předpokladu, že praeparát obsahuje jen činy radiové řady a že údaje doručitele o síle stěny a materiálu jeho obalu jsou správné.
3. (Týkající se praeparátu): 0

Tento posudek se vydává v jednom exempláři, jeho opisy se nevydávají, má být vždy připojen k praeparátu. ~~POKROČILÝ~~

Zařídil:
Ph.D.
přednost St. radiologického ústavu ČSR.
Státní laborator v Praze. — 495-54.

Obr. 1: Historický certifikát vydaný Státním radiologickým ústavem a podepsaný Františkem Běhounekem.

Po "sametové revoluci" započalo období transformace a ÚVVVR se v roce 1990 rozdělil do několika samostatných částí. Když v roce 1993 vznikl Český metrologický institut,

přiblížit práci kolegů z oddělení legální metrologie, zmiňme proto alespoň, že o jejich činnosti v oblasti zdravotnictví vyšel pěkný článek v Tematické příloze 3/2023.

Kromě uchovávání a rozvoje státních etalonů a účasti na mezilaboratorních porovnáních (viz článek Ing. Kohoutové) je hlavní doménou oddělení primární metrologie IZ metrologický výzkum. Jaké jsou hlavní směry mezinárodního výzkumu, kdo je vytyčuje a kam nás zavede v nejbližších letech, je tématem dvou posledních článků. Zatímco cílem mezinárodního výzkumu jsou témata evropského či světového významu, interní výzkum se zaměřuje na potřeby národní metrologie. Spektrometrie rentgenového záření spadá do obou oblastí, a proto je jejímu rozvoji v ČMI v současné době věnována značná pozornost, což dokládá i rozsáhlý článek Dr. Šolce.

Metrologie neutronů spadá jak do oblasti legální, tak také fundamentální metrologie a v ČMI je provozována na světové úrovni. Států, které metrologii neutronů na úrovni

primárních etalonů zajišťují, je velice málo, to ovšem neznamená, že by se jednalo o okrajový obor. Jaderná energetika se bez ní neobejde a nástup záchranné neutronové terapie (angl. Boron Neutron Capture Therapy – BNCT) v radiační medicíně tuto potřebu v nejbližších letech ještě umocní. Vzhledem k výše uvedenému není překvapením, že se na neutronovou laboratoř v ČMI obrací zákazníci z celého světa, ať už se jedná o kalibrace, schvalování typu nových měřidel či experimentální měření. Aby mohl být tento vysoký standard udržen, je potřeba rozšiřovat i přístrojové vybavení laboratoře. V současné době se uvažuje o nákupu nového neutronového spektrometru. Ovšem na trhu se objevila celá řada nových měřidel. Jaké jsou nejnovější možnosti v této oblasti a podle jakých kritérií se rozhodnout podrobně popisuje článek o neutronové spektrometrii.

Obsah této přílohy zdaleka nepokrývá celou paletu činností oddělení ionizujícího záření, nicméně věříme, že čtenářům tuto oblast dostatečně přiblíží.



PŘEHLED VELIČIN POUŽÍVANÝCH V OBORU IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Ing. Ludmila Štemberková

Český metrologický institut

Abstrakt

Obor ionizujícího záření je specifický značným množstvím veličin, které se v něm používají, a (nejen) pro laika může být složité se v nich zorientovat. Kromě dobře měřitelných fyzikálních veličin popisujících fyzikální vlastnosti ionizujícího záření (aktivita, fluence, dávka, kerma) jsou používány také veličiny pro radiační ochranu, jež berou v potaz biologické účinky daného druhu ionizujícího záření na lidský organismus (efektivní dávka, ekvivalentní dávka). Ty ale nejsou přímo měřitelné, proto byly zavedeny tzv. operační veličiny, jež jsou měřitelné, resp. odvoditelné z měřitelných fyzikálních veličin, a zároveň poskytují dostatečně dobrý odhad veličin pro radiační ochranu (osobní dávkový ekvivalent, prostorový dávkový ekvivalent). Ve snaze překlenout propast mezi operačními veličinami a veličinami pro radiační ochranu vyšlo v roce 2020 nové doporučení Mezinárodní komise pro radiační veličiny a jednotky ICRU 95, které koncept operačních veličin od základu mění. I když se jedná o krok uvážený a pečlivě připravovaný, dá se očekávat, že v nejbližších letech povede k ještě větší nepřehlednosti operačních veličin.

Úvod

Tento článek si bere za cíl představit základní veličiny používané v oboru ionizujícího záření (IZ). Veličiny IZ můžeme rozdělit na veličiny měřitelné a neměřitelné. Měřitelné veličiny popisují fyzikální vlastnosti ionizujícího záření jako počty částic nebo energii předanou hmotě.

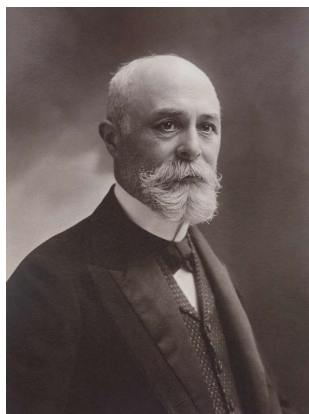
Neměřitelné veličiny byly definovány za účelem stanovení limitů pro radiační ochranu obyvatelstva a radiačních pracovníků a reflektují míru vlivu IZ na lidský organismus. Je možné změřit absorbovanou dávku ve vodě ve vodním fantomu, ale už jednoduše nejde změřit biologické účinky IZ umístěním detektoru do kůže nebo jater. Veličiny radiační ochrany je však potřeba umět změřit, aby bylo prokázáno dodržování stanovených limitů. Za tím účelem byly definovány tzv. operační veličiny [1], které jsou měřitelné a poskytují přijatelný odhad veličin radiační ochrany. V nedávné době bylo vydáno doporučení ICRU 95 [2]. Jeho záměrem je zjednodušení systému veličin sloučením operačních veličin a veličin radiační ochrany.

Veličiny v oboru ionizujícího záření

Aktivita

Základní veličinou v oboru IZ je aktivita, která kvantifikuje míru rozpadu radioaktivního materiálu. Jedná se o počet radioaktivních přeměn (rozpadů), ke kterým dojde v daném množství radionuklidu za jednotku času. Jednotkou aktivity je becquerel a 1 Bq odpovídá 1 přeměně radioaktivního atomu za sekundu. Ve vzorci pro výpočet aktivity se uplatňuje přeměnová konstanta λ , která určuje pravděpodobnost radioaktivní přeměny daného radioizotopu za sekundu. Čím nižší je přeměnová konstanta, tím delší čas bude materiál radioaktivní. Poločas přeměny pak udává dobu, za kterou se přemění polovina z celkového počtu atomů radioaktivního materiálu. Poločas přeměny může být libovolný, od mikrosekund do miliard let, v závislosti na typu radionuklidu. Avšak pro daný radionuklid je specifický a konstantní.

Lidské tělo je samo o sobě radioaktivní, protože ve sva-
lech včetně srdce obsahuje draslík. Jeho přírodní složení



Obr. 1: Objevitel radioaktivity, francouzský fyzik a nositel Nobelovy ceny, Henri Becquerel.

obsahuje 0,012 % radioaktivního draslíku 40, označovaného jako ^{40}K . Ve stejném poměru je draslík přítomen i v lidském těle, kde je ho celkově asi 140 gramů při hmotnosti těla 70 kg. To odpovídá přibližně 0,0168 g ^{40}K o celkové aktivitě 4 300 Bq [3]. Tato radioaktivita je v těle přítomna po celou dobu života člověka.

Měření aktivity je nezbytné pro hodnocení radiačního rizika a pro práci s radioaktivními materiály.

Fluence

Fluence popisuje, kolik částic se nachází v daném místě. Je to poměr počtu částic IZ, které dopadnou na povrch koule, a plochy průřezu této koule. Jednotkou fluence je m^{-2} . Fluence je základní veličina popisující pole IZ a je jednou z veličin používanou k hodnocení radiačního rizika a při výpočtech absorbované dávky.

Expozice

První veličinou využívanou v dozimetrii, která se zabývá měřením, výpočtem a hodnocením dávek IZ, byla expozice definovaná pouze pro fotonové záření a k působení ve vzduchu. Ve specifických případech se užívá dodnes. Expozice IZ je poměr celkového náboje elektronů vzniklého v určitém objemu vzduchu průchodem fotonů a hmotnosti tohoto vzduchu. Jedná se tak o měřítko intenzity záření v určitém bodu prostoru. Jednotkou expozice je coulomb na kilogram $[\text{C/kg}]$, případně v minulosti používaný rentgen $[\text{R}]$.

Absorbovaná dávka

Absorbovaná dávka je fyzikální veličina, která vyjadřuje poměr energie, kterou ionizující záření předá materiálu, a hmotnosti tohoto materiálu. Zjednodušeně ji lze popsat jako rozdíl celkové energie IZ vstupující a vystupující z určitého objemu hmotnosti 1 kg. Jednotkou je 1 Gy (gray). Jedná se o základní dozimetrickou veličinu použitelnou pro libovolný typ IZ a libovolný materiál. Vždy je nutné uvést, o jaký materiál se jedná, protože pro stejný typ záření je například dávka v 1 kg vody jiná než dávka v 1 kg železa. V metrologii IZ se lze nejčastěji setkat s dávkou ve vzduchu a ve vodě a v radiační ochraně s dávkou ve tkáni. V přístrojové technice se často jedná o dávku v křemíku, tedy v materiálu senzoru IZ. Z absorbované dávky jsou odvozovány operační veličiny.

Kerma

Velichina kerma je blízká absorbované dávce. Jednotkou je 1 Gy (gray). Také vyjadřuje poměr energie a hmotnosti materiálu. Kerma je však definována pouze pro neutrální částice IZ, jako jsou fotony a neutrony. Navíc energie

v čitateli je počítána jako součet kinetických energií částic, kterým primární neutrální částice předaly svou energii, což je obsaženo již v názvu samotné veličiny představující akronym „Kinetic Energy Released per unit MAss“ (kinetická energie uvolněná na jednotku hmotnosti). Kerma ve vzduchu je základní veličinou v dozimetrii rentgenového záření.

Rozdíl mezi absorbovanou dávkou a kermou

Ačkoli jsou kerma a absorbovaná dávka sobě blízké, nelze je zcela zaměňovat. Každá z těchto veličin popisuje interakci IZ s látkou jiným způsobem. Rozdíl mezi absorbovanou dávkou a kermou lze demonstrovat na příkladu interakce fotonů v malé kouli z plexiskla. Při interakci fotonů v plexisklu vznikají odražené elektrony, které z malé koule mohou vylétnout. Kerma je počítána z počáteční energie elektronů, ale absorbovaná dávka z energie, kterou elektrony v materiálu zanechají. Kerma je v takovém případě vyšší než dávka. Část energie popsaná kermou se tedy může přeměnit na absorbovanou dávku, když nabitě částice předají svou energii materiálu. Pokud by výše uvedená koule z plexiskla byla dostatečně velká, uvnitř koule by nastala rovnováha nabitých částic (množství a energie částic do objemu vstupujících je shodná s množstvím a energií částic z objemu vystupujících) a ve vnitřku koule by se pak kerma rovnala absorbované dávce.

Velichiny radiační ochrany

Velichiny radiační ochrany jsou používány ke stanovení limitů ozáření. Jedná se zejména o ekvivalentní dávku v orgánu a efektivní dávku [4], které zohledňují biologické účinky daného druhu ionizujícího záření na lidský organismus. Jejich jednotkou je 1 Sv (sievert), aby byla odlišena od jednotky Gy fyzikální veličiny absorbované dávky.

Ekvivalentní dávka v orgánu je definována jako součin absorbované dávky v orgánu a radiačního váhového faktoru a slouží zejména ke stanovení limitů deterministických účinků, tedy takových, které se projeví klinicky v důsledku úmrtí příliš velkého počtu buněk najednou. Nejčastěji je ekvivalentní dávka stanovována pro oko nebo kůži.

Efektivní dávka je definována jako součet součinů ekvivalentních dávek v jednotlivých orgánech a příslušných



Obr. 2: Průkopník radiační ochrany, švédský fyzik Rolf Maxmilian Sievert

tkáňových váhových faktorů a slouží zejména k nastavení limitů stochastických účinků, tedy takových, které se projeví jen s určitou pravděpodobností a nelze je jednoznačně přisoudit vlivu IZ. Patří sem například zvýšení rizika nádorových a dědičných onemocnění. Efektivní dávka je důležitou veličinou, ať se jedná o rentgenování zlomených kostí, kontrolu zubů nebo popis účinků záření na zhoubné buňky a okolní tkáň při léčbě rakoviny.

Operační veličiny

Veličiny radiační ochrany nejsou přímo měřitelné. Je však nutné umět je měřit, aby bylo možné prokázat dodržování stanovených limitů. Proto byly definovány dvě skupiny tzv. operačních veličin [1], které měřitelné jsou a poskytují přijatelný odhad veličin radiační ochrany. Jedná se o veličiny pro monitorování pracovního prostředí a veličiny pro osobní monitorování zevního ozáření. Aplikovány jsou také při testování a kalibraci detektorů v laboratoři ČMI.

Veličinou pro odhad efektivní dávky pro osobní monitorování je osobní dávkový ekvivalent v hloubce 10 mm v lidském těle, $H_p(10)$. Veličinou pro odhad efektivní dávky pro monitorování pracovního prostředí je prostorový dávkový ekvivalent v hloubce 10 mm pod povrchem ICRU koule (poloměr 30 cm, hustota 1 g/cm³, složení 76,2 % O₂, 11,1 % C, 10,1 % H₂, 2,6 % N₂), $H^*(10)$.

Veličinami pro odhad ekvivalentní dávky na oční čočku a kůži jsou osobní dávkové ekvivalenty v hloubkách 3 mm, $H_p(3)$, a 0,07 mm, $H_p(0,07)$, a směrové dávkové ekvivalenty v těchto hloubkách pod povrchem ICRU koule, $H'(3)$ a $H'(0,07)$.

Testování a kalibrace detektorů určených pro měření veličin pro osobní monitorování jsou prováděny na speciálních fantomech z plexiskla, které nahrazují lidské tělo. Pro celotělové dozimetry měřící $H_p(0,07)$ a $H_p(10)$ je používán deskový fantom (30 cm × 30 cm × 15 cm), pro oční dozimetry měřící $H_p(3)$ je používán válcový fantom (výška × průměr = 20 cm × 20 cm), pro prstové dozimetry měřící $H_p(0,07)$ je používán tyčový fantom (30 cm × 1,9 cm) a pro dozimetry nošené na zápěstí nebo kotníku měřící $H_p(0,07)$ je používán sloupkový fantom (30 cm × 7,3 cm).



Obr. 3: Ozařování osobních dozimetrů na vodním fantomu.

Nové operační veličiny

Předchozí kapitola ukázala, že problematika operačních veličin IZ je poměrně komplikovaná a na první pohled nepřehledná. Takový názor pravděpodobně sdílí i nezanedbatelná část komunity. Ve snaze zjednodušit systém operačních veličin, zohlednit také částice s velmi nízkými a velmi vysokými energiemi a překlenout propast mezi operačními veličinami a veličinami pro radiační ochranu vyšlo v roce 2020 nové doporučení Mezinárodní komise pro radiační veličiny a jednotky ICRU 95 [2], které koncept operačních veličin od základu mění. Doporučení navrhuje opustit dosavadní operační veličiny a definuje nové operační veličiny na základě

výpočtů absorbovaných dávek v referenčních fantomech lidského těla publikovaných v ICRP 110 [5]. Nové operační veličiny určené pro limitování a pro optimalizaci ochrany proti stochastickým účinkům jsou osobní dávka a prostorová dávka. Nové operační veličiny určené pro limitování a ochranu proti deterministickým účinkům na kůži a oční čočku jsou osobní absorbovaná dávka a směrová absorbovaná dávka.

Zavedení nových veličin ICRU 95 je však komplikované zejména pro výrobce detektorů, protože to typicky znamená provést mechanické a softwarové úpravy přístrojů. Nicméně sami autoři ICRU 95 předpokládají, že potrvá až 20 let, než tato doporučení budou zahrnuta do norem a legislativy. I když se jedná o krok uvážený a pečlivě připravovaný, je možné, že to postupně povede k ještě větší nepřehlednosti operačních veličin.

Závěr

Obor ionizujícího záření je specifický značným množstvím veličin. Veličiny jako aktivita, fluence, nebo absorbovaná dávka jsou jasně definované a popisují fyzikální vlastnosti ionizujícího záření. To však v oboru IZ pro potřeby naší společnosti nestačí. Je nutné kvantifikovat také biologické účinky IZ na lidský organismus. Na základě shrnutí výsledků celé řady experimentů byly nastaveny limity radiační ochrany obyvatelstva a radiačních pracovníků. Za tímto účelem byly definovány nové veličiny IZ, veličiny radiační ochrany, které reflektují vliv IZ na lidský organismus, ale nejsou přímo měřitelné. Splnění limitů je však nutné prokázat měřením. Proto byly zavedeny další veličiny, tzv. operační veličiny, jež jsou měřitelné a poskytují dostatečně dobrý odhad veličin radiační ochrany. Avšak na základě pokroku na poli radiační ochrany a výpočetních modelů lidského těla vyšlo v nedávné době doporučení na sjednocení operačních veličin a veličin radiační ochrany, což do problematiky veličin IZ přineslo nový rozměr. Budoucnost ukáže, zda se jedná o krok správným směrem.

Reference

- [1] ICRU 51, International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Quantities and units in radiation protection dosimetry. ICRU Report 51, 1993, Bethesda.
- [2] ICRU 95, International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). Operational Quantities for External Radiation Exposure, J. ICRU 20(1) ICRU Report 95, 2020, Sage Publishing, Thousand Oaks, CA.
- [3] BIN SAMAT, S.; GREEN, S.; BEDDOE, A. H. The ⁴⁰K activity of one gram of potassium. *Physics in Medicine and Biology*. 1997, s. 407.
- [4] ICRP 103, International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007. Ann. ICRP 37 (2-4).
- [5] ICRP 110, International Commission on Radiological Protection (ICRP). Adult Reference Computational Phantoms, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 38(2), 2009, Elsevier Science, Oxford. Badash, Lawrence. „Henri Becquerel“. *Encyclopedia Britannica*, 21 Aug. 2024

HISTORIE A BUDOUCNOST METROLOGIE RADONU A JEHO PRODUKTŮ PŘEMĚNY

**Mgr. Petr Otáhal, Ph.D., Ing. Josef Vošahlík,
Ing. Eliška Fialová**

Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i.

Abstrakt

V roce 1993 bylo v České republice založeno Autorizované metrologické středisko (AMS), které se specializuje na zajišťování metrologické návaznosti měřidel pro měření objemové aktivity radonu (OAR) a ekvivalentní objemové aktivity radonu (EOAR). Během své 30leté historie AMS navázalo spolupráci s mnoha významnými zahraničními metrologickými organizacemi a pracovníci AMS byli zapojeni do řady tuzemských a mezinárodních výzkumných úkolů zaměřených na zlepšení metod stanovení veličin radiační ochrany.

Zavedení konzervativnějších konverzních koeficientů pro přepočet mezi aktivitou a dávkou u krátkodobých produktů přeměny radonu, spolu se zvyšováním koncentrací radonu v domech vlivem zateplování a snahy o snižování spotřeby energií, činí z radonové problematiky aktuální téma v mnoha evropských zemích. Tento článek se zaměřuje na metrologické přístupy a výzkumné aktivity AMS, které přispívají k efektivnějšímu měření a hodnocení koncentrace radonu a jeho přeměnových produktů. Důraz je kladen na význam mezinárodní spolupráce a aplikace inovativních metod měření pro zajištění vysoké úrovně radiační ochrany.

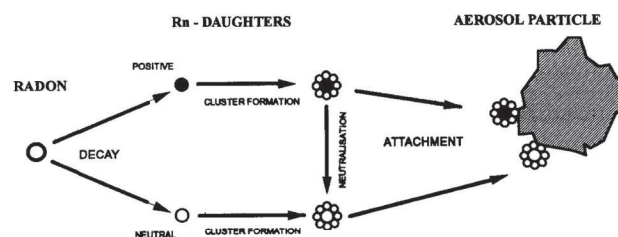
Úvod

Radon je přirozeně se vyskytující radioaktivní plyn, který vzniká radioaktivním rozpadem radia v půdě, horninách a vodě. Jeho tři nejznámější izotopy (radon ^{222}Rn , thoron ^{220}Rn a aktinon ^{219}Rn) jsou členy tří přírodních radioaktivních řad (uran-radiové, thoriové a aktiniové). Plyný charakter těchto izotopů způsobuje šíření radonu do okolního prostředí. V nevětraných prostorech, jeskyních, podzemních objektech mohou koncentrace tohoto radioaktivního plynu dosahovat významných hodnot, které několikanásobně překračují hodnoty uvedené ve Vyhlášce o radiační ochraně a zabezpečení radioaktivního zdroje [1]. Dále v textu budou podrobněji popisovány vlastnosti izotopu ^{222}Rn (a jeho krátkodobých produktů přeměny), který bude pro zjednodušení označován jako „radon“.

Produkty přeměny radonu zahrnují radioaktivní izotopy polonia, bismutu a olova, které vznikají postupným rozpadem radonových izotopů. Tyto dceřiné produkty jsou těžké kovy, které se snadno připojují k aerosolovým částicím v atmosféře a dále se šíří vzduchem. Po vdechnutí se tyto radioaktivní aerosoly usazují v plicích, kde mohou emitovat alfa, beta a gama záření. Velikost radioaktivních aerosolových částic tvořených obecným aerosolem a krátkodobými produkty přeměny radonu je v rozsahu od 30 nm do 400 nm.

Tato velikostní frakce se obecně nazývá vázaná frakce a její zastoupení je dominantní v prostorách s běžnými zdroji aerosolových částic.

Vedle této frakce existují také nevázané (volné) produkty přeměny radonu, které nejsou připojeny k žádným aerosolovým částicím. Tyto nevázané produkty mají velmi malou velikost, typicky v řádu nižších jednotek nanometrů (0,5 až 5 nm), a vysokou mobilitu díky jejich malým rozměrům a nízké hmotnosti. V důsledku toho mají vysoký difúzní koeficient, který ovlivňuje i jejich rychlé připojování k aerosolovým částicím a depozici na povrchy, včetně lidských plic. Nevázaná frakce produktů přeměny radonu je zvláště významná z hlediska osobní dozimetrie. Vysoká mobilita a malá velikost částic významně zvyšuje pravděpodobnost, že se při vdechnutí dostanou tyto částice hluboko do dýchacího traktu, snadněji dosáhnou vysoce citlivých buněk v plicích a způsobují zde radiační poškození tkáně. Proto má tato frakce vyšší biologickou účinnost ve srovnání s přeměnovými produkty vázanými na aerosol. V prostředích s nízkou koncentrací aerosolových částic může podíl nevázané frakce dosáhnout významných hodnot, což zvyšuje celkovou radiační zátěž pro jednotlivce vystavené vdechování radonu a jeho produktů přeměny [2].

