

Jaderná energie / Jadrová energia

3/4 2023, ročník 4 (69)

jie

Hlavním tématem tohoto čísla jsou radiofarmaka, jejich historie, současnost a výhled do budoucnosti. Na bohatou historii produkce pro medicínské účely navazuje divize Radiofarmaka ÚJV Řež, tu v tomto čísle představíme spolu se společností BIONT, která se věnuje výrobě radiofarmak pro pozitronovou emisní tomografii na Slovensku. Na následujících stránkách vás čeká dokončení článku o francouzské jaderné energetice a pokračování cyklu vzpomínek Zdeňka Kříže na vznik a historii jaderného dozoru v Československu. Závěrečná část seriálu Vladimíra Wagnera o jaderných zdrojích pro vesmír je věnována exotickým možnostem mezihvězdného cestování, nechybí ani medailonek významné „jaderné“ osobnosti, pravidelné aktuality a řada dalších zajímavostí.



Jaderná energie / Jadrová energia

Základní úlohou časopisu „Jaderná energie/Jadrová energia“ je přispívat k úrovni kultury jaderné bezpečnosti. Časopis je psaný v českém a slovenském jazyce, vědecké a odborné články, abstrakty a anotace též v anglickém jazyce. Časopis vychází čtyřikrát ročně nákladem 550 výtisků a v elektronické podobě, která je volně dostupná na adrese jadernaenergie.online.

Obsah časopisu je zaměřen na jadernou bezpečnost a radiační ochranu s důrazem na ochranu životního prostředí, zdraví profesionálních pracovníků a obyvatelstva; výzkum, vývoj a nové technologie; provoz a výstavbu jaderných elektráren; zpracování a ukládání radioaktivních odpadů; aplikace radioizotopů a ionizujícího záření; aktuální informace z dozorných orgánů, vzdělávání a rozvoj know-how.

YDAVATEL:

CENTRUM VÝZKUMU ŘEŽ S.R.O.

Hlavní 130, Řež
250 68 Husinec, Česká republika
IČO: 26722445

Úrad jadrového dozoru SR

Bajkalská 27
P.O.Box 24, 820 07 Bratislava, Slovenská republika
IČO: 30844185

REDAKCE:

Michal Šafránek – šéfredaktor
redakce@jadernaenergie.online
+420 775 374 384
Ing. Jiří Kuf, Ing. Jan Procházka.

ADRESA REDAKCE:

Centrum výzkumu Řež s.r.o.
Hlavní 130, Řež, 250 68 Husinec, Česká republika

REDAKČNÍ RADA:

Ing. Daneš Burket, Ph.D. – předseda,
doc. Ing. Václav Dostál, Ph.D.,
Ing. Jiří Duspiva, PhDr. Tomáš Ehler, MBA,
Ing. Miroslav Hrehor, Ing. Jiří Hůlka,
Ing. Aleš John, MBA, prof. Ing. Jan John, CSc.,
Ing. František Pazdera, CSc., Ing. Alena Rosáková,
prof. Ing. Vladimír Slugeň, DrSc., Mgr. Petr Šuleř,
Ing. Radek Trtílek, Ing. Zdeněk Tipek,
Mgr. Miriam Vachová, Mgr. Ilona Vysoudilová,
RNDr. Marek Vyšinka, Ph.D.,
RNDr. Vladimír Wagner, CSc., Ing. Jan Zdebor, CSc.

GRAFIKA, SAZBA A TISK:

Boomerang Communication s.r.o.

REGISTRACE MK ČR

Časopis Jaderná energie/Jadrová energia
byl zapsán do evidence periodického tisku
Ministerstva kultury České republiky a bylo
mu přiděleno evidenční číslo MK ČR E 4671.
ISSN 2694-9024

ČÍSLO 3/2023, ROČNÍK 4 [69]

Vychází 24. 11. 2023

Editorial



Vážení a milí čtenáři,

máte před sebou další číslo našeho časopisu a já pevně věřím, že se nám navzdory zpoždění podaří do konce roku vydat ještě standardní čtvrté číslo, ve kterém bychom vám rádi představili projekty společností Westinghouse, EDF a KHNP, které před pár dny podaly nabídku na dostavbu jaderné elektrárny Dukovany.

Závazkem nám budiž nejen ediční plán, ale i stoupající zájem o naše periodikum. V této souvislosti jsme s minulým číslem navýšili počet tištěných výtisků na 550, přibližně stejný počet odběratelů registrujeme i u elektronické verze. Velmi nás těší též osobní dopisy od čtenářů a rostoucí zájem v našem časopisu publikovat.

Toto číslo je tematicky zaměřené na medicínské využití jaderné energie. Radiofarmaka, která dnes hrají nepostradatelnou roli při léčbě nebo diagnostice některých onemocnění mají u nás i na Slovensku velmi bohatou historii. Proto mě velmi těší, že se nám spolu s autory podařilo vytvořit velmi zajímavý materiál, který mapuje historii, současnost a budoucnost tohoto výjimečného odvětví a představuje významné česko-slovenské producenty radiofarmak a specializovaná centra nukleární medicíny.

Přeji vám příjemné čtení následujících řádků a poklidné adventní období.

Michal Šafránek

Šéfredaktor

Obsah

PŘEDSTAVUJEME

Představení divize Radiofarmaka ÚJV Řež, a. s. 4

Ing. Patrik Špátzal, MBA,
Mgr. Jana Rozenová

Onkologický ústav svätej Alžbety 6

doc. MUDr. Juraj Kaušitz, CSc.,
RNDr. Ing. Pavol Švec, CSc.

Spoločnosť BIONT a.s. 10

prof. MUDr. Jozef Šuvada, PhD., MPH, MBA, MSc.

Inštitút nukleárnej a molekulárnej medicíny v Košiciach 14

doc. MUDr. Ján Lepej, CSc.,
MUDr. Igor Marin, MBA

MEDAILONEK

VÝZNAMNÝCH OSOBNOSTÍ

doc. RNDr. Denisa Nikodémová, PhD. 18

Vladimír Slugeň, Tereza Melicherová,
Helena Cabánková a redakce

VÝZKUM, VÝVOJ A NOVÉ TECHNOLOGIE

Laboratorní testy a pilotní in-situ měření prototypem laserové dozimetrické sondy s bezdrátovým přenosem dat, založené na radiochromickém jevu v organickém detekčním elementu 20

Mgr. David Zoul, Ing. Hana Vodičková,
Jakub Beinstein, Ing. Luděk Kiňovič

APLIKACE RADIOIZOTOPŮ A IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Radiofarmaka – odkud přicházíme, kam jdeme a kam kráčíme 32

Ing. et Ing. Jan Adam, Ph.D.,
Ing. Patrik Špátzal, MBA

Výroba radiofarmak na reaktoru LVR-15 38

Ing. Martina Králová, Ing. Ján Milčák

Stereotaktická rádioterapia 42

Mgr. Ján Ivančík

SPOLUPRÁCE, PARTNERSTVÍ A PARTICIPACE

Nuclear Power in France and its Contribution to Reaching EU's Climate Objectives: Yesterday, Today and Tomorrow, Part 2 48

Jan Barták, Noël Camarcat

OKNO DO HISTORIE

Z knihy Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností. 14. část 56

Historie radiofarmak v ÚJV Řež, a. s. 60

Ing. et Ing. Jan Adam, Ph.D., Ing. Jiří Prokop,
Ing. Patrik Špátzal, MBA

ZAJÍMAVOSTI Z DOMOVA I ZE SVĚTA

Jaderné zdroje energie pro vesmír, 7. díl: Exotické možnosti mezihvězdného cestování 64

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

AKTUALITY

Společnost Elektrárna Dukovany II obdržela finální nabídky od tří uchazečů na stavbu nového jaderného zdroje v Dukovanech 78

Dana Drábová povede SÚJB dalších pět let 79

Zemětřesení na východě Slovenska neohrozilo provoz jaderných elektráren 79

Zemřel Ing. Bedřich Fridrich 80

Konference NUSIM přilákala do Brna stovku jaderných odborníků 81



Onkologický ústav svätej Alžbety

doc. MUDr. Juraj Kaušitz, CSc., RNDr. Ing. Pavol Švec, CSc.

6

**Laboratorní testy a pilotní
in-situ měření prototypem
laserové dozimetrické sondy
s bezdrátovým přenosem dat,
založené na radiochromickém
jevu v organickém detekčním
elementu**

Mgr. David Zoul, Ing. Hana Vodičková, Jakub Beinstein, Ing. Luděk Kiňovič

20



**Radiofarmaka - odkud
přicházíme, kam jdeme
a kam kráčíme**

Ing. et Ing. Jan Adam, Ph.D., Ing. Patrik Špátzal, MBA

32

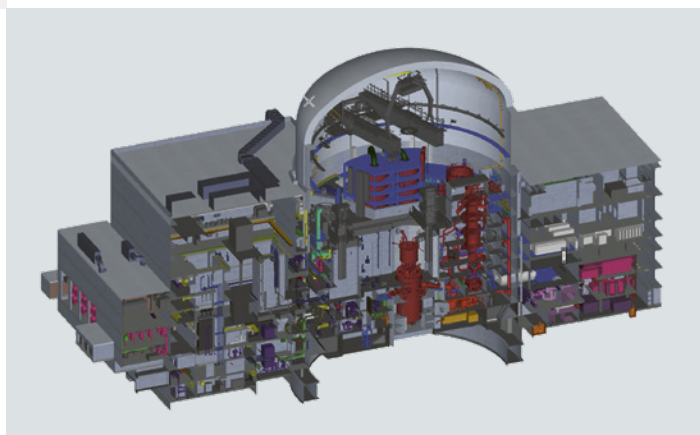


**Nuclear Power in France and
its Contribution to Reaching
EU's Climate Objectives:
Yesterday, Today and Tomorrow**

Part 2

Jan Barták, Noël Camarcat

48



Představení divize Radiofarmaka ÚJV Řež, a. s.

Ing. Patrik Špátzal, MBA, Mgr. Jana Rozenová
ÚJV Řež, a. s.

Divize Radiofarmaka společnosti ÚJV Řež, a. s. navazuje na bohatou historii produkce radionuklidů pro medicínské účely v Řeži. V současnosti provozuje v ČR tři výrobní centra pro produkci radiofarmak pro pozitronovou emisní tomografii (PET). Denně tato centra produkuje přes 100 vyšetřovacích dávek pro pacienty, přes 90 % veškerých PET vyšetření v ČR (v roce 2023 cca 50 000) je provedeno s radiofarmaky vyprodukovanými ÚJV Řež. Zkušenosti z budování a provozu center uplatňuje divize i v poradenství a výcviku personálu. Úspěšně se jí také daří rozšiřovat portfolio nových látek pro české pacienty.

The Division of Radiopharmaceuticals of ÚJV Řež is a successor to rich history of radionuclide production for medicinal use in Řež. Currently it runs three production centres for positron emission tomography radiopharmaceuticals in the Czech Republic. Daily, these centres produce over 100 patient doses, over 90% of all PET scans in the country (approx 50,000 in 2023) are done with ÚJV-produced substances. The division utilize its experience with building and running also in counselling and personnel training. It also successfully broadens the range of available new substances for Czech patients.

Radiofarmaka vyráběná v ÚJV Řež jsou moderní přípravky pro metodu pozitronové emisní tomografie (PET), pomocí kterých lze rychle a bezpečně diagnostikovat zejména nádorová onemocnění a správně určit či nasměrovat jejich léčbu.

Divize Radiofarmaka navazuje na téměř padesátiletou tradici produkce radionuklidů pro medicínské využití, jejíž počátky se datují do sedmdesátých let minulého století. Od radionuklidů vyráběných na jaderném reaktoru LVR-15 a produkce biomolekulárních „kitů“ k označení danými radionuklidy se těžiště činnosti divize přesunulo plně do oboru radiofarmak pro pozitronovou emisní tomografii (PET).

Divize Radiofarmaka ÚJV Řež provozuje v České republice tři výrobní centra pro výrobu PET radiofarmak, každé z nich je plně vybaveno urychlovačem (cyklotronem) jako zdrojem izotopů, zařízeními pro syntézu a kontrolu kvality radiofarmak a všemi nutnými podpůrnými technologiemi.

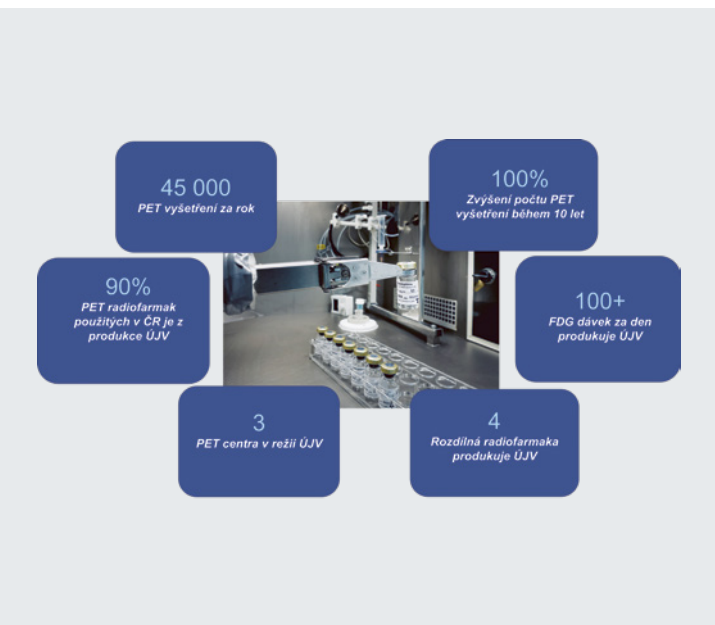
První výrobně/vyšetřovací centrum při Nemocnici Na Homolce bylo vybudováno na přelomu tisíciletí jako pilotní projekt Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Úkolem projektu bylo zjistit, zda je možné v zemi na teh-

dejším stupni rozvoje zavést tak náročnou vyšetřovací metodu, jakou je PET. Projekt byl úspěšný, a jak se metoda dále rozvíjela a rostla poptávka ze strany nemocnic, byla vybudována další PET centra v Brně (2008) a v Řeži (2012).

Radiofarmaka se v těchto centrech vyrábějí i několikrát denně a distribuují do celkem 18 diagnostických center nukleární medicíny vybavených PET skenery. Zde jsou pak prováděna příslušná vyšetření pacientů, v posledních letech jde téměř o 50 000 takových vyšetření ročně. Přes 90 % z nich je v ČR prováděno právě radiofarmaky, produkovanými ÚJV Řež.

Divize disponuje širokou paletou povolení a certifikací, nutných k vykonávání své činnosti: Povolení k výrobě léčivých a hodnocených léčivých přípravků, Povolení k distribuci léčivých přípravků, Certifikát správné výrobní praxe pro výrobce – humánní léčivé přípravky, Certifikát správné výrobní praxe pro výrobce – humánní hodnocené léčivé přípravky, Povolení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost pro nakládání se zdroji ionizujícího záření, ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001.

Zkušenosti s výstavbou a dlouhodobým rutinním provozem tří výrobních center umožň-



ňují divizi Radiofarmaka poskytovat komplexní a vysoce specializované služby, včetně poradenství s výstavbou, provozem i školením personálu. Kromě běžného provozu se divize zaměřuje na moderní trendy předpokládaného vývoje v oblasti radiofarmak — terapeutických i diagnostických.

Kromě základního PET radiofarmaka ^{18}F -fluorodeoxyglukosa byla zásluhou divize Radiofarmaka v poslední dekádě registrována na Státním ústavu pro kontrolu léčiv další radiofarmaka – ^{18}F -fluorid sodný na detekci kostních poruch a metastáz, ^{18}F -fluorocholin na diagnostiku karcinomu prostaty, jater a ná-

dorů příštitných tělísek, či unikátní ^{11}C -methionin pro diagnostiku nádorů mozku. Všechny tyto přípravky ÚJV Řež produkuje a dodává na pravidelné bázi.

Divize také průběžně zdokonaluje a vylepšuje své vybavení tak, aby dokázala i nadále plnit své závazky vůči odběratelům v maximální možné kvalitě a spolehlivosti. V roce 2017 proběhla například generační obměna syntézních zařízení, která umožnila zdvojnásobit výtěžky výrob. V letech 2022–2023 pak, po dvaadvaceti letech, vyměnila výrobní srdce centra – tedy cyklotron – za zcela nový, nejmodernější typ v Evropě.

↑
Obr. 1 Radiochemik u výrobního zařízení pro PET Radiofarmaka (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)

↖
Obr. 2 Divize Radiofarmaka v číslech (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)



Ing. Patrik Špátzal, MBA

patrik.spatzal@ujv.cz

Ing. Špátzal je absolventem fakulty chemicko-inženýrské VŠCHT v Praze. Celý profesní život se zaměřuje na komplexní farmacii a farmaceutickou technologii. Specificky se pohybuje v oborech, kde se využívá jaderné energie ve vazbě na medicínu. Hlavně v souvislosti s farmacií absolvoval množství rozšiřujících vzdělávacích programů českých univerzit a odborných institucí, včetně farmaceutického práva. Stál u zrodu rozšiřování produkčních center PET (pozitronové emisní tomografie) diagnostiky. Je členem představenstva a ředitelem divize Radiofarmaka ve společnosti ÚJV Řež, a. s. V rámci Skupiny ÚJV propojuje aktivity, směřující k farmaceutickému využití.

Onkologický ústav svätej Alžbety

doc. MUDr. Juraj Kaušitz, CSc., RNDr. Ing. Pavol Švec, CSc.
Onkologický ústav sv. Alžbety, s. r. o.

Dňa 10. januára 1996 vznikol Onkologický ústav sv. Alžbety, ktorý je dnes moderným vysoko špecializovaným neštátnym zdravotníckym zariadením. Patrí medzi popredné onkologické zariadenia na Slovensku a zabezpečuje špičkovú onkologickú, preventívnu, stomatologickú a fakultnú starostlivosť pacientom z celého územia Slovenska i zahraničia. Je držiteľom certifikátu ISO 9001. Laboratóriá ústavu majú akreditáciu pre celú EÚ. Je významným centrom pre pregraduálne aj postgraduálne vzdelávanie študentov – lekárov v spolupráci s Lekárskou fakultou Univerzity Komenského (LF UK), a Slovenskou zdravotníckou univerzitou (SZU).

On January 10, 1996, the St. Elizabeth Cancer Institute was established, which today is a modern highly specialized non-state medical facility. It is among the leading oncological institutions in Slovakia and provides top-notch oncological, preventive, dental, and faculty care to patients from all over Slovakia and abroad. It is the holder of the ISO 9001 certificate. The institute's laboratories are accredited for the entire EU. It is a significant center for the undergraduate and postgraduate education of medical students in collaboration with the Faculty of Medicine of Comenius University (LF UK) and the Slovak Medical University (SZU).



Onkologický ústav
sv. Alžbety

Dnes je to už 285 rokov odvtedy, čo zriadili sestry Rehole sv. Alžbety v Bratislave svoju rehoľnú nemocnicu. Už od svojho vzniku slúžila nemocnica ošetrovaní ťažko chorých, opustných a biednych. V prvej polovici 20. storočia bolo v Nemocnici sv. Alžbety zriadené pracovisko, venujúce sa diagnostike a liečbe onkologických ochorení. Z neho sa krátko po skončení druhej svetovej vojny vytvoril Ústav pre výskum a liečbu rakoviny. V roku 1950 bola Nemocnica sv. Alžbety zoštátnená. Následne v týchto priestoroch fungovali do roku 1993 experimentálne a klinicky zamerané štátne onkologické inštitúty. Po reštitúciách cirkevného majetku bola začiatkom 90-tych rokov nemocnica vrátená Reholi svätej Alžbety, ktorá od 10. januára 1996 zriadila v jej priestoroch Onkologický ústav sv. Alžbety (OÚSA). Cieľom ústavu je nadviazať na kvalitnú onkologickú tradíciu pôvodnej nemocnice sv. Alžbety a vytvoriť moderné zdravotnícke zariadenie, ktoré zabezpečí kvalitné ošetrovanie, diagnostiku a liečbu onkologických pacientov.

V Onkologickom ústave sv. Alžbety je sedem posteľových oddelení (onkochirurgické, onkogynekologické, maxilo-faciálnej chirurgie, ARO, klinickej onkológie, radiačnej onkológie a nukleárnej medicíny). Ďalej v ňom

funguje 25 bezposteľových oddelení, 74 odborných ambulancií a Lekáreň sv. Alžbety, slúžiaca potrebám ústavu aj verejnosti.

Onkologický ústav svätej Alžbety patrí podľa viacerých ukazovateľov, ale tiež v hodnotení pacientov a poisťovní, nielen medzi vedúce špičkové onkologické, ale tiež preventívne, stomatologické i fakultné zdravotnícke zariadenia na Slovensku. Poskytuje špeciálnu zdravotnú starostlivosť na medzinárodnej úrovni kvality podľa certifikátu ISO 9001. Laboratóriá ústavu majú ako jedni z mála pracovísk v SR akreditáciu pre celú EÚ.

Klinika rádiológie OÚSA bola prvým centrom digitálnej mamografie v SR a je aj najvýkonnejším centrom skríningu karcinómov prsníka v rámci Slovenska. Na pracoviskách skrínigovej/preventívnej a klinickej mamodiagnostiky sa vykonáva kompletná zobrazovacia diagnostika ochorení mliečnej žľazy u asymptomatických aj symptomatických žien a realizuje sa celé spektrum intervenčných výkonov na prsníkoch (punkčná aspiračná cytológia, jadrová biopsia, predoperačná lokalizácia nehmateľných ložísk). Ako jedno z mála pracovísk na Slovensku klinika vykonáva i miniinvazívne diagnostické a liečebné zákroky pomocou vákuového mamotomického prístroja.



Obr. 1 PET/CT



Obr. 2 SPECT/CT

Klinika onkologickej chirurgie OÚSA zabezpečuje komplexnú onkochirurgickú starostlivosť pacientov s nádorovými ochoreniami rôznych orgánových systémov. Je konzultačným onko-chirurgickým referenčným centrom a jedným z dvoch akreditovaných pracovísk v oblasti chirurgickej liečby karcinómu prsníka. Zároveň je centrom pre chirurgickú liečbu ochorení štítnej žľazy, prištítnych teliesok a nadobličiek.