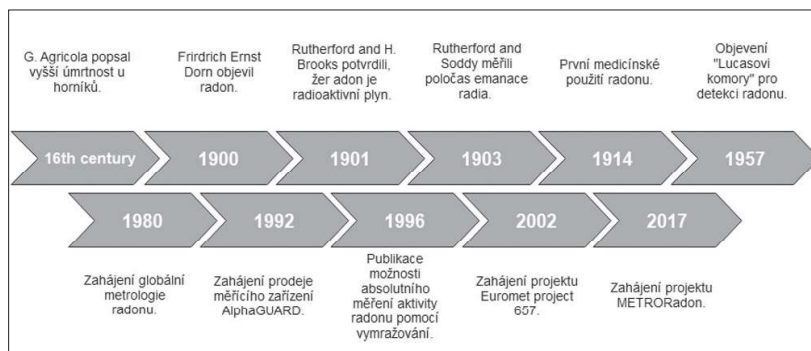


Obr. 1: Vznik volné a vázané frakce produktů přeměny radonu dle Porstendörfera [2]

Historie odvození konverzních koeficientů pro přepočet aktivity na dávku u produktů přeměny radonu sahá až do konce 20. století. První významné pokusy o kvantifikaci efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu byly založeny na studiích provedených na hornících v uranových dolech. Studie z 80. let minulého století, včetně modelů Jacobiho a Eisfelda [3], přinesly první konzistentní dávkové koeficienty, které braly v úvahu různé vlastnosti aerosolové atmosféry vnitřního a venkovního prostředí a variabilitu fyziologie dýchání. Zjištění z těchto studií vedla k významnému pokroku v porozumění distribuce aerosolových částic v lidských plicích a jejich biologickému působení.

Současný stav vývoje konverzních koeficientů je výsledkem dlouhodobého zlepšování dozimetrických modelů a sběru epidemiologických dat. ICRP Publikace 137 [4] představuje moderní přístup ke stanovování efektivních

dávkových koeficientů pro inhalaci produktů přeměny radonu a thoronu. Zvláštní důraz je kladen na význam volné (nevázané) frakce produktů přeměny z důvodu její výrazně vyšší biologické účinnosti a většího rizika pro zdraví. Moderní biokinetické modely nyní přesněji reflektují rozdíly mezi vázanou a nevázanou frakcí, což umožňuje přesnější a spolehlivější odhady efektivní dávky v různých pracovních prostředích, včetně turistických jeskyní a dolů, a tím zvyšují ochranu pracovníků před radiační expozicí.



Obr. 2: Hlavní milníky radonové metrologie [10]

Metrologie radonu – historie a současný stav

Historie metrologie radonu sahá až do 16. století. První zmínky o škodlivých účincích důlní atmosféry, konkrétně radonu, jsou zaznamenány již ve spisech Georga Agricoly, který popsal zdravotní problémy horníků těžících stříbro v oblasti Schneeberg. Tento velmi raný záznam poskytuje důležitý historický kontext zdravotního rizika inhalace radonu [5].

V roce 1901 provedli fyzici Ernest Rutherford a Frederick Soddy významné experimenty, které vedly k rozpoznání radonového plynu jako samostatného elementu. Rutherford a Brooks zkoumali, zda emanace z radia je plyn, radioaktivní plyn nebo částice hmoty, což vyústilo v potvrzení, že radon je radioaktivní plyn. V roce 1903 Rutherford a Soddy změřili poločas rozpadu radonové emanace, který určili na 3,7 dne, což je hodnota velmi blízká současně známému poločasu 3,823 dne. Tyto průkopnické studie poskytly základní údaje, které vedly k dalšímu zkoumání a kvantifikaci radonu.

Ve 30. letech 20. století přinesl Robley Evans průlom v měření radonu, když prokázal, že nižší úroveň detekce radonového plynu pomocí ionizační komory je na úrovni statistické odchylky 0,074 Bq. Evans vyvinul zařízení, které kombinovalo dvojitou ionizační komoru se strunovým elektroskopem, což umožnilo přesnější měření. V roce 1957 byla představena „Lucas cell“, která využívala alfa-scintilační vlastnosti zinkového sulfidu aktivovaného stříbrem, což představovalo další pokrok v technice detekce radonu [6].

V 80. letech 20. století vzrostl zájem o radon a jeho vliv na lidské zdraví, především kvůli rostoucímu povědomí o spojení mezi expozicí radonu a rakovinou plic. Tento zájem vedl k zahájení globálních srovnávacích programů, které měly za cíl standardizovat a zlepšit metody měření radonu. Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD) a Evropská komise zahájily program „Programme on radon and thoron dosimetry“, který zahrnoval srovnávací měření radonu a jeho produktů přeměny pomocí různých detekčních systémů. První interkalibrace byly prováděny pomocí scintilačních komor nebo vzorkovacích lahví naplněných v testovacích komorách, přičemž koncentrace radonu se pohybovaly od 1000 Bq/m³ do téměř 20 000 Bq/m³ [7, 8].

S vývojem technologií na přelomu tisíciletí se začala používat pokročilejší srovnávací měření založená na transportu srovnávacích zařízení mezi jednotlivými laboratořemi. Projekt EuroMET, který zahrnoval dvanáct laboratoří z devíti evropských zemí, byl jedním z prvních, který využil tuto metodu pro měření koncentrací radonu. Tento přístup zahrnoval měření v různých radonových atmosférách pomocí přenosných standardních zařízení, což umožnilo přesnější kalibraci měřicích přístrojů a efektivnější metrologickou provázanost evropských laboratoří [9].

V roce 2017 byl zahájen projekt MetroRADON, který měl za cíl vyvinout nové postupy pro kalibraci měřicích přístrojů při nízkých koncentracích radonu. Tento projekt reagoval na potřebu přesnějších měření radonové aktivity a jejích dopadů na lidské zdraví, zejména v prostředích s nízkou koncentrací radonu. MetroRADON byl zaměřen na vývoj kalibračních postupů, které umožňují měření radonové aktivity v rozmezí od 100 Bq/m³ do 300 Bq/m³ s relativní nejistotou menší než 5 %.

Metrologie radonu v ČR

Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany (SÚJCHBO, v.v.i.) provozuje od roku 1993 Autorizované metrologické středisko (AMS), které zajišťuje metrologickou návaznost měřidel stanovujících objemovou aktivitu radonu a ekvivalentní objemovou aktivitu radonu [11].



Obr. 3: Radon-aerosolová komora SÚJCHBO, v.v.i.

Hlavní metrologické etalony těchto veličin jsou pravidelně navazovány na přední evropské laboratoře, jako jsou PTB nebo BfS (Německo). Zároveň služby této laboratoře pravidelně využívají zahraniční instituce zabývající se radiační ochranou, měřením radonu a jeho produktů přeměny, například IRSN (Francie), CLOR (Polsko), RADONOVA (Švédsko), LaRUC (Španělsko), SARAD (Německo) a další.

Hlavními technickými zařízeními užívanými pro metrologii radonu v SÚJCHBO jsou tzv. radonové komory. Pro kalibrace a ověření přístrojů, jak pro měření objemové aktivity radonu, tak ekvivalentní objemové aktivity radonu, se používá Radon-aerosolová komora **obr. 3**, [12]. Tato komora s vnitřním objemem 10 m³ umožňuje pomocí aerosolových generátorů vytvořit atmosféru s hlavním velikostním módem generovaných aerosolových částic v rozsahu od 30 nm do 300 nm. Koncentrace aerosolových částic lze regulovaně nastavit v rozsahu od 300 od 80 000 částic na cm³. Řízené nastavení aerosolové atmosféry umožňuje měnit poměry mezi koncentrací radonu a jeho produktů přeměny v rozsahu od 0,1 do 0,9 (vyjádřeno nerovnovážným faktorem). Díky tomu je možno studovat i chování nevázané frakce dceřiných produktů radonu.

Výrazným posunem v možnostech metrologie radonu bylo vytvoření radonové komory s označením LLRCH (Low-Level Radon Chamber). Tato komora je primárně využívána pro kalibraci přístrojů v nízkých objemových aktivitách radonu [13]. Pro tyto činnosti je infrastruktura komory doplněna o průtočný radonový zdroj, který společně vytvořili pracovníci SÚJCHBO, v.v.i. a ČMI IIZ v rámci projektu MetroRADON. Pomocí tohoto radonového průtočného zdroje o aktivitě 5 kBq je v LLRCH komoře možné nastavit dlouhodobou, časově stabilní

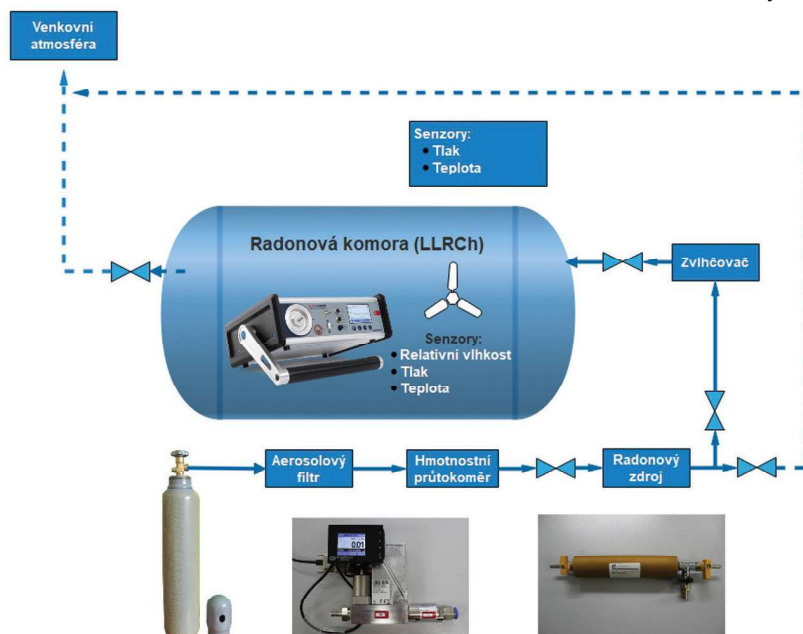
koncentraci radonu v rozsahu od 100 Bq/m³ do 300 Bq/m³. Při použití radonového zdroje o aktivitě 2 kBq lze dosáhnout hodnot objemové aktivity radonu v rozsahu od 40 Bq/m³ do 100 Bq/m³ [14]. Dále je možno tuto nízkoaktivní radonovou komoru při odstranění průtočného radonového zdroje využít i pro stanovení pozadí měřicích přístrojů. Při těchto měřeních je v komoře nastavena dlouhodobá atmosféra s nulovou objemovou aktivitou radonu. Znalost pozadí přístroje je velmi důležitým parametrem pro stanovení nejistoty měření objemové aktivity radonu.

Soubor technických prostředků pro testování funkčnosti přístrojů v reálných podmínkách doplňuje v AMS testovací místnost. Jedná se o speciálně upravenou místnost vybavenou zdrojem radonu, který do místnosti vstupuje z podloží tzv. radonovou studnou. Takto může radon do místnosti vstupovat přirozenou cestou pomocí difuze a kopírovat tak běžné podmínky v obytných nebo obecních místnostech. Pomocí ventilátoru umístěného v radonové studně je možno koncentraci radonu v místnosti i aktivně zvýšit. Dále je místnost vybavena řízenou výměnou vzduchu. Do vzduchotechnického zařízení ventilačního systému je možné vložit účinné aerosolové filtry, které potlačí vliv vnějších aerosolových částic. V této místnosti je možno pomocí aerosolových generátorů řízeně regulovat velikostní distribuci a celkovou koncentraci aerosolových částic obdobně jako v Radon-aerosolové komoře.

Budoucnost metrologie radonu

Celosvětový rozvoj metrologie radonu a jeho krátkodobých produktů přeměny se dle poznatků dosavadního vývoje bude v blízké budoucnosti pravděpodobně ubírat směrem k co nejpřesnějšímu stanovování objemové aktivity radonu a ekvivalentní objemové aktivity radonu na úrovni desítek Bq/m³. Snahou jednotlivých metrologických středisek zabývajících se touto problematikou by měl být interdisciplinární přesah radiační ochrany v oblasti měření radonu a aerosolového inženýrství. Schopnost metrologicky správného měření aktivní velikostní distribuce produktů přeměny radonu a následné přesné stanovení poměru mezi volnou a vázanou frakcí má značný vliv na odvození exaktních konverzních koeficientů pro stanovení efektivní dávky z inhalace produktů přeměny radonu.

Metrologie radonu v SÚJCHBO, v.v.i. se v současné době zaměřuje na několik klíčových oblastí, které v budoucnu zajistí přesnější a efektivnější měření poměru mezi volnou a vázanou frakcí a efektivní stanovení aktivní velikostní distribuce krátkodobých produktů přeměny radonu. Přístrojové vybavení laboratoří SÚJCHBO, v.v.i. bylo proto v nedávné době rozšířeno o možnost stanovování těchto veličin pomocí 14patrového kaskádního im-
paktoru a pomocí difuzní baterie. Tato zařízení



Obr. 4: Nízkoaktivní radonová komora (LLRCH) SÚJCHBO, v.v.i. [13]

jsou průběžně testována jak v laboratorních podmínkách testovací místnosti, tak následně v terénních podmínkách na různých typech pracovišť. V blízké budoucnosti bude přistoupeno k modernizaci Radon-aerosolové komory spočívající v úpravě vzorkovacích míst pro možnost efektivnějšího připojení kaskádního impaktoru. Dále bude Radon-aerosolová komora dovybavena možností efektivnějšího generování aerosolových částic, na které se budou ve vnitřní atmosféře komory kontrolovaně deponovat krátkodobé produkty přeměny radonu.



Obr. 5: Testování metodiky stanovení aktivitní velikostní distribuce krátkodobých produktů přeměny radonu v testovací místnosti SÚJCHBO, v.v.i.

Závěr

Rozvoj technologie a měřicích metod radonu a jeho přeměnových produktů v posledních desetiletích, v kombinaci s rozvojem a aplikací aerosolového inženýrství a vzájemnou spoluprací předních evropských metrologických laboratoří, směřuje k neustálému zkvalitňování úrovně metrologické návaznosti a ve svém důsledku i radiační ochrany. Organizace národních i mezinárodních mezilaboratorních srovnávacích měření je účelným a efektivním nástrojem k odhalování metrologických nepřesností a významně zvyšuje kvalitu v oblasti měření radonu.

Správnost měření v radiační ochraně je důležitá především při kontrolách bezpečného provozování a zacházení se zdroji ionizujícího záření nebo monitoringu přírodního prostředí. V případě AMS Kamenná se jedná o kontrolu správnosti měření přístrojů používaných ke snižování ozáření z radonu u nových a stávajících staveb, ke snížení ozáření na pracovištích s materiálem se zvýšeným obsahem přírodních radionuklidů (tzv. NORM pracoviště) a na pracovištích s možným zvýšením ozáření z radonu. Chybně stanovená hodnota objemové aktivity radonu může zapříčinit neadekvátní odhad efektivních dávek.

Poděkování

Kolektiv autorů a pracovníků Autorizovaného střediska SÚJCHBO, v.v.i., velmi děkuje dlouholetému kolegovi a zakladateli metrologie radonu v ČR, Ing. Ivu Burianovi, CSc. za jeho dlouholeté úsilí a práci odvedenou v oblasti radiační ochrany a metrologie.

Reference

- [1] Vyhláška č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje.
- [2] J. Porstendörfer (1994): Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air, *J. Aerosol Sci.*, Vol. 25, No. 2, pp. 219 – 263.
- [3] NEA/OECD (1983): Dosimetry aspects of exposure to radon and thoron daughters products. NEA-OECD Report, Paris.
- [4] ICRP, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4).
- [5] Hoover, H. C. & Hoover, L. H. (translators). (1950). *Gregorius Agricola De re metallica*: translated from the 1st Latin edition of 1556, with biographic introduction, annotation and appendices upon the development of mining methods, metallurgical processes, geology, mineralogy and mining law, from the earliest times to the 16th century. New York: Dover Publications.
- [6] Cothorn, C. R. (1987). History and uses. In C. R. Cothorn & J. E. Smith Jr. (Eds.), *Environmental radon* (pp. 31–58). Switzerland: Springer.
- [7] Solomon, S. B., Knutson, E. O., Holub, R. F., Strong, J. C., & Keng, W. T. (1986). International intercalibration and intercomparison of radon, thoron and daughters measuring equipment. Nuclear Energy Agency OECD (NEA). (INIS-XN-172).
- [8] Pegg, J. R., Gan, T. -H., & Solomon, S. B. (1993). Asian/Australasian Region Intercalibration and Intercomparison Programme for Radon, Thoron and Daughters.
- [9] Röttger, A., Honig, A., Schmidt, V., Buchröder, H., Rox, A., Butterweck, G., Schuler, Ch., Maringer, F. J., Jachs, P., Edelmaier, R., Michielsen, N., Howarth, C. B., Miles, J. C. H., Vargas, A., Ortega, X., Burian, I., Turtiainen, T., & Hagberg, N. (2006). Radon activity concentration – a Euromet and BIPM supplementary comparison. *Appl. Radiat. Isot.*, 64(10/11), 1102–1107.
- [10] Otahal PS P, Burian I. (2020): Remarks to history of radon activity concentration metrology, *Nukleonika*; 65(1); pp. 45–49.
- [11] Vošahlik J., Burian I., Otahal P., Merta J. Metrologie radonu, In: *Metrologie*, 2016, 4, pp 33–35.
- [12] Burian, I., Otahal, P., Vosahlik, J., Pilecka, E.: Czech Primary Radon Measurement Equipment. *Radiation Protection Dosimetry*. 2011, pp. 1–4
- [13] Fialova, E., Otahal, P., Vosahlik, J., Mazanova, M.: Equipment for Testing Measuring Devices at a Low-Level Radon Activity Concentration. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, 17, 1904.
- [14] Balle T. J., Rottger S., Kovar P., Otahal PS P., et al. (2024): Two new ²²²Rn emanation sources – a comparison study, *Atmos. Meas. Tech.*, 17, pp. 2055 – 2065.

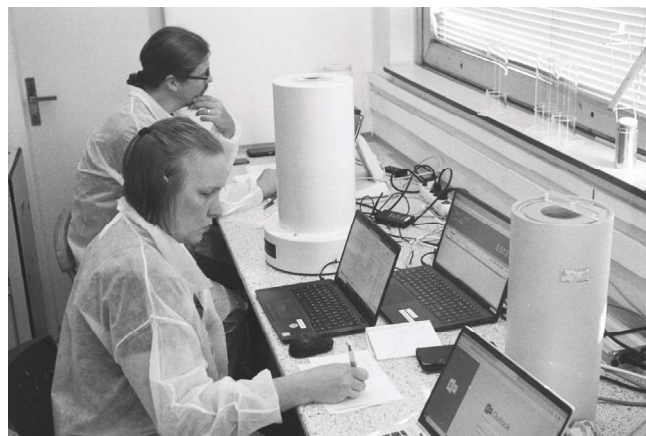
INFORMACE O PROBĚHLÉM MEZINÁRODNÍM POROVNÁNÍ V OBLASTI METROLOGIE RADIONUKLIDŮ PRO MEDICÍNSKOU PRAXI

Ing. Kristýna Kohoutová, Ing. Jana Sochorová

Státní ústav jaderné, chemické a biologické ochrany, v. v. i.

V poslední době v komunitě zabývající se metrologií ionizujícího záření vznikla poptávka po porovnání v oblasti metrologie radionuklidů s krátkým poločasem rozpadu, používaných v medicínské praxi. ČMI ve spolupráci s litevským FTMC začal takovéto porovnání organizovat a tato iniciativa se setkala s velkým zájmem.

Ve dnech 11.-15. 9. 2023 proto proběhlo v prostorách Českého metrologického institutu v Praze mezinárodní porovnání v oblasti metrologie ionizujícího záření za účasti týmů z Rakouska (BEV), Maďarska (BFKH), Španělska (CIEMAT), Litvy (FTMC), Rumunska (IFIN-HH), Česka (NUVIA), Belgie (SCK CEN), Slovenska (SMU) a Finska (STUK). Toto porovnání má statut tzv. supplementary comparison BIPM, jehož smyslem je porovnání výsledků měření provedených jednotlivými týmy a stanovení referenční hodnoty aktivity pro dané vzorky. Na základě předběžného průzkumu potřeb jednotlivých účastníků byly pro měření zvoleny radionuklidy ^{177}Lu , ^{153}Sm , ^{67}Ga , ^{123}I , ^{131}I , ^{111}In , ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ a ^{201}Tl .



Obr. 1: Účastníci porovnání měří aktivitu vzorků pomocí radionuklidových kalibrátorů

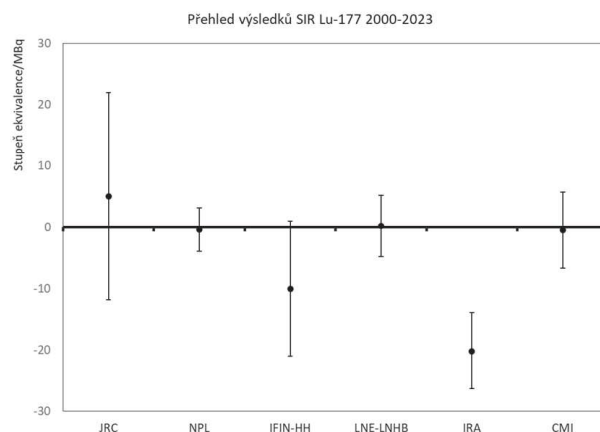
V laboratoři Oddělení výroby standardních radionuklidových zdrojů ČMI bylo připraveno několik typů vialek a ampulí obsahujících jednotlivé radionuklidy. Tyto vzorky byly následně účastníky měřeny pomocí jejich ionizačních komor, které byly za tímto účelem fyzicky přepraveny do laboratoří ČMI.

Doplňkově byly hodnoty aktivity též stanoveny v laboratoři spektrometrie Oddělení primární metrologie veličin ionizujícího záření ČMI pomocí spektrometrie gama se současným kvalitativním i kvantitativním stanovením radionuklidových nečistot měřených vzorků. Informace o nalezených radionuklidových nečistotách byly sděleny účastníkům

mezinárodního porovnání za účelem provedení adekvátních oprav získaných hodnot. V blízké době očekáváme publikaci veřejné zprávy o tomto mezinárodním porovnání obsahující konečné výsledky.

Vybrané radionuklidy byly rovněž měřeny absolutní metodou v laboratoři Oddělení primární metrologie veličin ionizujícího záření ČMI a výsledky získané primární metodou byly zaslány do SIR v rámci tzv. key comparison.