V odbore nukleárnej medicíny je OÚSA najstarším pracoviskom na Slovensku, na ktorom sa začalo vyšetrovať modernými metódami PET, PET-CT a SPECT-CT. Klinika nukleárnej medicíny poskytuje kompletne spektrum vyšetrení konvenčnej scintigrafie (gamagrafické vyšetrenie skeletu, obličiek, pľúc, srdca, centrálného nervového systému, štítnej žľazy, prištítnych teliesok, lymfoscintigrafiu, lokalizáciu sentinelovej lymfatickej uzliny, lokalizáciu infekcie skeletu a niektorých typov neuroendokrinných neoplázií) a hybridnej pozitronovej emisnej tomografie v onkologických a neonkologických indikáciách. Lôžkové oddelenie Kliniky nukleárnej medicíny je najväčším slovenským centrom pre rádionuklidovú liečbu. Hlavnou odbornou náplňou oddelenia je liečba diferencovaného karcinómu štítnej žľazy s rádioaktívnym jódom ^{131}I , ale vykonáva sa aj rádionuklidová paliatívna anal-

getická liečba bolestivých kostných metastáz osteotropnými rádiofarmakami (napr. ^{223}Ra). Poskytovaná je aj liečba rádioaktívnym jódom (^{131}I) pri viacerých neonkologických ochoreniach štítnej žľazy (definitívna liečba tyreotoxikóz, objemová redukcia netoxických strúm, tyreoblácia pri endokrinnnej orbitopatii). Novou liečebnou metódou, ktorá sa na klinike vykonáva, je rádionuklidová liečba funkčných metastatických progredujúcich neuroendokrinných nádorov pomocou somatostínových analógov značených ^{177}Lu a tiež je poskytovaná rádionuklidová liečba pomocou ligandov prostatického špecifického membránového antigénu značených ^{177}Lu .

Onkologický ústav sv. Alžbety a hlavne Klinika nukleárnej medicíny zabezpečuje stálu havarijnú pripravenosť pre poskytovanie zdravotnej starostlivosti osobám pri mimoriadnych radiačných udalostiach (napr. v dôsledku havárií na jadrových zariadeniach) s podozrením na vnútornú rádioaktívnu kontamináciu zasiahnutých osôb. K analýze biologických vzoriek (napr. vzorky krvi a moču) má Klinika nukleárnej medicíny k dispozícii aj gamaspektrometer, ktorý nie je bežným vybavením pracovísk nukleárnej medicíny a vďaka ktorému je možné určiť rádionuklidy prítomné v biologických vzorkách zasiahnutých osôb a tiež stanoviť ich aktivitu.



Obr. 3 Lineárny urýchľovač TrueBeam 2.7 /SN4188/.

Onkologický ústav sv. Alžbety je známy aj tým, že vykonáva kvalitnú rádioterapiu (ročne sa tu odlieči vyše 1 200 pacientov externou rádioterapiou a okolo 250 pacientov brachyterapiou) a dlhé roky patrí v tejto oblasti k špičkovým nemocniciam nielen na Slovensku. Práve na pracoviskách ústavu sa zavádzali viaceré nové techniky vôbec ako prvé v krajine. Už v roku 1992 sa na urýchľovači Clinac2100C/D začalo v OÚSA, ako na prvom pracovisku vo vtedajšom Československu, ožarovanie v oblasti mozgu pomocou vysoko precíznej techniky intrakraniálnej stereotaktickej rádiochirurgie. Doposiaľ bolo týmto spô-

sobom ožiarených viac ako 2 200 pacientov a stále sme jediné pracovisko v SR, ktoré takúto možnosť liečby poskytuje. V nasledujúcich rokoch sa liečba v ústave rozšírila o techniku celotelového ožarovania, vyžadujúcu náročné dozimetrické vybavenie a špecifické zariadenie. V Onkologickom ústave sv. Alžbety bolo vždy cieľom poskytovať pacientom tú najlepšiu dostupnú liečbu a preto získal prvenstvá tiež v oblasti zavádzania a využívania obrazom navigovanej brachyterapie. V rokoch 2007 až 2008 sa začalo v ústave s realizáciou 3D plánovania HDR brachyterapie (^{192}Ir), ktorému sa v tých časoch rutinne venovalo iba niekoľko pracovísk v Európe. V tomto období sme taktiež začali s liečbou karcinómu prostaty pomocou implantácie rádioaktívnych zŕn ^{125}I do prostaty (LDR permanentná brachyterapia prostaty). Dodnes bolo touto technikou liečby v OÚSA odliečených takmer 1 700 pacientov, naďalej ju poskytujeme ako jediné pracovisko na Slovensku. Môžeme sa tiež pochváliť tým, že pre tento spôsob liečby rakoviny prostaty sme sa stali centrom excelentnosti a školiacim strediskom nemeckého výrobcu rádioaktívnych zŕn pre východnú a strednú Európu. Dô-



Obr. 4 CT Simulátor Somatom Confidence RT Pro



vodom, prečo dostalo toto privilégium práve naše pracovisko a nie niektoré renomované špičkové centrá v zahraničí, bola výborne nastavená úzka kooperácia: radiačný onkológ – urológ – fyzik, ktorú ohodnotili ako príkladnú.

Onkologický ústav sv. Alžbety je moderným vysoko špecializovaným neštátnym zdravotníckym zariadením, ktoré poskytuje kvalitné odborné služby pacientom z celého územia Slovenska i zahraničia. Zúčastňuje

sa biomedicínskych výskumov, slúžiacich na získavanie a overovanie nových medicínskych poznatkov. Venuje sa aj riešeniu grantových projektov, ako aj inovatívnej liečbe kmeňovými bunkami. Okrem toho je ústav aj významným centrom pre a postgraduálneho vzdelávania študentov – lekárov v spolupráci s Lekárskou fakultou Univerzity Komenského (LF UK) a Slovenskou zdravotníckou univerzitou (SZU).



doc. MUDr. Juraj Kaušitz, CSc.

juraj.kausitz@ousa.sk

v roku 1969 ukončil štúdium všeobecného lekárstva na Lekárskej fakulte UK v Bratislave. Svoju profesionálnu dráhu začínal ako asistent na katedre fyziky a nukleárnej medicíny LF UK v Bratislave. Neskôr sa zamerával viac na nukleárnu medicínu, v roku 1973 nastúpil na Subkatedru nukleárnej medicíny ILF (dnes SZU), spočiatku ako asistent, od roku 1990 ako jej prednosta.

Po získaní špecializácie z internej medicíny (v roku 1974) a nadstavbovej špecializácie z nukleárnej medicíny (v roku 1978) obhájil v roku 1981 kandidátsku dizertačnú prácu (CSc.) na Fakulte všeobecného lekárstva UK v Prahe. Roku 1990 sa stal docentom nukleárnej medicíny na Jesseniovej lekárskej fakulte UK v Martine. Doménou jeho klinickej praxe bola spočiatku problematika liečby karcinómu štítnej žľazy rádiojódom. Avšak jeho hlavným medicínskym zameraním sa stalo vyšetrovanie nádorových markerov rádioimunoanalýzou, ktorú v roku 1973 ako prvý na Slovensku zaviedol do klinickej praxe. Založil oddelenie imunodiagnostiky, z ktorého sa postupne stalo najväčšie pracovisko svojho druhu na Slovensku a v súčasnosti je to akreditované laboratórium európskeho formátu. V roku 1994 sa stal riaditeľom Nemocnice s poliklinikou sv. Alžbety NOÚ v Bratislave, ktorá sa pretransformovala 1. januára 1996 na Onkologický ústav sv. Alžbety.



RNDr. Ing. Pavol Švec, CSc.

pavol.svec@ousa.sk

v roku 1966 ukončil štúdium na Fakulte jadrovej a technickej fyziky ČVUT v Prahe v odbore jadrová fyzika a v rokoch 1976–1980 študoval odbor matematika na Prírodovedeckej fakulte UK v Bratislave. V roku 1981 získal titul „RNDr.“ na Matematicko-fyzikálnej fakulte UK v Bratislave a roku 1983 obhájil kandidátsku dizertačnú prácu (CSc.) v odbore Stavby jadrových

zariadení na Fakulte jadrovej a fyzikálnej inžinierskej ČVUT v Prahe. Po skončení FJTF ČVUT v Prahe nastúpil do Ústavu jaderného výskumu v Řeži, odkiaľ v roku 1970 prešiel do Výzkumného ústavu energetického Praha, pracovisko Jaslovské Bohunice a Bratislava, kde pôsobil do roku 1982. V rokoch 1982–1992 pracoval vo Výskumnom ústave palivovo-energetického komplexu, pracovisko Bratislava. Následne prešiel v rokoch 1992–1994 do firmy VUPEX Bratislava, kde robil vo vedení oddelenia jadrového paliva a palivových cyklov a ako predseda dozornej rady spoločnosti. V roku 1994 sa stal zástupcom riaditeľa NsP sv. Alžbety NOÚ v Bratislave, ktorá sa od 1996 zmenila na Onkologický ústav sv. Alžbety, kde pôsobí ako konateľ spoločnosti, ktorého kompetenciou je technicko-ekonomická činnosť ústavu.

Spoločnosť BIONT a.s.

prof. MUDr. Jozef Šuvada, PhD., MPH, MBA, MSc.
BIONT, a.s.

BIONT je jediným pracoviskom na Slovensku zameraným na výrobu rádiofarmák pre pozitronovú emisnú tomografiu (PET). Produkcia rádiofarmák v spoločnosti BIONT zabezpečuje 75% podiel počtu pacientov vyšetovaných pomocou PET tomografie v Slovenskej republike. Z celkovej produkcie BIONTu sa 59 % rádiofarmák spotrebováva v Slovenskej republike a zvyšných 41 % sa exportuje do okolitých krajín, predovšetkým do Rakúska. Okrem dodávania registrovaných rádiofarmák 18F-FDG a 18F-Cholín iným odberateľom, BIONT ako jediný poskytovateľ zdravotnej starostlivosti zabezpečuje PET vyšetrenia pomocou ďalších rádiofarmák vyrobených pomocou cyklotrónu, ktoré sú určené na ciele špecifické vyšetrenia. BIONT, a.s. je štátna akciová spoločnosť s jediným akcionárom – Slovenskou republikou, v ktorej mene koná Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky.

BIONT is the only company in Slovakia that specializes in manufacturing of radiopharmaceuticals for positron emission tomography (PET). BIONT produces radiopharmaceuticals for 75% of patients examined by PET in the Slovak Republic. 59% of BIONT's total production of radiopharmaceuticals is distributed to Slovak PET centres and the remaining 41% is exported to neighbouring countries, primarily to Austria. Besides supply of registered radiopharmaceuticals 18F-FDG and 18F-Choline to other customers, BIONT PET centre is the only centre in Slovakia that uses other cyclotron produced radiopharmaceuticals targeted for specific examinations. The company BIONT is a state-owned joint-stock company with only one stakeholder – the Slovak Republic, on whose behalf acts the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic.



BIONT, a.s. je štátna akciová spoločnosť orientovaná na oblasť nukleárnej medicíny, s užším zameraním na pozitronovú emisnú tomografiu (PET). Jej hlavným poslaním je vyrábať a distribuovať rádiofarmaká pre logisticky dosiahnuteľné PET centrá a zabezpečovať PET/CT a SPECT/CT vyšetrenia pre pacientov zo SR i zahraničia. S hlavnou činnosťou úzko súvisí aj výskum a vývoj prípravy rádionuklidov, rádiofarmák, výrobného zariadenia a v neposlednej miere aj vzdelávanie, školenia a šírenie poznatkov v oblasti využitia nukleárných metód v modernej medicíne.

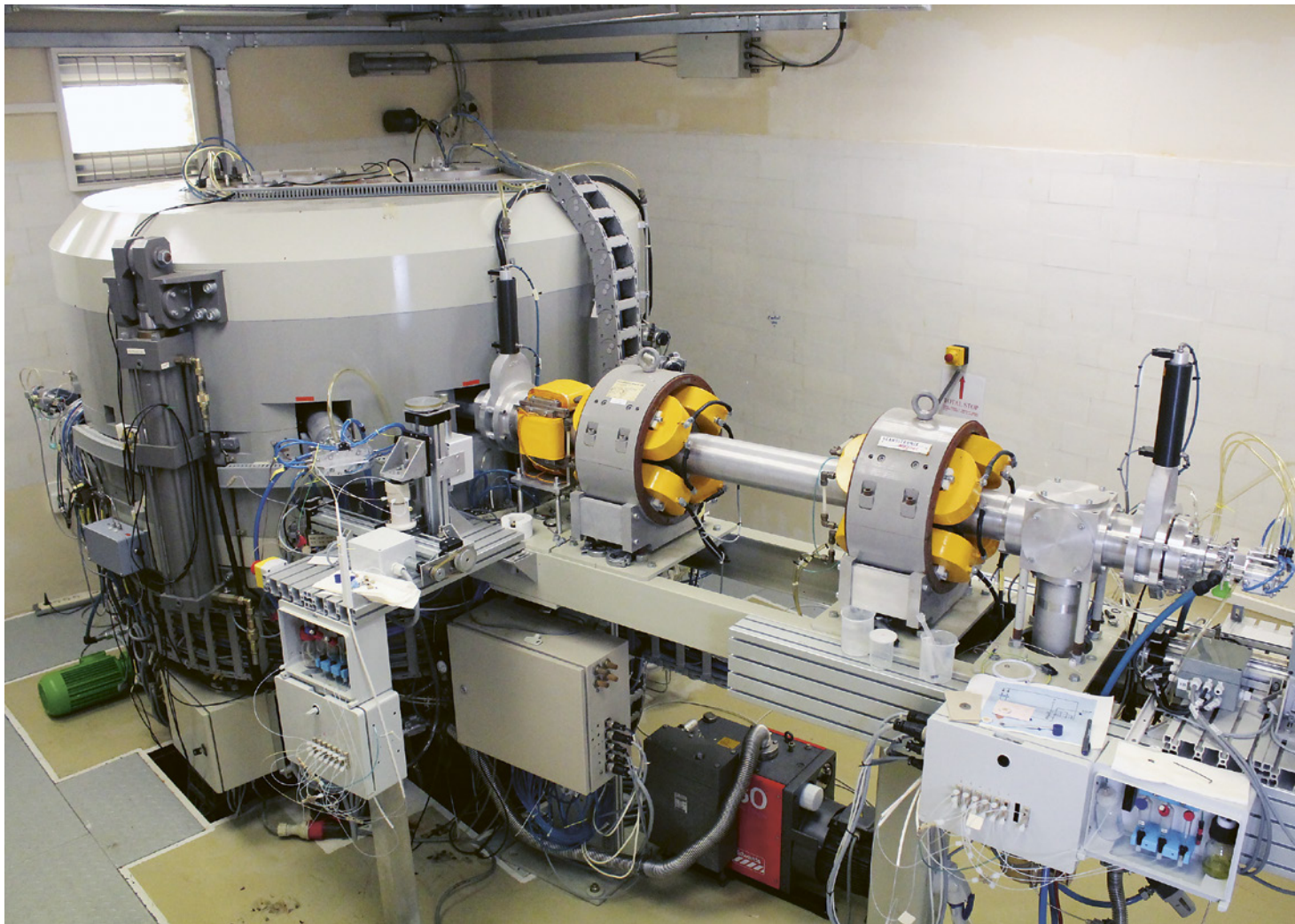
Výroba rádiofarmák

BIONT je v Slovenskej republike jediným výrobcom rádiofarmák pre PET. Päťdesiatimi deviatimi percentami výrobnéj kapacity zabezpečuje rádiofarmaká pre 75 percent všet-

kých pacientov vyšetovaných pomocou 18F-FDG a 18F-Cholínu na Slovensku. Zvyšných 41 percent kapacity tvoria ďalšie rádiofarmaká vyrábané na export do okolitých krajín, najmä do Rakúska a to:

- (18F)Fludeoxyglucose Biont
- (18F)Fluorocholine Biont
- (18F)Fluoroethyltyrosine Biont
- (18F)PSMA-1007 Biont
- (68Ga)DOTANOC Biont
- (68Ga)DOTATOC Biont
- (68Ga)PSMA-11 Biont
- (18F)Fluorodopa Biont
- $^{64}\text{CuCl}_2$ Biont – radiopharm. precursor

Pomocou prekurzoru $^{64}\text{CuCl}_2$ Biont sa značením pripravujú rádiofarmaká (^{64}Cu) DOTA-PSMA a (^{64}Cu)DOTATOC pre exportné účely.



Pre úplnosť je potrebné spomenúť aj zavedenú výrobu rádiofarmák (11C)Methionine Biont a (11C)Choline Biont, hoci sa v súčasnosti už nepoužívajú.

Všetky uvedené rádiofarmaká sa vyrábajú v súlade so zásadami Správnej výrobnéj praxe (cGMP), ich distribúcia sa riadi zásadami Správnej veľkodistribučnej praxe (GDP) a celý systém je zastrešený Systémom manažerstva kvality podľa ISO 9001:2015.

Na výrobu všetkých rádionuklidov BIONT prevádzkuje cyklotrón s energiou protónov 18 MeV a maximálnym prúdom 100 mA (na terči), pričom rádioizotopy ^{64}Cu a ^{68}Ga sú vyrábané pomocou technológie a zariadeniami vyvinutými v rámci vlastnej výskumnej činnosti spoločnosti. Výskumné aktivity sa realizujú v spolupráci s významnými svetovými pracoviskami ako aj s Medzinárodnou agen-

túrou pre atómovú energiu, v súčasnosti v rámci projektu – F22073 – „Production of cyclotron-based Gallium-68 radioisotope and related radiopharmaceuticals“

Všetky vyrábané rádiofarmaká prechádzajú kontrolou kvality v súlade s európskym liekopisom „European Pharmacopoeia Curr. Ed.“, ktorú zabezpečuje samostatné a nezávislé oddelenie kontroly kvality kontrolovaním vstupných materiálov pre výrobu, ako aj kontrolou kvality finálnych liekov. Vyrábané lieky sú prepustené na klinické použitie až po kontrole všetkých predpísaných parametrov podľa európskeho liekopisu. Bezpečnosť liekov je zabezpečená dodržiavaním zásad Správnej farmakovigilančnej praxe (cGVP).

Práca s krátko-žijúcimi rádionuklidmi v štýle vysokej dochvilnosti „just-in-time“ kladie vysoké nároky na kvalifikáciu personálu a za-

↑
Obr. 1 Cyklotrón
 Cyclone 18/9, pohľad na
 pracoviská s tuhými terčami



Obr. 2 Laboratórium výroby rádiofarmák



Obr. 3 Laboratórium kontroly kvality rádiofarmák



bezpečovanie spoľahlivosti technického vybavenia a kvality pracovného prostredia.

Nukleárna medicína

Počas krátkej doby od svojho vzniku v roku 2005 sa spoločnosť zaradila medzi popredných poskytovateľov ambulantnej zdravotnej starostlivosti v odbore nukleárna medicína.

BIONT, a.s. prevádzkuje PET centrum s dvomi PET/CT tomografmi a jedným SPECT/CT tomografom. Prebieha tu diagnostika širokej škály onkologických aj neonkologických ochorení, u približne 25 pacientov denne. V onkologickej diagnostike s rádiofarmakom 18F-FDG sa zameriava najmä na vyšetrenia pacientov s lymfoproliferatívnymi ochoreniami, nádormi gastrointestinálneho traktu, pľúc, prsníka, gynekologických nádorov, pacien-

tot s malígnym melanómom. Na diagnostiku gliových nádorov mozgu využíva rádiofarmakum 18F-fluoroetylytyrozín vlastnej produkcie. Vyšetrenia pacientov s karcinómom prostaty sa realizujú s použitím vysokosenzitívnych rádiofarmák 68Ga-PSMA alebo 18F-PSMA. Na diagnostiku neuroendokrinných nádorov a meningeómov sa používa rádiofarmakum 68Ga-DOTATOC. V neonkologickej diagnostike má pracovisko bohaté skúsenosti s diagnostikou neurodegeneratívnych ochorení (demencie, Parkinsonova choroba), vyšetreniami pacientov s refraktérnou epilepsiou, s diagnostikou zápalových ochorení v ortopédii a reumatológii, ako aj s diagnostikou hyperparatyreózy. PET centrum participuje na realizácii viacerých klinických štúdií a výskumných projektov.



Obr. 4 Plne digitálny PET/CT tomograf firmy Siemens inštalovaný v roku 2020





prof. MUDr. Jozef Šuvada, PhD., MPH, MBA, MSc.

suvada@biont.sk

vysokoškolský profesor, lekár, hosťujúci profesor na viacerých medzinárodných univerzitách (McMaster University v Kanade, Scranton University v Pensylvánii, Makerere University v Ugande, American University of Beirut v Libanone, Imperial College of London vo Veľkej Británii), ako aj na Slovensku a v Česku. Špecializácie získal v oblasti pediatrie, infekčných ochorení, tropickej medicíny, epidemiológie, detskej onkológie a paliatívnej medicíny. Okrem medicíny má pregraduálne štúdium psychológie (postgraduálne štúdium v oblasti traumaterapie), sociálnej práce (postgraduálne štúdium v oblasti sociálnej práce v zdravotníctve, dlhodobej starostlivosti a sociálneho lekárstva) a verejného zdravotníctva. V oblasti detskej onkológie vedie od roku 2012 v platforme Global Alliance for Childhood Health ako predstaviteľ SIOP (Medzinárodná spoločnosť detskej onkológie) a St. Jude Children Research Hospital od roku 2012 globálnu iniciatívu budovania detských onkologických centier, vrátane diagnostických a rádioterapeutických centier v krajinách s nízkym a stredným príjmom. V rokoch 2017–2020 viedol odbor preventívnych, diagnostických a liečebných štandardných postupov, dlhodobej starostlivosti, SDGs a bezpečnosti pacienta na Ministerstve zdravotníctva SR, kedy sa v spolupráci s odbornou spoločnosťou Nukleárnej medicíny, Lekárskej rádiológie, Onkológie a Radiačnej onkológie podarilo pripraviť prvý súbor národných štandardných postupov. Pôsobí vo viacerých výskumných tímoch, tímov tvoriacich klinické postupy a metodologické usmernenia v rôznych oblastiach medicíny a výskumu, vrátane „knowledge translation“ a bezpečnosti pacienta. Je tiež členom mnohých medzinárodných organizácií a získal viacero medzinárodných ocenení za prácu v oblasti globálneho zdravia, zvlášť v oblasti rozvoja onkológie a infekčných ochorení. V súčasnosti okrem pozície generálneho riaditeľa BIONT a.s. v Bratislave zastáva čestnú funkciu Veľvyslanca Slovenska pre globálne zdravie a je prvým Slovákom v histórii Svetovej zdravotníckej organizácie zastávajúcim čestnú funkciu člena Riadiacej rady WHO, podpredsedu pre tvorbu klinických odporúčaní a bezpečnosť pacienta a v máji tohto roku bol zvolený aj do čestnej funkcie podpredsedu PBAC (Plánovacej, rozpočtovej a administratívnej rady). V pozícii generálneho riaditeľa BIONT pôsobí od 31. októbra 2020.