Mezinárodní referenční systém (SIR) pro měření aktivity radionuklidů emitujících záření gama byl koncipován jako doplněk mezinárodních porovnání stanovení aktivity organizovaných Mezinárodním úřadem pro váhy a míry (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) a svěmu účelu slouží již od roku 1976. Porovnání v rámci systému SIR probíhá tak, že zúčastněná laboratoř zašle vzorek standardizovaného roztoku radionuklidu ve speciální ampuli do BIPM. K tomu vyplní předepsaný formulář, ve kterém kromě celkové aktivity roztoku v ampuli, jeho hmotnosti a kombinované nejistoty stanovené aktivity podrobně uvede standardizační metodu použitou ke stanovení aktivity radionuklidu a úplný seznam složek nejistoty. Pomocí vysoce stabilní ionizační komory BIPM je pak pro danou laboratoř stanovena hodnota tzv. ekvivalentní aktivity, která je získána porovnáním ionizačního proudu komory vyvolaného zasláným vzorkem a ionizačního proudu vyvolaného standardním vzorkem ^{226}Ra uchovávaným v BIPM. Z hodnot ekvivalentní aktivity vybraných účastníků se stanoví KCRV – referenční hodnota porovnání. Rozdíl ekvivalentní aktivity a hodnoty KCRV je pak stupněm ekvivalence pro každého účastníka, ekvivalentní nejistota účastníka je kvadratický součet nejistoty měření aktivity účastníka a nejistoty KCRV (u těch účastníků, jejichž hodnota je do KCRV zahrnuta, je ve výpočtu zohledněna váha jejich výsledku). Tato porovnání jsou pro jednotlivé radionuklidy uvedena jako průběžná porovnání BIPM v databázi klíčových porovnání KCDB.



Obr. 2: Výsledky porovnání aktivity ^{177}Lu zaslaných do SIR mezi lety 2000 a 2023.

ČMI zaslal do porovnání v září 2023 ampule s nuklidy ^{67}Ga , ^{153}Sm a ^{177}Lu . Podle předběžných výsledků je pro všechny tyto nuklidy poměr stupně ekvivalence a rozšířené ekvivalentní nejistoty menší než 1, což znamená dobrou

shodu s výsledky ostatních účastníků. Výsledky ^{177}Lu již byly publikovány (DOI 10.1088/0026-1394/61/1A/06012). U zbývajících nuklidů již BIPM vydal tzv. Draft B, tzn. očekává se brzké publikování výsledků.



NOVÉ MOŽNOSTI V OBLASTI SPEKTROMETRIE NEUTRONŮ

Ing. Jan Rusňák Ph.D.

Český metrologický institut

Bonnerův spektrometr je již od 60 let minulého století základním nástrojem pro měření neutronových spekter. Sestává z řady sférických polyethylenových moderátorů, do jejichž středu se umísťuje detektor citlivý na termální neutrony. Umožňuje tak měření energií od setin elektronvoltů až po jednotky MeV. Nejedná se ale o ideální měřidlo. Jeho značná hmotnost a rozměry, složité vyhodnocování naměřených dat, necitlivost na vysokoenergetické neutrony, nutnost v každém bodě provést měření pro všechny velikosti moderátoru – to vše jsou překážky, které použití Bonnerova spektrometru výrazně omezují. V posledních letech se však začaly objevovat nové detektory, které se snaží některé z těchto problémů vyřešit. V některých případech se jedná pouze o upravený Bonnerův spektrometr, v jiných případech se jedná o zcela jiné měřidlo založené na jiných fyzikálních principech, např. scintilační detektor s analyzátozem tvaru pulsu nebo pole polovodičových diod. Které měřidlo a podle jakých kritérií by si tedy měl uživatel vybrat?

Úvod

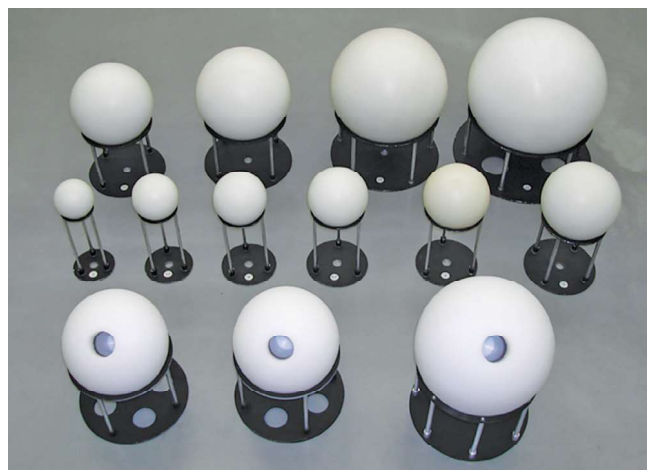
Měření energetických spekter neutronů není jednoduchou a přímočarou záležitostí, a to z několika důvodů. Neutrony nenesou elektrický náboj a s okolní hmotou reagují pouze pomocí silné interakce, jež má velmi omezený dosah a účinný průřez těchto reakcí je velmi malý, neboť řádově odpovídá geometrickému příčnému průřezu atomových jader. Typická neutronová spektra obsahují kontinuum rozptýlených neutronů, a mohou tak pokrývat energie od tisíců eV až do jednotek GeV (v závislosti na zdroji neutronů), tedy 12 řádů! Neutronové pole je navíc prakticky vždy doprovázeno fotony gama záření, které by mohly snadno zkreslit naměřené údaje, pokud by na ně detektor nebyl dostatečně necitlivý. Tyto aspekty kladou omezující podmínky na konstrukční vlastnosti neutronových spektrometrů. Téměř vždy se proto jedná o poměrně velká a těžká měřidla, mnohdy modulární, sestavovaná až na místě měření.

Ani vyhodnocení naměřených dat nelze považovat za triviální. Pechod od detektorového spektra k požadovanému energetickému spektru je realizován pomocí dekonvoluce, která kromě odezvoové funkce detektoru vyžaduje i počáteční hrubý „náštel“ měřeného spektra, což je krok vyžadující určitou míru zkušenosti. Dekonvoluční algoritmy se téměř

pokaždé dopracují k nějakému výsledku, ten ale nemusí nutně představovat fyzikální realitu. Zde opět nastupuje zkušenost uživatele, který musí posoudit, jestli výsledné spektrum neobsaahuje např. umělé artefakty pocházející z výchozího spektra.

Bonnerův spektrometr

S příchodem jaderných reaktorů v 50. letech minulého století nastal rozvoj neutronové fyziky a potřeba co nejpřesněji měřit neutronová spektra se stala mnohem naléhavější. V článku z roku 1960 autoři Bramblett, Ewing a Bonner popsali měřidlo skládající se z detektoru citlivého na tepelné neutrony a sady sférických polyethylenových moderátorů s průměry od 2" do 12" (palec/inch), jejichž funkcí je měření spektrum v různé míře moderovat a určitou část spektra převést do oblasti nízkých energií, v níž jsou tyto neutrony detekovatelné detektorem umístěným uvnitř moderátoru [1]. Dnes je toto měřidlo všeobecně známo jako Bonnerův spektrometr (Bonner Sphere Spectrometer – BSS).

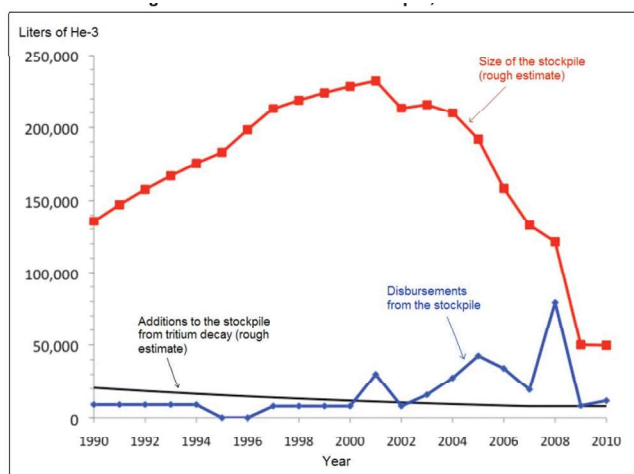


Obř. 1: Sada polyethylenových koulí Bonnerova spektrometru používaného v ČMI.

Jako detektor termálních neutronů použila trojice zmíněných autorů scintilační detektor s krystalem $\text{LiI}(\text{Eu})$ o průměru 4 x 4 mm. Ačkoliv účinnost detekce tepelných neutronů byla u tohoto detektoru poměrně vysoká, díky přítomnosti vysokoatomárního prvku (jódu) byla velmi vysoká i účinnost detekce doprovodného gama záření (gama záření vzniká při jaderných reakcích produkujících neutrony, ale také v důsledku aktivace polyethylenového moderátoru neutrony). Separace těchto dvou složek vyžadovala složitou analýzu výstupního světelného spektra. Další nevýhodou

tohoto systému je nutnost připojení krystalu k fotonásobiči, čímž je výrazně snížena izotropní odezva měřidla. Jako vhodná alternativa se později prosadily proporcionální čítače naplněné fluoridem boritým [2]. Nepříjemnou vlastností BF_3 je jeho vysoká toxicita a korozivnost, proto byla tato měřidla v 80. letech postupně vytlačena mnohem bezpečnějšími proporcionálními čítači naplněnými ^3He , které poskytovaly vysokou účinnost detekce tepelných neutronů a zároveň nízkou citlivost na doprovodné gama záření [3, 4]. Nejznámějším příkladem tohoto detektoru je sférický čítač SP9 od britské společnosti Centronic.

Izotop helia ^3He vzniká beta rozpadem tritia (^3H). V 70. a 80. letech minulého století se termonukleární hlavice naplněné tritiem produkovaly jak o závod a při jejich údržbě muselo být vznikající ^3He odebráno, protože by jinak snižovalo výbušný potenciál hlavic. Toto „odpadní“ helium bylo dále průmyslově využíváno a jednalo se o cenově dostupnou komoditu. Nicméně v 90. letech, po podepsání dohody START I, začal počet termonukleárních hlavic a skladovaného tritia prudce klesat (obr. 2). To se odrazilo i na ceně izotopu ^3He , která se během dekády 2000–2010 zdvacetinásobila a od té doby nadále roste. Výrobci neutronových detektorů tak hledají nová řešení a stávající majitelé heliových proporcionálních čítačů je opatrují jako oko v hlavě.



Obr. 2: Pokles zásob ^3He (červená křivka) mezi lety 1990 a 2010. Zdroj: [5]

Veliká výhoda Bonnerova spektrometru tkví v tom, že uživatel není omezen na použití jediného typu detektoru tepelných neutronů. V závislosti na intenzitě neutronového toku je kupříkladu možné použít proporcionální čítač s různou velikostí pracovního tlaku, aby na jedné straně účinnost detekce nebyla příliš nízká a na straně druhé aby nedocházelo k přehlcení detektoru a nárůstu mrtvé doby. V případě časově proměnlivých polí, jakými jsou například pulzní pole generovaná částicovými urychlovači, může být vhodné použít pasivní detektory pracující v integrálním režimu, např. termoluminiscenční dozimetry či aktivační detektory (Au a In fólie, Mn pelety). Základními požadavky na detektor jsou dostatečně malé rozměry, vysoká účinnost detekce tepelných neutronů a nízká citlivost na gama záření.

Zpomalení neutronů o vyšších energiích je zajištěno sadou polyethylenových moderátorů, které mají nejčastěji sférický tvar, ale mohou být např. i cylindrické. Uvnitř moderátoru se nachází dutina pro umístění detektoru. V případě kulových moderátorů se nejčastěji používají sféry o průměru 3", 3,5", 4", 4,5", 5", 6", 8", 10", 12". Jejich počet a velikost závisí na tvaru měřeného neutronového spektra. Obecně je důležité, aby odezva detektoru byla u různých sfér dostatečně odlišná, aby množství nové informace poskytnuté daným moderátorem bylo co nejvyšší.

Zpracování dat je poměrně komplikované a představuje jedno z hlavních úskalí použití BSS. Nejprve je potřeba naměřit data pro každou moderační vrstvu zvlášť, vždy ve stejné pozici. V ČMI používáme systém s dvanácti sférami. Pokud bychom chtěli změřit neutronové pole v 10 různých bodech, bude potřeba provést 120 měření. Jestliže jedno takové měření bude trvat 5 minut a výměna moderační sféry další 3 minuty, je na 16 hodin o zábavu postaráno. Dobu měření je možné zkrátit použitím více detektorů a měření na více pozicích zároveň. V případě měření v časově proměnlivém poli (např. urychlovačové provozy) je možné měření navázat na monitorovací jednotku a v případě pulzního režimu na počet pulzů. Ale v žádném případě se nejedná o jednoduchou a přímočarou záležitost. Nicméně i v případě měření v časově stabilním poli představuje dlouhá doba měření a nutnost fyzické výměny jednotlivých sfér obrovskou nevýhodu, a to zejména z pohledu radiační bezpečnosti jednotlivých pracovníků provádějících měření.

Jedno měření s jednou sférou poskytne jako výsledek obvykle jedno číslo – četnost detekovaných tepelných neutronů za daný čas. To ale není veličina, kterou potřebujeme znát. Tou je energetické fluenční spektrum. Přejít od naměřených hodnot k fluenčnímu spektru se provádí pomocí dekonvoluce. Existují různé algoritmy založené na různých matematických principech, které na nejobecnější úrovni řeší tentýž problém: namísto matice odezvy funkce $\mathbf{R}$, která převádí neutronové spektrum $\vec{e}$ (v podobě histogramu, kde e_i je obsah i -tého binu) na naměřené hodnoty $\vec{m}$ (kde m_j je hodnota naměřená pro j -tou sféru)

$$\vec{m} = \mathbf{R} \cdot \vec{e} \quad (1)$$

potřebujeme najít dekonvoluční matici $\mathbf{D}$, která převádí měřené hodnoty na energetické spektrum

$$\vec{e} = \mathbf{D} \vec{m} \quad (2)$$

Triviální řešení $\mathbf{D} = \mathbf{R}^{-1}$ bohužel v praxi nefunguje, jelikož inverzní matice k $\mathbf{R}$ buďto vůbec neexistuje, anebo je zcela nefunkční, neboť malé, nejistotami nejvíce zatížené prvky $\mathbf{R}$ jsou při inverzi nejvíce zesíleny a stávají se dominantními složkami matice $\mathbf{D}$. Taková matice pak vede ke zcela nefyzikálním výsledkům. Proto je potřeba k řešení úlohy využít zmíněné algoritmy. Pokud počet binů energetického spektra převyšuje počet použitých moderátorů, pak se nejedná o jednoznačně definovanou úlohu a je třeba dodat další omezující podmínky. Těmi nejčastějšími je použití regularizačního parametru a volba apriorního – výchozího – spektra, které

pro dané neutronové pole předpokládáme, čímž je do celé analýzy vnesen zásadní prvek subjektivity. Neboť jak volba apriorního spektra, tak volba velikosti regularizačního parametru do značné míry závisí na zkušenostech a znalostech daného pracovníka (byť v případě regularizačního parametru většinou existují matematické postupy pro nalezení optimální hodnoty). Některé algoritmy nejsou schopny zpropagovat statistické nejistoty měřených dat a odezвовých funkcí do výsledného spektra, jiné tak činí jen s obtížemi. Rovněž je potřeba brát v potaz i významnou nejistotu typu B výsledného spektra, která může dosahovat až desítek procent a je dána převážně výběrem apriorního spektra, volbou regularizačního parametru a použitým dekonvolučním algoritmem.

V ČMI používáme 3 různé dekonvoluční algoritmy, ale existuje i řada dalších. Často vycházejí ze zcela odlišných matematických principů, ale ve většině případů vedou ke srovnatelným výsledkům, což je kýžený stav.

- Gravel je iterativní dekonvoluční program [6] založený na algoritmu SAND II [7]. Vezme počáteční spektrum, konvoluje ho s maticí odezvy a získá čísla, která pak porovná s naměřenými hodnotami. Jejich poměry se použijí k výpočtu modifikace počátečního spektra, které se použije v další iteraci.
- Iterativní bayesovská dekonvoluce [8] považuje prvky matice odezvy za podmíněné pravděpodobnosti a počítá inverzní prvky pomocí Bayesovy věty. Rozložené spektrum se použije jako vstup pro další iteraci.
- Singular Value Decomposition (SVD) [9] využívá rozklad na singulární hodnoty za účelem získání inverzní matice odezvy. Malé singulární hodnoty diagonální matice získané z rozkladu SVD se eliminují, aby se potlačily nefyzikální statistické fluktuace výsledku. Počet eliminovaných singulárních hodnot je určen parametrem regularizace k .

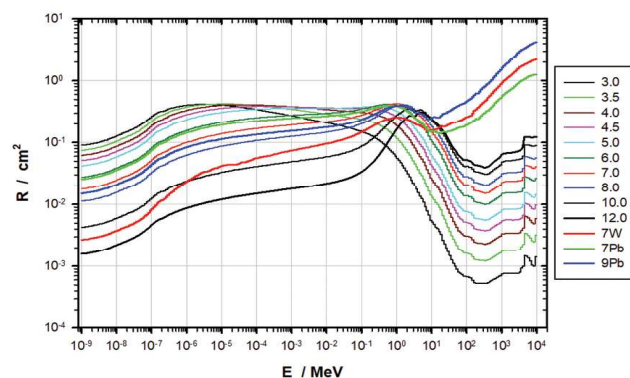
I přes svou těžkopádnost, nesnadnou manipulaci při měření a obtížné zpracování dat zůstává Bonnerův spektrometr základní výbavou zavedených i nově vznikajících neutronových metrologických pracovišť. Důvodů, proč tomu tak je, je několik. Předně univerzálnost (možnost použít celou škálu detektorů tepelných neutronů), spolehlivost, mechanická odolnost. Navíc je poměrně jednoduché vytvořit detailní Monte-Carlo počítačový model celého detektoru, který je nezbytný pro výpočet odezвовých funkcí, ale také jej lze použít pro predikce chování detektoru v různých neutronových polích, ověření fyzikálních parametrů skutečného detektoru (např. tlak plynu v proporcionálním čítači) či validace Monte-Carlo modelů neutronových polích vyskytujících se na různých pracovištích (a to tak, že se porovná odezva simulovaného detektoru v simulovaném poli s odezvou reálného detektoru v reálném poli).

Další varianty Bonnerova spektrometru

BSS s rozšířením energetickým rozsahem

Při energiích nad 20 MeV je tvar odezвовé funkce polyethylenových sfér do velikosti 12" prakticky totožný a měření s těmito moderátory tak již neposkytuje dostatečné množství informací. Pro tyto případy v ČMI používáme

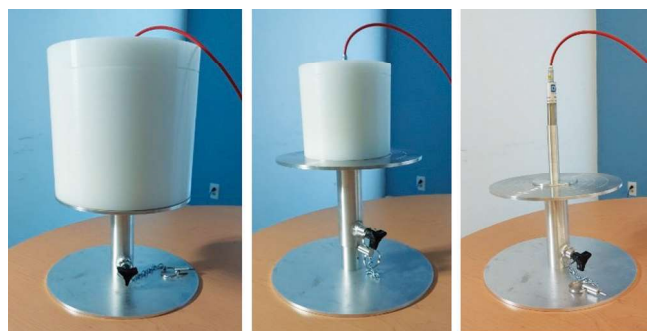
vícevrstvé moderátory s přidanou vrstvou olova (7palcová koule s vrstvou tloušťky 0,5 palce a 9palcová koule s vrstvou tloušťky 1 palec) a wolframu (7" koule s vrstvou 0,5"). V těchto vrstvách dochází k reakci ($n, 2n$), kdy 2 vylétávající neutrony mají zhruba poloviční energii oproti dopadajícímu neutronu. Jak je vidět na **obr. 3**, odezвовá funkce má v těchto případech zcela jiný tvar a s energií neutronů roste.



Obr. 3: Odezвовé funkce detektoru SP9 pro jednotlivé sféry Bonnerova spektrometru. Číslo v legendě udává průměr v palcích. Sféry s označením 7W, 7Pb a 9Pb obsahují dodatečnou vrstvu wolframu, respektive olova.

Sendvičový BSS

Spektrometr kanadské firmy Detec nesoucí označení NNS (Nested Neutron Spectrometer) je zajímavou variantou Bonnerova spektrometru používající cylindrický tvar moderátorů [10, 11]. Hlavním cílem zřejmě bylo vytvořit měřidlo, které se vejde do ručního kufříku, a přesto si zachová většinu kvalit běžného BSS. Nápad je to vynikající, samotné provedení však maličko pokulhává.



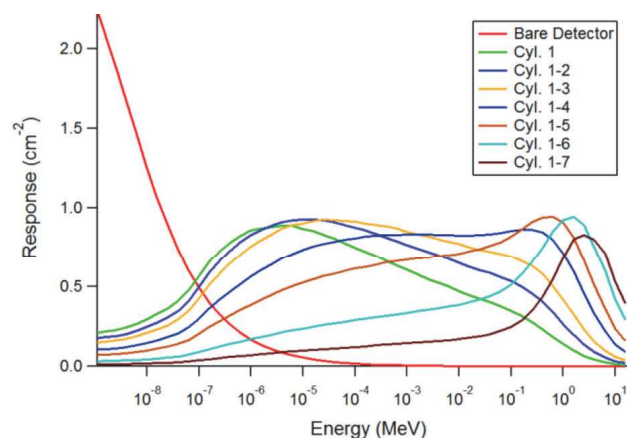
Obr. 4: Spektrometr NNS se všemi válci (vlevo), s polovinou válců (uprostřed) a holý detektor (vpravo).

Spektrometr je tvořen proporcionálním čítačem naplněným ^3He o tlaku 2 atm a sadou 7 válcových moderátorů různých velikostí, které lze vkládat do sebe (podobně jako matryšky), takže největší moderátor vznikne seskládáním všech 7 válců do sebe a dalších velikostí je dosaženo postupným odebíráním vnějších slupek (**obr. 4**). Poslední měření je pak provedeno pomocí samotného detektoru, bez moderátoru. Praktickou nevýhodou tohoto postupu je, že pro odebrání každé slupky (sestavující z dutého válce a víčka) je nutné detektor odpojit od předzesilovače, a tedy pokaždé vypnout a znovu zapnout vysoké napětí. Navíc je nutné pokaždé

přenastavit výšku stojánku (součást spektrometru), aby bylo dosaženo stejné pozice proporcionálního detektoru. Avšak jedna výhoda je neoddiskutovatelná - zatímco BSS v ČMI je uložen v boxu o rozměrech 110 x 70 x 40 cm, NSS se vejde do příručního kufříku.