Inštitút nukleárnej a molekulárnej medicíny v Košiciach

doc. MUDr. Ján Lepej, CSc, MUDr. Igor Marin, MBA
Inštitút nukleárnej a molekulárnej medicíny

V článku autori prezentujú 70-ročnú históriu nukleárnej medicíny v Košiciach, ktorej v roku 2004 zriadený Inštitút nukleárnej a molekulárnej medicíny vytvoril nové podmienky pre dynamický rozvoj. Za posledných 20 rokov bola vybudovaná inštitúcia, spĺňajúca vysoké európske štandardy pre fungovanie tohto medicínskeho odboru. Je otvorená pre spoluprácu so všetkými partnermi v prospech vzdelávania, aplikovaného výskumu a hlavne v starostlivosti o pacientov.

In the article, the authors present the 70-year history of nuclear medicine in Košice, for which the Institute of Nuclear and Molecular Medicine established in 2004 created new conditions for dynamic development. Over the past 20 years, an institution meeting high European standards for the functioning of this medical field has been built. It is open for cooperation with all partners for the benefit of education, applied research and especially in patient care.

Začiatky nukleárnej medicíny v Košiciach siahajú do roku 1954, kedy bolo na Rádio-logickom oddelení vtedajšej Štátnej nemocnice v Košiciach zriadené Pracovisko pre využitie rádionuklidových izotopov. Aj za zložitých podmienok počas totality 50-tych rokov v Československu to bolo veľmi rýchlo po vzniku prvých pracovísk v USA (1943), po 2. svetovej vojne vznikli podobné pracoviská aj v Európe (1947), ako aj v samotnom Československu – v Prahe (1949) aj v Bratislave (1952). Nukleárna medicína bola v tom čase nová diagnostická technológia, mala však v náplni aj riešenie následkov radiačného ožiarovania, z čoho vyplynula rýchlosť budovania týchto pracovísk, ktorá súvisela s rastúcimi obavami z použitia jadrových zbraní v bilaterálnom svete.

Na základe vládneho uznesenia bolo v roku 1961 zriadené Centrálné izotopové pracovisko, ktoré bolo v tom čase jediným zariadením tohto typu vo Východoslovenskom kraji. V nasledujúcom období prešlo toto pracovisko mnohými zmenami – najprv sa stalo Oddelením nukleárnej medicíny Fakultnej, neskôr

Univerzitnej nemocnice Louisa Pasteura a následne bolo veľmi krátke obdobie (v rokoch 2003–2004) súčasťou novovzniknutého Východoslovenského onkologického ústavu. Rozhodnutím MZ SR s účinnosťou od 1. septembra 2004 vznikol Inštitút nukleárnej a molekulárnej medicíny (INMM) ako vysokošpecializovaný odborný ústav pre zabezpečenie rozvoja diagnostiky najmodernejšími metódami medicínskeho zobrazovania a laboratórnymi postupmi nukleárnej medicíny, ako aj pre liečbu ochorení pomocou otvorených žiaričov. Liečba na východnom Slovensku v tom čase chýbala. INMM vtedy sídlil v suteréne XV. pavilónu v prenajatých priestoroch VOÚ. Od 1. júla 2006 sa stalo detašovaným pracoviskom INMM aj oddelenie nukleárnej medicíny v Banskej Bystrici, ktoré bolo dovtedy súčasťou FNŠP FDR. Cieľom tohto kroku bolo zabezpečiť podmienky pre dobudovanie infraštruktúry potrebnej pre moderné pracovisko nukleárnej medicíny aj v tejto oblasti Slovenska.

Z dôvodov nevyhovujúcich podmienok, v ktorých INMM vykonávalo svoju činnosť,



udelilo MZ SR súhlas na výstavbu novej budovy v priestoroch areálu UNLP na Rastislavovej ulici. Výstavba bola zahájená v roku 2009.

Dňa 22. marca 2011 sa uskutočnilo slávnostné otvorenie novej budovy INMM v Košiciach a v máji 2011 bola zahájená aj prevádzka lôžkového oddelenia určeného na terapiu nádorov a ochorení štítnej žľazy pomocou rádiojódu (^{131}I). Najnovšie pracovisko tohto typu na Slovensku spĺňa najvyššie európske štandardy rádioekologickej eliminácie odpadov a pacientom poskytuje vysoký komfort v šiestich jednolôžkových a dvoch dvojlôžkových izbách. Stalo sa tak tretím lôžkovým pracoviskom na Slovensku, ktoré lieči pacientov otvorenými žiaričmi.

Uvedenie najmodernejšej diagnostickej metódy – pozitronovej emisnej tomografie (PET) na východnom Slovensku sa začalo v rokoch 2012–2013 riešiť spoluprácou s firmou Agel, ktorá prevádzkovala PET/CT zariadenie v nových priestoroch INMM. Rovnaké zariadenie má doteraz táto firma inštalované aj na pracovisku INMM v Banskej Bystrici. Na oboch pracoviskách sa začalo v rámci nádorovej diagnostiky používať rádiofarmakum ^{18}F -FDG (fluórdeoxyglukóza).

V roku 2013 sa dobudovala diagnostická časť – endokrinologická ambulancia, USG ambulancia a PET/CT pracovisko v Košiciach prešlo do pôsobnosti INMM.

Dlhé roky bolo pracovisko nukleárnej medicíny v Košiciach súčasťou Kliniky nukleárnej medicíny a rádiodiagnostiky a ako také bolo výučbovou základňou LF UPJŠ. V roku 2016 bola výučbová a výskumná základňa Inštitútu nukleárnej a molekulárnej medicíny v Košiciach v rámci spolupráce s LF UPJŠ transformovaná do samostatnej Kliniky nukleárnej medicíny. Jej vedením bol poverený prednosta doc. MUDr. Ján Lepej, CSc. Klinika zabezpečuje v súčasnosti výučbu nukleárnej medicíny v slovenskom aj anglickom jazyku.

V priebehu rokov 2017–2018 bola vykonaná rozsiahla rekonštrukcia priestorov pracoviska INMM v Banskej Bystrici, kde boli následne inštalované aj nové SPECT/CT gamakamery. V nasledujúcich rokoch nová generácia gamakamier nahradila pôvodné zariadenia aj v Košiciach.

V roku 2019 sa rozšírilo spektrum rádiofarmák používaných pri PET/CT diagnostike vďaka tomu, že pre potreby INMM boli zmluvne zabezpečené pre nasledujúce roky až po



Obr. 1 Sídlo Inštitútu nukleárnej a molekulárnej medicíny v areáli Univerzitnej nemocnice L. Pasteura v Košiciach



Obr. 2 Pracovisko pozitronovej emisnej tomografie s PET/CT prístrojom



Obr. 3 Gamakamera na jednofotónovú emisnú počítačovú tomografiu (SPECT)



súčasnosť dodávky generátorov na výrobu gália ^{68}Ga , ktoré sa používajú na označenie PSMA (prostatického špecifického antigénu) a molekuly DOTA, čo umožnilo vyšetřovať pacientov s nádormi prostaty a s neuroendokrinnými nádormi. V INMM v súčasnosti pracuje 52 pracovníkov v Košiciach a 25 pracovníkov v Banskej Bystrici. V roku 2020 bolo na košickom pracovisku zrekonštruované laboratórium na prípravu rádiofarmák podľa najnovších aktuálne platných európskych noriem. Tu sa pre vlastnú potrebu pripravujú rádiofarmáká značené rádionuklidmi vyrábanými v gene-

rátoroch. Sú to technécium $^{99\text{m}}\text{Tc}$ značené rádiofarmáká pre 23 klasických scintigrafických a SPECT/CT vyšetření a tri vyššie uvedené rádiofarmáká pre PET/CT diagnostiku rôznych, predovšetkým nádorových ochorení.

INMM s pracoviskami v Košiciach a Banskej Bystrici je dnes počtom gamakamier, diagnostických a terapeutických výkonov za rok a stavom personálu, najväčším pracoviskom nukleárnej medicíny na Slovensku. V súčasnosti má INMM sortiment vyšetření nukleárnej medicíny, ktorý spĺňa vysoký európsky štandard. Na oboch pracoviskách poskytuje mimoriadne široké spektrum diagnostických metód a ročne vyšetří viac ako 10 000 pacientov. Na lôžkovom oddelení sa ročne uskutoční takmer 300 hospitalizácií pacientov indikovaných na liečbu otvorenými žiaričmi. Nové priestory a diagnostická technika podstatne zlepšili možnosti spolupráce na mnohých výskumných a grantových projektoch so štyrmi univerzitnými a školskými inštitúciami, ako aj na príprave odborníkov pre medicínske využitie otvorených rádioizotopov aj v postgraduálnom vzdelávaní.

V období pandémie COVID-19 (2020–2021), pracoviská INMM neobmedzili svoju



Obr. 4 Systém dočasného uskladnenia tekutého rádioaktívneho odpadu – ten sa tu uskladňuje vo veľkých nádržiach do doby, kedy jeho rádioaktivita poklesne na úroveň, umožňujúcu vypustenie odpadu do verejnej kanalizácie



prevádzku, naopak doplnili vyšetrenia, ktoré neboli vykonávané na oddeleniach iných zdravotníckych zariadení. Vyšetrovali sme pacientov s neskorými pľúcnymi komplikáciami po prekonaní COVID-19 a výsledky našej analýzy sme referovali na kongrese Európskej asociácie nukleárnej medicíny vo Viedni.

INMM v súlade so súčasným trendom teranostiky – diagnostika a liečba nádorových ochorení využívajúca rovnakú molekulu

označenú rôznymi rádionuklidmi – postupne zavádza aj ďalšie terapeutické protokoly, vykonávané nielen na lôžku, ale aj ambulantnou formou. V najbližšej budúcnosti rozšíri INMM svoje portfólio terapeutických metód uplatňujúcich teranostický princíp o rádioligandovú liečbu neuroendokrinných nádorov rádiofarmakom ¹⁷⁷Lu-DOTA, ako aj nádorov prostaty rádiofarmakom ¹⁷⁷Lu-PSMA.



doc. MUDr. Ján Lepej, CSc.

lepej@inmm.sk

po absolvovaní LF UK v Martine v roku 1974 a po špecializačnej príprave z vnútorného lekárstva, pracoval ako odborný asistent na klinike nukleárnej medicíny v Martine do roku 1992. V rokoch 1992–2004 bol primárom oddelenia nukleárnej medicíny v Banskej Bystrici, súčasne externe pokračoval v pedagogickej činnosti, výskume. Je autorom desiatok publikácií a monografií. V roku 2000 habilitoval na II. LF UK v Prahe. Od roku 2004 bol námestníkom riaditeľa INMM a od roku 2016 je prednostom Kliniky nukleárnej medicíny, LF UPJŠ a INMM Košice.



MUDr. Igor Marin, MBA

marin@inmm.sk

po absolvovaní LF UPJŠ v Košiciach v roku 1984 pracoval ako pediater v Krajskej detskej nemocnici v Košiciach, následne na oddelení nukleárnej medicíny UN LP a vo VŠZP. V roku 2004 bol menovaný za riaditeľa novovzniknutého INMM a v spolupráci so svojimi zamestnancami sa zaslúžil o vybudovanie nového pracoviska nukleárnej medicíny v Košiciach. V súčasnosti pôsobí v INMM ako námestník úseku liečebno-preventívnej starostlivosti.

doc. RNDr. Denisa Nikodémová, PhD.

Vladimír Slugeň, Tereza Melicherová, Helena Cabánková a redakce



Narodila sa roku 1936 v Spišskej Novej Vsi, absolventka Katedry experimentálnej fyziky Prírodovedeckej fakulty UK v Bratislave (1958). Od roku 1960 pracovala na Odbore hygieny žiarenia Ústavu preventívnej a klinickej medicíny v Bratislave. V rokoch 1985–1988 pracovala ako hlavný odborník MZ SR pre odbor hygieny žiarenia. V rokoch 1975–1989 pracovala na problémoch ochrany pred žiarením v spolupráci s SÚJV Dubna. V rokoch 1986 až 1992 pôsobila ako poradca hlavného hygienika SR v otázkach ochrany pred ionizujúcim žiarením a likvidácie dôsledkov černoobyľskej radiačnej havárie. Od roku 1989 sa venovala expozícii radónu v bytoch a zúčastňovala sa na príprave Národného cyklotrónového centra SR. V spojenom Výskumnom ústave preventívneho lekárstva viedla v rokoch 1991–2003 Oddelenie radiačnej hygieny. V roku 2004 získala habilitáciou vedecko-pedagogický titul docenta v odbore Verejné zdravotníctvo. Podieľala sa na viacerých projektoch MAAE vo Viedni a na európskych výskumných projektoch SENTINEL a ORAMED, zameraných na rozvoj nových metód ochrannnej dozimetrie pri vyšetreniach v intervenčnej rádiológii a kardiológii. Veľkú pozornosť venovala radiačnej záťaži detskej populácie pri lekárskych vyšetreniach, predovšetkým pri CT vyšetreniach. V rokoch 2000–2015 bola zástupcom Slovenska v európskej asociácii pre výskum v dozimetrii EURADOS (European Radiation Dosimetry Group). Od roku 2002 pra-

cuje ako podpredseda Komisie MZ SR pre zabezpečenie kvality v rádiodiagnostike, radiačnej onkológii a nukleárnej medicíne. Od roku 2011 do 2019 sa zúčastňovala na práci Medzinárodnej asociácie pre radiačnú ochranu (IRPA) pri skúmaní radiačnej záťaže očných šošoviek u zdravotníckych pracovníkov rôznych medicínskych odboroch. Zabezpečovala činnosť sekcie radiačnej hygieny v rámci Slovenskej lekárskej spoločnosti. V rámci pedagogickej činnosti vychovala viac ako 60 diplomantov a doktorandov v oblasti radiačnej ochrany a dozimetrie ionizujúceho žiarenia. Publikovala viac ako 300 odborných publikácií. V súčasnosti ďalej vykonáva pedagogickú činnosť na oddelení radiačnej hygieny Slovenskej zdravotníckej univerzity v Bratislave. Za svoju profesijnú činnosť má niekoľko ocenení, predovšetkým Zlatú medailu Slovenskej lekárskej spoločnosti, Zlatú ihlu – významenie rakúskej spoločnosti pre ochranu pred žiarením za dlhoročnú rakúsko-slovenskú spoluprácu, Guothovu cenu prezídia Slovenskej lekárskej spoločnosti a Zlatú medailu Slovenskej zdravotníckej univerzity pri príležitosti 60. výročia jej založenia. Aktívne sa podieľala na činnosti WiN Slovakia v rámci SNUS. Čestným diplomom SNUS bola ocenená v roku 2001. Dlhé roky pôsobila v programovom alebo organizačnom výbore vrcholnej československej vedeckej konferencie Dni radiačnej ochrany. Do riadneho dôchodku odišla v júni 2021, v súčasnosti žije v Bratislave.



O hĺbke stopy, ktorú za sebou zanecháva medzi nami, svedčí aj osobné svedectvo prof. Vladimíra Slugeňa, nazvané O odvahe a Denise a uverejnené v Úvodníku SNUS v októbri 2017:

Pre mňa i moju generáciu má odva-ha tvár Winnetoua. Zámerne nepíšem Pier-ra Bricea, lebo ten pred dvoma rokmi zomrel a odvaha nezomiera. Nádhernú pieseň „O odvahe“ majú v repertoári aj Hana a Pe-ter Ulrychovci, ale tí sa z éteru – podobne ako odvaha – vytrácajú. O všetkom zásad-nom sa už dozvedáme od hovorcov a nie od osobností, ktoré by nás svojou múdrosťou a odvahou mohli inšpirovať. Inšpirovať sa dá aj knihou Odvaha od bývalého džoke-ja Dicka Francisa, lebo „veď aj kôň je napo-kon tak trochu človek“ (citát – hádajte koho). Od istého času v nedeľu ráno o 10.00 počúvam na SRO1: „Encyklopédiu spravodlivých“. Toto je program o skutočnej odvahe, ktorá často hraničila až so stratou života. Počas druhej svetovej vojny bolo veľa príležitostí na preja-venie charakteru i odvahy. Dňa 8. októbra 2017 vysielali príbeh vtedy osemročného dievča-tka Denisky Rosenthalovej. Koľko ľudí riskovalo len preto, aby spolu so svojou sestrou Vier-kou prežila... Nepochybne ju mnohí z vás dob-re poznajú a to nielen tí, ktorí chodia na Dni radiačnej ochrany. V závere vyslovila dnes už dospelá Denisa Nikodémová krásnu myšlienku o tom, že asi nikdy sa jej za odvahu nepoda-rí dostatočne poďakovať tým dobrým ľuďom, ktorí im nezištne pomohli. Dobří ľudia stále

žijú, len byť dobrým je dnes asi menej „cool“. Byť dobrým je prejav ľudskosti a nie slabosti. Odvahou je slušne hovoriť svoj názor, či po-ctivo pracovať. A v tom je nám Denisa vzorom.

A ešte osobné vyjadrenie od blízkej pria-telky a kolegyne doc. Heleny Cabánekovej:

Za to, čím som sa stala, od začiatku až po koniec mojej vedeckej a pedagogickej ka-riéry, je zodpovedná Deniska. Je to jej vina! Ja som ako prvá robila diplomovku mimo Fa-kulty jadrovej fyziky UK a základňou pre moju experimentálnu prácu bolo pôsobenie na Vý-skumnom ústave preventívneho lekárstva a chorôb z povolania, kde Deniska už pracovala a stala sa mojou školiteľkou. Po obháje-ní diplomovky (s ocenením) som nastúpila tam, kde som tú diplomovku napísala a s De-niskou sme od roku 1980 začali spolupracovať ako kolegyne. Odvtedy sme boli stále spolu aj ako kamarátky až do ukončenia našich pracov-ných činností, ale aj potom. Takže záverom, tí diplomanti a doktorandi, ktorí sú v medailóni-ku spomenutí, zahŕňajú aj mňa.

Denisa Nikodémová je vzácnym členom našej odbornej komunity, príkladom neúnavnosti, vysokej profesionality, ľudského prístupu a nadovšetko človekom motivujúcim mladých aj tých starších. Stretnutia s ňou sú vždy osviežujúce a ukazujúce nám všetkým, že sa netreba vzdávať a treba ísť ďalej za cieľom, o ktorého správnosti sme presvedčení.

Laboratorní testy a pilotní in-situ měření prototypem laserové dozimetrické sondy s bezdrátovým přenosem dat, pracující na principu radiochromického jevu v organickém detekčním elementu

Mgr. David Zoul, Ing. Hana Vodičková, Jakub Beinstein, Ing. Luděk Kiřovič
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

V roce 2023 bylo na oddělení Radiochemie II Centra výzkumu Řež provedeno testování prototypu laserové teleskopické sondy s bezdrátovým přenosem dat, založené na radiochromickém jevu v organickém detekčním elementu. Tento článek zahrnuje podrobný popis celého zařízení, dokumentaci průběhu experimentu a výsledky měření.

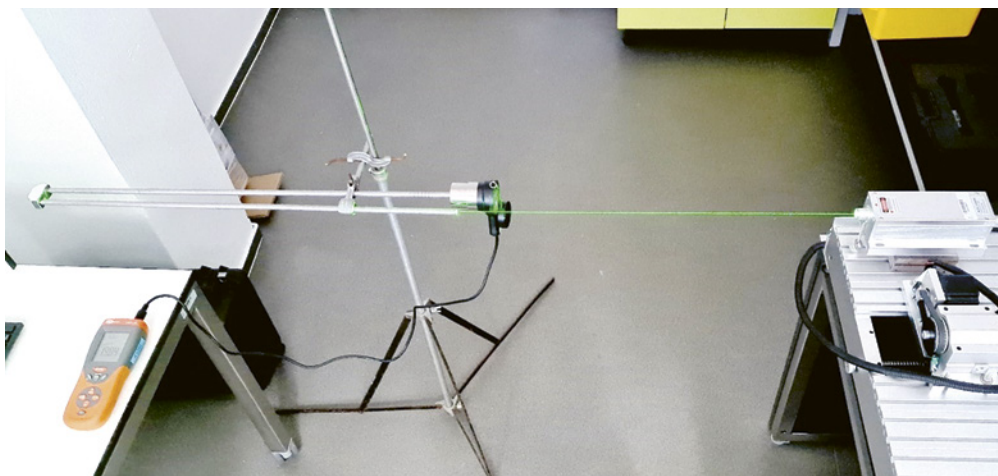
In 2023, the Radiochemistry II Department of the Research Centre Řež tested a prototype of a laser telescopic probe with wireless data transmission, based on the radiochromic phenomenon in an organic detection element. This article includes a detailed description of the entire device, documentation of the course of the experiment, and measurement results.

1. Úvod

Vývoj laserové dozimetrické sondy založené na radiochromickém jevu v polykarbonátovém detekčním elementu umístěném na hrotu sondy započal v květnu roku 2020. Laserový svazek prochází světlovodem tvořeným vnitřně vyleštěnou trubkou z nerezové oceli o vnějším průměru 10 mm a vnitřním průměru 7 mm, na jejímž konci je paprsek odražen pod úhlem 90° na průhledný polykarbonátový detekční prvek o tloušťce 10 mm. Po průchodu prvkem je paprsek opět odražen pod úhlem 90° do druhého paralelního světlovodu stejné konstrukce, kterým se vrací se zpět, načež dopadá na citlivý optický detektor Sonel LXP 10-A, který měří

a v reálném čase zaznamenává do své paměti intenzitu dopadajícího světla.

Sonda byla vyvinuta na základě předcházejícího dlouholetého výzkumu radiochromického jevu v polykarbonátu, který probíhal od roku 2015 v Centru výzkumu Řež. [1, 2, 3, 9, 11, 13–24] Díky konstrukčnímu řešení sondy, jež dovoluje mj. též teleskopické provedení, je možno dozimetrický člen umístit na konec velmi dlouhého a tenkého světlovodu, a provádět tak měření dávky a dávkového příkonu i v úzkých a obtížně přístupných prostorách s nebezpečně vysokou úrovní ionizujícího záření, jako je např. aktivní zóna jaderného reaktoru.



2. Technické parametry

2.1. Parametry laserového zdroje

Energetický zdroj sondy tvoří stabilizovaný pevnolátkový polovodičovými diodami čerpaný laser GL532T6-1500 s výstupním výkonem 1,5 W na vlnové délce 532 nm, s výkonovou stabilitou 3 %, napájený řídicí a napájecí jednotkou ADR-800D, který dodala firma OPTIX (viz Obr. 2)

2.2. Parametry optického detektoru

Digitální luxmetr Sonel LXP-10A pracuje s rozlišením 0,001 lx a měří v rozsahu od 0 lx do 400 klx s nejistotou menší než 2 %. Fotosen-



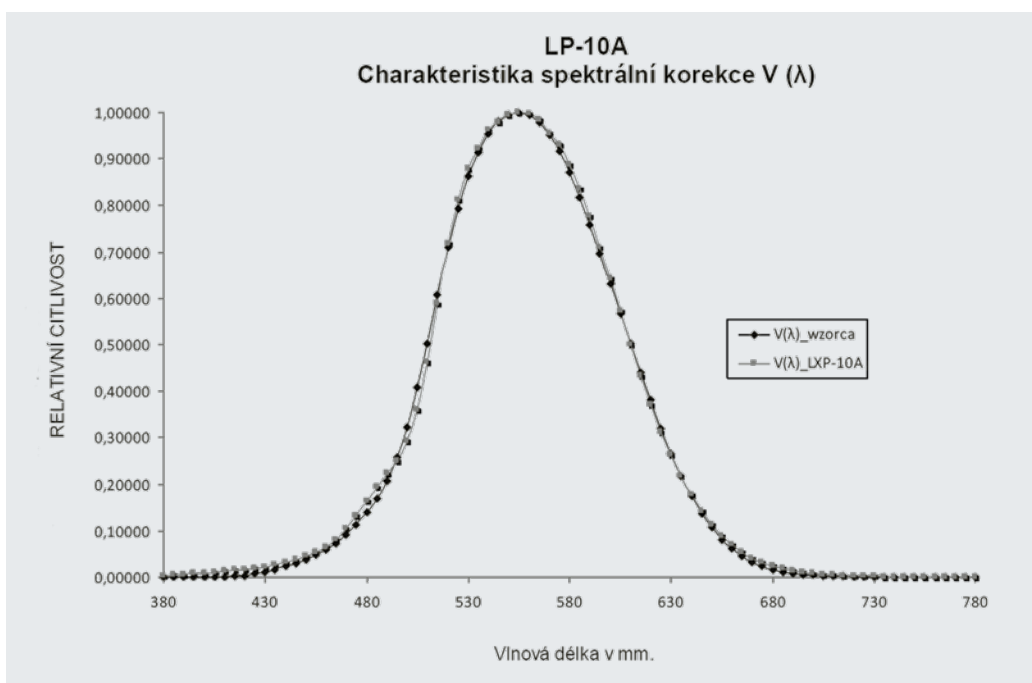
Obr. 1 Demonstrace principu fungování sondy



Obr. 2 Laserový zdroj GL532T6-1500 spolu s řídicí a napájecí jednotkou ADR-800D



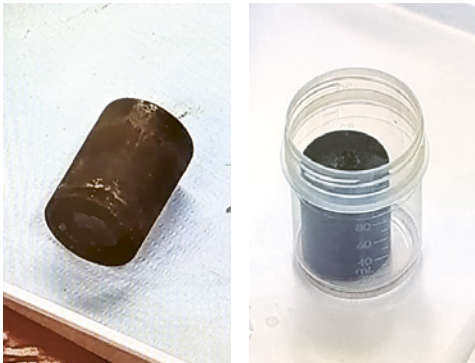
Obr. 3: Digitální luxmetr Sonel LXP-10A se záznamem a bezdrátovým přenosem dat



Obr. 4: Charakteristika spektrální citlivosti digitálního luxmetru Sonel LXP-10A



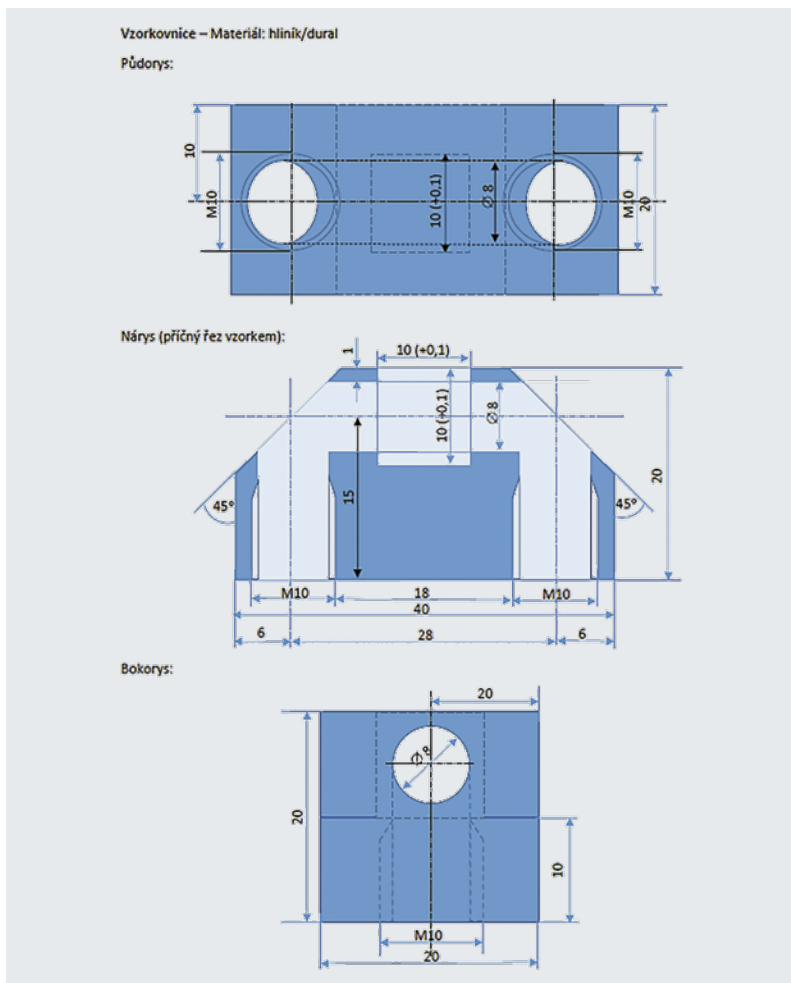
Obr. 5 Vysokoaktivní radionuklidový zdroj IGI-C-8-2 o aktivitě 7,2 TBq ^{137}Cs



Obr. 6: Redukční prvek pro připojení vstupního světlovodu k laserovému zdroji



Obr. 7: Redukční prvek pro připojení výstupního vlnovodu k detektoru Sonel LXP 10-A



Obr. 8: Technická výkresová dokumentace vzorkovnice

zitivní prvek je velmi stabilní a odolný, tvořený křemíkovou fotodiódou a filtrem se spektrální citlivostí (viz Obr. 3).

Přístroj obsahuje vnitřní paměť pro manuální uložení až 999 hodnot, dále pak paměť pro automatické uložení až 16 000 hodnot. Interval automatického ukládání lze předem nastavit v rozsahu od 1 s do 60 s, s krokem po jedné sekundě. Do paměti jsou data ukládána společně s časem jejich pořízení.

Ovládací program Sonel Reader umožňuje bezdrátový přenos dat do vzdáleného PC pomocí USB adaptéru OR-1, a to dokonce i přes 500 mm silnou ocelovou stěnu horké komory a 50 mm silné olověné stínění ochranného bunkru. K tomu je zapotřebí před začátkem měření přepnout přístroj do rádiového módu.

Použité fotodiody a filtry způsobují, že charakteristika spektrální citlivosti je vhodně přizpůsobena požadavkům křivky C.I.E. (INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION). Charakteristika citlivosti $V(\lambda)$ je zobrazena na Obr. 4.

2.3. Parametry vysokoaktivního ZIZ

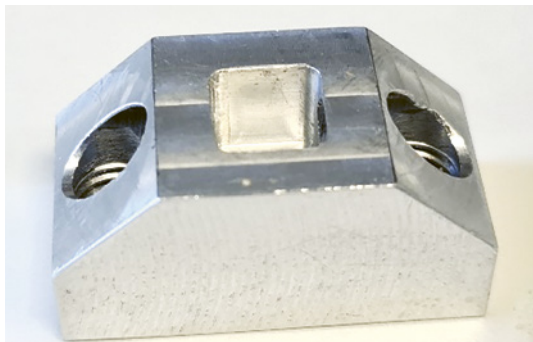
Jako zdroj ionizujícího záření byl použit vysokoaktivní zářič model IGI-C-8-2, obsahující 7,2 TBq radionuklidu ^{137}Cs , který zapůjčilo oddělení vysokoaktivních odpadů (VAO) naší mateřské společnosti ÚJV Řež. Zdroj tvořil válec o průměru 35 mm a výšce 47 mm (viz Obr. 5).

Zdroj byl po vyjmutí z obalového souboru v horké komoře umístěn do polyetylenové ampule (viz Obr. 5 vpravo) a následně ještě do připravené uzavíratelné plechovky.

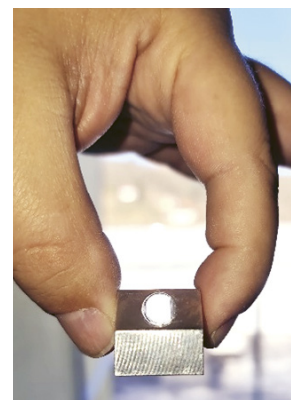
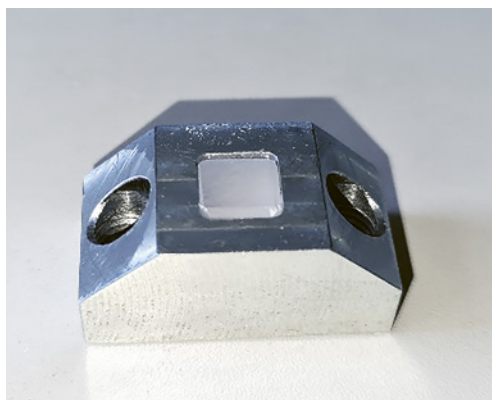
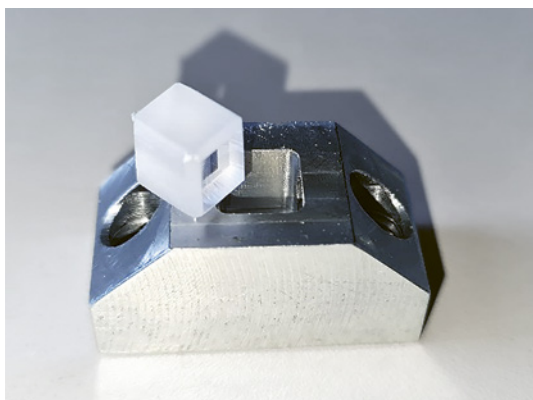
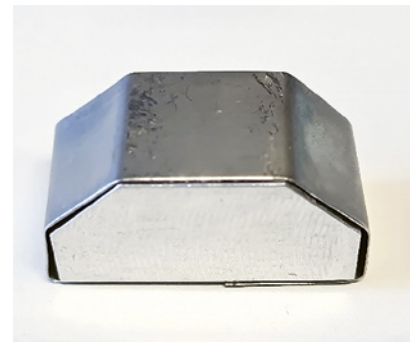
3. Popis zařízení

Laserový zdroj byl skrze redukční prvek (viz Obr. 6) napojen na vstupní světlovod šroubovým spojením prostřednictvím závitu M10.

Výstupní světlovod byl skrze redukční prvek (viz Obr. 7) napojen na optický detektor Sonel LXP 10-A na výstupu světelného svazku šroubovým spojením se závitem M10.



Obr. 9: Detail rozebrané vzorkovnice



Vstupní i výstupní světlovod byly na svém druhém konci napojeny závitovým spojením M10 na aluminiovou vzorkovnici (viz Obr. 8, 9) konstruovanou tak, aby umožnila průchod paprsku průhledným polykarbonátovým detektorem a poté paprsek nasměrovala do výstupního světlovodu směrem k detektoru Sonel LXP 10-A.

Do vzorkovnice byl vložen čirý polykarbonátový detekční element ve tvaru krychle o hraně 10 mm (viz Obr. 10)

Po úplném sestavení bylo zařízení nejprve důkladně otestováno v laboratoři při délce obou světlovodů 3300 mm (viz Obr. 11)

4. Příprava experimentu

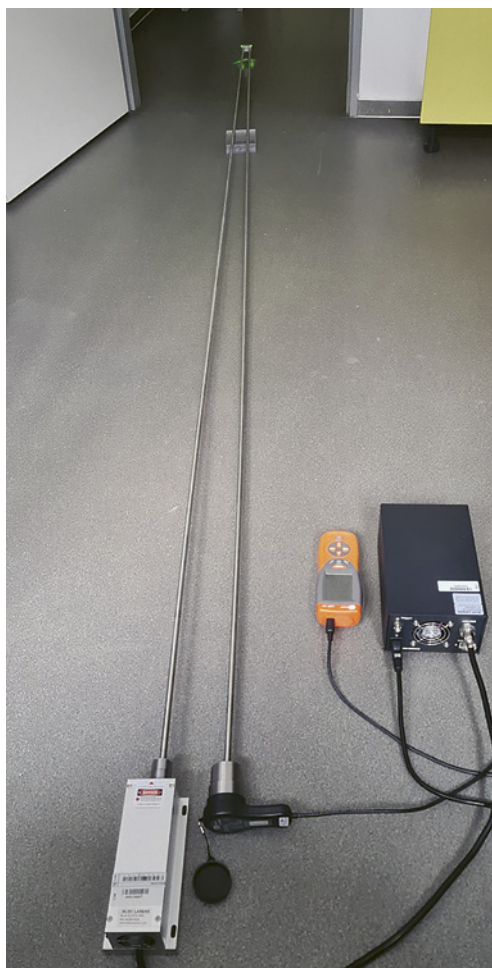
Z důvodu omezeného prostoru uvnitř horké komory musely být následně oba světlovody zkráceny na délku 2600 mm. V rohu komory byl postaven z olověných cihel tloušťky 50 mm stíněný bunkr o rozměrech (š × d × v) 300 x 400 x 300 mm a hmotnosti cca 300 kg. Do něho byla umístěna veškerá citlivá elektronika (napájecí zdroj, polovodičový laser, luxmetr Sonel LXP 10-A). Skrze 2 z cihel byly provrtány průchodky pro oba světlovody (viz Obr. 12).



Obr. 10: vkládání organického detekčního prvku do vzorkovnice

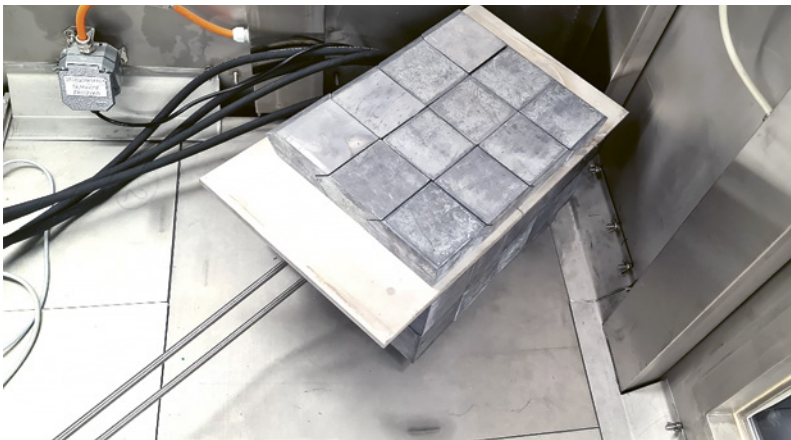


Obr. 11: Laboratorní testy sestavené sondy s délkou světlovodů 3300 mm





Obr. 12: Radiačně stíněný olověný bunkr pro ochranu citlivé elektroniky sondy před účinky ionizujícího záření



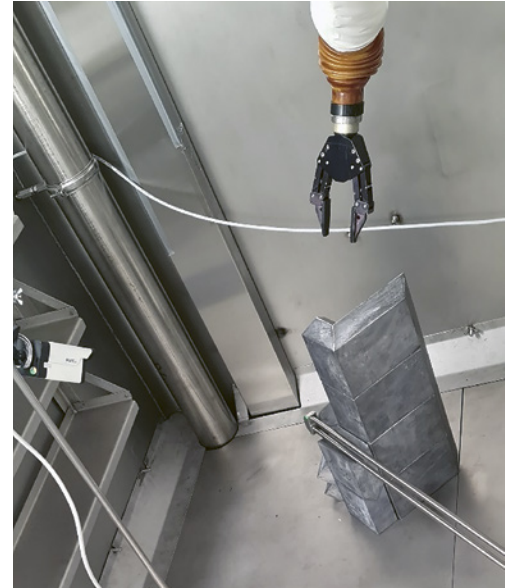
Obr. 14: Úplně zastíněný bunkr pro ochranu citlivé elektroniky sondy před účinky ionizujícího záření

Na opačném konci Horké komory byla z olověných cihel tloušťky 50 mm postavena zástěna (paraván) – viz Obr. 13 – o hmotnosti cca 130 kg. Součástí zástěny bylo rovněž lože podpírající oba světlovody na straně vzorkovnice. Za zástěnou byl položen olověný podstavec pro uzavíratelnou plechovku s vysokoaktivním zdrojem ^{137}Cs .

Během experimentu byl dávkový příkon na stěně bunkru 17,6 mSv/h (měřeno kalibrovanou dozimetrickou sondou MDG 04 – viz kap. 5) a dávkový příkon uvnitř bunkru, vypočtený pomocí programu Rad Pro Calculator, byl stanoven na 65 $\mu\text{Sv/h}$. Za celou dobu ozařování (103 hodin) tak citlivá elektronika uvnitř bunkru obdržela dávku necelých 7 mSv.



Obr. 13: Olověný paraván pro zastínění vysokoaktivního ZIZ ^{137}Cs



5. Průběh experimentu

Luxmetr Sonel LXP 10-A byl nastaven do režimu automatického ukládání dat do vnitřní paměti v intervalu po 60 s. Současně byl přepnut do rádiového módu, kdy je s ním možno vzdáleně komunikovat prostřednictvím PC v opeátorovně horké komory a průběžně stahovat data ve formátu xlsx. Laserový zdroj byl spuštěn a bunkr byl shora zcela radiačně zastíněn ocelovými pláty tloušťky 10 mm, na které byla poté vyskládána souvislá vrstva olověných cihel tloušťky 50 mm (viz Obr. 14). Pouze v zadní části byla ponechána úzká mezera z důvodu chlazení vnitřního prostoru s elektronikou a současně průchodu pro kabeláž – viz Obr. 12.

Vysokoaktivní ZIZ byl uvnitř uzavřené plechovky dopraven prostřednictvím zavážecího zařízení do horké komory, kde byl prostřednictvím dálkových manipulátorů usazen na své místo na olověném podstavci za paravánem (viz Obr. 15, 16)

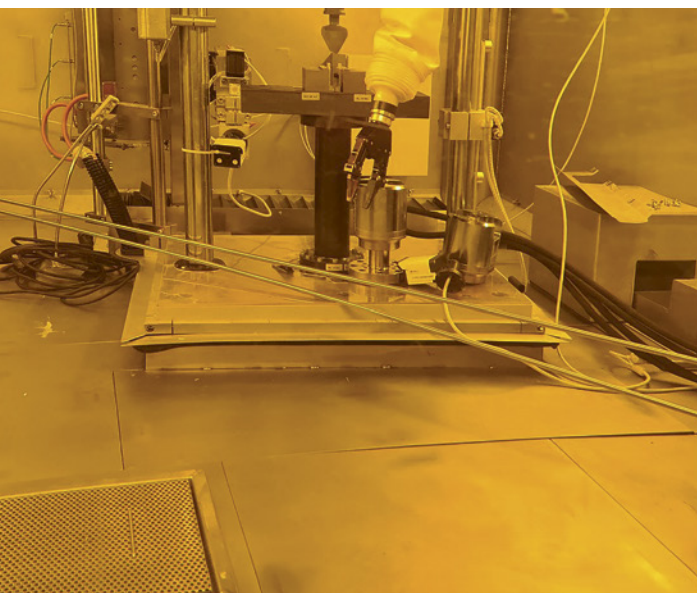
Pomocí dozimetrické sondy MDG-04, kalibrované na ^{137}Cs , byl naměřen v místě detektoru dávkový příkon $501 \pm 10 \text{ Gy/h}$, tj. cca. $8,35 \pm 0,17 \text{ Gy/min}$.

Jelikož se jedná o plynový detektor, byla naměřená hodnota dále korigována na tlak a teplotu dle vztahu

$$\frac{dD}{dt} = \left(\frac{dD}{dt} \right)_0 \frac{T P_0}{T_0 P}$$



Obr. 15: Snímek probíhajícího experimentu pořízený skrze stíněný průzor horké komory, tvořený 900 mm silným olovnatým sklem



V místě a době měření byl atmosférický tlak $100\,830 \pm 30$ Pa a podtlak v horké komoře vytvářený činností aktivní vzduchotechniky byl stanoven kalibrovaným převodníkem diferenčního tlaku AX2 – XMD na -319 Pa. Tlak v horké komoře byl tedy $P = 100\,511$ Pa. Teplota v horké komoře, stanovená kalibrovaným měřicím řetězcem s odporovým teploměrem P_t100, byla $T = 22,1 \pm 1$ °C. Referenční tlak uvedený v kalibračním listu ionizační komory je $P_0 = 98\,030 \pm 30$ Pa, referenční teplota $T_0 = 23,1 \pm 1$ °C.

Dosažením uvedených hodnot dostáváme výsledek

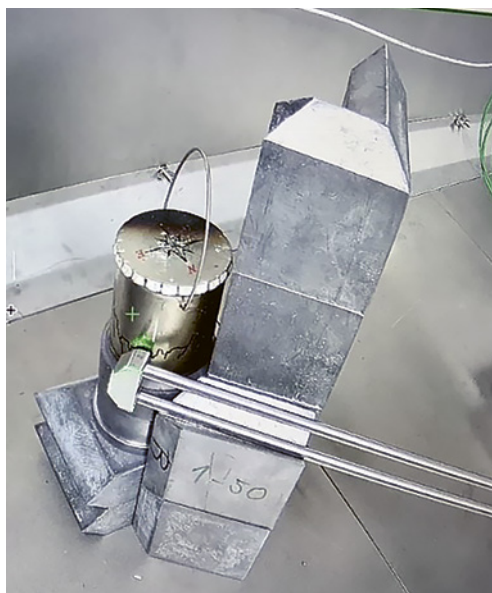
$$\frac{dD}{dt} = 501 \text{ Gy/h} \frac{(22,1 + 273,15) \text{ K} \cdot 98030 \text{ Pa}}{(23,1 + 273,15) \text{ K} \cdot 100511 \text{ Pa}} = 487 \pm 10 \text{ Gy/h}$$

který odpovídá dávkovému příkonu $8,10 \pm 0,17$ Gy/min. Měření probíhalo kontinuálně po dobu 6 174 minut, tj. 103 hodin, během nichž se postupně vlivem absorbované dávky zvyšovala optická denzita polykarbonátového detekčního elementu, a signál na výstupu sondy s časem v důsledku toho slábl.