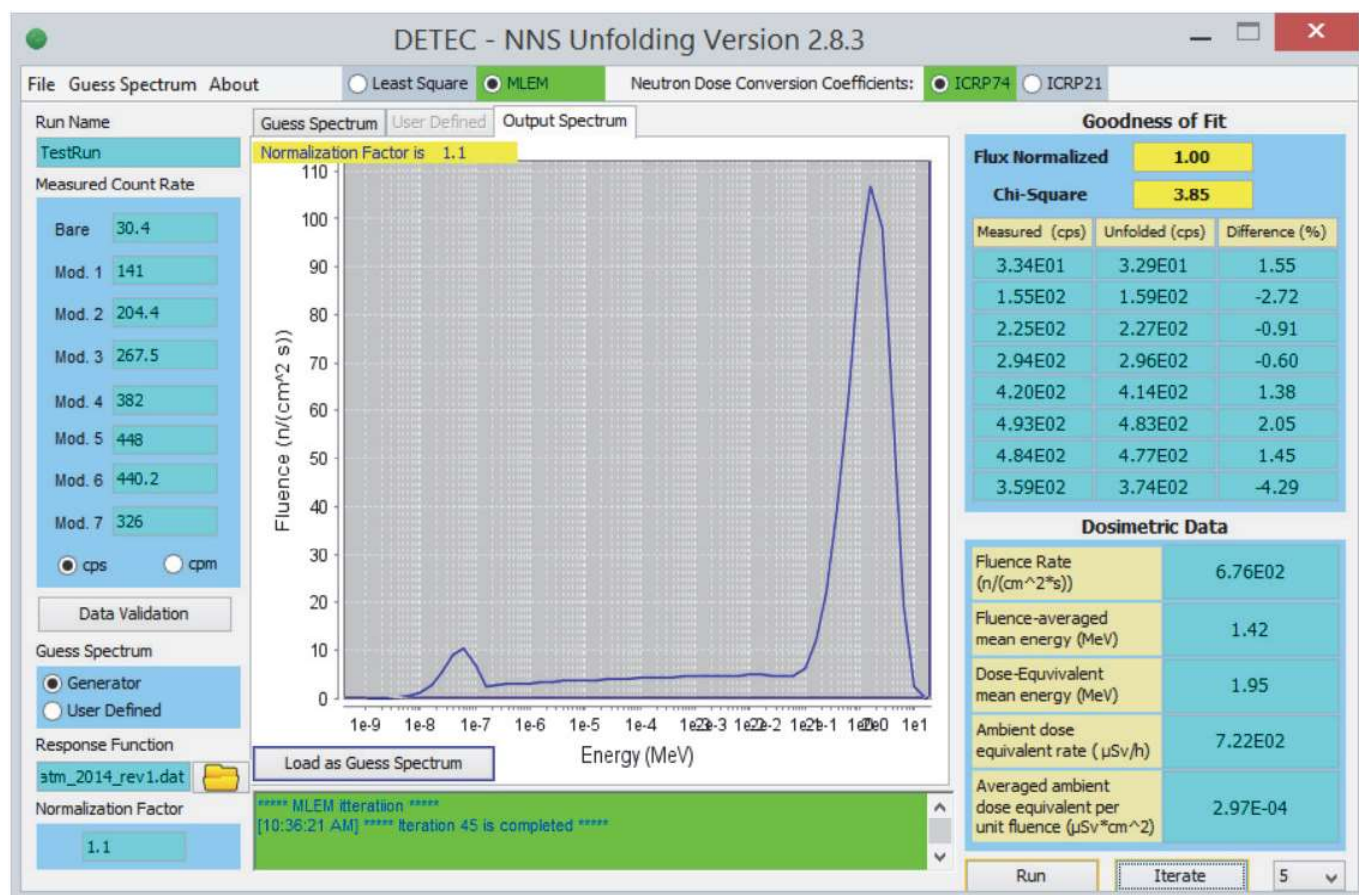
Ke spektrometru je dodáván i poměrně uživatelsky přívětivý a jednoduchý software na zpracování dat, který nabízí volbu dvou různých dekonvolučních algoritmů (obr. 5). Kromě výsledného energetického spektra program automaticky spočte některé dozimetrické veličiny (příkon prostorového dávkového ekvivalentu, průměrný dávkový ekvivalent na jednotku fluence, průměrnou energii vzhledem k fluenci a průměrnou energii vzhledem k dávkovému ekvivalentu), přičemž je možné volit příslušné konverzní koeficienty buď podle doporučení ICRP 74 nebo staršího ICRP 21. Nejnovější koeficienty podle ICRU 95 zatím implementovány nejsou. Použití programu je jednoduché a intuitivní, příjemným doplňkem je generátor výchozích spekter. Náročnější uživatelé budou zklamáni, že nemohou mít dekonvoluci zcela pod kontrolou, volba regularizačního parametru či použití jiného algoritmu jsou jim zapovězeny. Největší slabinou je ale nutnost zadat hodnoty měření se všemi vrstvami moderátoru. Pokud by tak uživatel chtěl např. provést rychlejší měření známého spektra pouze s 3 vrstvami, nemůže. Nicméně pozitivně lze hodnotit možnost výběru vlastních odezвовých funkcí. Pokud dojde ke konstrukční modifikaci moderátorů či k výměně detektoru,

nemusí se uživatel obávat, že mu zůstane nepoužitelný software. Stačí vypočítat nové odezвовé funkce a může se s detektorem pracovat jako obvykle.



Obr. 6: Odezвовé funkce sendvičového spektrometru.

Podle tvaru odezвовých funkcí (obr. 6) by mělo měřidlo být schopné měřit neutronová spektra až do energií okolo 5 MeV. Při našich testech jsme bohužel neměli k dispozici největší vrstvu moderátoru, spektrometrické vlastnosti tak nebylo možné otestovat, neboť (jak již bylo zmíněno výše) příložený dekonvoluční software vyžaduje měření se všemi vrstvami.



Obr. 5: Analyzační software pro spektrometr NNS.

Celkově lze sendvičový spektrometr NSS hodnotit jako zajímavé inovativní měřidlo, které si přes některé konstrukční nedostatky najde své aplikace, ale diskvalifikuje ho vysoká pořizovací cena srovnatelná s ostatními měřidly představenými v tomto článku, která přitom nabízejí celou řadu dalších výhod.

Polovodičové spektrometry.

V letech 2023-24 jsme v ČMI měli možnost otestovat i dva zcela unikátní spektrometry založené na soustavě polovodičových detektorů uložených v jediném měřidle. Detektory jsou rozmístěny izotropně, rovnoměrně v několika vrstvách. Rekonstrukční algoritmy tak mohou kromě tvaru spektra určit i další informace, například směrovou orientaci neutronového pole.

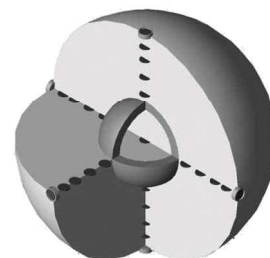
ELSE Nuclear SP2

Měřidlo italského výrobce ELSE Nuclear [12] na první pohled připomíná spíše rekvizitu ze sci-fi filmu z 80. let minulého století (obr. 7). To ale na jeho funkčnosti nic neubírá. (Snad kromě embosovaného loga, které znemožňuje při kalibraci měřidla přitisknout kalibrační zdroj až na dotek polyethylenového moderátoru).

Jedná se o robustní přístroj kulovitého tvaru s průměrem 30,4 cm, s válcovým podstavcem a masivní rukojetí. Hmotnost spektrometru je překvapivě veliká, 25 kg. Pěší mapování větší oblasti s detektorem v ruce tak nepředstavuje aplikaci,



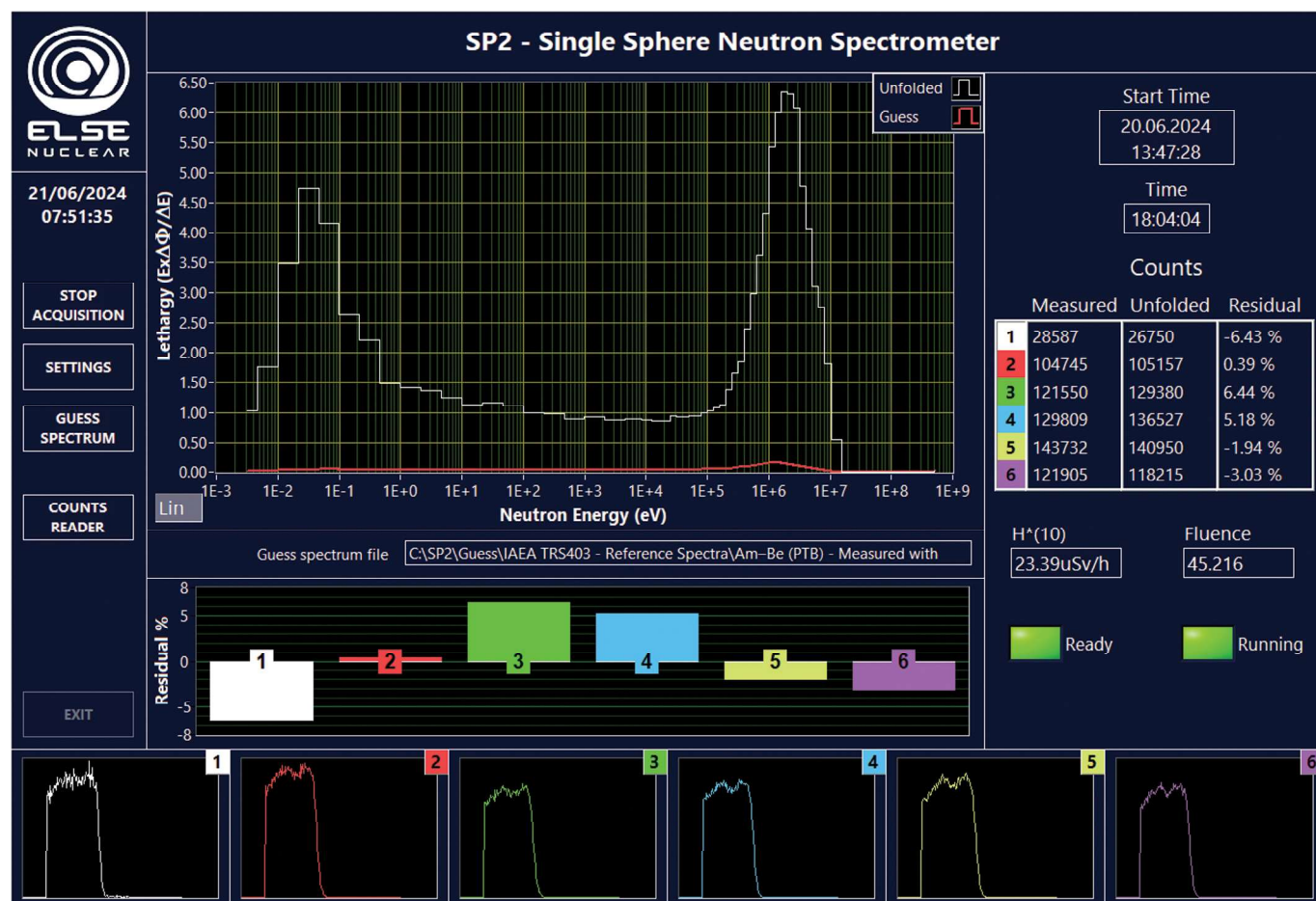
Obr. 7: Spektrometr SP2 italského výrobce ELSE Nuclear.



Obr. 8: ozmistění polovodičových detektorů uvnitř spektrometru SP2.

pro kterou by bylo toto měřidlo vhodné. V úvahu připadají spíše delší stacionární měření s občasným přenesením.

Spektrometr je osazen 32 křemíkovými polovodičovými senzory potažených vrstvou izotopu fluoridu litného ^6LiF . Ty jsou rozmístěny do tvaru kříže v 6 různých hloubkách (jak je vidět na obr. 8). Každá vrstva pak v rámci zpracování dat funguje jako jeden detektor s určitým stupněm moderace. To jistě není špatný přístup, ale potenciál měřidla se tím nevyužije naplno. Například nikterak není zužitkována informace



Obr. 9: Analyzační software dodávaný ke spektrometru SP2.

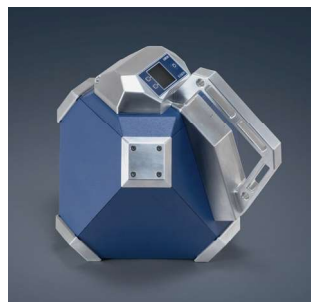
o směrové závislosti spektra, kterou by přitom s tímto hardwarovým uspořádáním bylo možno získat. Nicméně oproti klasickému BSS jsou data ze všech detektorů vyčítána ve stejný okamžik, zcela tak odpadá starost o korekce v souvislosti s časovou proměnlivostí spektra.

SP2 je dodáván ve dvou verzích. Základní verze je vybavena olověnou vrstvou, a má tak značný energetický rozsah (od 0.025 eV až do 10 GeV), zatímco odlehčená LITE verze je bez olověné vrstvy, díky čemuž je o 2 kg lehčí, ale její horní energetický rozsah končí na 2 MeV.

Analyzační software je asi největší slabinou tohoto detektoru. Instalační proces svou složitostí uživatele vrátí kamsi do 90. let minulého století a éry Windows 95. A ani po úspěšném dokončení instalace není vyhráno; komunikace počítače se sondou někdy funguje, jak má, jindy však uživatel marně čeká na úspěšné rozpoznání připojeného zařízení. U přístroje za 40 000 EUR by v dnešní době zákazník čekal poněkud vyšší standard. Po výběru výchozího spektra proběhne automaticky dekonvoluce a software vykreslí výsledné energetické spektrum a vypíše i další fyzikální veličiny – celkovou fluenci a prostorový dávkový ekvivalent $H^*(10)$. Náročnější uživatelé jistě ocení možnost dokoupit dekonvoluční software samostatně a provádět dekonvoluci s větší uživatelskou kontrolou (volba regularizačních parametrů, binování, jiná odezвовá matice, ...) a např. i s daty z jiných detektorů.

Celkově lze SP2 charakterizovat jako velmi inovativní měřidlo, které nabízí zcela nové možnosti měření neutronových spekter, ale celkový dojem kazí poněkud nedotažený software a také nevyužití plného potenciálu, který hardware spektrometru skýtá.

Raylab DIAMON



Obr. 10: Raylab DIAMON má neotřelý design a kvalitní zpracování.

Podobně jako SP2 i spektrometr DIAMON je italské provenience a hardwarově vychází ze stejného principu – polovodičové křemíkové detektory rozmístěné v polyethylenovém moderátoru v několika vrstvách [13, 14]. Ale pořekadlo „když dva dělají totéž, není to totéž“ se zde uplatňuje v plné míře. Elegantní italský design, uživatelsky přívětivý software

nevyžadující žádnou instalaci, kompaktní rozměr, nízká hmotnost, měření směrové závislosti – to vše jsou vlastnosti, které DIAMON má a SP2 nikoliv. Přitom cenově jsou obě měřidla srovnatelná. Snad jen kdyby po skončení životnosti přístroje někdo plánoval jeho využití jako posilovacího nástroje (kettlebell), sáhl by po SP2, ale jako neutronový spektrometr vítězí DIAMON na plné čáře. Podívejme se, proč tomu tak je.

Spektrometr uživatele překvapí již na první pohled. Namísto obvyklé koule má tvar pravidelného osmistěnu, díky čemuž je možné detektor postavit na podstavu a není třeba

ba přidávat nepraktické nožičky či válcové podstavy, jak je běžné u kulových měřidel (**obr. 7**). Také je na první pohled vidět orientace měřidla. Konstrukce působí velmi robustním dojmem, ale hmotnost přitom nedosahuje ani 10 kg.

Obdobně jako SP2, i DIAMON je vyráběn ve dvou variantách – nízkoenergetická s hmotností 6 kg a energetickým rozsahem od 0.025 eV do 20 MeV a vysokoenergetická s hmotností 8,5 kg a rozsahem do stovek MeV.

Polovodičové detektory jsou rozmístěny v několika vrstvách, nicméně nejsou uspořádány do tvaru kříže jako u SP2, ale v každé vrstvě jsou oproti pozici na nižší vrstvě posunuty, díky čemuž je odezva měřidla mnohem více směrově nezávislá. Rekonstrukční algoritmy navíc nevyčítají celou vrstvu jako jeden detektor, ale každý senzor zvlášť a z těchto údajů pak i překvapivě přesně rekonstruuji směr dopadajících neutronů. Při měření v ČMI jsme testovali mj. i tuto vlastnost a s výsledkem jsme byli pozitivně překvapeni.

Analyzační software je stejně promyšlený jako zbytek měřidla. Nevyžaduje žádnou instalaci, uživatel se přes webové rozhraní připojí k detektoru buď drátově (ethernetovým kabelem) nebo bezdrátově (wifi) a ve svém internetovém prohlížeči má ihned přístup k analyzačnímu softwaru. Kromě energetických spekter jsou zobrazovány i dozimetrické charakteristiky (prostorový dávkový ekvivalent, příkon prostorového dávkového ekvivalentu, konverzní koeficient z fluence na dávkový ekvivalent pro dané spektrum), příkon fluence a poměry tepelných, epitermálních a rychlých neutronů. Jednoduchá animace pak pomocí šipek ukazuje dominantní směry dopadajících neutronů. Metrologové i další uživatelé ocení funkci odečtu pozadí. Po naměření dat, která obsahují jak signál, tak pozadí, se naměří druhá sada dat, obsahující jen pozadí (například odstíněním zdroje pomocí stínícího kužele). Software pak obě sady odečte a dekonvoluci provede jen z rozdílu obou datových sad. Výsledkem je primární spektrum zdroje, očištěné o rozptýlené neutrony.

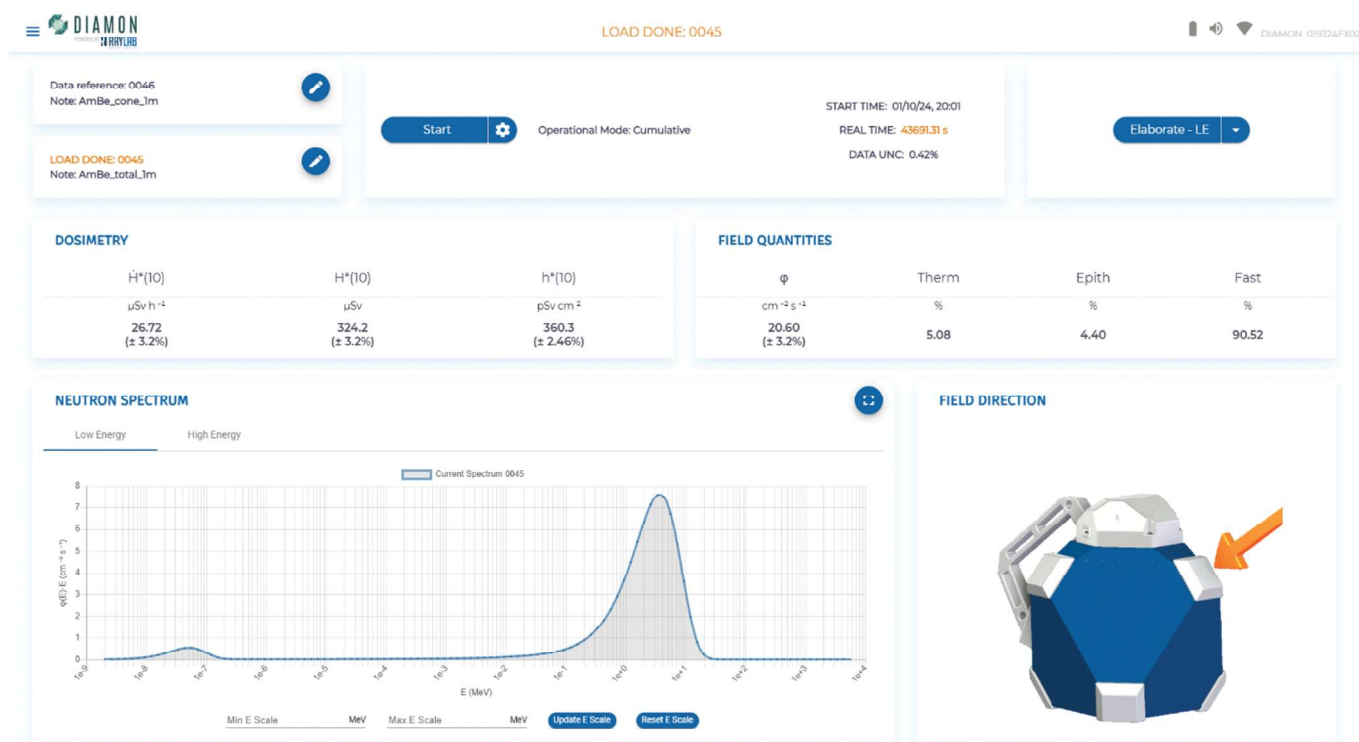
Podobně jako Else Nuclear, i Raylab umožňuje náročnějším uživatelům dokoupit samostatný dekonvoluční software (UNCLE), s jehož pomocí lze zpracovávat data offline, a třeba i z jiných měřidel.

Příjemným doplňkem je malý displej integrovaný v rukojeti detektoru, který v reálném čase zobrazuje dozimetrické veličiny vypočítané z naměřeného spektra. Měřidlo tak lze velmi snadno používat i pro účely radiační ochrany.

Když jsme se loni v laboratoři metrologie neutronů v ČMI rozhodli pro nákup nového spektrometrického měřidla, padla volba právě na Raylab DIAMON.

Scintilační neutronové detektory

V některých aplikacích je spíše než vysoké energetické rozlišení požadována vysoká detekční účinnost či nižší pořizovací cena. Příkladem je oblast detektorů půdní vlhkosti založených na měření albedo neutronů (neutronů kosmického záření moderovaných a rozptýlených v půdě). Tyto detektory jsou rozmisťovány ve venkovním prostředí a mají detekovat rozptýlené neutrony z ploch o velikosti jednotek až desítek hektarů. Vhodným materiálem pro konstrukci takovýchto detektorů jsou plastické scintilátory s neutronovým konvertorem.



Obr. 11: Analyzační software je přístupný přes webové rozhraní a nevyžaduje žádnou instalaci a přitom poskytuje všechny potřebné informace

Cílem evropského výzkumného projektu SoMMet je harmonizace tohoto typu měřidel a jejich provázání s dalšími metodami detekce půdní vlhkosti na lokální (vlhkoměry) i globální (satelitní měření) úrovni. ČMI je jedním z členů výzkumného konsorcia a v rámci projektu byl v laboratoři metrologie neutronů metrologicky charakterizován italský detektor Finapp.

Plastické scintilační detektory jsou poměrně levné a lze je vyrábět i ve větších objemech. Nicméně jsou velmi citlivé i na záření gama. Aby bylo možné odlišit neutrony (respektive nabitá jádra vznikající v neutronových konvertorech) od fotonů, je potřeba celý detektor odstínit vrstvou olova a složku pocházející od záření gama tak zcela eliminovat. Druhá možnost se otevřela s příchodem rychlých digitálních analyzátorů v posledních dvou desetících let. Výsledný elektrický impuls z připojeného fotonásobiče má totiž v obou případech odlišný tvar, takže na základě analýzy tvaru pulsu je možné tyto dvě složky identifikovat a v případě potřeby od sebe oddělit. Detektor tak může sloužit zároveň jako neutronový detektor i jako detektor záření gama.

Podobně jako proporcionální čítač plněný ^3He i scintilační detektor s LiF konvertorem je citlivý primárně na tepelné neutrony, a spektrometrických vlastností je dosaženo až použitím kombinace moderátorů. Zmiňovaný Finapp sice tyto spektrometrické vlastnosti nemá, nicméně dokáže rozlišovat druhy dopadajících částic a je využíván pro zajímavou aplikaci, proto jej krátce zmíníme.

Finapp

Italský Finapp není klasickým neutronovým detektorem, jedná se o komplexní řešení pro monitorování půdní vlhkosti [15]. Kromě neutronové detekční části je přístroj vybaven

solárním panelem, baterií, GPS, datovým 4G modemem, SD kartou pro ukládání dat. Kompletní sestava je zobrazena na obr. 12.

Sběr dat probíhá automaticky, v přednastaveném intervalu. Data jsou následně mobilním signálem odeslána na server Finappu, kde jsou automaticky zpracována a výsledek je zobrazen na webové stránce či odeslán zpět na klientskou stanic. V případě ztráty mobilního signálu detektor data ukládá interně a odešle je, jakmile je spojení obnoveno. Uživatel ve většině případů nedostává informace o měřených četnostech neutronů, fotonů a mionů, ale již výslednou informaci o půdní vlhkosti, která je odvozena z těchto naměřených dat. Intenzita neutronového toku je úměrná jak intenzitě dopadajícího kosmického záření, tak množství vody v okolní půdě, zatímco intenzita gama záření a četnosti mionů je úměrná intenzitě kosmického záření.



Obr. 12: Sonda Finapp umístěná v terénu

Základem detekční části je sendvičový scintilátor o rozměrech 17,5 x 17,5 cm a tloušťce 5 cm, skládající se z několika vrstev plastického scintilátoru Eljen EJ-280 prokládaného fóliemi EJ-426 citlivými na tepelné neutrony. EJ-426 obsahuje částičky fluoridu lithia ${}^6\text{LiF}$ a sulfidu zinečnatého ZnS:Ag . Tepelný neutron je zachycen ${}^6\text{Li}$ a dojde k uvolnění částice alfa a tritonu. Ty jsou detekovány sulfidem zinečnatým za vzniku fotonů se střední vlnovou délkou 450 nm. V sousedních vrstvách scintilátoru EJ-280 je pak toto modré světlo absorbováno a vyzařeno s delší vlnovou délkou. Tyto fotony jsou následně detekovány připojeným fotonásobičem a vzniklý elektrický impuls je zpracováván vyčítací elektronikou.



Obr. 13: Čtvercový scintilační detektor a fotonásobič v zeleném plastovém obalu tvoří jádro sondy Finapp.

V rámci projektu SoMMet byl v ČMI vytvořen počítačový Monte-Carlo model detektoru, který byl pomocí celé řady měření v referenčních neutronových polích validován. Avšak pomocí těchto modelů lze činit teoretické předpovědi pouze ohledně měřených četností pulzů; simulace tvaru pulzu je příliš komplexní problém a standardními kódy pro transport částic ji nelze řešit.

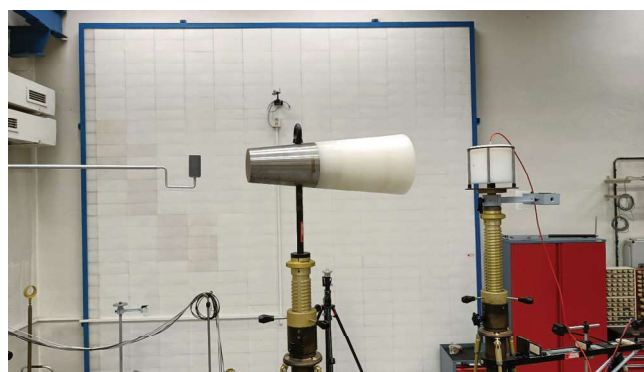
Závěr

Metrologie neutronů se po dlouhou dobu spoléhala na osvědčené metody a detekční sestavy. Proporcionální detektory plněné ${}^3\text{He}$ a sada polyethylenových koulí byly výbavou, bez které nebyla spektrometrie neutronů myslitelná. Toto paradigma se ale v posledních letech mění a na scéně

se objevují nové přístroje vybavené polovodičovými detektory, které v jednom kompaktním celku snoubí měřicí schopnosti klasického Bonnerova spektrometru a měřidla prostorového dávkového příkonu. Další výraznou inovací je použití scintilačních detektorů pro měření neutronů ve směsných polích, kde rychlé digitální analyzátory umožnily separaci neutronové a fotonové složky na základě analýzy tvaru pulzů. Tato inovativní měřidla nalézají uplatnění v celé řadě oblastí – od zemědělství přes jadernou energetiku až po zdravotnictví.

Příloha 1 – testování detektorů v laboratoři ČMI

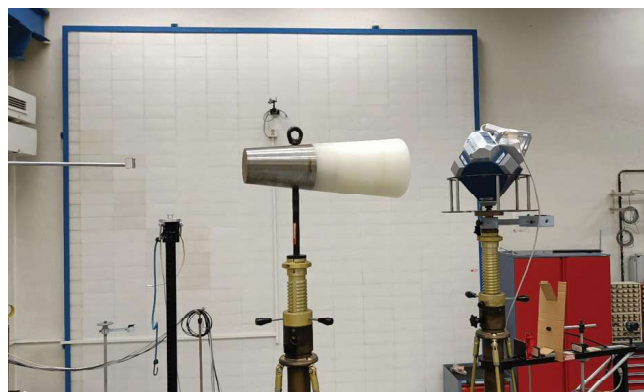
Pro názornost přikládáme fotografie popisovaných detektorů z měření v laboratoři neutronů ČMI.



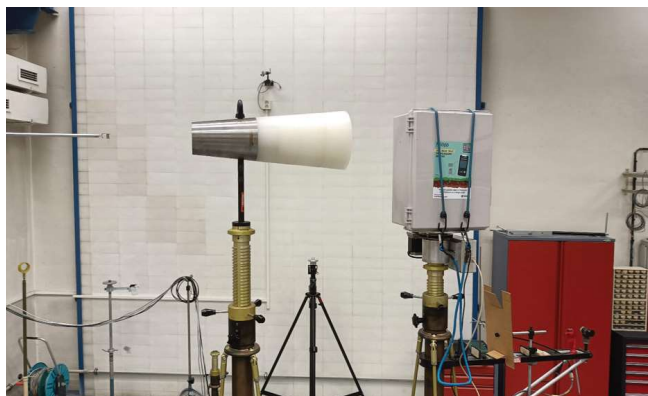
Obr. 14: DETEC NNS



Obr. 15: ELSE Nuclear SP2



Obr. 16: Raylab DIAMON



Obr. 17: Finapp

Literatura

1. R.L. Bramblett, R.I. Ewing, T.W. Bonner, Nucl. Instr. and Meth. 9 (1960) 1.
2. J.C. Liu, et al., Radiat. Prot. Dosim. 30 (1990) 169.
3. A.V. Alevra, et al., Radiat. Prot. Dosim. 23 (1988) 293.
4. P.M. Thomas, et al., Nucl. Instr. and Meth. 224 (1984) 225.
5. D. A. Shea, D. Morgan, *The Helium-3 Shortage: Supply, Demand, and Options for Congress*, 2010
6. M. Reginatto, *The "few channels" unfolding programs in the UMG package*, UMG package version 3.3, PTB Braunschweig (2004).
7. McElroy W. N., Berg S., Crockett T., Hawkins R. O., *A Computer-Automated Iterative Method For Neutron Flux Spectra Determination By Foil Activation*, Technical Report No. AFWL-TR-67-41, Vol I, (1967)
8. D'Agostini G., *Improved iterative Bayesian unfolding*, arXiv:1010.0632, (2010)
9. Höcker A., Kartvelishvili V., *SVD Approach to Data Unfolding*, LAL 95-55, MC-TH-95/15, arXiv:hep-ph/9509307, (1995)
10. J. Dubeau, et al., *A neutron spectrometer using nested moderators*, Radiation Protection Dosimetry, Volume 150, Issue 2, June 2012, Pages 217–222, <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr381>
11. <https://www.detec-rad.com>
12. <http://www.elsenuclear.com/en/sp2>
13. <https://www.raylab.solutions>
14. A. Pola, et al., *DIAMON: A portable, real-time and direction-aware neutron spectrometer for field characterization and dosimetry*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A (2020), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164078>
15. <https://www.finapptech.com/en/finapp-probe>



SPEKTROMETRIE RENTGENOVÝCH SVAZKŮ

**Ing. Jaroslav Šolc, Ph.D., Mgr. Jana Šmoldasová,
Ing. Vladimír Sochor, Ing. Ludmila Štemberková**

Český metrologický institut

Abstrakt

Energetická distribuce fluence fotonů umožňuje stanovit základní parametry svazků rentgenového záření, jako je polotloušťka, střední energie nebo napětí na rentgenové trubici, v níž je záření generováno. Znalost energetického spektra fluence dále umožňuje přechod od veličiny kerma ve vzduchu k operačním veličinám $H_p(0,07)$, $H_p(3)$, $H_p(10)$ a $H^*(10)$ a je vyžadována aktualizovaným doporučením normy ISO 4037:2019, která definuje podmínky pro referenční svazky používané pro kalibraci dozimetrů v uvedených veličinách radiační ochrany. V rámci rozvoje metrologie ionizujícího záření v dozimetrické laboratoři ČMI OI Praha byl zaveden postup stanovení energetické distribuce fotonů přímým měřením v rentgenových svazcích polovodičovým detektorem X-123CdTe v celém rozsahu napětí na trubici realizovaném v ČMI. Standardní možnosti tohoto kompaktního spektrometru byly podstatným způsobem vylepšeny: přidání dodatečného čelního stínění umožnilo měření svazků s maximální energií fotonů 300 keV; doplnění bočního a zadního stínění detektoru potlačilo příspěvek parazitního

rozptýleného záření, a zaměřovací přípravek ve spojení s pixelovým detektorem umožnil přesné zaměření osy spektrometru na ohnisko rentgenky. Detailní Monte Carlo model detektoru a kolimačního systému byl využit pro výpočet matice odezvy detektoru potřebné k dekonvoluci energetické distribuce fluence primárních fotonů. Energetická kalibrace detektoru je prováděna pomocí referenčních radionuklidových zdrojů ^{241}Am , ^{57}Co a ^{133}Ba z produkce ČMI. Snadný transport a sestavení spektrometrického systému umožňuje realizovat spektrometrii rentgenových svazků i mimo prostory ČMI, např. na radiologických pracovištích v klinických zařízeních.

Klíčová slova: rentgenové záření, spektrometrie, fluence, Monte Carlo

1. Úvod

Český metrologický institut (ČMI) se rozhodl v roce 2018 zakoupit spektrometr s kadmium-telluridovým (CdTe) senzorem v reakci na doporučení ISO 4037:2019-1 ed. 2 [1], které definuje charakteristiky a metody generování referenčních svazků rentgenového záření a záření gama určené pro kalibraci dozimetrů pro radiační ochranu. Pokud rentgenové svazky řady N, W, H a L realizované na daném pracovišti přesně nesplňují požadavky normy, nelze jednoduše převzít jejich parametry uvedené v normě, ale norma vyžaduje

spektrometrické stanovení jejich energetické distribuce fluence fotonů. Zvládnutí metody rentgenové spektrometrie umožňuje následně stanovit energetické distribuce primárních fotonů i v libovolných jiných kvalitách rentgenového záření. Přesná znalost energetického spektra fluence dále umožňuje přechod od veličiny kerma ve vzduchu k operačním veličinám $H_p(0,07)$, $H_p(3)$, $H_p(10)$ a $H^*(10)$.

Rentgenová spektra lze v současnosti již poměrně přesně stanovit analyticky. Slouží k tomu například obecné programy umožňující modelování transportu ionizujícího záření prostředím a interakce v něm, jako je MCNP [2], nebo přímo k tomu určené programy, jako je SpekPy [3]. K výpočtu spektra je nutné definovat napětí na trubici, materiál anody, úhel sklonu anody, materiál a tloušťku vnitřní filtrace, typicky se jedná o výstupní okénko rentgenové trubice, materiál a tloušťku dodatečné filtrace, která slouží k úpravě tvaru rentgenového spektra a typicky jsou tyto parametry definované v příslušné normě, a vzdálenost od ohniska. Pro získání orientační informace o tvaru spektra poslouží tyto programy výborně. Obecně však platí, že zejména u napětí na trubici a filtrů jsou často známy jen nominální hodnoty. Proto pokud je požadována přesná znalost tvaru spektra fluence fotonů, což se například týká kalibračních laboratoří, jakou je ČMI, je nutné spektrum stanovit experimentálně.

Spektrometrie pomocí CdTe detektoru byla zvolena proto, že tyto spektrometry jsou relativně levné a snadno použitelné a je možné zvolit model detektoru a jeho senzoru s parametry optimálními pro fotonovou spektrometrii v požadovaném rozsahu napětí na trubici do 300 kV. V České republice je tento typ detektoru používán ke spektrometrii rentgenových svazků také na pracovišti Státního úřadu radiční ochrany (SÚRO) [4]. Podrobnosti o CdTe detektorech a rentgenové spektrometrii jsou uvedeny např. v [5].

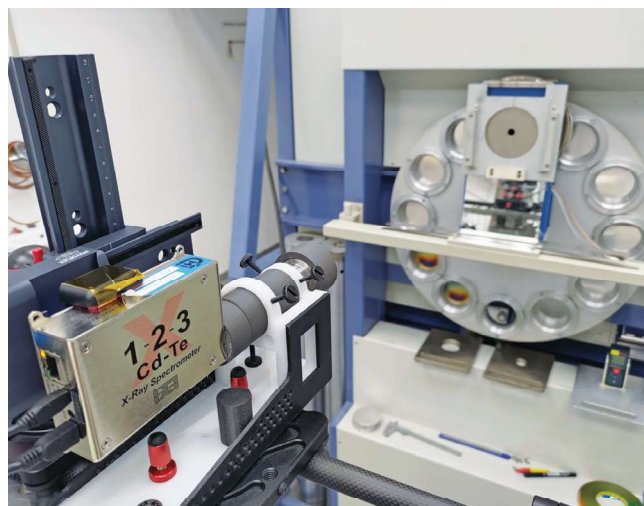
V literatuře je popsáno několik metod stanovení spektra fluence fotonů z naměřeného detektorového spektra. Patří mezi ně metoda stripping [6], algoritmus opravy na únikové píky [7], metoda nejmenších čtverců [8], principy maximální entropie [9] nebo iterační metody [10]. Společným požadavkem je znalost matice odezvy detektoru. Následně se způsob aplikace odezvy matice na naměřené spektrum liší dle metody.

2. Spektrometrie rentgenových svazků

2.1 Detektor

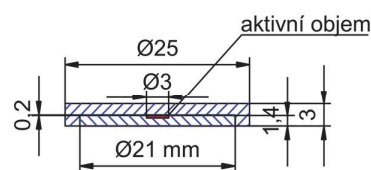
Spektrometrie rentgenového záření je v ČMI realizována komerčním detektorem X-123CdTe (AMPTEK, Inc., USA) [11] (obr. 1). Jedná se o kompaktní a snadno použitelný přenosný polovodičový detektor o rozměrech 7 cm × 10 cm × 2,5 cm (šířka, délka, výška) s nastavcem délky 3,8 cm, ve kterém je umístěn senzor, a s dodatečným kolimátorem se stíněním. X-123CdTe se skládá z CdTe senzoru, předzesilovače, digitálního pulzního procesoru a vícekanałového analyzátoru a napájecího zdroje. Senzor o rozměrech 3 mm × 3 mm × 1 mm (šířka, výška, tloušťka) je připevněn k dvoustupňovému Peltierově termoelektrickému chladiči, který snižuje teplotu snímače na přibližně -60 °C, čímž dojde k potlačení tepelného šumu a umožní to zvýšit napětí [12]. Vstupní okénko je vyrobeno z berylia tloušťky

100 μm. Přední a zadní elektrody jsou realizovány tenkými vrstvami india a platiny tvořícími Schottkyho a Ohmův kontakt [11], [12]. Detektor lze propojit s měřicím počítačem napřímo pomocí USB nebo ethernetového kabelu. V ČMI je používáno USB připojení, protože se ukázalo být spolehlivější. Pro nastavení detektoru, k akvizici spekter a k vyhodnocení základních parametrů spekter je používán software DppMCA [13] od výrobce detektoru. Detektor je spolehlivý a po zapnutí je okamžitě připraven k měření.



Obr. 1: Detektor X-123CdTe ve svazku rentgenového záření v ČMI.

Energetická kalibrace detektoru je prováděna pomocí referenčních radionuklidových zdrojů ^{241}Am , ^{57}Co a ^{133}Ba typu EG z produkce ČMI (obr. 2). Jedná se o téměř nehmotný a téměř bodový zdroj, který je tak velmi dobře prostorově definován.



Obr. 2: Výkres a fotografie radionuklidového fotonového zdroje typu EG z produkce ČMI, který je používán pro kalibraci spektrometru. Rozměry jsou v mm.

Energetickou kalibraci detektoru je třeba realizovat při obdobné celkové četnosti impulsů, jaká je dosažena při měření rentgenových spekter (viz kapitola 2.10), protože mírně závisí na četnosti impulsů. Radionuklidový zdroj o obvyklé aktivitě vyšší stovky kBq je proto umístěn těsně u detektoru, aby bylo dosaženo požadované vysoké četnosti impulsů (obr. 3).

2.2 Kolimátor a stínění

Kolimátor je připevněn před detektor a jeho účelem je regulace množství fotonů, které dopadnou na senzor. Rentgenový svazek dosahuje vysokého příkonu fluence fotonů

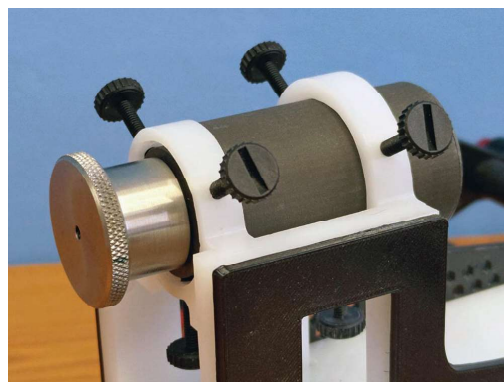
(počet částic na jednotku plochy za sekundu) a zároveň se detekovaný počet impulzů musí pohybovat v určitém intervalu, aby nedošlo k zahlcení detektoru (viz kapitola 2.10). Z těchto důvodů je pro uvedenou aplikaci kolimátor nezbytný. Originální ocelový kolimátor byl dodán výrobcem detektoru. Počet fotonů dopadajících na senzor je omezen vložením wolframových disků na čelo kolimátoru (**obr. 4 vpravo**). Disky dodané výrobcem detektoru mají otvory s nominálním průměrem od 50 μm do 2 mm. Nejvíce využívaný je disk s otvorem o průměru 200 μm .



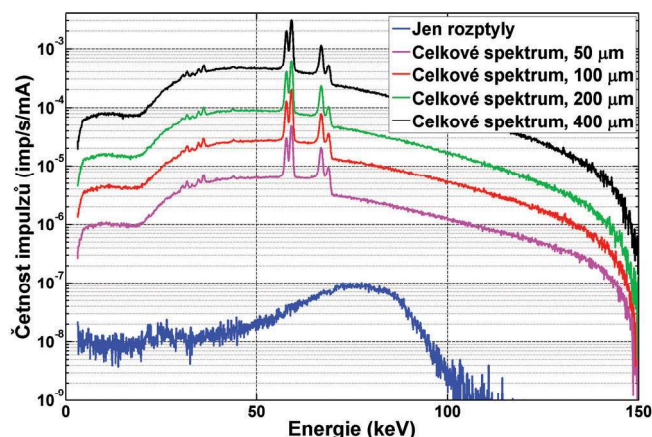
Obr. 4: Původní ocelový kolimátor se sadou wolframových kolimačních disků [14].

Původní ocelový kolimátor (**obr. 4 vlevo**) dodaný výrobcem detektoru je vhodný pro měření rentgenových spekter s napětím na trubici přibližně do 75 kV. U spekter generovaných vyšším napětím významně roste pravděpodobnost rozptylu fotonů na těle detektoru nebo na okolních objektech a následně dochází k detekci těchto nežádoucích fotonů [14]. U vyšších napětí může počet impulzů od rozptýlených fotonů převýšit počet impulzů od primárních fotonů, přičemž cílem ČMI je umět měřit spektra generovaná napětím až 300 kV. Parazitní signál od rozptýlených fotonů je proto nutné zcela odstranit. Snaha o odečet parazitního signálu měřením s tlustým diskem bez otvoru vloženým na čelo kolimátoru místo kolimačních disků ani modelování pomocí počítačových simulací nevedla k uspokojivým výsledkům. Nakonec bylo navrženo a vyrobeno kompletní stínění detektoru upevněné zvenku na původní ocelový kolimátor (**obr. 5**).

První část stínění je umístěna před ocelový kolimátor a je vyrobena z wolframu tloušťky 6 mm s průměrem středového otvoru 3 mm. Pokud je měřeno spektrum generované napětím vyšším než 150 kV, potom je na toto stínění nasazeno dodatečné stínění z olova o tloušťce 29 mm a průměru 46 mm. Podél osy tohoto stínění je otvor průměru 3,2 mm. Teoretický poměr počtu 300 keV fotonů procházejících otvory a materiálem obou předních stínění dovnitř ocelového kolimátoru je přibližně 7000:1. Jedná se tedy o dostatečné odstínění. Druhá část stínění je připevněna na ocelový kolimátor ze strany a je tvořena kombinací olova a wolframu celkové tloušťky mezi 3 a 6 mm. Veškeré stínění je zvenku i zevnitř chráněno plastovým krytem vytištěným na 3D tiskárně. Tím je dosaženo téměř úplného odstínění detektoru zepředu, ze strany i zezadu (**obr. 6**).



Obr. 5: Vnější stínění detektoru. Jádru je tvořeno kombinací olova a wolframu a je vloženo do pouzdra vytištěného na 3D tiskárně. Čelo je vyrobeno z wolframu.