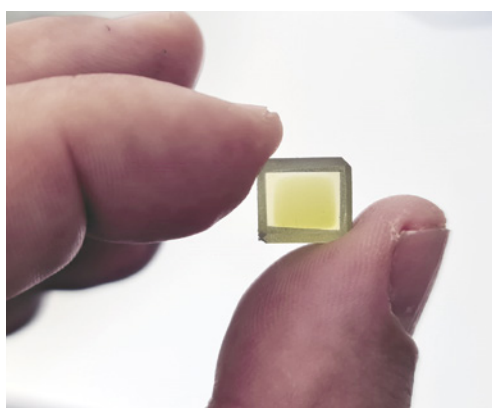
Po ukončení měření byl organický detekční element vyjmut ze vzorkovnice a vyfotografován – viz Obr. 17. Na snímku je velmi dobře patrné radiochromické zbarvení původně čirého polymeru, které již směrem od okrajů začíná regenerovat v důsledku interakce s kyslíkem, jak jsme popsali např. v práci [2, 9].



Obr. 16: Kamerový pohled na detail uložení plechovky s vysokoaktivním ZIZ za stínícím paravánem



Obr. 17: Ozářený detekční prvek po ukončení experimentu



6. Zpracování výsledků

Na Obr. 18 vidíme průběh intenzity signálu (v jednotkách lx) s absorbovanou dávkou (v jednotkách Gy), proložený polynomem druhého stupně (oranžová křivka).

Obr. 19 ukazuje přepočtení na optickou denzitu (v převrácených centimetrech) dle známého vztahu

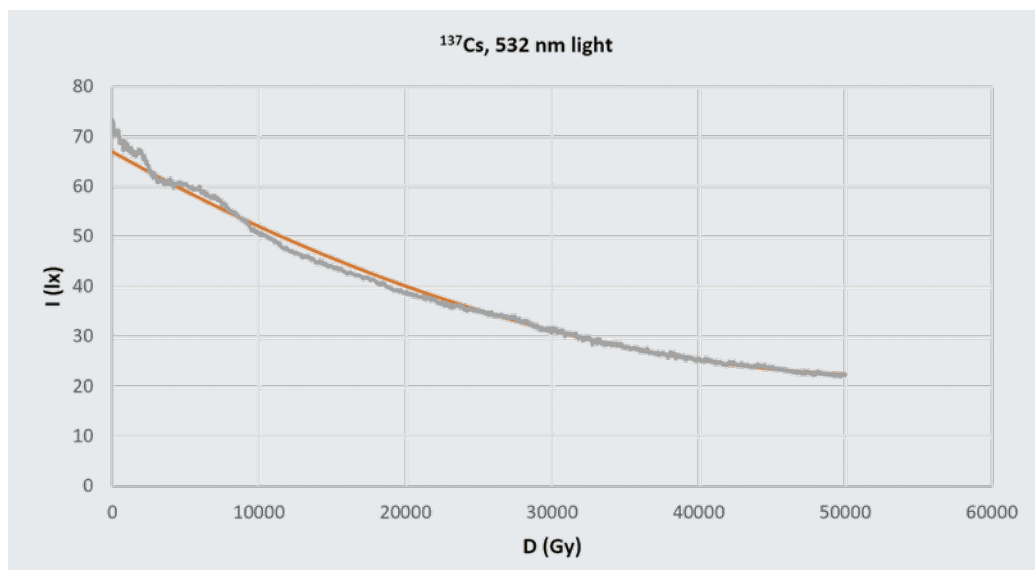
$$OD = \frac{1}{d} \log \frac{I_0}{I}$$

s nejistotou cca 2 % danou především nejistotou určení intenzity signálu luxmetrem Sonel LXP-10A.

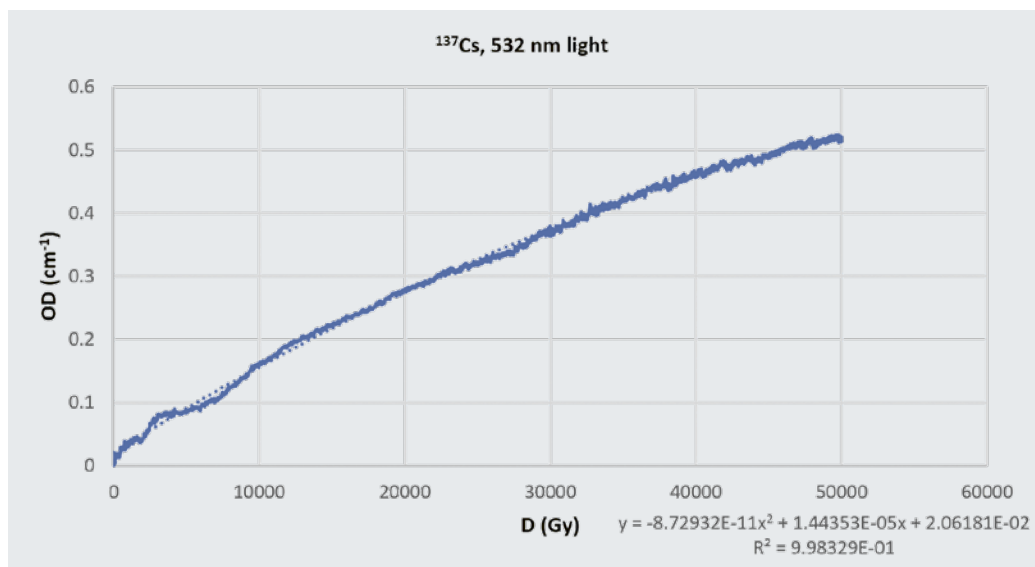
Regresní křivku grafu na Obr. 19 lze již použít v uvedeném rozmezí dávek coby kalibrační křivku sondy po fotony o energii v okolí 662 keV (fotopík ¹³⁷Cs). Vzhledem k tomu, že kalibrační křivku pro energii 1 173 keV



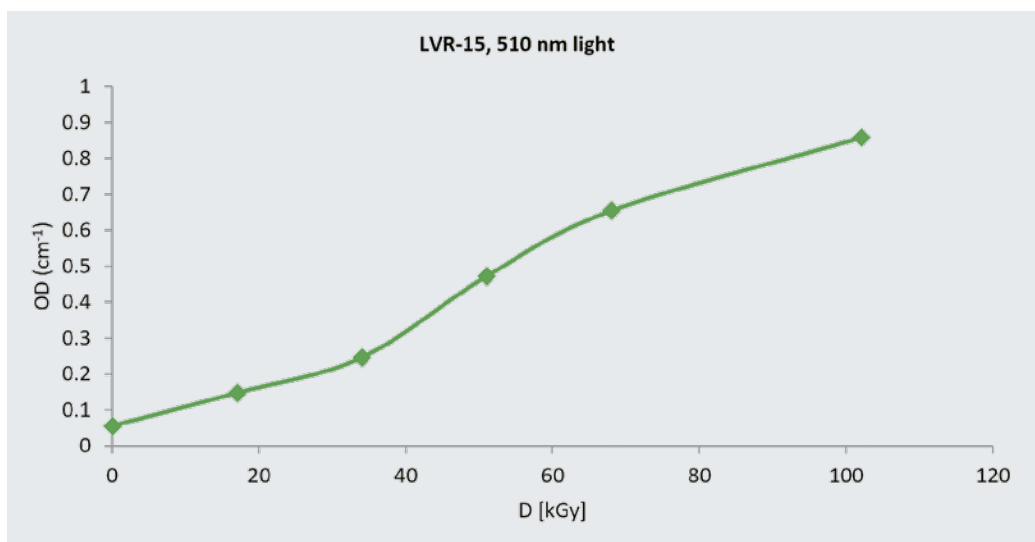
Obr. 18: Měřená závislost intenzity osvětlení na dávce proložená polynomem 2. stupně



Obr. 19: Vypočtená závislost optické hustoty na dávce, proložená kvadratickou regresní funkcí (tečkovaná čára)



Obr. 20: Měřená závislost optické hustoty na absorbované dávce pro spektrum záření spuštěného výzkumného reaktoru LVR-15



a 1333 keV radionuklidu ^{60}Co , jakož i kalibrační křivku pro energetické spektrum výzkumného reaktoru LVR-15 v Řeži jsme důkladně prozkoumali v uplynulých letech, bylo možné učinit určitá srovnání.

7. Porovnání výsledků

Porovnáním s odezvou na spektrum spuštěného výzkumného reaktoru LVR-15, publikovanou např. v [23, 24] (viz Obr. 20), dospíváme k poměrně dobré shodě s výsledky získanými pro ^{137}Cs v našem experimentu.

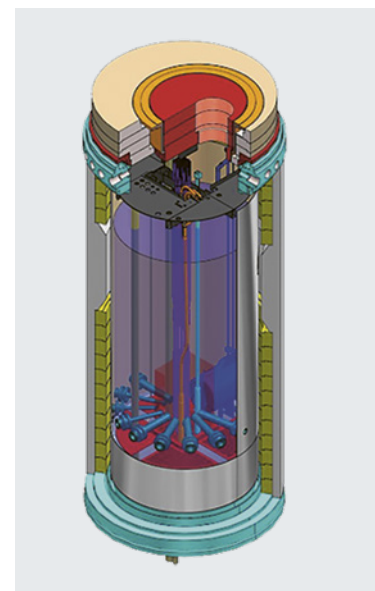
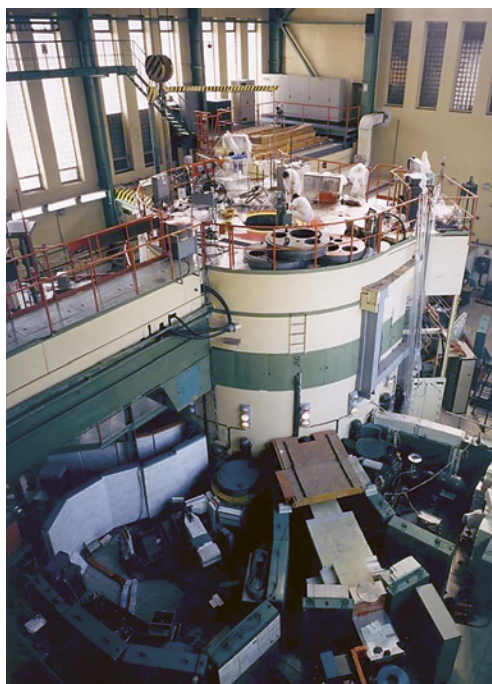
8. Pilotní in situ měření

Pilotní in situ měření bylo uskutečněno uvnitř aktivní zóny výzkumného jaderného reaktoru LVR-15 Centra výzkumu Řež. Jedná se o reaktor o maximálním tepelném výkonu 15 MW, chlazený a moderovaný lehkou vodou – Obr. 21. Měření probíhalo během jeho plánované provozní odstávky. K aktivní zóně reaktoru vede řada horizontálních a vertikálních kanálů (viz Obr. 21 vpravo), které vyúsťují mimo prostor reaktoru a umožňují zasunutí ozařovaných materiálů a sond až k hranici aktivní zóny. Pilotní měření probíhalo uvnitř jednoho z horizontálních experimentálních kanálů s označením HK1.

U ústí HK1 byl po otevření kanálu detekován dávkový příkon 2 Sv/h. Z toho důvodu bylo ústí kanálu zastíněno válcovou olověnou zátkou výšky 90 mm a průměru 96 mm, s vyvrtanými průchodkami pro světlovody laserové sondy – Obr. 22.

Po zasunutí sondy spolu se stínící zátkou do horizontálního kanálu reaktoru (viz Obr. 23), a vytažení přidavného stínění kanálu, byl u ústí naměřen příkon dávkového ekvivalentu pouhých 12 mSv/h.

Abychom ochránili citlivou elektroniku sondy před zářením procházejícím radiačně nechráněnými dutými světlovody, byl na vstupu a výstupu paprsku instalován optický periskop – viz Obr. 24 – obsahující 2 optické hranoly schopné změnit trasu laserového svazku o 90° , tj. mimo přímý svazek ionizujícího záření. Nejvíce exponované elektronické prvky tak byly vystaveny dávkovému příko-



Obr. 21: Výzkumný jaderný reaktor LVR-15



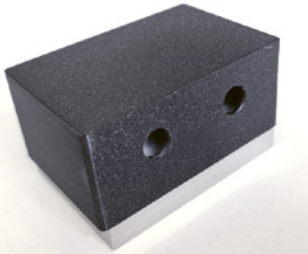
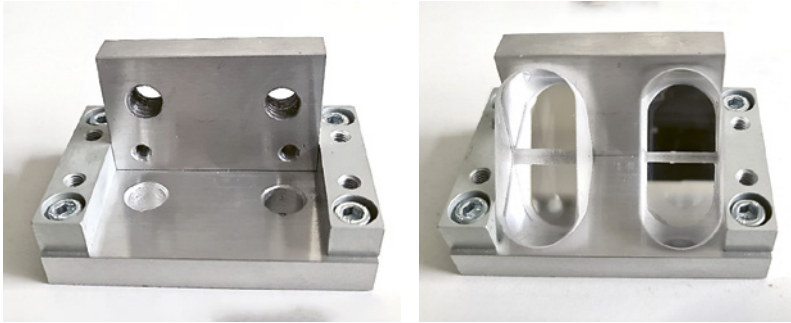
Obr. 22: Olověná stínící zátká průměru 96 mm a celkové výšky 90 mm, pro zastínění ústí horizontálního kanálu výzkumného reaktoru LVR-15



Obr. 23: Zasouvání 4 m dlouhé sondy s olověnou zátkou do horizontálního kanálu výzkumného jaderného reaktoru LVR-15

nu pouhých $7 \mu\text{Sv/h}$ a za celou dobu měření obdržely okolo 0,5 mSv.

Úplná sestava sondy pro měření uvnitř kanálu výzkumného reaktoru LVR-15, byla vyfotografována během jejího laboratorního testování (Obr. 25) a následně během její instalace v horizontálním kanálu jaderného reaktoru LVR-15 (Obr. 26).



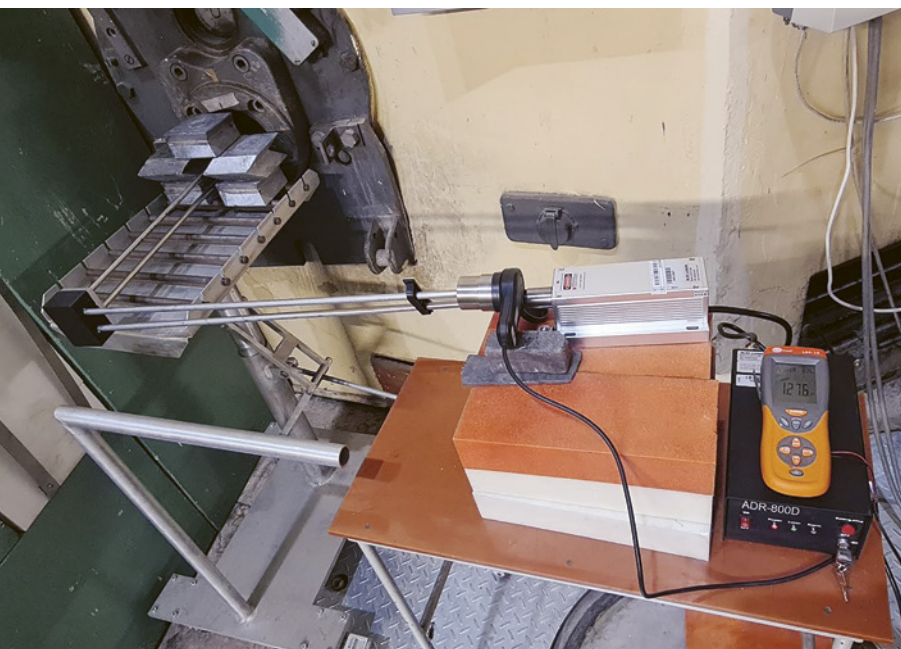
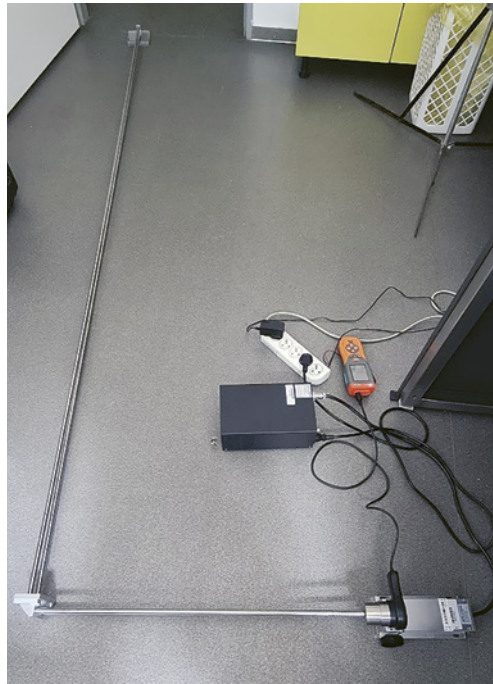
Obr. 24: Optický periskop měnící trajektorii laserového svazku o 90°



Obr. 25: Laboratorní testování úplné sestavy laserové sondy



Obr. 26: In situ měření uvnitř horizontálního kanálu výzkumného reaktoru LVR-15



9. Zpracování výsledků

Měření uvnitř HK1 výzkumného reaktoru LVR-15 probíhalo v hloubce 3,6 m od vnější stěny reaktoru, tj. na samé hranici aktivní zóny. Doba měření činila 78 hodin, během kterých sonda postupně obdržela dávku téměř 200 kGy. Závislost absorbované dávky na OD, vypočtenou jako inverzní funkce k regresní funkci z Obr. 19, ukazuje Obr. 27.

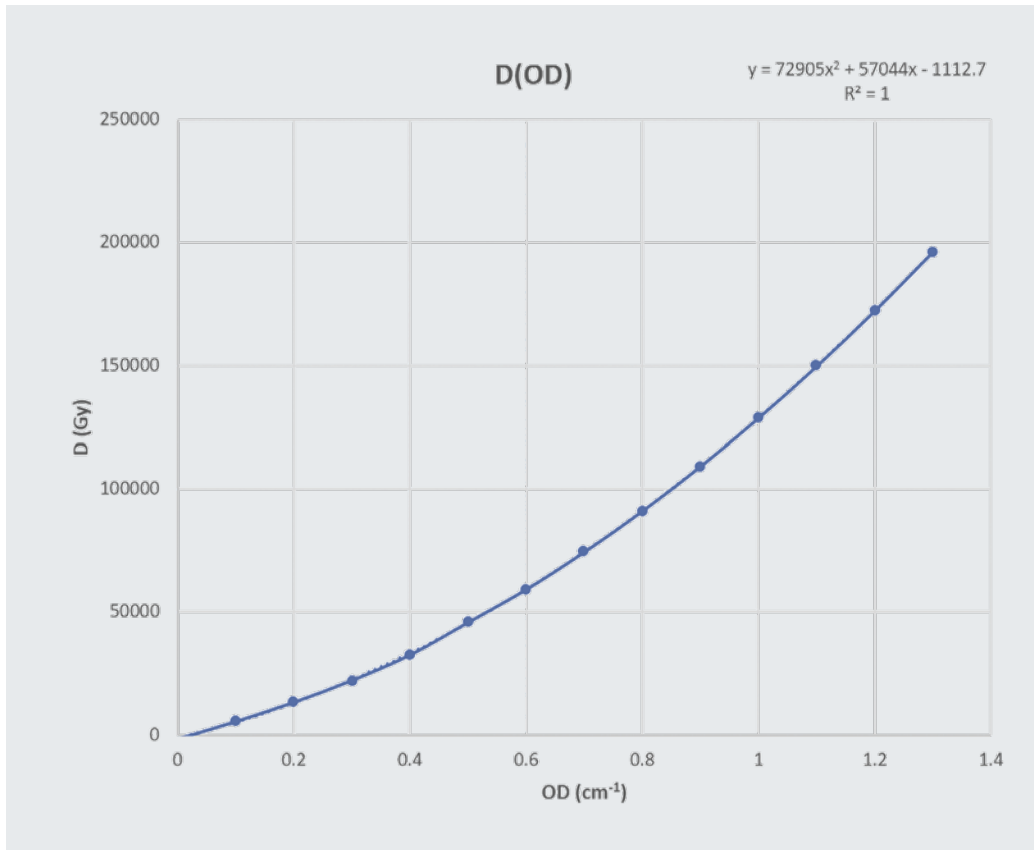
Proložení vypočtených hodnot polynomičnou regresní funkcí druhého řádu byly dopočteny i hodnoty ležící mimo oblast dávek změřené kalibrační křivky (Obr. 19). Přiřazením změřené ozařovací doby jednotlivým hodnotám OD z Obr. 27 byla poté získána závislost absorbované dávky na čase – viz Obr. 28.

Proložení těchto bodů lineární regresní funkcí byl již snadno vyjádřen dávkový příkon v místě sondy $dD/dt = 42,5 \text{ Gy/min}$, tj. $2,55 \text{ kGy/h}$, s nejistotou 10 %, coby směrnice této regresní funkce.