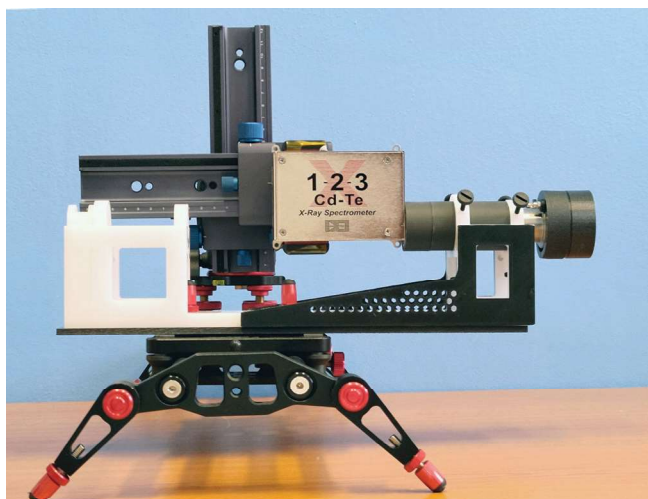
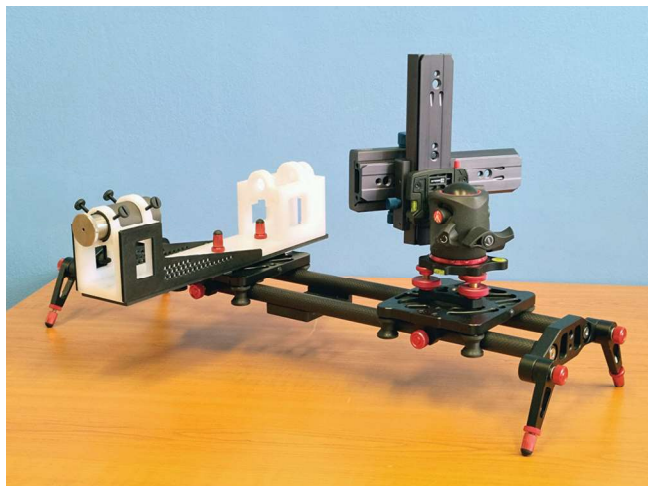


Obr. 6: Detektorové spektrum RQR10 (150 kV) naměřené s kolimačními disky s otvorem různých průměrů a s plným diskem bez otvoru [16]. Spektrum měřené s plným diskem (modrá) je tvořeno pouze příspěvkem rozptýlených fotonů a jeho četnosti jsou o několik řádů nižší než spektra získaná s disky s otvorem, což svědčí o dostatečném odstínění detektoru.

2.3 Geometrie měření

Měřicí systém kromě detektoru s kolimátorem sestává ze stativu, který je použit v případě, kdy v místě měření není možnost připevnění na posuvnou lavici, a fotografického slideru se dvěma na sobě nezávislými plošinami pohyblivými po kolejnici v horizontálním směru kolmo na osu rentgenového svazku (**obr. 7**). Jedna pohyblivá plošina umožňuje pouze hrubé polohování a drží plošinu s kolimátorem. Druhá je plynule pohyblivá a drží stativovou hlavu s křížovými

makrosáňkami (Castel Cross-Q, Novoflex), na kterých je připevněn spektrometr. Makrosáňky umožňují plynulý a jemný ruční posuv detektoru v horizontálním směru a ve směru podél osy rentgenového svazku. Systém je snadno přenosný a složitelný. Přípravu nastavení včetně zaměření kolimátoru (kapitola 2.4) lze provést za méně než jednu hodinu. Demontáž systému trvá cca 10 min.



Obr. 7: Spektrometrická sestava ČMI [16].

2.4 Zaměření detektoru na ohnisko rentgenky

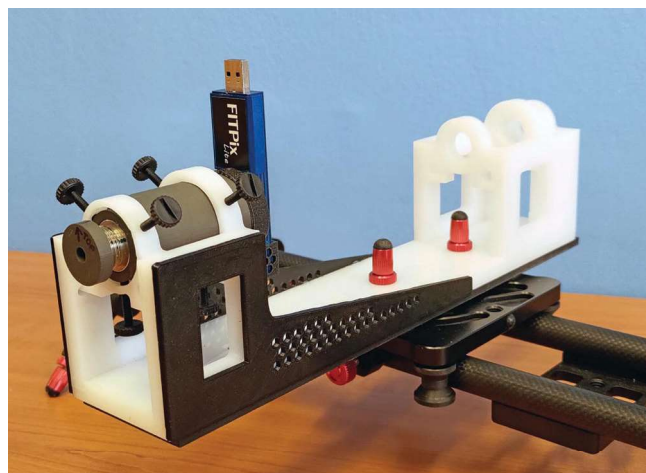
U měření rentgenových spekter je klíčové přesné zaměření kolimátoru tak, aby ohnisko rentgenky (průměr se



Obr. 8: Přípravek pro přesné zaměření osy kolimátoru na ohnisko rentgenky (vlevo). Otvor v podstavě přípravku je téměř nezatelný (vpravo). [16]

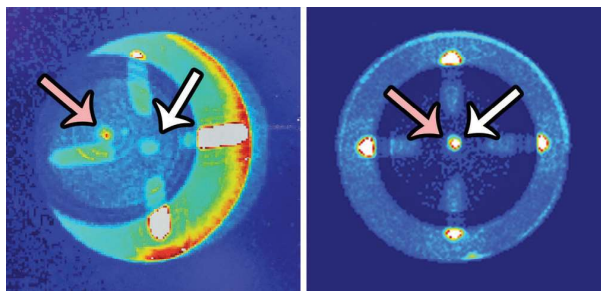
pohybuje od 1 mm do několika mm), otvor kolimačního disku a střed senzoru detektoru ležely na jedné přímce. Při větším odchýlení může dojít k deformaci tvaru detektorového spektra a vypočítané fluenční spektrum bude nesprávné. Hrubé nastavení lze provést pomocí laserového ukazovátka, které je však v mnoha případech nedostatečné. K přesnějšímu zaměření osy kolimátoru je proto využito speciálního válcového přípravku s malým otvorem průměru přibližně 150 μm v každé z obou podstav vzdálených od sebe 8 cm (obr. 8).

Přípravek vytištěný na 3D tiskárně je vložen dovnitř těla ocelového kolimátoru. Těsně za něj je místo spektrometru umístěn pixelový detektor FITPix Lite [17] (256x256 pixelů, velikost pixelu 55 μm , obr. 9).



Obr. 9: Geometrie pro přesné zaměření osy kolimátoru na ohnisko rentgenky pomocí přípravku s malými otvory a projekcí těchto otvorů na pixelový detektor FITPix Lite. [16]

Rentgenový svazek procházející podstavami vytvoří v pixelovém detektoru projekci obou otvorů. Osa kolimátoru míří na ohnisko, pokud jsou oba otvory v zákrytu (obr. 10). Správnost nastavení lze zkontrolovat projekcí otvoru jednoho kolimačního disku, kdy zaměření kolimátoru je v pořádku, pokud je otvor kolimačního disku zobrazen ve stejných pixelech jako projekce zákrytu otvorů přípravku. Nejistota zaměření osy kolimátoru na ohnisko je 0,2°, tzn. nejistota je 3,5 mm pro vzdálenost detektoru od ohniska 100 cm.

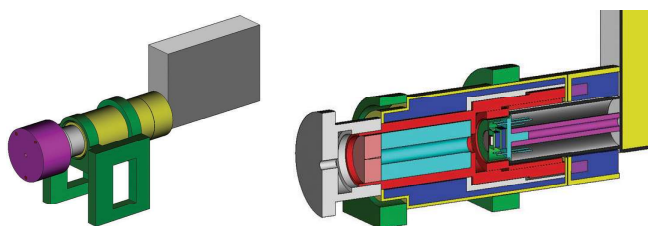


Obr. 10: Projekce dvou otvorů v přípravku pro přesné zaměření osy kolimátoru získaná pixelovým detektorem: vlevo – osa kolimátoru je odchýlena od ohniska rentgenky, projekce otvorů není v zákrytu; vpravo – kolimátor je zaměřený na ohnisko, projekce otvorů je v zákrytu. [16]

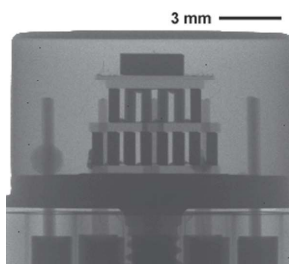
Po zaměření osy kolimátoru na ohnisko je do přední části ocelového kolimátoru vložen kolimační disk s vhodným průměrem otvoru a na čelo je připevněno čelní wolframové stínění. Dovnitř zadní části ocelového kolimátoru je jemně zasunut nástavec detektoru se senzorem. Spektrometrický systém je tak připraven na měření.

2.5 Výpočty metodou Monte Carlo

Počítačové simulace metodou Monte Carlo jsou nezbytné za účelem výpočtu matice odezvy detektoru (viz dále), kterou nelze stanovit měřením. Výpočetní model detektoru a kolimátoru (**obr. 11**) byl vytvořen v prostředí software MCNP, který slouží k modelování transportu a interakcí ionizujícího záření s okolním prostředím [2]. Vnitřní struktura detektoru byla charakterizována prozářením rentgenovým svazkem a projekcí na pixelový detektor FITPix Lite (**obr. 12**). Správnost modelu byla ověřena porovnáním detekčních účinností vypočítaných v programu MCNP a naměřených pomocí referenčních radionuklidových zdrojů fotonového záření typu EG (**obr. 2**) o známé aktivitě a energii emitovaných fotonů.



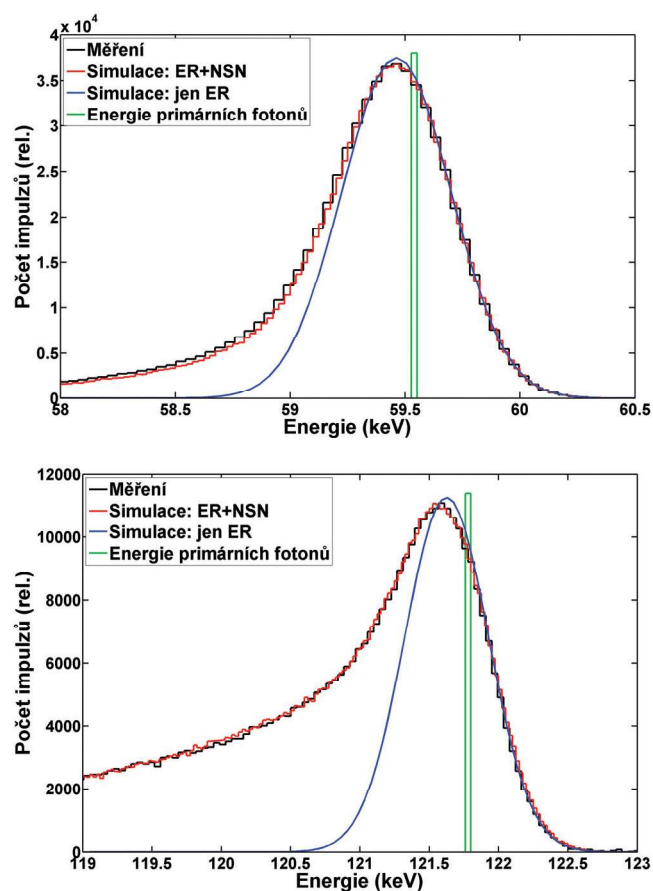
Obr. 11: Vizualizace výpočetního modelu detektoru s kolimátorem. Barvy rozlišují materiály.



Obr. 12: Radiogram blízkého okolí CdTe senzoru detektoru X-123CdTe získaný pixelovým detektorem. Senzor je tmavý obdélník v horní části obrázku. [15]

2.6 Sběr a zpracování náboje v detektoru

Energie zanechaná částicí v senzoru se může lišit od energie, kterou detektor ve výsledku zaznamená. Jedná se zejména o vliv energetického rozlišení detektoru a neúplný sběr náboje vlivem rekombinace v senzoru, které je nutné zohlednit v odezvách detektoru získaných ideální počítačovou simulací. Energetické rozlišení detektoru je způsobeno elektronickým šumem a statistikou počtu sebraného náboje. Neúplný sběr náboje je způsoben rekombinací náboje v průběhu driftu senzorem k elektrodám v důsledku vysokého počtu pastí v CdTe krystalu. Výsledkem je deformace tvaru měřeného spektra. Oba jevy jsou popsány rovnicemi, jejichž volné parametry byly nalezeny prokladem tvaru píků úplné absorpce ve změřených spektrech radionuklidových zdrojů (**obr. 13**).

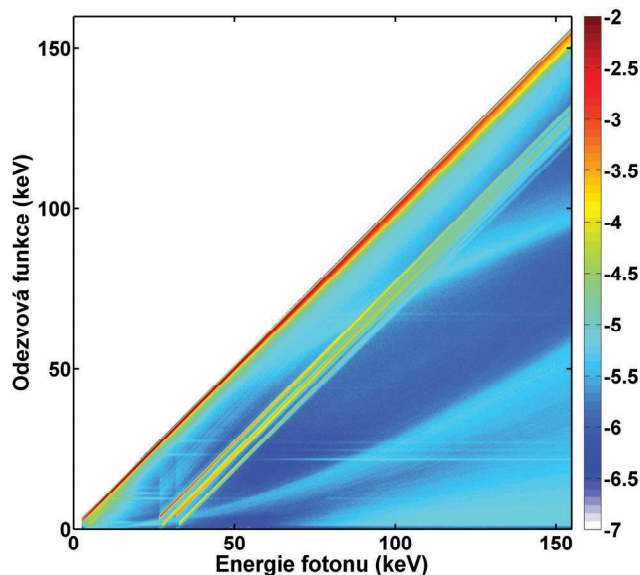


Obr. 13: Příklad prokládání naměřeného píku úplné absorpce (černá) o energii 59.5 keV (radionuklid ^{241}Am ; nahoře) a 121.7 keV (^{152}Eu ; dole), pouze funkcí energetického rozlišení detektoru (ER, modrá) a kombinovanou funkcí energetického rozlišení a neúplného sběru náboje (ER+NSN, červená). Zelená křivka znázorňuje energii primárního fotonu. Patrný je posun maxima píku k nižším energiím. [14]

2.7 Odezvová matice detektoru

Matice odezvy detektoru je seznam detektorových spekter, tzv. odezvových funkcí, získaných počítačovými výpočty v programu MCNP pro různé energie primárních monoenergetických fotonů (**obr. 14**). Odezvové funkce byly spočteny s krokem 0.125 keV pro monoenergetické fotony do 27 keV, s krokem 0.25 keV (od 27 keV

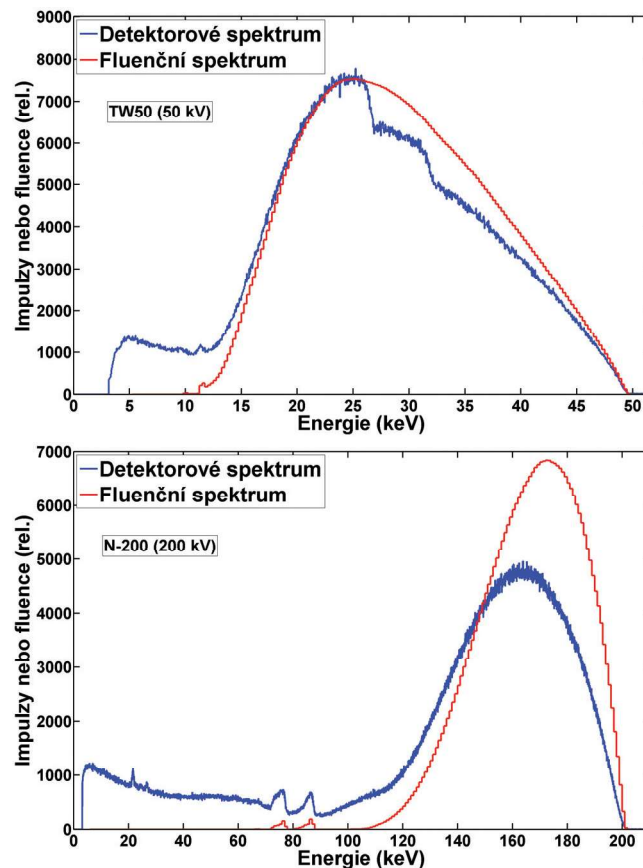
do 155 keV) nebo s krokem 1.0 keV (od 155 keV do 311 keV), a pro kolimační disky s různými průměry otvorů. Na vypočítané odezvy byly aplikovány opravy na sběr a zpracování náboje v detektoru, aby odpovídaly odezvě skutečného detektoru.



Obr. 14: Odezvová matice detektoru X-123CdTe použitelná pro spektra s maximální energií fotonů 150 keV a pro kolimační disky s nejmenším průměrem otvoru 200 μm . Barevná stupnice zobrazuje logaritmus hodnoty relativní odezvy.

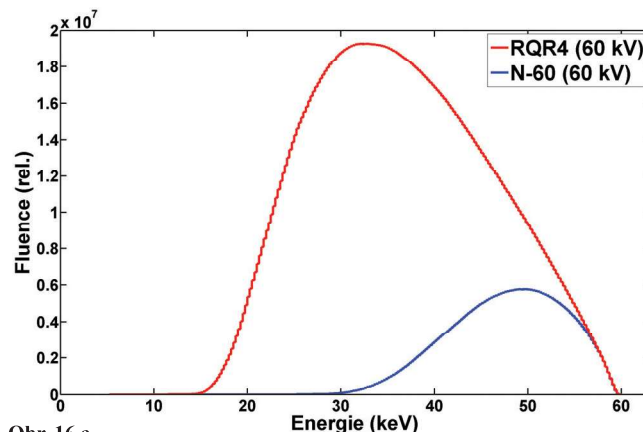
2.8 Výpočet energetické distribuce fluence primárních fotonů

Aplikací všech dílčích kroků uvedených v předchozích kapitolách je nyní možné přistoupit k výpočtu energetické distribuce fluence primárních fotonů v rentgenovém svazku. S využitím vypočítané matice odezvy detektoru lze stanovit, jaký tvar má primární spektrum fluence fotonů, když detektorové spektrum vypadá tak, jak bylo detektorem X-123CdTe naměřeno. Detektorové spektrum je totiž ovlivněno například detekční účinností senzoru, kdy senzor detekuje všechny fotony nízkých energií ale jen malou část fotonů vyšších energií. Dále obsahuje i impulzy od fotonů zpětně rozptýlených na vnitřní struktuře detektoru nebo impulzy od odražených elektronů, které v senzoru zanechaly jen část energie a detekovaná energie tedy neodpovídá energii primárního fotonu. Tyto všechny jevy způsobují, že tvar detektorového spektra se liší od tvaru spektra fluence primárních fotonů a je nutné provést korekci. Za tímto účelem je použita metoda dekonvoluce s využitím programu GRAVEL [18], který načte odezвовou matici a naměřené spektrum a iterativní metodou stanoví nejpravděpodobnější tvar primárního fluenčního spektra. Nakonec jsou v takto nalezeném spektru vyhlazeny fluktuace způsobené dekonvolučním algoritmem a statistikou impulzů v naměřeném spektru. Reprezentativní příklad porovnání naměřeného detektorového spektra a vypočítaného fluenčního spektra je uveden na obr. 15.

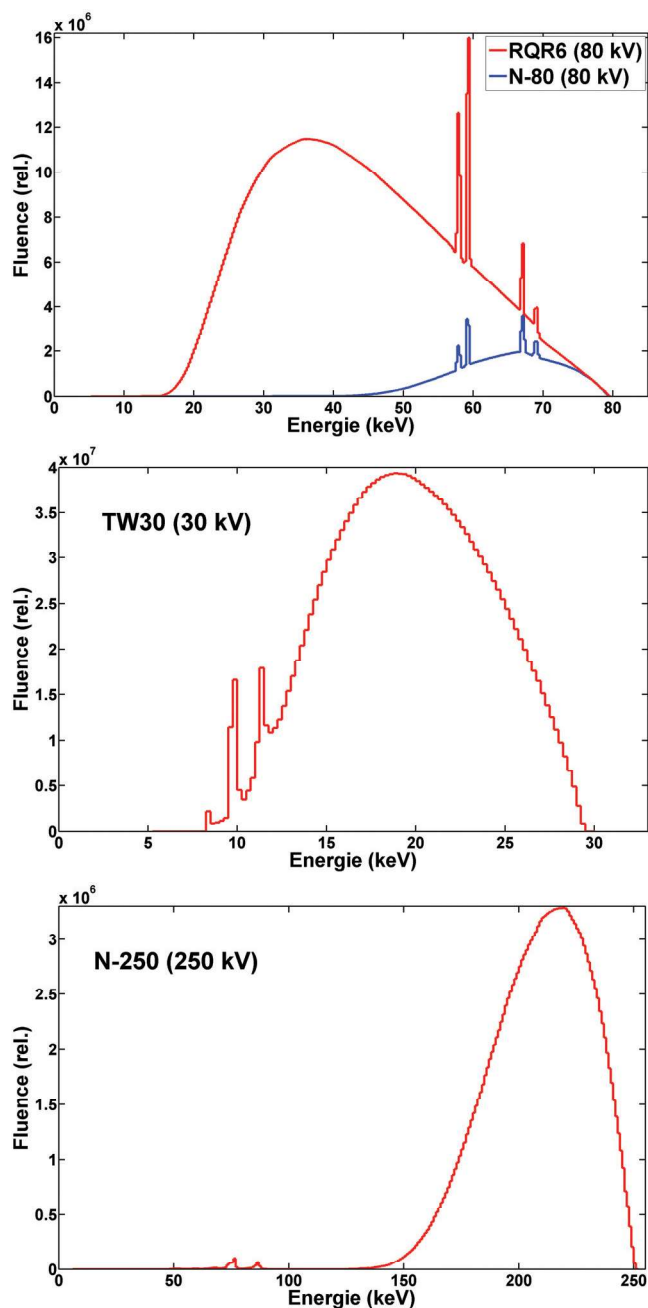


Obr. 15: Příklad porovnání naměřeného detektorového spektra (modrá) a vypočítaného spektra fluence primárních fotonů (červená) pro kvalitu TW50 (50 kV; vlevo) a N-200 (200 kV; vpravo). Plochy detektorového a fluenčního spektra jsou stejné.

Další příklady fluenčních spekter referenčních rentgenových svazků ČMI jsou uvedeny na obr. 16 a, b, c, d. Kromě hladkého spojitého spektra tvořeného fotony brzdného záření se v některých spektrech objevují i charakteristické K nebo L čáry wolframu, které jsou tvořeny fotony s diskrétními hodnotami energie odpovídající energii vyzářené při deexcitaci elektronů v atomovém obalu wolframu v anodě rentgenky. Z fluenčního spektra lze následně vypočítat libovolné parametry spektra dle potřeby. Příkladem mohou být průměrné konverzní koeficienty na operační veličiny, jejichž převodní tabulka pro monoenergetické fotony je uvedena v příslušných normách (např. [19]).



Obr. 16 a



Obr. 16 b, c, d: Příklady naměřených fluenčních spekter primárních fotonů ve svazcích různých kvalit rentgenového záření - různá napětí na trubici a různé filtrace spektra (RQR4: 2,68 mm Al, N-60: 4 mm Al + 0,6 mm Cu, RQR6: 2,9 mm Al, N-80: 4 mm Al + 2 mm Cu, TW30: 0,5 mm Al, N-250: 4 mm Al + 2 mm Sn + 3 mm Pb).