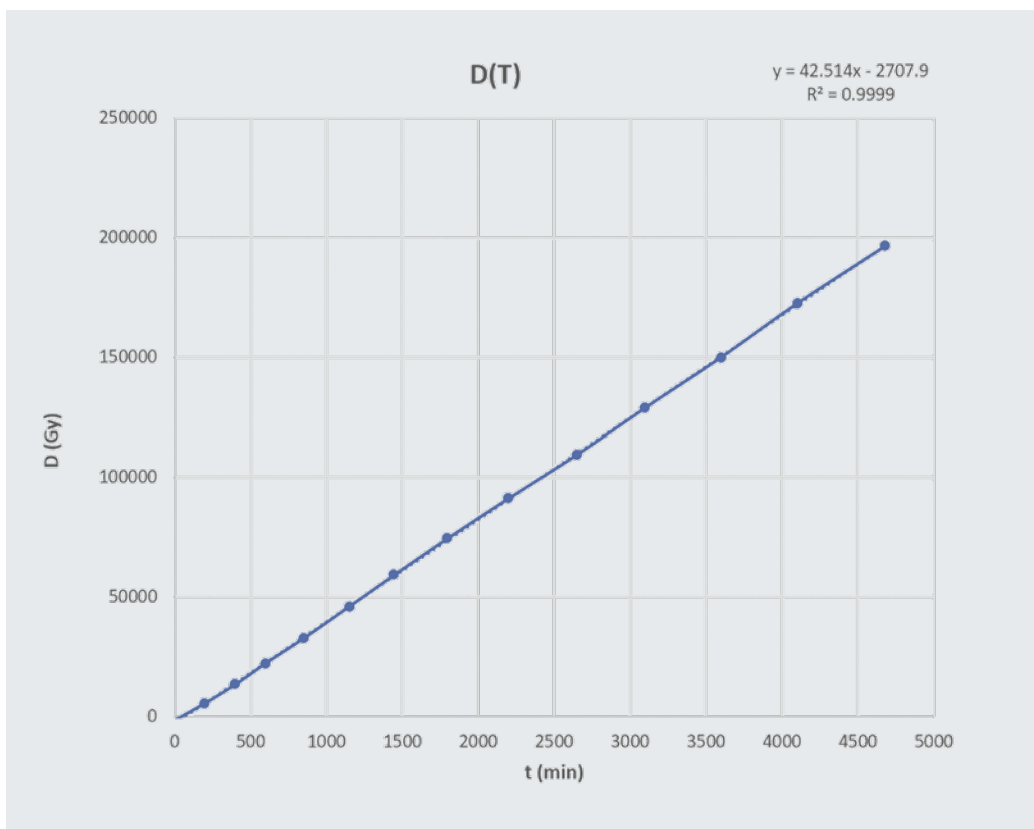
10. Závěrečné shrnutí

Experiment prokázal funkčnost a časovou stabilitu zkonstruovaného zařízení pro dozimetrii vysokých dávkových příkonů v obtížně přístupných prostorách, jako jsou např. kanály výzkumného jaderného reaktoru apod. Současně umožnil porovnání s výsledky starších měření pomocí stejného detekčního materiálu. Bylo prokázáno, že v rámci cca 30% odchylky se výsledky získané pro ^{137}Cs shodují s výsledky získanými v námi již publikovaných pracích pro spektrum spuštěného výzkumného reaktoru LVR-15 v Řeži.

Provedená pilotní měření dávkového příkonu přímo na hranici aktivní zóny během plánované odstávky výzkumného jaderného reaktoru LVR-15 již nyní pomohla poskytnout některé cenné informace o celkovém inventáři aktivity uvnitř aktivní zóny a umožnila kupř. odhad absorbované dávky v podvodní kameře používané pro vizuální kontrolu stavu aktivní zóny reaktoru během jeho odstávky. Z rychlosti poklesu aktivity v aktivní zóně během odstávky bude do budoucna kupř. možno usuzovat též na radioizotopové spektrum.



←
Obr. 24: Závislost absorbované dávky na OD



←
Obr. 25: Závislost absorbované dávky na čase

Literatura:

- [1] Zoul, D., Cabalka, M., Koplová, M., A study of using polycarbonate as a reusable radiochromic integrating dosimeter for the determination of high doses of ionizing radiation, RAD Conference Proceedings, vol. 3, pp. 138–142 (2018)
- [2] Zoul, D., Cabalka, M., Koplová, M., Studie využití polykarbonátu pro integrující dozimetrii vysokých dávek ionizujícího záření, Bezpečnost jaderné energie (Nuclear power safety) 25 [63] 5/6, pp. 141–149 (2017)
- [3] Zoul, D., Cabalka, M., Koplová, M., Studie využití polykarbonátu pro integrující dozimetrii vysokých dávek ionizujícího záření, Book of abstracts XXXIX. DRO (2017)
- [4] Galante, A. M. S., Campos, L. L., Characterization of polycarbonate dosimeter for gamma-radiation dosimetry, Proceedings of 3rd European IRPA Congress, Dosimetry, Helsinki (2010)
- [5] Galante, A. M. S., Campos, L. L., (2012), "Mapping radiation fields in containers for industrial g-irradiation using polycarbonate dosimeters", Applied Radiation and Isotopes, vol. 70, pp. 1264-1266. DOI: 10.1016/j.apradiso.2011.12.046
- [6] Serini, V., "Polycarbonates" in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH, Weinheim (2000)
- [7] Xie, X. Q., Ranade, S. V., and Dibenedetto, A. T., A solid state NMR study of polycarbonate oligomer grafted onto the surface of amorphous silica. Polymer 40, 6297–6306 (1999)
- [8] Shamshad, A, Rashid, M., Husain, A, High gamma dose dosimetry by polycarbonates, Radiation Physics and Chemistry, vol. 50, pp. 307–311 (1997)
- [9] Zoul, D., Studie tmavnutí polykarbonátových desek v poli ionizujícího záření, (A study of the changes in optical density of the polycarbonate plates in the field of ionizing radiation), Bezpečnost jaderné energie (Nuclear power safety) 24 [62] 1/2, pp. 33–38 (2016)
- [10] Dosimetry Systems for Use in Radiation Processing, ICRU REPORT 80, Journal of the ICRU, Oxford University Press, (2008), vol. 8, no. 2, pp. 1–81
- [11] Zoul, D., Koplová, M., Rosnecký, V., Štěpánková, H., Římal, V., Štěpánek, J., Mojzeš, P., Procházka, M., 2019, "Studium molekulárních mechanismů radiochromického jevu v polykarbonátu (A study of the molecular mechanisms of the radiochromic effect in the polycarbonate), Bezpečnost jaderné energie (Nuclear power safety), 26 [64] 11/12, pp. 338–346. ISSN: 1210-7085 (2019)
- [12] Košťál, M., Schulc, M., Rypar, V., et. al, (2017), "Validation of zirconium isotopes (n, γ) and ($n, 2n$) cross sections in a comprehensive LR-0 reactor operative parameters set, " Appl. Rad. and Isot., 128, pp. 92–100, DOI: 10.1016/j.apradiso.2017.06.023
- [13] Zoul, D., Cabalka, M., Koplová, M., A study of using polycarbonate as a reusable radiochromic integrating dosimeter for measurements of high doses of ionizing radiation. Radiation measurements (2017)
- [14] Koplová, M.; Zoul, D.; Rosnecký, V.; Štěpánková, H.; Římal, V.; Štěpánek, J.; Procházka, M., Study of molecular mechanisms of radiochromic phenomenon in polycarbonate. Book of abstracts RAD (2019)
- [15] Zoul, d.; Koplová, M.; Libera, O.; Zimina, M.; Rosnecký, V.; Cabalka, M.; Kučera, J.; Strunga, V.; Štěpánková, H.; Římal, V.; Štěpánek, J.; Procházka, M., Výzkum fyzikálně-chemických změn v ozářeném polykarbonátu v kontextu možné využitelnosti pro dozimetrii vysokých dávek. Bulletin IAA (2019)
- [16] Koplová, M.; Zoul, D.; Košťál, M.; Rosnecký, V.; Čížek, J., Positron annihilation spectroscopy of irradiated polycarbonate. Book of abstracts RAD (2020)
- [17] Zoul, D.; Koplová, M.; Zimina, M.; Libera, O.; Rosnecký, V.; Košťál, M.; Štěpánková, H.; Římal, V.; Čížek, J., Study of structural changes in irradiated polycarbonate by positron annihilation spectroscopy, NMR spectroscopy and nanoindentation. Book of abstracts RAD (2020)
- [18] Koplová, M.; Zoul, D.; Čížek, J.; Košťál, M.; Rosnecký, V.; Cabalka, M.; Vinš, M.; Šimon, J.; Schulc, M., Pozitronová anihilační spektroskopie ozářeného polykarbonátu. Book of abstracts DRO (2021)

- [19] Zoul, D.; Koplová, M.; Rosnecký, V.; Košťál, M.; Vinš, M.; Šimon, J.; Schulc, M.; Cabalka, M.; Kučera, J.; Strunga, V., Využití polykarbonátu pro dozimetrii vysokých dávek. Book of abstracts DRO (2021)
- [20] Zoul, D.; Koplová, M.; Libera, O.; Zimina, M.; Rosnecký, V.; Košťál, M.; Cabalka, M.; Kučera, J.; Strunga, V.; Štěpánková, H.; Římal, V.; Čížek, J.; Štěpánek, J.; Procházka, M., Study of chemical processes in irradiated polycarbonate in the context of applicability for integrating dosimetry of high doses. Radiation Physics and Chemistry (2020)
- [21] Zoul, D.; Koplová, M.; Zimina, M.; Rosnecký, V.; Cabalka, M.; Kučera, J.; Strunga, V.; Štěpánková, H.; Štěpánek, J.; Procházka, M., Studium chemických pochodů v ozářeném polykarbonátu v kontextu možné využitelnosti pro integrující dozimetrii vysokých dávek. Book of abstracts DRO 2019
- [22] Zoul, D.; Koplová, M.; Rosnecký, V.; Košťál, M.; Vinš, M.; Šimon, J.; Schulc, M.; Cabalka, M.; Kučera, J.; Strunga, V., Výzkumný program Laboratoře optické absorpční spektroskopie v Centru výzkumu Řež. Aldebaran Bulletin (2020)
- [23] Zoul, D.; Koplová, M.; Rosnecký, V.; Košťál, M.; Vinš, M.; Šimon, J.; Schulc, M.; Cabalka, M.; Kučera, J.; Strunga, V., The use of Polycarbonate as dosimeter of high doses – SI. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science (2021)
- [24] Zoul, D.; Koplová, M.; Zach, V., Využití organického materiálu MAKROCLEAR pro radiochromickou integrující dozimetrii hadronových svazků. Jaderná energie (2022)

Poděkování

Předkládané výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podporována MŠMT – projekt LM2023041.



Mgr. David Zoul

david.zoul@cvrez.cz

Absolvoval Matematicko-fyzikální fakultu Univerzity Karlovy v Praze v oborech Jaderná fyzika a Kvantová biofyzika. Na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze získal kvalifikaci a akreditaci pro výkon zdravotnického povolání v oboru Radiologická fyzika. V letech 2001–2014 pracoval ve Fakultní nemocnici v Motole a v Nemocnici na Homolce jako lékařský fyzik v oboru radiodiagnostiky a radiační onkologie se specializací na léčbu dětské leukémie a stereotaktickou radioterapii nádorů mozku. Současně zde vykonával soustavný dohled nad dodržováním požadavků radiační ochrany na pracovištích s radiodiagnostickými rentgenovými přístroji. V letech 2006–2013 přednášel lékařskou fyziku na 2. lékařské fakultě Univerzity Karlovy v Praze a Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT na Kladně. Od roku 2014 pracuje ve společnosti Centrum výzkumu Řež v oblasti dozimetrie ionizujícího záření, kde se zabývá mimo jiné výpočty a konstrukčním řešením rozmanitých zařízení pro nakládání s vysoce radioaktivními materiály, výzkumem a vývojem organických integrujících dozimetrů, gama spektrometrií a gama-tomografií. Současně vykonává soustavný dohled nad dodržováním požadavků radiační ochrany na pracovištích s otevřenými a uzavřenými radionuklidovými zdroji.

Radiofarmaka – odkud přicházíme, kam jdeme a kam kráčíme

Ing. et Ing. Jan Adam, Ph.D., Ing. Patrik Špátzal, MBA
ÚJV Řež, a. s.

Článek se věnuje historii oboru radiofarmak – od radia v kosmetických přípravcích a radioizotopů v květináči, přes českou stopu v metodě PET až po radioaktivní léčiva pomáhající diagnostikovat včas rakovinná a jiná onemocnění nebo léčit těžko operovatelné nádory. Od zrození až po výhled do budoucnosti jde o fascinující příběh o technologickém pokroku hned v několika odvětvích, na jehož konci stojí radioaktivita skutečně pomáhající lidskému zdraví způsobem, jakým si to před sto lety nedokázali představit ani laikové a ani odborníci.
The article monitors the story of radiopharmaceuticals – from radium-imbued cosmetic products and radioisotopes in flowerpots through the Czech contribution to PET method to radioactive drugs helping to diagnose cancer and other diseases or treating tumors, where surgery is not an option. From the emergence to the vision of the future, it is a fascinating story of technological progress across fields, resulting in radioactivity actually helping human health in ways unthought-of a hundred years ago either by laymen or experts.

Radiofarmaka. Co se skrývá za tímto tajemně a pro některé možná i trochu nebezpečně znějícím slovem? Odpověď hledejme v jeho dvou částech. Tato veskrze fascinující skupina látek v sobě spojuje dvě věci – radioaktivitu a léčivo. S pomocí využití radioaktivních vlastností atomů které obsahují, dokáží radiofarmaka přispívat nemalou měrou k rozšíření možností a zlepšení vyhlídek pacientů zejména ve dvou hlavních oblastech – diagnostice a terapii. Pomocí radiofarmak dokáže nukleární medicína – moderní a multidisciplinární obor lékařských věd – jednak stanovovat či zpřesňovat diagnózy, jednak přispívat přímo k léčení zjištěných poruch či malignit. Jaderné záření tak přímo pomáhá lidskému zdraví.

Trocha historie

Nicméně cesta, která vedla až sem, byla do jisté míry velice trnitá, plná zákrut a sem tam i slepých uliček. Stačí se podívat pouhých sto let do minulosti. Ve dvacátých letech zachvá-

tila Spojené státy americké takzvaná „radiová horečka“. Radium, které bylo objeveno manželi Curieovými v jáchymovském smolinci v roce 1898, získalo mezi tehdejší veřejností až magickou pověst. Nebezpečí radioaktivity a jejích efektů nebylo tehdy mimo vědecké kruhy všeobecně známo a lidé měli dojem, že jim tento „mystický nový druh energie“ pomůže k leccemus – krásnější pleť, bělejší zubům, vyšší potenci či libidu. Z dnešního hlediska se zdá až neuvěřitelné, co se tehdy dělo, a odstrašující obrázky například „radiových čelistí“ nešťastných malířek ručiček kapesních hodinek, ale i lidí dobrovolně používajících radiové produkty, jsou tichým mementem toho, že ve špatných rukou je radiace s lidským zdravím v přímém rozporu.

Paradoxně, v tu samou dobu, kdy se lidé dobrovolně vystavovali radiaci z produktů s radium, byly pokládány základy nukleární medicíny. George de Hevesy, pozdější nositel Nobelovy ceny, poprvé použil izotop



Obr. 1 Radithor, jeden z nejznámějších příkladů tzv. „radiation quackery“ (zdroj: Wikimedia, foto: Sam LaRussa, USA)

olova-212 (tehdy nazývaný radium-E), aby studoval jeho distribuci v živém organismu – konkrétně rostlinách bobu koňského. Koncept použití zanedbatelného množství radioaktivního preparátu (tak malého, že nehrozí riziko toxických účinků), či krátce tzv. radiotracerů, je doposud úhelným kamenem diagnostických metod nukleární medicíny. De Hevesy za tento objev a následující studie získal v roce 1943 Nobelovu cenu.

Třicátá léta dvacátého století pak přinesla další objev, bez kterého by pozdější zrod nukleární medicíny a radiofarmacie nebyl možný – byl jím objev umělé (indukované) ra-

dioaktivity. Práce manželů Joliot-Curieových prokázala, že ostřelování lehkých neradioaktivních materiálů (např. hliníku) alfa-částicemi indukuje v ostřelovaném cíli radioaktivitu, přetrvávající i po ukončení ozařování. Jod-131, objevený v roce 1938, byl poprvé podán coby vůbec historicky první terapeutické radiofarmakum na poruchy štítné žlázy roku 1941. Zajímavostí je, že se používá dodnes.

Scintigrafie, metoda založená na podání radioaktivního izotopu pacientovi a následném snímkování jeho distribuce, byla poprvé popsána v roce 1950. V následujících dekádách byly objevovány a popisovány další ra-



↑
Obr. 2 PET Centrum
Praha – první v ČR
(zdroj ÚJV Řež, a. s.)

dionuklidy vhodné pro zobrazování různých dějů v lidském těle. V padesátých letech byl také poprvé formulován koncept tomografie, snímkování planárních řezů a následná rekonstrukce trojrozměrného obrazu lidského těla. V roce 1962 byla představena takzvaná emisní rekonstruktivní tomografie, ze které se později (v závislosti na použitém druhu radionuklidu) vyvinuly metody SPECT (jednofotonová emisní tomografie) a PET (pozitronová emisní tomografie).

Šedesátá léta přinesla taktéž první využití technecia-99m jako radiotraceru. Vazbou na různé druhy biomolekul či specifických molekul umožnil zobrazování mnoha biologických dějů, a během šedesátých let se jeho používání rozšířilo do celého světa. Přispěla k tomu i poměrně levná produkce technecia-99m jako vedlejšího produktu činnosti fungujících výzkumných reaktorů.

Česká stopa a zrození PET

Roku 1968 se v Československu odehrálo mnoho věcí, včetně jedné s nedozírnými důsledky pro celou nukleární medicínu. Prof. Josef Pacák a Miroslav Černý designovali molekulu a popsali poprvé syntézu 2-deoxy-2-[¹⁸F] fluor-D-glukosy coby látky schopné potlačit rakovinné bujení „vyhladovněním“ rakovinných buněk s velkou potřebou energie, které ji snadno a ochotně přijmou, ale nedokáží přeměnit na energii. Premisa vyhladovnění splněna sice nebyla, ale předpoklad snadného vychytávání a transportu do metabolicky abnormálně aktivních buněk ano. O deset let později byla tato látka v La Jolla v USA označena radioaktivním fluorem-18, pozitron vyzařujícím nuklidem o poločasu 109 minut. Zrodila se tak látka, která nastartovala exponenciální rozvoj metody pozitronové emisní tomografie.

Pomalou se tak formovalo to, co dnes nazýváme oborem nukleární medicíny. Výroba



Obr. 3 Vnitřní kontejner pro transport ^{18}F -radiofarmak (zdroj ÚJV Řež, a. s.)

technecia-99m ve formě centralizované vyráběných, a de facto celosvětově distribuovatelných, molybden/techneciových generátorů umožnila rozvoj extenzivního využívání scintigrafie a SPECT. U pozitronové emisní tomografie byla situace složitější – krátký poločas přeměny fluoru-18 (109 minut) vyžadoval budování výrobních center s příslušnými technologiemi, umožňujících efektivní a ekonomicky racionální výrobu, a také logistických sítí.

Zobrazovací technika se paralelně vyvíjela a zdokanala ruku v ruce s pokroky ve výpočetní technice. Klíčovou ideou bylo propojení informace získané z emisní tomografie (odpovídající biologickým a biochemickým

dějům v organismu) s informací z klasické tomografie výpočetní (CT). Ta totiž poskytla jasnou strukturální (morfologickou) informaci o vyšetřovaném těle, do které bylo možné zasadit a lokalizovat přesné informace o podezřelých biologických dějích. Zrodil se tak PET/CT skener, přístroj, který byl vyhlášen v roce 2000 vynálezem roku.

Radiofarmaka v ČR – současnost

Rok 2000 se stal symbolickým předělem pro radiofarmaka také v ČR. Do této doby byla využívána různá farmaka pro scintigrafii, metodu SPECT, či terapeutické a paliativní účely, produkovaná v Řeži u Prahy (viz článek o his-

torii radiofarmak v ÚJV Řež). Stalo se tak díky unikátnímu modelovému projektu Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA), který měl za cíl otestovat, zdali lze provozovat v zemích na podobném stupni rozvoje, na kterém v té době Česká republika byla, tak technologicky složitou diagnostickou metodu, jakou je pozitronová emisní tomografie (PET). Zrodilo se tak první vyšetřovací centrum PET v České republice a o něco později zahájilo dodávky i první dedikované produkční centrum Ústavu jaderného výzkumu.

Pilotní projekt byl úspěšný a v následujících letech se metoda PET začala v ČR rozšiřovat. Instalovány byly skenery v Brně, Plzni, Olomouci. Reakcí na zvyšující se poptávku bylo vybudování druhého produkčního centra ÚJV Řež v Brně u Masarykova onkologického ústavu. Kvůli poločasů přeměny fluoru-18, rovnému 109 minutám, by už totiž ani maximální vyráběné množství nedokázalo uspokojit potřebu všech center zároveň – včas a v odpovídající míře. Paralelně s výrobními centry ÚJV Řež v ČR v této době funguje i druhý výrobce – spinoff společnost Ústavu pro jadernou fyziku AV ČR – RadioMedic, s.r.o.

Mimo fluorodeoxyglukosu oba v ČR činné subjekty v následujících letech postupně registrují pro potřebu českých pacientů další radiofarmaka.

Fluorodeoxyglukosa je látka širokospektrální, s obrovským významem hlavně v onkologii, pro některé diagnózy ovšem není vhodná. Vzhledem ke krátkému poločasu přeměny fluoru-18 je dovoz ze zahraničí sice teoreticky možný, nicméně jsou s ním spojeny nemalé komplikace. Nejlepší cestou pro zajištění spolehlivých dodávek je proto zavedení a výroby daných látek přímo českými výrobci. Postupem času tak přibývají látky fluoru-L-thymidin, fluorid sodný, fluorocholin pro diagnostiku karcinomu prostaty nebo z hlediska použitého nuklidu unikátní ¹¹C-methionin. U tohoto přípravku poločas přeměny uhlíku-11 rovný 20 minutám umožňuje pouze striktně lokální využití v místě výroby, díky menší radiační zátěži je nicméně důležitý například pro pediatrické pacienty. Dal-

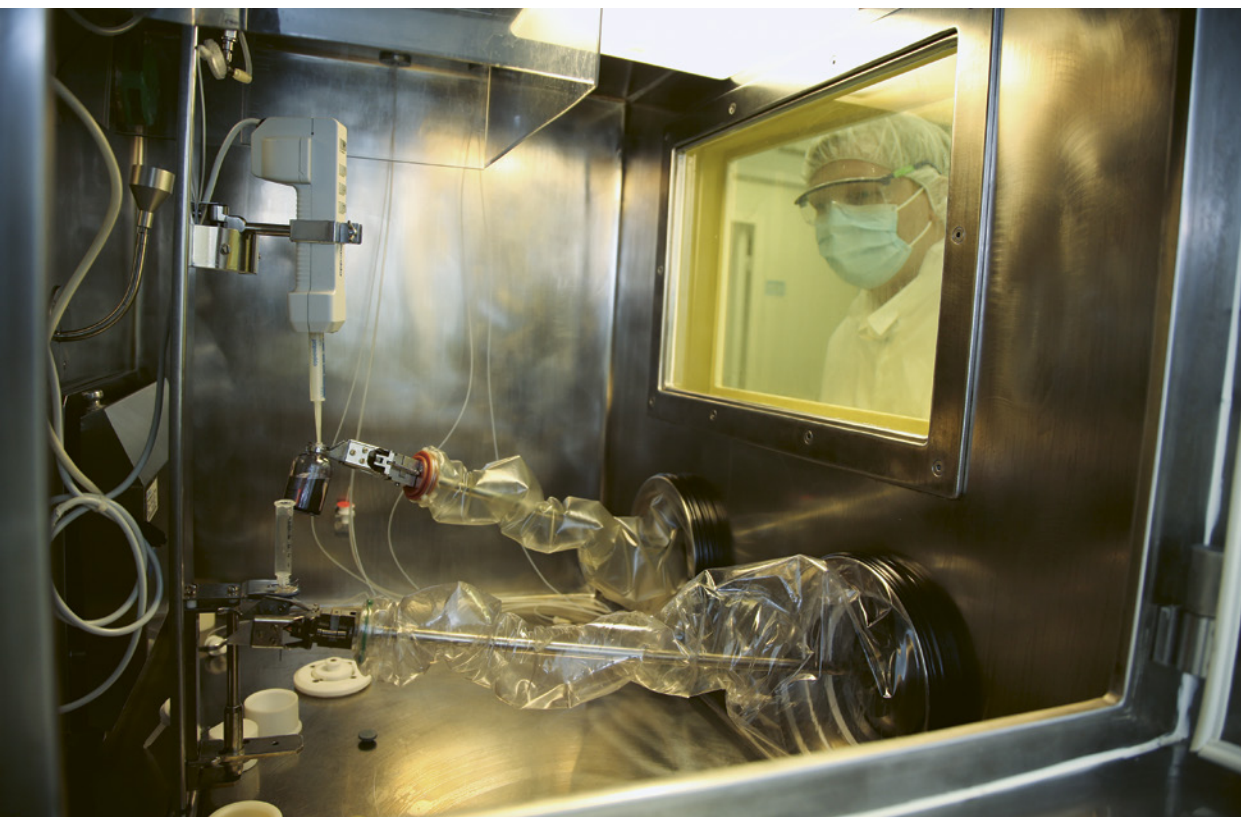
ší registrované látky jsou omezeně dováženy z výrobních míst v zahraničí, je-li to možné.

Potřeby rozšířenější metody SPECT jsou saturovány standardním dovozem techneciových generátorů a kitů pro značení, ze kterých si nemocnice připravují radiofarmaka samy. Dovozen jsou řešena i případná terapeutika (například látka Xofigo založená na radiu-225). V poslední době se díky aktivitám odborných společností a distributorů rozvolnila také situace kolem diagnostického PET radionuklidu gallium-68, který si mohou nemocnice zakoupit a využívat podobně, jako je zavedená letitá praxe u technecia-99m a metody SPECT.

Radiofarmaka v ČR – Quo vadimus?

Jaký je další předpokládaný vývoj v ČR? Asi nejjednodušší je odpověď u metody PET. Za uplynulých deset let došlo ke zdvojnásobení počtu vyšetření i počtu instalovaných skenerů v ČR. Z epidemiologických dat je nicméně zřejmé, že potenciální počet pacientů, kterým může metoda pomoci, je ještě vyšší, a pokud by byly odstraněny nebo marginalizovány současné limitace, je zde možný další růst. Skupina ÚJV (resp. divize Radiofarmaka ÚJV Řež a nedávná akvizice v podobě RadioMedic) má další radiofarmaka v registračním procesu a další potenciální jsou zpřístupňována pomocí celoevropských registrací, což otevírá cestu spolupracím na licenčních výrobcích.

Co se týká metody SPECT, posledních 15 let otřáslo věcmi dlouho považovanými za jistoty. Fakt, že produkce molybdenu-99, mateřské látky pro výrobu molybden/techneciových generátorů, závisela ještě v roce 2010 na pouhých šesti reaktorech a neplánovaný souběh odstávek a havárií dvou z nich vyústil v redukci produkce v roce 2009 o více než 60 % a tzv. první techneciovou krizi, byl prvním varováním. Ačkoli byla učiněna opatření, produkce byla diverzifikována a byly zapojeny další reaktory, včetně řežského LVR-15, nezabránilo to opětovným dočasným výpadkům, naposledy na podzim 2022. Vesměs se totiž jedná o výzkumné reaktory dotované často státem, pro které byla produkce radiofarmak pouze vedlejší čin-



Obr. 4 Rozplňovací zařízení pro výrobu diagnostická radiofarmaka v jednom z výrobních center ÚJV (zdroj ÚJV Řež, a. s.)

ností. Dva z evropských reaktorů jsou již přes 60 let staré a výstavba nových nabírá zpoždění. Odpovědí mohou být nové metody produkce ^{99m}Tc , na kterých se usilovně pracuje, dá se nicméně předpokládat, že i zde bude potřeba přenastavit dlouholeté zvyklosti. V úvahu přichází například přímá výroba technecia-99m pomocí cyklotronu na ÚJV AV ČR.

Podobná situace pak platí i pro terapeutická radiofarmaka. Nuklidy s terapeutickými účinky mají z fyzikální povahy delší poločasy přeměny a jejich výroba vyžaduje (mimo reaktoru nebo kruhových urychlovačů s velmi vysokými energiemi coby zdrojů nuklidů)

také výrazně komplikovanější metody výroby a zejména zabezpečení, než je tomu u PET. Vybudování takových výrobních zařízení je v současnosti vysoko nad možnostmi většiny subjektů, vyjma těch největších, leckdy nadnárodních společností. Ve spolupráci se silnými zahraničními partnery by se nicméně i zde mohlo v budoucnu podařit navázat na někdejší tradici výroby terapeutických radionuklidů. Metou, ke které se pak upínají zraky odborníků, je plnohodnotné využívání thera-
nostik, kombinovaných radiofarmak schopných zároveň fungovat jako zobrazovací i jako terapeutická látka.



Ing. et Ing. Jan Adam, Ph.D.

jan.adam@ujv.cz

je absolventem Fakulty chemicko-technologické Univerzity Pardubice (Ing.) a Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity (doktorát). Po absolvování Ph.D. souvisejícího s designem léčiv nastoupil do ÚJV Řež, kde od roku 2012 zastává pozici manažera pro výzkum a vývoj Divize Radiofarmaka. Zde se podílí na vytyčování a realizaci strategických směrů rozvoje, modernizace, navazování spoluprací a rozšiřování portfolia radiofarmak pro medicínské účely. Pravidelně na toto téma také přednáší na univerzitách, odborných institucích či odborných setkáních.

Výroba radiofarmak na reaktoru LVR-15

Ing. Martina Králová, Ing. Ján Milčák
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Výzkumné jaderné reaktory mají často charakter víceúčelových zařízení. Díky relativně vysokým výkonům (v řádu jednotek až desítek MW) slouží jako silné zdroje neutronů pro rozsáhlé aplikace. Jednou z těchto aplikací je výroba, resp. produkce radioizotopů pro technické ale i lékařské účely. Článek představuje přiblížení realizaci těchto aktivit na reaktoru LVR-15 převážně z pohledu využití pro lékařské účely.

Research nuclear reactors often have the character of multi-purpose facilities. Thanks to relatively high powers (in the order of units to tens of MW), they serve as strong neutron sources for large-scale applications. One of these applications is the production of radioisotopes for technical as well as medical purposes. The article presents a basic description of the implementation of these activities on the LVR-15 reactor, mainly from the point of view of use for medical purposes.

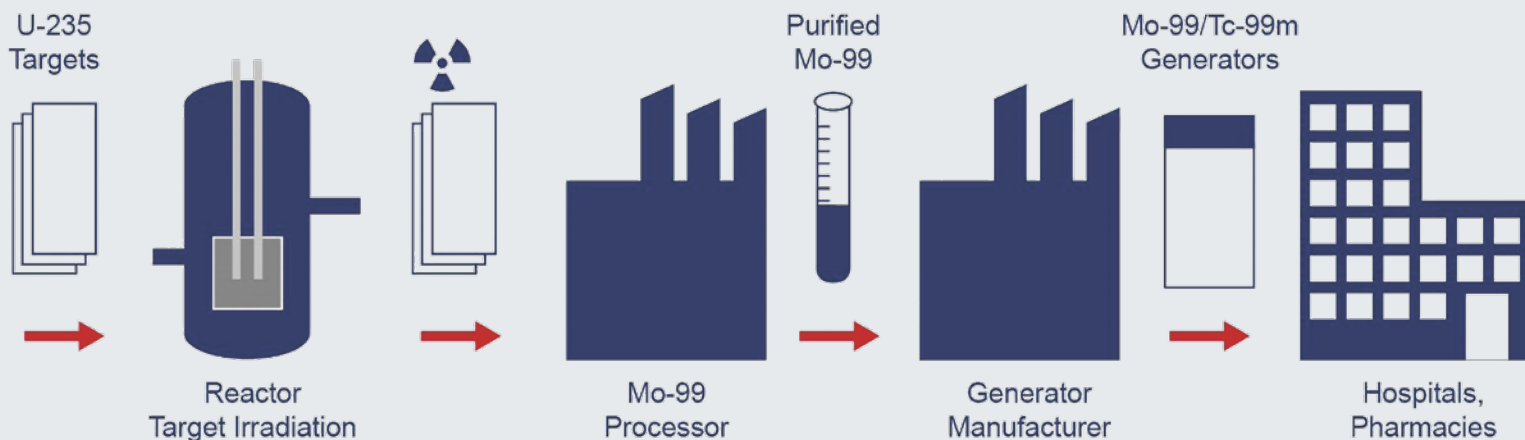
Výroba radioizotopů je založena na zachytu neutronů v materiálu terče, buď aktivací nebo generováním radioizotopů ze štěpení materiálu terče (typicky obohacený uran) tepelnými neutrony. Tyto neutrony mohou pocházet z výzkumného reaktoru nebo z urychlovačů.

Celý proces tvorby radiomedika/radioizotopu je ale značně složitý a využití služeb reaktoru představuje jen část celého produkčního cyklu. Výroba radioizotopů zahrnuje několik vzájemně souvisejících činností, včetně zajištění potřebného materiálu a návazné výroby terčů → jejich příprava a ozáření v reaktoru → přeprava ozářených terčů do zpracovatelských zařízení → radiochemické zpracování a purifikace samotného izotopu → zapouzdření v uzavřených zdrojích → kontrola kvality → distribuce a aplikace koncovým uživatelům.

Typickým lékařským izotopem je molybden-99, jehož produkční cyklus je zobrazen na obrázku 1. Proces je ale pro většinu izotopů velmi podobný.

Již původní reaktor VVR-S byl od počátku určen k produkci izotopů, rozvoj poptávky po využití LVR-15 ale souvisí s postupným

úbytkem kapacity velkých výzkumných reaktorů, které byly v nedávné době uzavřeny (NRU, OSIRIS) a doposud nebyla postavena relevantní náhrada. V některých případech došlo kombinací neplánované odstávky a absence kapacit k opravdu závažným nedostatkům v produkci (např. 2009–2010^[1]) a to následně vedlo k prvním testům o zapojení LVR-15 do produkčního cyklu pro ⁹⁹Mo. V současné době LVR-15 představuje jeden z mála reaktorů na světě se stabilní produkcí tohoto izotopu. Pro medicínské aplikace není zásadní samotný molybden (⁹⁹Mo) ale produkt rozpadu ^{99m}Tc, který je izotopem nukleární medicíny pro diagnostické zobrazování. Technecium-99m se používá k detekci onemocnění ke studiu struktury a funkce orgánů a je zvláště užitečné pro postupy nukleární medicíny, protože může být chemicky začleněno do malých molekulových ligandů a proteinů, které se koncentrují ve specifických orgánech nebo tkáních, když jsou injikovány do těla. Produkci ⁹⁹Mo lze zajistit několika způsoby, z nichž se aktuálně na LVR-15 používá metoda ozáření obohacených uranových terčů (historicky obohacení 93%, aktuálně po finální konverzi pod 20%). Po ozáření jsou terče dochlazovány mimo aktivní



zónu, poté transportovány z reaktoru do komory, kde jsou vyjmuty z ozařovacích pouzder a z horkých komor do odstíněných transportních obalových souborů určených k následné přepravě do zpracovatelského závodu (v případě LVR-15 je to belgické IRE Fleurus).

Kromě zajištění ozařování terčů pro produkci k lékařskému využití probíhal rozsáhlý vývoj v oblasti snížení obohacení a změny geometrie terčů tak, aby celý produkční cyklus mohl pracovat s materiály s obohacením pod 20 %. Současný vývoj je směřován ke zvýšení účinnosti ozařování s cílem dosáhnout lepších výtěžků a zároveň možnosti prodloužit doby ozařování tak, aby kromě produkce ^{99}Mo byly terče možným zdrojem ^{131}I a ^{133}Xe .

Přestože produkce ^{99}Mo je zásadní, LVR-15 je zapojen i do produkce dalších izotopů:

Holmium – izotop holmium-166 je pro oblast medicíny atraktivní tím, že vyzařuje vysokoenergetické beta záření, které lze využít k terapeutickému účinku, a gama záření, které lze použít pro účely jaderného zobrazování. Kromě toho lze holmium-166 zobrazit pomocí MRI pro jeho paramagnetické vlastnosti a pomocí CT pro jeho vysokou hustotu. Podobně lze využít kombinovaného účinku radioembolizace (tedy kromě silného účinku ionizujícího záření na buňky i využití blokace tepen, které k nádoru vedou) – právě pro tuto oblast je navázána dlouhodobá spolupráce mezi LVR-15 a společností Quirem Medical B.V. (Holandsko), která se věnuje vývoji tzv. Holmium

Spheres. Ty byly primárně určeny pro léčbu nádorů jater. Spolupráce vedla k postupnému vývoji ozařovacích podmínek pro zajištění potřebných aktivit holmia ve vzorcích a zároveň vytvoření podmínek pro následnou validaci postupů zpracování a vývoje dalších produktů sloužících jako zobrazovací metody nebo jako nástroje pro ověření správné aplikace radio-medika^[2].

Lutecium-177 – se stává nejúčinnějším a nejžádanějším radioizotopem pro terapeutické použití. Je to nízkoenergetický emitér beta-částic, který funguje tak, že přímo ozařuje rakovinné buňky poté, co je do místa rakoviny dopraven cílcí molekula. Používá se k léčbě neuroendokrinních rakovin, ale slibuje také léčbu metastatické rakoviny prostaty a dalších rakovin. V současné době probíhají desítky klinických studií zkoumající potenciál ^{177}Lu při léčbě různých typů rakoviny a očekává se, že poptávka po něm rychle poroste, protože se bude nadále prokazovat jeho účinnost

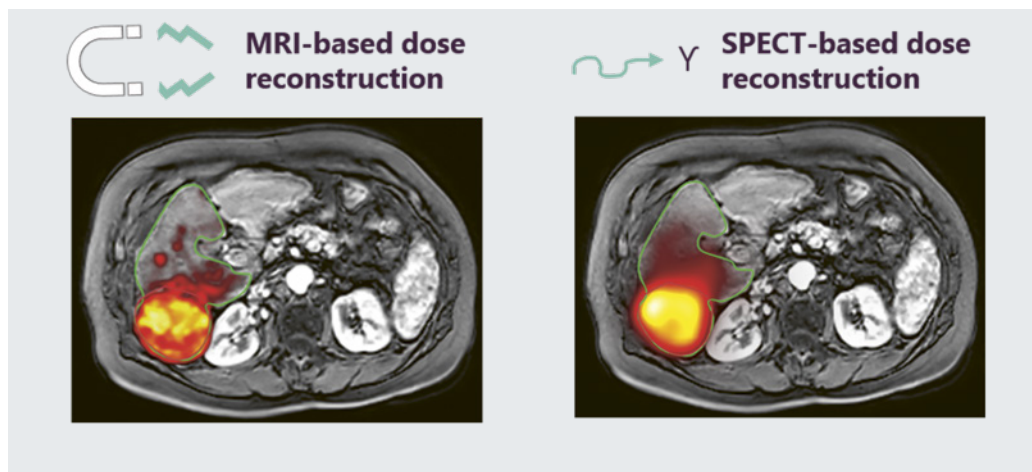


↑
Obr. 1 Produkční cyklus izotopu Mo-99

←
Obr. 2 Obohacený uranový terč IRE v komoře



Obr. 3 Mikrokuličky Holmium-166 (QuiremSpheres™) umožňují vizualizaci a kvantifikaci po ošetření pomocí MRI a SPECT, pro další analýzu v Q-Suite™ potřebnou k zahájení individuální léčby



a dopad na oblast léčby rakoviny. Návazně tak je celosvětově rostoucí trend zajištění zdrojového materiálu a potřebných ozařovacích a zpracovatelských kapacit. Z tohoto pohledu se jedná o jeden z budoucích nejvýznamnějších produktů v této oblasti. Do oblasti vývoje byl nedávno reaktor LVR-15 zapojený skrz výzkumné aktivity s ÚOCHB (dr. Miloslav Polášek^[3]), který se věnoval vývoji metod na izolaci finálního produktu po ozařování. Aktuálně další podobné vývojové akce jsou realizovány s evropskými partnery z SCK-CEN pro zajištění designu geometrie ozařovacího terče a stanovení optimálních ozařovacích podmínek pro návaznou produkci.

Terbium (¹⁶¹Tb) – po úspěchu ¹⁷⁷Lu v terapii různých nádorů se dnes vědecká komunita soustředí i na terbium-161 (¹⁶¹Tb). Tento radionuklid je zajímavý zejména tím, že spolu s dalšími izotopy terbia jako ¹⁴⁹Tb (alfa zářič), ¹⁵²Tb (pozitronový zářič) a ¹⁵⁵Tb (gama zářič) může tvořit řadu teranostických párů. Tedy stejně jako u ¹⁷⁷Lu poptávka po ¹⁶¹Tb v poslední době značně rychle roste. Terbium-161 může být vyrobeno v jaderném reaktoru ozařením ¹⁶⁰Gd tepelnými neutrony – a právě výzkum podmínek ozařování a návazného zpracování je obsahem mezinárodního výzkumného projektu ELECTTRA pod TA ČR realizovaného v CVŘ na reaktoru LVR-15. Mezi konkrétní cíle projektu patří jak zajištění podmínek výroby nuklidu Tb-161 v relevantním množství, tak i jeho nosičů pro cílenou terapii. Spolupráce probíhá mezi českými a norskými partnery s bohatými

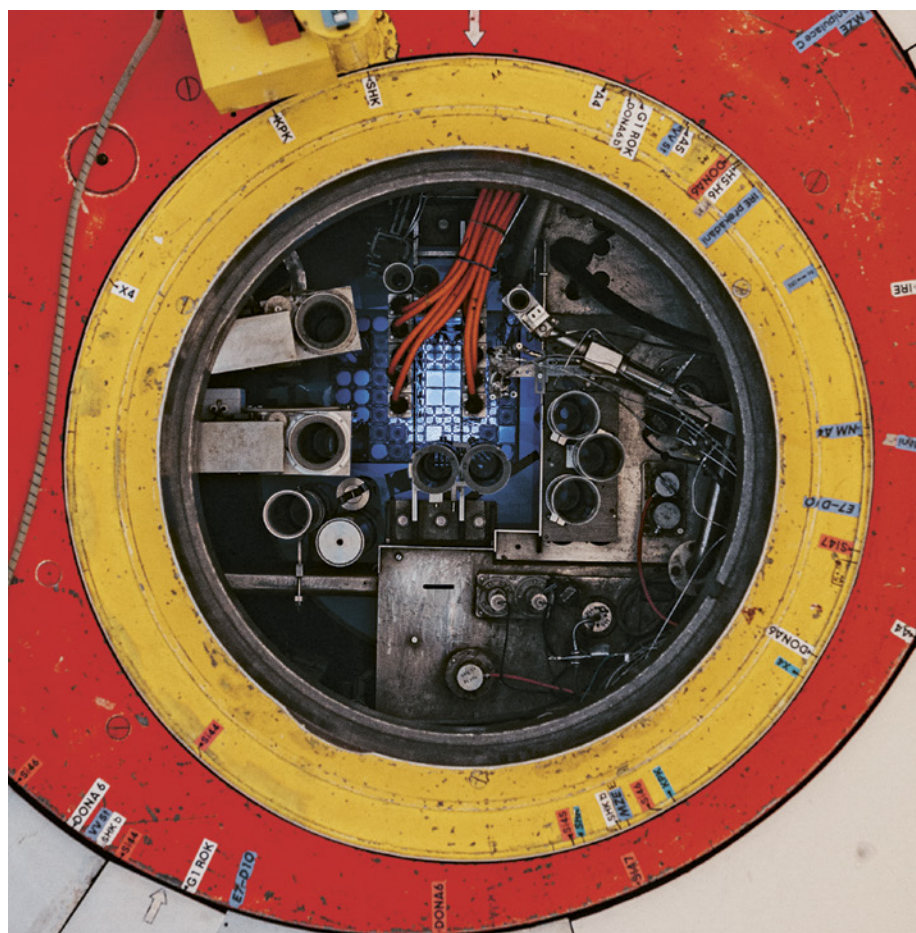
mi zkušenostmi ve výzkumu a vývoji a lékařském prostředí.

Jód (¹³¹I) – po desetiletí byl a stále zůstává nejrozšířenějším radionuklidem a má velmi dobře zavedenou roli v oblasti nukleární medicíny. Jód-131 se vyrábí ve výzkumných reaktorech dvěma různými výrobními cestami. Jedním z nich je izolace od štěpných produktů ²³⁵U v procesu souběžném se separací molybden-99, proto je jeho produkce velmi závislá na produkci ⁹⁹Mo a je omezena na několik jaderných reaktorů/zpracovatelských závodů po celém světě – tedy i LVR-15 vlivem ozařování terčů pro výrobu Mo-Tc se může na zajištění produkce podílet.

Druhou možností je produkce prostřednictvím neutronového ozařování telurových terčů. I tato metoda je aktuálně aktivní na LVR-15 vlivem výpadku reaktoru Maria v Polsku, který byl vždy zásadním producentem lékařského jódu a na kterém aktuálně probíhá rekonstrukce systému řízení – ale původní termín obnovy provozu byl posunut a vzniklý nedostatek nyní vykrývá částečně i reaktor LVR-15 spoluprací s POLATOM.