2.9 Validace

Ověření správnosti postupu dekonvoluce fluenčního spektra bylo provedeno porovnáním naměřených polotlouštěk (HVL, half-value layer) kvalit CCRI a RQR s polotlouškami vypočítanými z dekonvolovaných fluenčních spekter. HVL je definována jako tloušťka materiálu, která způsobí pokles dozimetrické veličiny příkon kermu ve vzduchu na 50 % původní hodnoty a závisí na energetické distribuci fotonů ve spektru. Experimentálně je stanovena interpolací kermového příkonu naměřeného za materiálem různé tloušťky. Z fluenčních spekter je HVL vypočítána podle matematického vzorce. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1.

Kromě kvality RQR2 bylo dosaženo výborné shody HVL, která se pohybuje v rozmezí $\pm 1,3$ %, což je na úrovni nejistoty stanovení HVL oběma metodami.

Tab. 1: Porovnání polotloušťky spekter kvalit RQR a CCRI stanovené měřením kermu ve vzduchu a výpočtem z naměřeného spektra fluence fotonů.

Kvalita	$U^{(1)}$ (kV)	Filtrace ⁽²⁾ (mm)	$E_{stř}^{(3)}$ (keV)	HVL _{kerma} ⁽⁴⁾	HVL _{spek} ⁽⁵⁾	Rozdíl ⁽⁶⁾
RQR2	40	2,45 (Al)	28,1	1,43 (Al)	1,38 (Al)	3,4 %
RQR3	50	2,45 (Al)	32,3	1,78 (Al)	1,76 (Al)	1,3 %
RQR4	60	2,68 (Al)	36,5	2,18 (Al)	2,19 (Al)	-0,8 %
RQR5	70	2,83 (Al)	40,3	2,58 (Al)	2,61 (Al)	-1,1 %
RQR6	80	2,90 (Al)	44,0	2,98 (Al)	3,01 (Al)	-0,8 %
RQR7	90	3,23 (Al)	47,7	3,51 (Al)	3,55 (Al)	-1,3 %
RQR8	100	3,40 (Al)	50,8	4,07 (Al)	4,04 (Al)	0,9 %
RQR9	120	3,73 (Al)	56,3	5,05 (Al)	5,04 (Al)	0,3 %
RQR10	150	4,43 (Al)	64,0	6,55 (Al)	6,59 (Al)	-0,6 %
CCRI 100	100	3,5 (Al)	50,6	4,07 (Al)	4,09 (Al)	-0,5 %
CCRI 135	135	2,25 (Al)+0,225 (Cu)	68,5	0,516 (Cu)	0,518 (Cu)	-0,4 %
CCRI 180	180	2,25 (Al)+0,5 (Cu)	85,7	1,025 (Cu)	1,03 (Cu)	-0,5 %
CCRI 250	250	2,25 (Al)+1,6 (Cu)	123,8	2,53 (Cu)	2,52 (Cu)	0,4 %

(1) Nominální napětí na rentgence;

(2) Filtrace spektra;

(3) Střední energie fluenčního spektra;

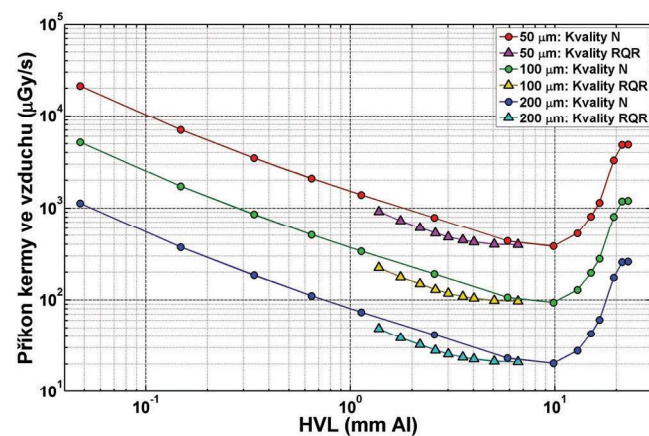
(4) HVL v mm Al nebo Cu stanovená měřením kermu ve vzduchu;

(5) HVL v mm Al nebo Cu stanovená výpočtem ze spektra fluence fotonů;

(6) Relativní rozdíl $1 - HVL_{spek}/HVL_{kerma}$.

2.10 Limity rentgenové spektrometrie ČMI

Počet detekovaných impulzů za sekundu musí být kontrolován, protože příliš vysoká četnost impulzů způsobuje koincidenční detekci více impulzů najednou, zhoršení energetického rozlišení detektoru a změnu parametrů rekombinace náboje ve výsledku vedoucí k deformaci naměřeného spektra. Optimální četnost impulzů platná pro nastavení detektoru používané



Obr. 17: Maximální příkon kermu ve vzduchu, při kterém lze spolehlivě změřit spektrum fluence fotonů, jako funkce střední energie spektra a průměru otvoru v kolimačním disku pro rentgenové svazky s úzkým (kvality N, kruhy) a širokým (kvality RQR, trojúhelníky) spektrem. Příkony kermu ve vzduchu platí pro četnost impulzů 13 000 imp/s. [16]

v ČMI je 13 000 imp/s pro spektra s píky a dvojnásobek této četnosti pro spektra bez píků. Hodnoty platí pro kontinuální režim ozařování. V případě pulzního režimu ozařování, který je častý u klinických rentgenů, je hodnota nižší úměrně celkové délce pulzů za sekundu. Z toho plyne i maximální příkon kermu ve vzduchu, při kterém lze fluenční spektrum spolehlivě změřit. Pro různé HVL a různé průměry otvoru kolimačních disků je maximální příkon kermu ve vzduchu pro četnost impulzů 13 000 imp/s uveden na **obr. 17**.

3. Závěr

Článek shrnul vybavení a metody používané ke spektrometrii rentgenových svazků generovaných napětím do 300 kV v Českém metrologickém institutu. Detaily všech aspektů spektrometrie rentgenových svazků realizované v ČMI jsou popsány v článcích [14], [15], [16], [20]. Základní požadavky na CdTe spektrometrii zahrnují pečlivé nastavení směru osy kolimátoru, stínění proti rozptýlenému záření a přesnou energetickou kalibraci detektoru. Spektrometrická sestava s CdTe detektorem X-123CdTe je snadno přenosná a umožňuje charakterizaci rentgenových svazků i mimo prostory ČMI, např. na radiologických pracovištích v klinických zařízeních.

Přístrojové vybavení a metody pro rentgenovou spektrometrii zavedené v ČMI umožňují v souladu s příslušnými normami charakterizovat kvality rentgenových svazků realizovaných v laboratoři ČMI a tím dále rozvíjet metrologii ionizujícího záření v České republice.

4. Reference

- [1] ISO 4037-1:2019(E), Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 1: Radiation characteristics and production methods, Second edition, 2019-01.
- [2] J. Ch. Werner, MCNP® User's Manual, Code Version 6.2, Los Alamos National Laboratory LA-UR-17-29981, 2017.
- [3] R. Bujila, A. Omar and G. A. Poludniowski, A validation of SpekPy: A software toolkit for modelling x-ray tube spectra, *Phys. Med.* 75 (2020) 44.
- [4] D. Kurková, L. Judas. An analytical X-ray CdTe detector response matrix for incomplete charge collection correction for photon energies up to 300keV, *Rad Phys Chem*, Vol 146, 2018, Pages 26-33, ISSN 0969-806X, DOI: 10.1016/j.radphyschem.2018.01.003.
- [5] Redus, R., Pantazis, J., Pantazis, T., Huber, A., Cross, B. Characterization of CdTe Detectors for Quantitative X-ray Spectroscopy. *Nuclear Science, IEEE Transactions on.* 56. 2524 - 2532, 2009. DOI: 10.1109/TNS.2009.2024149.
- [6] S. Miyajima, K. Imagawa, and M. Matsumoto, CdZnTe detector in diagnostic x-ray spectroscopy. *Med. Phys.*, 29: 1421-1429, 2002. DOI: 10.1118/1.1485975.
- [7] R. H. Redus, J. A. Pantazis, T. J. Pantazis, A. C. Huber and B. J. Cross, Characterization of CdTe Detectors for Quantitative X-ray Spectroscopy, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, no. 4, pp. 2524-2532, Aug. 2009. DOI: 10.1109/TNS.2009.2024149.
- [8] XRS-FP2 Quantitative XRF Analysis Software, Amptek, Inc., USA, online: <https://www.amptek.com/software/analytical-software/xrs-fp2-quantitative-xrf-analysis-software> (15. 8. 2024).
- [9] M. Moralles, D. A. B. Bonifácio, M. Bottaro, and M. A. G. Pereira, Monte Carlo and least-squares methods applied in unfolding of X-ray spectra measured with cadmium telluride detectors, *Nucl. Instr. and Meth. A* 580, Issue 1, 270-3, 2007, DOI: 10.1016/j.nima.2007.05.147.
- [10] M. Reginatto, P. Goldhagen. and S. Neumann, Spectrum unfolding, sensitivity analysis and propagation of uncertainties with the maximum entropy deconvolution code MAXED, *Nucl. Instr. and Meth. A* 476, 242, 2002, DOI: 10.1016/S0168-9002(01)01439-5.
- [11] X-123CdTe Complete X-Ray & Gamma Ray Spectrometer, AMPTEK, Inc., USA. Online: <https://www.amptek.com/internal-products/x-123-cdte-complete-x-ray-gamma-ray-spectrometer-with-cdte-detector> (15. 8. 2024).
- [12] M. C. Veale et al., Characterization of Edgeless CdTe Detectors for use in Hard X-Ray Imaging Applications, in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 59, no. 4, pp. 1536-1543, Aug. 2012, DOI: 10.1109/TNS.2012.2197025.
- [13] DPPMCA Display & Acquisition Software, AMPTEK, Inc., USA. Online: <https://www.amptek.com/software/dp5-digital-pulse-processor-software/dppmca-display-acquisition-software> (15. 8. 2024).
- [14] J. Šolc, P. Dryák, J. Rusňák, V. Sochor, Z. Vykydal. Practical X-ray beam spectrometry with cadmium telluride detector in 10–300 kVp range at Czech Metrology Institute. Part I. Instrumentation, 2022, *JINST* 17 P10002, DOI: 10.1088/1748-0221/17/10/P10002.
- [15] J. Šolc, P. Dryák, J. Rusňák, V. Sochor, Z. Vykydal. Practical X-ray beam spectrometry with cadmium telluride detector in 10–300 kVp range at Czech Metrology Institute. Part II. Unfolding, 2022 *JINST* 17 P10003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/10/P10003>.
- [16] J. Šolc, J. Šmoldasová, L. Štemberková, V. Sochor, Z. Vykydal. Practical X-ray beam spectrometry with cadmium telluride detector in 10-300 kV range at Czech Metrology Institute. Part III. Measurement setup, 2024, odesláno do časopisu *JINST*.
- [17] FITPix Lite – Kompaktní pixelový detektor ionizujícího záření, RICE, Západočeská univerzita v Plzni, online: <https://www.rice.zcu.cz/cs/Offers/products/Fitpixlite.html> (15. 8. 2024).
- [18] M. Reginatto, The „multi-channel“ unfolding programs in the UMG package: MXD_MC33, GRV_MC33 and IQU_MC33 (UMG package, version 3.3), PTB, 2004.
- [19] ISO 4037-1:2019(E), Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence, Second edition, 2019-01.
- [20] J. Šolc, S. Pojtinger, J. Šmoldasová, V. Sochor, J. Rusňák. Practical X-ray beam spectrometry with cadmium telluride detector in 10 300 kV range at Czech Metrology Institute. Part IV. X-ray spectrum end-point energy, 2024, odesláno do časopisu *JINST*.

VÝVOJ A TESTOVÁNÍ PROGRAMU OVLÁDAJÍCÍHO MODUL VPP01 PRO ZEFEKTIVNĚNÍ METODY ETALONÁŽE VELIČINY EMISE PLOŠNÝCH RADIONUKLIDOVÝCH ZDROJŮ

**Ing. Mariana Zika, MBA, Mgr. Martin Kačur,
Ing. Karolína Grexová**

Český metrologický institut

1. Úvod

ČMI OI Praha, odd. 1035 používá k výstupní kontrole vyráběných plošných radionuklidových zdrojů velkoplošný bezokénkový proporcionalní počítač (dále VBPP). Za účelem stanovení certifikované hodnoty veličiny emise plošných radionuklidových zdrojů záření alfa a beta v souladu s normou ISO 8769 [1] byl VBPP vybrán pro realizaci referenčního etalonu ČMI. Metrologické vlastnosti VBPP byly stanoveny v rámci programu ZÉTA 4 TAČR, projektu č. TJ04000521, v období červen 2020 - červen 2022 [2]. Projekt vedl k vyhlášení etalonu emise plošných radionuklidových zdrojů záření alfa a beta referenčním etalonem ČMI, č. RCC 442-1/23-001, v červnu 2023.

K měření impulzů z detekční části VBPP se používá obvyklý měřicí řetězec zahrnující zdroj vysokého napětí, předzesilovač, modul vnucené mrtvé doby, diskriminátor a čítač impulzů. Tyto komponenty jsou integrovány do bloku elektroniky VPP01 od firmy BQM, který je pevně spojen s detekční částí VBPP. Pro optimální funkčnost a využití těchto komponent v měření emise

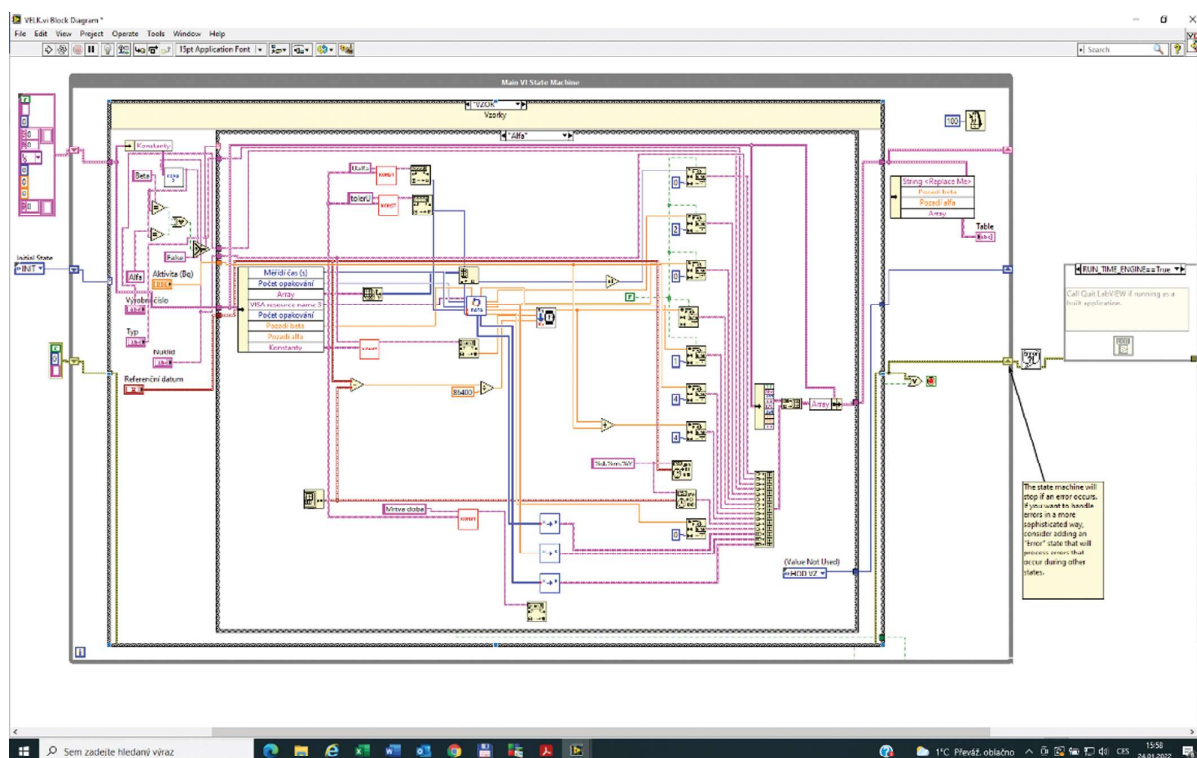
bylo nutné vyvinout nový program ovládací modul VPP01, který zefektivní ovládání referenčního etalonu emise plošných radionuklidových zdrojů, zjednoduší proces měření a sledování dlouhodobé stability zařízení, umožní automatizaci měření a minimalizuje riziko lidských chyb.

2. Cíle a popis řešení

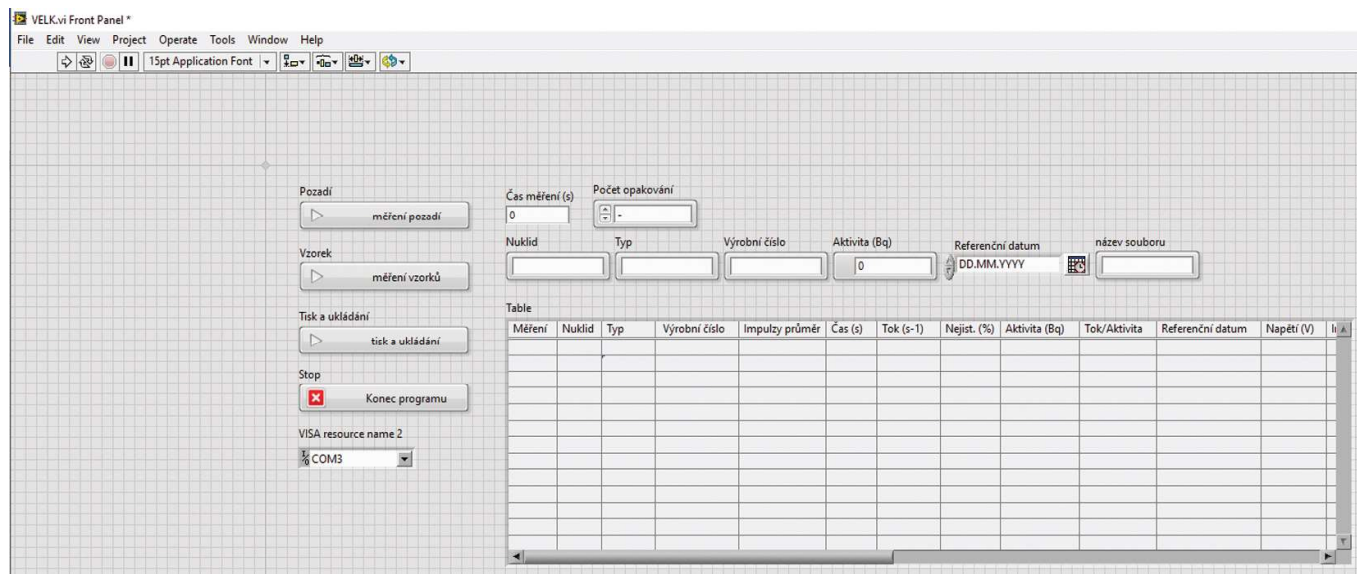
Cílem bylo vytvoření a testování programu ovládacího modulu VPP01. Ovládací program rozšíří možnosti správy zařízení, umožní automatické nastavení měřicího napětí a umožní vyhodnocování a ukládání naměřených dat [3]. V projektu TAČR byly zmapovány metrologické a technické vlastnosti zařízení VPP01, které slouží jako vstupní data vyvíjeného programu [2].

Program by měl sloužit ke klíčovým úkolům, jako je:

- řízení nastavení vstupních parametrů měření:
 - typ měření (pozadí/vzorek)
 - čas měření
 - počet měření
 - nastavení napětí v závislosti na druhu měřeného záření α/β
- zpracování naměřených dat:
 - výpočet toku částic
 - korekce na poločas
 - výpočet nejistot
- ukládání dat.



Obr. 1: Ukázka kódu programu VELKvi



Obr. 2: Měřicí rozhraní programu VELK.vi

2.1 Popis programu

Program byl realizován v grafickém programovacím jazyce LabView 2013, název programu je VELK.vi. Představuje strukturu stavového automatu, který zajišťuje hladký průběh měření i následné zpracování dat. Jednotlivé stavy programu jsou následující:

1. Inicializace programu: Načtení konstant z externího souboru, zahrnujících hodnoty pro mrtvou dobu, poločas rozpadu radionuklidů, typ emitujícího záření a příslušná napětí.
2. Čekání na podnět: Umožňuje obsluze volit stavy programu, jako je měření pozadí, vzorků, ukládání dat a ukončení programu.
3. Měření pozadí: Provádí měření pozadí zvlášť pro zdroje emitující α částice a zvlášť pro zdroje emitující β částice.
4. Hodnocení pozadí: Po změření pozadí se hodnota porovnává s dlouhodobou hodnotou.
5. Měření vzorků: Provádí měření daného radionuklidu a porovnává naměřené hodnoty s dlouhodobými daty.
6. Hodnocení naměřených dat: Automaticky vyhodnocuje naměřené hodnoty a následně je ukládá do textových souborů pro pozdější analýzu.
7. Konec programu.

Na obr. 1 a 2 je ukázka kódu programu VELK.vi a měřicí rozhraní programu [3].

2.2 Testování a validace programu

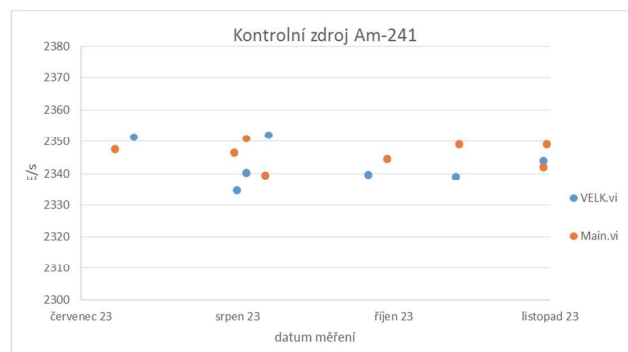
Po vývoji programu VELK.vi bylo provedeno jeho testování. Naměřené hodnoty byly porovnány s výsledky získanými pomocí předchozího programu Main.vi. Z technických parametrů se ověřovala hodnota měřicího času, počtu impulsů a výstupní hodnota veličiny emise.

Měřicí čas a počet impulsů byly ověřeny měřením radionuklidových zdrojů se známým tokem částic. Zdroje ^{241}Am a ^{90}Sr byly měřeny při různých dobách, tj. 5, 10, 20, 50, 100,

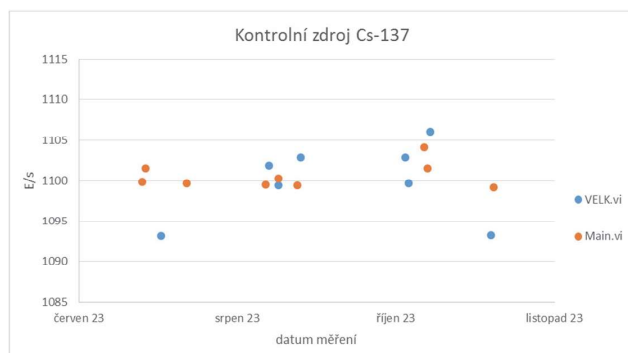
200, 500 a 1000 s, počet opakování 5x. Odchyłky od průměru byly nižší než nejistota ze statistiky měření [3].

Ke zjištění shody naměřené veličiny emise byla využita sada dat kontrolních zdrojů ^{241}Am a ^{137}Cs . Data z programu VELK.vi byla porovnána s hodnotami změřenými dosavadním programem Main.vi, viz obr. 3 a 4.

Hodnoty emise, které byly měřeny za použití programu VELK.vi, jsou ve shodě s hodnotami z programu Main.vi



Obr. 3: Srovnání hodnot emise zdroje ^{241}Am měřených programem VELK.vi a dosavadním programem Main.vi



Obr. 4: Srovnání hodnot emise zdroje ^{137}Cs výrobní číslo 1379139 měřených programem VELK.vi a dosavadním programem Main.vi

(tab. 1), tj. průměrná emise zdroje ^{241}Am je o 0,13 % nižší a průměrná emise zdroje ^{137}Cs je o 0,04 % vyšší, než průměrné hodnoty emise měřeny pomocí programu Main.vi. Relativní odchylka obou souborů dat je v obou případech výrazně nižší než celková kombinovaná nejistota průměrné emise ($k = 1$), která je 1 % pro ^{241}Am a ^{137}Cs (měřeno VELK.vi.) a 1,2 % pro ^{241}Am 1,1 % a ^{137}Cs (měřeno Main.vi). Získaná data prokazují shodu s dlouhodobými měřeními hodnotami, a tím potvrzují účinnost nového programu [3, 4].

Tabulka 1: Porovnání průměru hodnot emise, E , pro zdroj s ^{241}Am a ^{137}Cs měřených za použití programu VELK.vi a programu Main.vi

	^{241}Am		^{137}Cs	
	Program VELK.vi	Program Main.vi	Program VELK.vi	Program Main.vi
Průměr E/s	2342 (23)	2346 (26)	1100 (11)	1100 (13)
Sm. odch.	6,05	3,67	4,04	1,38
Rel. odch. prům. E/s, %	0,26	0,16	0,37	0,13

3. Dosažené výsledky

Provedené testování programu ukazuje, že nové řešení se shoduje s předchozím systémem měření, čímž je zajištěna metrologická spolehlivost. Vyvinutý program je schopen efektivně řídit zařízení VPP01, přinesl významné přínosy ke zlepšení procesu měření emise plošných radionuklidových zdrojů a zároveň nabízí flexibilitu pro změny měřicích parametrů bez nutnosti zásahu do základní struktury programu.



Závěr

Modul VPP01 je klíčovou součástí referenčního etalonu emise plošných radionuklidových zdrojů. V reakci na potřebu spolehlivého a efektivního nástroje pro sběr a vyhodnocení dat byl v grafickém programovacím jazyce LabVIEW 2013 vyvinut program VELK.vi ovládající modul VPP01.

Funkční správnost programu byla ověřena porovnáním souboru dat naměřených pomocí vyvinutého programu s hodnotami změřenými dosavadní metodou. Vyvinutý ovládající program svými vlastnostmi zvyšuje efektivitu měření referenčního etalonu, umožňuje jednodušší sběr dat a jejich dlouhodobé sledování a snižuje riziko vlivu lidské chyby při nastavení provozních parametrů.

Literární zdroje

- [1] ČSN ISO 8769 (404412) Měření radioaktivity - Alfa-, beta- a gama-zářiče - Specifikace referenčních etalonů pro kalibraci monitorů povrchové kontaminace
- [2] Zpráva č. 115-ZV-C0001-23 (VÝSTUP PROJEKTU TAČR Č. TJ04000521): Referenční etalon emise plošných radionuklidových zdrojů
- [3] Závěrečná zpráva č. 1035-TR-Z001-23 úkolu TR UTR23E103501: Zajištění nové přesnější metody etalonáže veličiny emise pro plošné radionuklidové zdroje záření alfa a beta
- [4] Uncertainties in surface emission rate measurements, M P Unterweger and P De Felice 2015 Metrologia 52 S165

EVROPSKÉ METROLOGICKÉ SÍŤ V OBLASTI IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Ing. Petr Kovář

Český metrologický institut

Úvod

EURAMET je organizace, která koordinuje spolupráci Národních metrologických institutů (NMIs) a Designovaných Institutů (DIs) v Evropě v oblastech, jako je výzkum v metrologii, návaznost měření na jednotky SI, mezinárodní uznávání národních etalonů a souvisejících kalibračních a měřicích schopností (CMCs). V rámci organizace EURAMET jsou budovány Evropské metrologické sítě (EMNs), které mají analyzovat a řešit evropské i celosvětové metrologické potřeby koordinovaným způsobem. Členové EMNs formulují společné metrologické strategie včetně aspektů, jako je výzkum, infrastruktura a služby. V současné době existuje celkem dvanáct EMNs, z toho dvě v oblasti ionizujícího záření, a to „Monitorování nečistot ve vzduchu, vodě a půdě“ a „Radiální ochrana“.

Monitorování nečistot

(EMN for Pollution Monitoring - PolMo)

<https://www.euramet.org/european-metrology-networks/pollution-monitoring>

Zelená dohoda EU (COM/2019/640) požaduje mimo jiné, aby státy EU lépe monitorovaly, hlásily, předcházely a napravovaly znečištění vzduchu, vody a půdy, a systematictěji se zabývaly všemi nařízeními a předpisy v této oblasti. Za účelem toho zahájila Komise v říjnu 2020 novou strategii pro udržitelnost a v roce 2021 přijala akční plán pro nulové znečištění ovzduší, vody a půdy.

Protože v současné době je regulována či monitorována pouze malá část znečišťujících látek, nemáme úplný přehled o chemikáliích, radionuklidech, částicích a biologických polutantech a jejich možných dopadech na životní prostředí a zdraví obyvatelstva. Navíc někdy neexistují analytické metody, dostatečně citlivé pro monitorování těchto nečistot.

Správnost a jednotnost měření množství a kvality látek, znečišťujících životní prostředí, je často ovlivněna neexistencí schémat metrologické návaznosti, systémů

kontroly kvality (certifikované referenční materiály, mezilaboratorní porovnání) či standardních pracovních postupů.

Měřicí schopnosti evropských metrologických institutů, kalibračních laboratoří, poskytovatelů zkoušek odborné způsobilosti, normalizačních a akreditačních orgánů v oblasti monitorování znečištění jsou nejednotné. EMN PolMo má za úkol sjednocovat tyto schopnosti a poskytovat metrologickou podporu regulačním orgánům, agenturám pro životní prostředí, různým odvětvím průmyslu a dalším subjektům, zabývajícím se monitorováním životního prostředí.

Členové EMN PolMo nabízejí v oblasti monitorování chemických látek, radionuklidů, biologických látek a částic ve vzduchu, vodě a půdě uživatelům služby jako konzultace, školicí kurzy, mezilaboratorní porovnání, typové zkoušky, workshopy, měření laboratorní i v terénu, kalibrace, zkoušky odborné způsobilosti, odběr vzorků a certifikované referenční materiály.

Radiační ochrana

(EMN for Radiation Protection)

<https://www.euramet.org/european-metrology-networks/radiation-protection>

Lidé na celém světě jsou vystaveni působení ionizujícího záření, ať už z přírodních či umělých radionuklidových zdrojů nebo generátorů ionizujícího záření (urychlovače částic). Více než 23 milionů lidí je vystaveno ionizujícímu záření v souvislosti s jejich prací.

Aby bylo možné lépe chránit občany před účinky ionizujícího záření, jsou předpisy EU o radiační ochraně stále sofistikovanější.

Technologický vývoj vede k novým scénářům ohledně expozice ionizujícímu záření. Opatření, reagující na tyto skutečnosti, zahrnují přísnější limity pro expozici, zavedení referenčních hodnot a zvýšené požadavky na zajištění kvality při hodnocení absorbovaných dávek.

V reakci na tento vývoj má EMN Radiation Protection působit jako jednotné kontaktní místo pro pokrytí metrologických požadavků souvisejících s radiační ochranou.

EMN Radiation Protection bude podporovat harmonizovanou, udržitelnou, koordinovanou a specializovanou infrastrukturu, která podpoří potřeby zainteresovaných stran, zejména v rámci evropských předpisů o radiační ochraně.

Zvláštním zaměřením EMN Radiation Protection je spolupráce s regulátory v oblasti radiační ochrany s cílem aktivně přispívat k vytváření nových či revidovaných norem.

EMN Radiation Protection si klade za cíl vytvořit výzkumnou agendu k zajištění podkladů pro nové či zdokonalené normy a předpisy o radiační ochraně, řešit vstupy do mezinárodních standardů, podporovat zajištění kvality ve všech otázkách radiační ochrany a podporovat rozvoj harmonizovaných postupů a schopností v oblasti poskytování služeb a výzkumu.

Členové EMN Radiation Protection nabízejí zejména v oblasti dozimetrie uživatelům služby jako konzultace, školicí kurzy, mezilaboratorní porovnání, typové zkoušky, workshopy, kalibrace a zkoušky odborné způsobilosti.



BUDOUCNOST METROLOGICKÉHO VÝZKUMU V OBLASTI IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Ing. Jan Rusňák Ph.D.

Český metrologický institut

Na začátku března 2024 proběhla schůze kontaktních osob Technické komise pro ionizující záření (TC-IR) při EURAMETu, které se zúčastnili i dva zástupci ČMI. Setkání se konalo na půdě belgického Centra jaderného výzkumu SCK-CEN v Molu a kromě obvyklých metrologických problémů se tentokrát diskutovala i obecnější témata budoucího směřování metrologie ionizujícího záření a evropského výzkumu.

Jen těžko bychom dnes asi hledali člověka, který by nebyl dostatečně informován o tom, jakým globálním problémům a výzvám čelí naše civilizace a jak bychom se k nim měli postavit. Vždyť kromě politiků a novinářů se do boje za udržitelnost vrhly obchodní řetězce, bankovní domy, automobilky, energetické firmy, IT giganti, ... Jestli se v jejich případě jedná o udržitelnost kvality životního prostředí, ekonomického růstu nebo dominantního postavení na trhu, je věc jiná. Nicméně dílčí cíle jsou jasně vytyčeny a celá

společnost za nimi míří. Metrologická komunita nemůže a nechce zůstat pozadu.

Nebylo proto žádným překvapením, když na schůzi Technické komise pro ionizující záření při EURAMETu v úvodní přednášce Dr. Koen Hasaers (ředitel Institutu pro aplikace v nukleární medicíně, Centrum jaderného výzkumu SCK-CEN) představil proces zásadní modernizace, kterým SCK-CEN v posledních letech prošlo. Svou výzkumnou činnost v nejbližším desetiletí hodlá institut zaměřit na tři klíčové oblasti v souladu s Cíli udržitelného rozvoje OSN pro rok 2030: klimatická změna, cirkulární ekonomika (recyklace a minimalizace vytváření odpadu, v oblasti IZ se jedná primárně o zpracování jaderného odpadu a odstavování jaderných zařízení) a v neposlední řadě boj s rakovinou. Že nezůstane jen u slov, dokazuje SCK-CEN na projektech, které nedávno zahájilo. Největším z nich je zahájení výstavby lineárního protonového urychlovače MYRRHA, který má být využíván jak pro výrobu radiofarmak pro nukleární medicínu, tak jako součást spalačního reaktoru pro transmutaci vyhořelého jaderného paliva.



Obr. 1: Vizualizace komplexu lineárního urychlovače MYRRHA, který je budován v belgickém Centru jaderného výzkumu SCK-CEN

V podobném duchu se nesla i následující prezentace přednesená místopředsedkyní EURAMET paní Mirunou Dobře, která představila strategii 2030 EURAMETu: hlavními oblastmi výzkumu a rozvoje budou i nadále Zelená dohoda (Green Deal), digitalizace a zdravotnictví. Zároveň EURAMET připravil Bílou knihu na období 2030–2040 s názvem “Metrologie pro silnější Evropu”. Nejedná se o příliš obsáhlou publikaci, a proto ji tu můžeme v krátkosti shrnout.



Obr. 2: Bílá kniha EURAMETu představuje strategii evropského metrologického výzkumu pro roky 2030–40.

Podle slov Bílé knihy současný výzkumný program Evropského partnerství pro metrologii staví a navazuje na předchozí programy EMRP a EMPIR, ale oproti nim se více zaměřuje na regulaci, tvorbu politiky, standardizaci a přesah do dalších programů Evropského partnerství a dalších evropských a mezinárodních komunit uživatelů prostřednictvím Evropské metrologické sítě.

I v dalším desetiletí bude dle EURAMETu Green Deal vlajkovou lodí evropského výzkumu. Hlavní role pak případně programu REPowerEU, který řeší potřebu ukončit závislost Evropy na

plynu, ropě a uhlí a zároveň urychlit energetický přechod k obnovitelným zdrojům a posílit bezpečnost dodávek a skladování energie. Hlavní opatření v balíčku REPowerEU zahrnují úspory energie, diverzifikaci dodávek, nahrazení fosilních paliv a investice a reformy.

Druhým významným tématem pro toto období 2030–40 bude konkurenceschopný a přizpůsobivý průmysl. Evropská komise přichází s opatřeními na podporu dlouhodobé konkurenceschopnosti EU v oblasti strategických technologií, se zaměřením na digitální technologie (včetně AI), čisté technologie a biotechnologie. Kromě toho existuje šest klíčových technologií, které vědecké prognostické oddělení Evropské parlamentní výzkumné služby označilo za klíčové pro dosažení technologické suverenity Evropy. Těmito technologiemi jsou pokročilá výroba, pokročilé (nano)materiály, technologie pro vědy o živé přírodě, mikro/nanoelektronika a fotonika, umělá inteligence a technologie pro bezpečnost a konektivitu.

Třetím pilířem je zdravotnictví. Bílá kniha nás informuje, že dekáda 2030 až 2040 bude desetiletím, kdy do důchodu odejde generace babyboomu, což zatíží dostupné zdroje na maximum. To vyžaduje posun od přístupu „jedna velikost pro všechny“ k zohlednění individuálních rozdílů a lepšímu využití hromadících se údajů k řízení zdravotnictví. Příslušné metrologické potřeby budou zahrnovat kvantitativní měření s vysokou přesností pro zjišťování individuálních rozdílů, digitální nástroje se zajištěnou kvalitou, podporu výroby nových léčiv a zdravotnických prostředků pro personalizovanou léčbu, jakož i kvantitativní měření pro hodnocení individuálních reakcí na léčbu.

Posledním tématem je vyrovnání rozdílů mezi metrologickými instituty a další budování výzkumné infrastruktury. Zatímco některé metrologické instituty v Evropě jsou na světové špičce, jiné bojují o přežití. ČMI je v paradoxní situaci, minimálně co se oblasti metrologie ionizujícího záření týče. Můžeme konstatovat, že se v řadě oblastí (např. metrologie

neutronů, měření jaderného odpadu, Monte-Carlo simulace) pohybujeme na světové špičce, jak je vidět i z výsledků mezinárodních porovnání či počtu mezinárodních výzkumných projektů, jichž se ČMI v oblasti IZ účastní a účastnil. Těchto výsledků je však dosahováno v podmínkách spíše východoevropských. Kbelíky na chodbě na zachytávání dešťové vody, havárie vody během probíhajícího mezinárodního porovnání, porucha kotleny uprostřed zimy – to jsou obvyklé obrazy z každodenního provozu. Doufejme, že právě zahájená rekonstrukce budovy IZ situaci zlepší.

Pro metrologickou komunitu se tyto 4 okruhy nejvíce odrazí v tématech budoucích výzev výzkumných programů, které tvoří stále větší a větší podíl příjmové stránky rozpočtů většiny metrologických institutů v Evropě. A tedy i pracovní náplň metrologů bude více a více odpovídat plnění těchto společných evropských (či globálních) cílů na úkor požadavků národních. Byť ne vždy musí být tyto požadavky nutně v rozporu.

Ovšem pokud metrologové a vědecká komunita obecně budou v příštích letech pracovat „společně pro lepší zítřek“, jak praví nápis na billboardu oznamujícím spolupráci jednoho nejmenovaného supermarketu a fondu pro ochranu přírody WWF, je potřeba, abychom si byli vědomi důsledků svého počínání. Jako vědci jsme spoluzodpovědní za směřování naší společnosti, a podoba Evropy za 10 či 20 let, kterou přenecháme další generaci, bude naším dílem. A historie nás učí, že budování ráje na zemi obvykle končí peklem.

Oblastí, která situaci dobře ilustruje, je rozvoj umělé inteligence. Zazní-li v nějakém návrhu výzkumného projektu klíčové slovo „AI“, máte z poloviny vyhráno. V etické příloze je sice potřeba zdůraznit, že v důležitých rozhodovacích procesech AI nenahradí člověka, to ale není žádná faktická překážka. Výzkum AI má rozhodně více než zelenou. Když se podíváme na veřejnou diskusi ohledně souvisejících etických a společenských otázek, zjistíme, že etika zaostává za výzkumem minimálně o několik let. Nemohu nezmínit rozhovor, který jsem vedl se švagrem, jenž je vedoucím katedry, na níž působí jedna z nejlepších českých výzkumných skupin v oblasti AI. „Řešíte u vás i etické otázky ohledně umělé inteligence a vůbec společenské dopady tohoto výzkumu?“ byla moje otázka, na kterou jsem dostal následující odpověď:



„Neřešíme, to ani není naše práce, my se věnujeme řešení technických úkolů a tohle je práce pro lidi z filozofické fakulty nebo něčeho podobného.“ Problém ale tkví v tom, že „lidé z filozofické fakulty nebo něčeho podobného“ rozhodně netuší, v jakém stavu je špičkový výzkum v té či oné oblasti, a tudíž nemohou relevantně posoudit případné negativní dopady. Samozřejmě člověk věnující se po celý život úzké specializaci bude mít nejspíše také problém plně předvídat dopady své vědecké činnosti, ale má alespoň nějaké informace. A navíc má možnost se rozhodnout v tom či onom bádání nepokračovat.

V oblasti zdravotnictví je ale situace jistě lepší, namítně čtenář. Na první pohled zdravotnický výzkum přináší jen pozitivní výsledky. Ale i když zcela pomineme kontroverzní oblast genetického výzkumu, zjistíme, že i zde existují stinné stránky. Na jedné straně máme prakticky neomezené možnosti léčby nekonečným množstvím léčiv a špičkovou diagnostiku, na straně druhé jen velmi omezený zdravotní rozpočet. V důsledku pak o vhodné léčbě spíše než lékaři rozhodují zdravotní pojišťovny, a to na základě nejrůznějších metrik (např. Quality-adjusted life year, QALY), jejichž etičnost je přinejmenším diskutabilní. Bonmot mé švagrové: „Potravinový průmysl z nás ve třiceti udělá mrzáky, aby nás pak zdravotnictví do devadesáti udržovalo při životě.“ byl jistě hyperbolou, která v sobě ale zachytává jádro dalšího problému – společenskou preferenci drahé léčby před nepohodlnou prevencí. Hluboce se mi vryl do paměti závěr přednášky doktorky Marizy Vorster z JAR, kterou přednesla na workshopu o cílené alfa terapii, který proběhl v únoru 2024 na půdě BIPM a jehož bylo ČMI spoluorganizátorem. Se slzami v očích popisovala situaci, kdy musela odmítnout pacienty v terminálním stádiu rakoviny, kterým mohla cílenou alfa terapií prodloužit život z týdnů na roky, ale poté, co jim tuto naději dala, musela jim ji zase sebrat, neboť jim nemohla podat plánované radiofarmakum. Farmaceutická společnost se totiž rozhodla probíhající klinickou studii předčasně ukončit.

Cílem předešlých odstavců nebylo čtenáře zdeptat temnými vyhlídkami na budoucnost, spíše šlo o to ukázat, že naše práce nemusí vždy přinášet jen pozitivní výsledky a že bychom to měli mít stále na paměti. Někdy je totiž lépe přibrzdit nežli sešlápnout plyn.

ZÁVĚR

Na rozdíl od našich jižních a západních sousedů není v české kotlině zvykem ve veřejném prostoru používat radiofobii jako politickou zbraň, a proto se u nás odvětví typu jaderná energetika, výroba a vývoj měřidel ionizujícího záření, nukleární medicína či základní výzkum s pomocí částicových urychlovačů těší dlouholeté tradici a zřejmě i světlé budoucnosti. I po více než sto letech své existence je metrologie ionizujícího záření rozvíjející se obor, ve kterém je potřeba řešit stále nové výzvy, na druhou stranu je ale možné se opřít o osvědčené postupy. Jak zaznělo v posledním článku, výzkum v této oblasti je sice stále více

orientován na celoevropské cíle než na národní, to ale neznamená, že by potřeby lokálních zákazníků nebyly reflektovány. Děje se tak převážně na základě osobního kontaktu s výrobcí radionuklidových zdrojů a detektorů IZ (z nichž někteří sídlí v bývalém areálu ÚVVVR, tedy v těsném sousedství ČMI) a také koncových uživatelů. Při pohledu na ceník služeb ČMI, jenž velmi agilně reagoval na inflaci v uplynulých letech, sice může člověk nabýt jiného dojmu, pravdou ale zůstává, že se v naší práci snažíme mít vždy na paměti, že Český metrologický institut je zřízen převážně pro občany ČR a jejich potřeby.

Redakční rada:

Ing. Zdeňka Pohořelá (předsedkyně), Mgr. Kristýna Vančurová (místopředsedkyně), Mgr. Petr Barták, Ing. Miroslav Čermák, Mgr. Václava Holušová, Doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Ing. Jiří Kazda, Ing. Pavel Nosek, RNDr. Klára Popadičová, Ing. Pavel Rubáš, Ing. Jakub Svatoš, Ph.D., doc. RNDr. Jiří Tesař, Ph.D., Ing. Josef Vojtíšek. Přizvaní: PhDr. Bořivoj Kleník – šéfredaktor.

Časopis vychází 4 x ročně. Cena výtisku 80,- Kč, roční předplatné 320,- Kč + poštovné a balné + 12 % DPH. Vydavatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením. Sídlo vydavatele: ÚNMZ, Biskupský dvůr 1148/5, 110 00 Praha 1. IČO: 48135267. Povolení tisku: registrace MK ČR 6111, MIČ 46 676, ISSN 1210-3543.

Místo vydávání: Praha. Datum vydání: březen 2025. Nakladatelský servis, předplatné a inzerce: PhDr. Bořivoj Kleník, Bezdědice 19, 294 25 Katusice, mobil: 603 846 527, e-mail: klenik@q-art.cz. Nevyžádané materiály se nevracejí. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

Tato Tematická příloha je součástí č. 1/2025 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

Foto na obálce:

Detektor X-123CdTe ve svazku rentgenového záření v ČMI

Photo on the front page:

X-123CdTe spectrometer at CMI's calibration X-ray beams