Pro oblast medicínské aplikace nejsou využívány pouze izotopy, ale v některých případech samotný reaktor – resp. jeho horizontální kanály jako zdroje neutronů pro další aplikace. Jedno z nich je tzv. bórová záchyťová terapie (BNCT) – terapeutická technika určená původně pro léčbu invazivních maligních nádorů. Používání neutronů pro generování energetických alfa částic k ničení buněk pří-

mo v nádoru. Pacientům podstupujícím BNCT se podá, většinou injekcí do žíly, činidlo na bázi boru, které se přirozeně hromadí v rakovinových buňkách. Když je stabilní izotop boru (^{10}B) v rakovinových buňkách zasažen neutrony, může je zachytit a jadernou reakcí se přemění na alfa částici (jádro helia) a jádro lithia. Energie těchto nových částic je předána blízkému okolí – tedy do nádorové buňky, což ji poškodí a usmrtí. Historicky byl LVR-15 využit i pro tento typ aplikace – první český pacient byl na výzkumném reaktoru LVR-15 v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži ozářen 28. září 2000^[4]. Postupně byla aktivita omezována až do téměř kompletního ukončení daného postupu. Nedávný rozvoj metod ale opětovně přivedl mezinárodní výzkumný tým na LVR-15 v rámci projektu FRINGE^[5] (kde hlavní spolupráce je s Univerzitou Oslo a kolegy z uzavřeného řeckého reaktoru Democritos), jehož výsledky jsou velmi pozitivní a vedou k aktuálně dalšímu projektu v rámci grantu Evropské komise (NuCapCure). Podobně jsou zahájeny další spolupráce na národní úrovni s několika ústavu Akademie věd České republiky.



↑
Obr. 4 Pohled do nádoby reaktoru LVR-15

Reference:

- [1] https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/064/41064193.pdf
- [2] <https://www.terumo-europe.com/en-emea/products/quiremspheres%E2%84%A2-microspheres>
- [3] <https://www.uochb.cz/en/news/206/first-commercial-sales-of-lutetium-177-based-on-iocb-separation-technology>
- [4] <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2005/cislo-3/borova-neutronova-zachytova-terapie-dnes.html>
- [5] <https://www.fringe-fetopen.eu/>



Ing. Martina Králová

martina.kralova@cvrez.cz

V roce 2008 absolvovala fakultu textilního inženýrství na Technické univerzitě v Liberci. V Centru výzkumu Řež působí od roku 2016. První dva roky na pozici specialisty grantové kanceláře v rámci administrace a monitorování projektu udržitelné energetiky „SUSEN“. Od roku 2018 pracuje jako projektový manažer drobných ozařovacích zakázek na reaktoru LVR-15.

Stereotaktická rádioterapia

Mgr. Ján Ivančík

Onkologický ústav sv. Alžbety, s.r.o.

Stereotaktická rádiochirurgia (SRS) je vysoko konformná technika hypofrakcionovanej rádioterapie vhodná pre liečbu malých nádorov či metastáz v mozgu a mieche u pacientov, ktorí nemôžu alebo nechcú podstúpiť operáciu. Táto technika ožarovania je veľmi zložitá a vyžaduje si vysokú presnosť a precíznosť. Tento článok diskutuje niektoré z vecí nevyhnutných pre zodpovedné ožiarenie pacienta touto technikou.

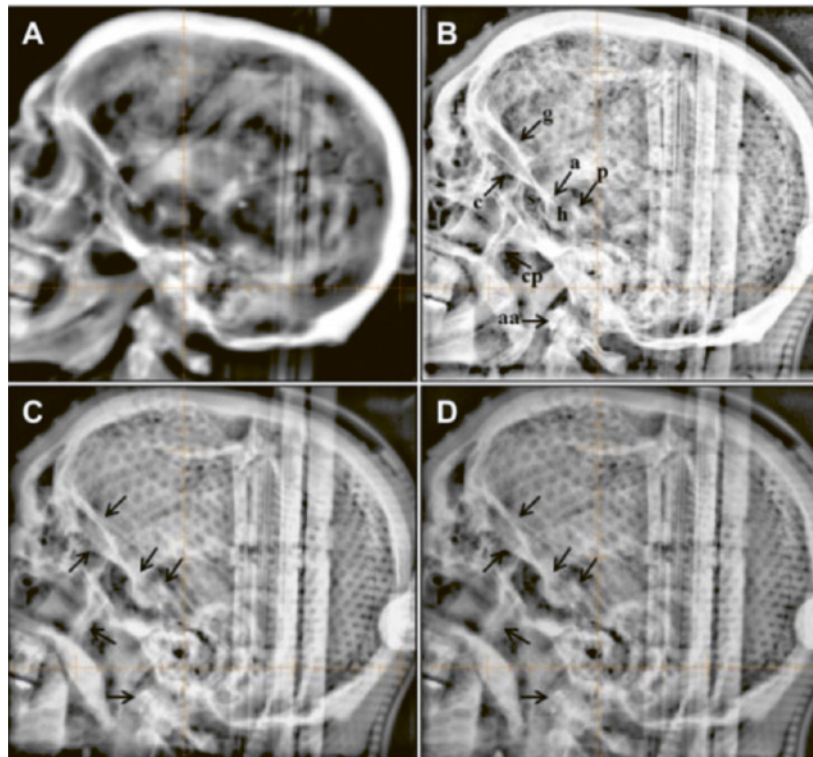
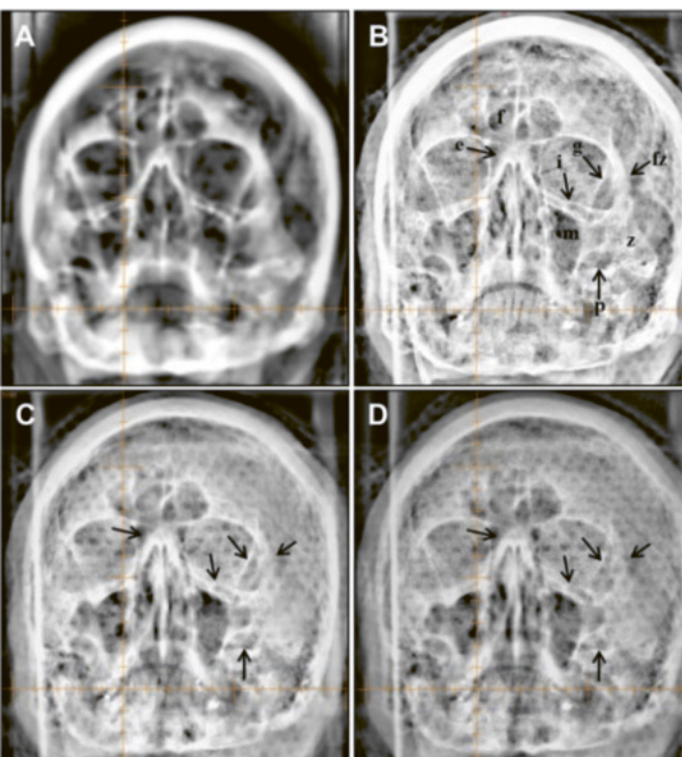
Stereotactic radiosurgery (SRS) is a high conformal form of therapeutic radiation that can be used to treat cancer in the brain and spine, in inoperable tumour cases or if the subject reject the surgery. This sophisticated irradiation technique requires accuracy and precision. These, as well as some necessities for responsible irradiation of subject with this type of technique, will be discussed in this article.

Stereotaktická rádiochirurgia (SRS) je vysoko sofistikovaná forma rádioterapie, zameraná na liečbu malých nádorov na mozgu či funkčných abnormalít, kedy sa predpísaná dávka ožaruje iba v jednej frakcii. Jednorazové ožiarenie nedáva žiadny priestor na chybu, ktorá by sa dala zistiť neskôr, takže táto technika patrí medzi špeciálne techniky, čo sa týka zabezpečenia presnosti ožiarenia. Za určitých podmienok, napr. väčší cieľový objem či veľmi tesné naliehanie citlivého kritického orgánu, je možné dávku aplikovať v troch až piatich frakciách, kedy hovoríme o frakcionovanej stereotaktickej rádioterapii. Pri stereotaktických ožarovaniach musí byť zabezpečená extrémna presnosť v celom procese počnúc zakreslením, cez registráciu obrazu, až po mechanickú nepresnosť ožarovacieho zariadenia pri všetkých druhoch pohybov – stola, hlavice (gantry), kolimátora a zobrazovacích zariadení a to všetko do jedného milimetra.

V predchádzajúcich dekádach, keď nebola možnosť presnej obrazovej verifikácie polohy pacienta, bola pri intrakraniálnej SRS využívaná invazívna metóda fixácie a nastavenia pacienta – s rigidným kovovým alebo kera-

mickým kruhom, fixovaným štyrmi skrutkami na lebku pacienta, pričom na presnosť doručenia dávky využívala nastavenie na externé moduly (lokalizačný systém, nastavovacia „klietka“). Výhoda týchto pevných zariadení bola, a naďalej zostáva ich vynikajúca reprodukovateľnosť nastavenia t.j. je možné použiť jednomilimetrový alebo takmer žiadny bezpečnostný lem. Preto sa aj v dnešných časoch stále tento spôsob rigidnej fixácie využíva ako na Leksellovom gamma noži, tak aj na niektorých pracoviskách stereotaktickej rádiochirurgie, pričom verifikácia polohy sa už robí najnovšími zobrazovacími technikami CBCT s možnosťou dostaviť polohu pacienta v šiestich rôznych smeroch (3 translácie + 3 rotácie) pomocou špeciálneho softvéru a 6D stola.

V súčasnosti sa upúšťa od invazívnych fixačných pomôcok, ktoré sú nahrádzané pevnejšími a nastaviteľnými maskami s možnosťou záhryzu pre fixáciu mandibuly, určených špeciálne pre stereotaktické ožarovanie. Predsa ale existuje určitá možnosť pohybu pacienta počas ožarovania, ktorá sa udáva pri použití špeciálnej masky na úrovni 2 milimetrov, takže tento typ je vhodné použiť iba pri frak-



cionovanej stereotaktickej rádioterapii. Pri jednorazovom ožarovaní zabezpečuje najlepšiu presnosť naďalej iba invazívna fixácia. Pri súčasných zobrazovacích technológiách sa od externých súradnicových systémov taktiež upustilo a boli nahradené kónickým CT.

Presnosť ožarovania – zobrazovacie a navádzacie techniky

Ako už bolo spomenuté, vďaka vysoko-sofistikovaným a presným technikám je možné redukovať veľkosť ožiareného objemu, eskalovať dávku na nádor a zároveň viac šetriť zdravé tkanivo. Preto je však veľmi dôležité, aby bol pacient ožiarený do presne predpísaného objemu, čiže je nevyhnutné zabezpečiť jeho presné nastavenie identické s plánovacím CT. Na to slúžia rôzne techniky navádzania, ktoré môžu byť obrazové, tzv. obrazom riadená rádioterapia (IGRT), alebo sa využíva iný spôsob pre lokalizáciu cieľového objemu alebo polohy pacienta.

Obrazom navádzacie techniky teda slúžia na korekciu polohy pacienta (resp. cieľového objemu) pred, alebo počas samotného ožiaru.

Obrazom riadená rádioterapia

Ako už zo samotného názvu vyplýva, ide o vizuálne navádzanie, čiže na základe obrazu je korigovaná poloha pacienta. Zariadenie na ožarovanie pacienta je vybavené zobrazovacím systémom, ktorý umožní vykonať snímku pacienta na ožarovacím stole. Tieto snímky sú potom porovnané so snímkami z referenčného plánovacieho CT a následne je možné vykonať korekciu pacienta na túto referenčnú polohu. Medzi tieto zobrazovacie metódy patria systémy s využitím ionizujúceho žiarenia, najčastejšie RTG snímky, MV (Megavoltové) snímky, CT snímky, alebo systémy bez použitia ionizujúceho žiarenia, ako MRI či USG (IGRT – Image-Guided Radiation Therapy, 2018)(Nabavizadeh et al., 2016) as well as IGRT's impact on clinical workflow and planning treatment volumes (PTVs). Veľká väčšina ožarovačov je už v súčasnosti vybavená týmto integrovaným MV, RTG a CT systémom, čo teda umožňuje presnejšie nastavenie a vizualizáciu nielen denzných tkanív.

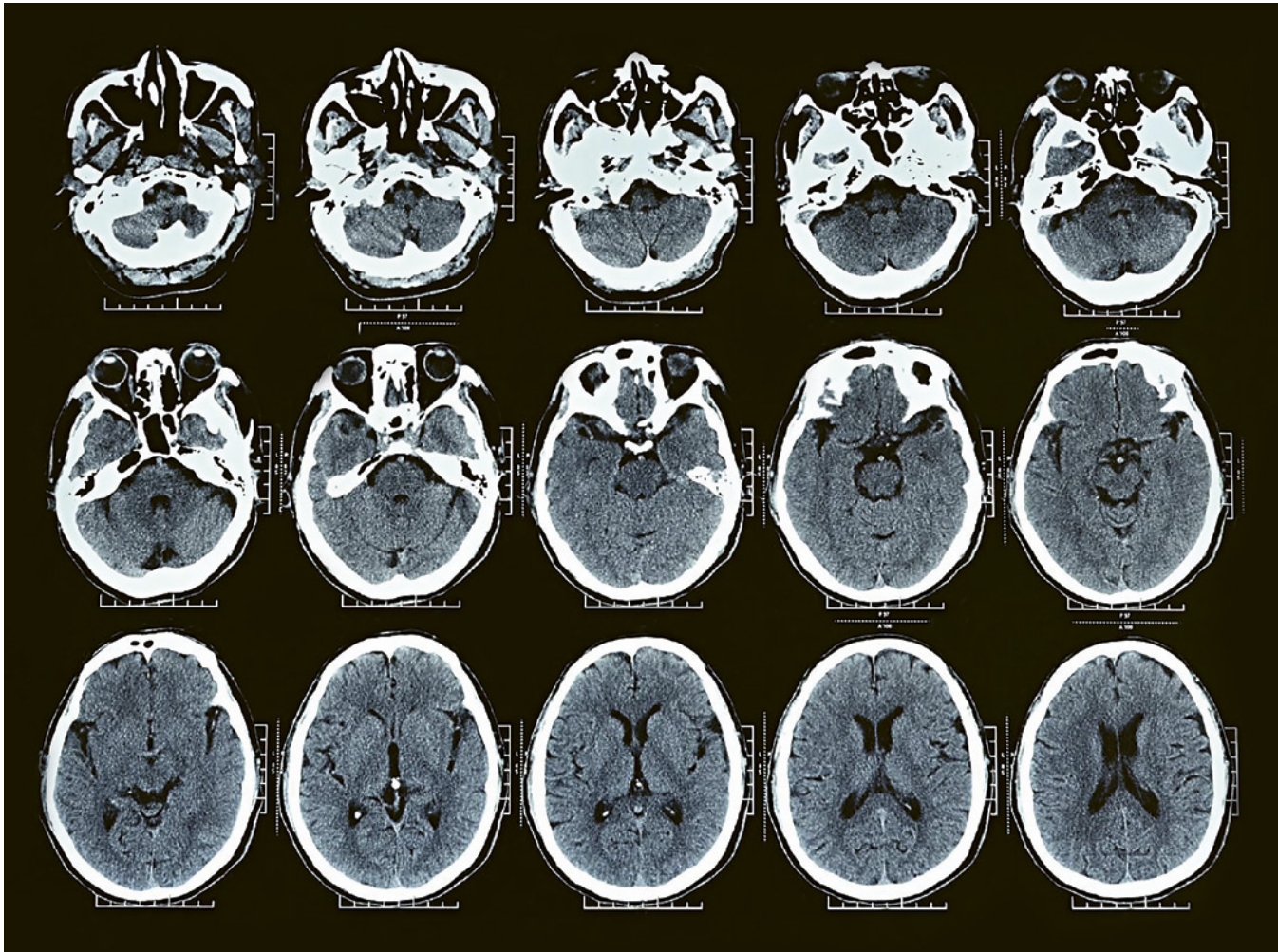
MV zobrazovanie – EPID – Electronic Portal Imaging Detectors je systém, ktorý vznikol ako náhrada za snímkovanie na film. Priamy



Obř. 1 Posterior-anterior (PA) obrázky použité vo frakcionovanej srs; A – DRR (digitálne rekonštruovaný rádiogram), B – kV RTG snímka (85 kVp a 5 mAs), C – 2,5 MV portálový obrázok pri 1,5 MU, D – 6MV portálová snímka s 3 MU (Song et al., 2016)



Obř. 2 Latero-laterálna snímka (LL)-obrázky použité vo frakcionovanej srs; A – DRR (digitálne rekonštruovaný rádiogram), B – kV RTG snímka (85 kVp a 5 mAs), C – 2,5 MV portálový obrázok pri 1,5 MU, D – 6MV portálová snímka s 3 MU (Song et al., 2016)



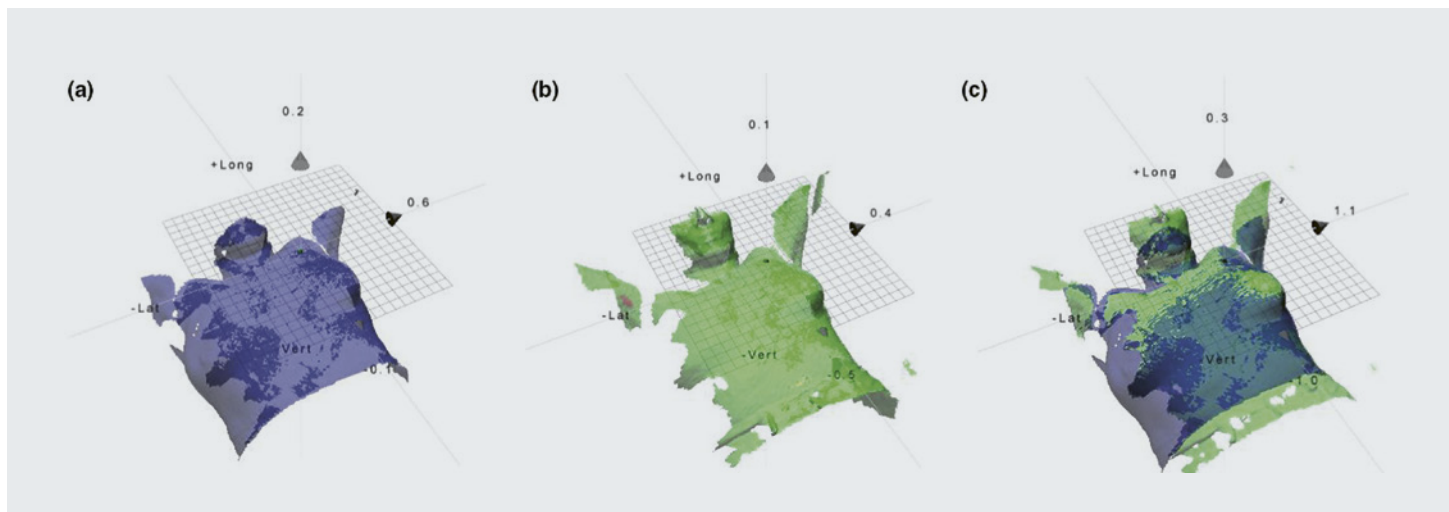
↑
Obr. 3 MRI kraniálnej oblasti
vybrané rezy (Zobrazovacie
vyšetrenie | Systém
manažmentu vzdelávania
Angels (LMS), no date)

urýchlený fotónový zväzok prechádza cez pacienta a dopadá na maticu detektorov. Výhodou tejto metódy je rýchlosť a eliminácia nepresnosti pohybu, nakoľko zväzok ide priamo zo zdroja terapeutického zväzku. Limitácia je však kvalita obrazu, nakoľko energia dopadajúcich fotónov je rádovo v MeV, čiže mäkké tkanivá sú veľmi zle viditeľné. Kvalitu obrazu ďalej určuje aj rozlíšenie samotného detektora (De Los Santos et al., 2013).

Kilovoltážne (kV) zobrazovanie je systém veľmi podobný MV zobrazovaniu na portál, avšak okrem toho, že je umiestnený kolmo na MV systém, ako zdroj žiarenia využíva RTG zdroj, kde je energia fotónov na úrovni približne 100 v keV, takže je možné do určitej miery diferencovať aj mäkké tkanivá a obraz je vo vyššej rozlišovacej kvalite. Využitím RTG zdroja je teda možné vykonať obraz 2D, alebo je možné tento systém využiť ako tzv. CBCT – Co-

ne-beam CT a vytvoriť tak 3D obraz podobný ako je štandardné CT. V tkanivách, ktoré nie sú veľmi dobre rozlíšiteľné, (napr. prostata), môžu byť navyše aplikované lokalizačné zrná – markery, ktoré majú fixnú polohu a na základe ich polohy je možné precízne identifikovať pozíciu cieľového objemu.

Existuje aj možnosť využitia dvoch semi-ortogonálnych kV (kilovoltových) zdrojov žiarenia, ktoré nie sú štandardnou súčasťou ožarováčov, ktoré sú schopné počas žiarenia nielen snímkať pacienta a sústavne konfrontovať jeho polohu s plánovacím CT, ale aj v reálnom čase korigovať jeho polohu pri prípadnom pohybe, či zastaviť žiarenie pri pohyboch nad povolenú toleranciu. (De Los Santos et al., 2013; Nabavizadeh et al., 2016) as well as IGRT's impact on clinical workflow and planning treatment volumes (PTVs). Pre znázornenie kvality obrazu sú na Obrázkoch 1 a 2



porovnania snímok vykonaných rôznymi protokolmi a energiami využívanými v klinickej praxi.

Zo systémov, ktoré nevyužívajú ionizujúce žiarenie bez je často používané USG, hlavne čo sa týka prostaty, nakoľko na štandardnom CT ju takmer nie je možné rozlíšiť od okolitého tkaniva a USG poskytuje absolútne najlepšiu obrazovú informáciu, ktorú je možné využiť aj pri online plánovaní brachyterapie prostaty.

MRI-linac patrí k jednému z novších systémov, čo sa týka IGRT. Jeho prednosťou je dobrá vizualizácia nádorov a mäkkých tkanív, pričom obraz je tiež počas žiarenia možné detegovať. Vďaka existencii množstva špecializovaných protokolov pre jednotlivé štruktúry, ako napríklad T1 či T2 vážený obraz, je možné veľmi dobre vizualizovať cieľové objemy prípadne rizikové orgány. Nevýhodou však ostáva jeho vysoká cena a náklady, špeciálne pomôcky vyrobené z nekovových predmetov a dlhšia doba nastavovania pacienta (*MRI-LINAC: Magnetic Resonance Imaging Guided Linear Accelerator – Brigham and Women's Hospital*, no date). 3D obraz z MR je možné podobne ako CT prehliadať po rezoch – vid' Obrázok 3.

Ostatné navádzacie systémy

Postupným vývojom hardvéru a techník vznikli nové možnosti navádzania, či detekcie cieľového objemu, ktoré donedávna tvorili súčasť IGRT. Dnes sa už môžu radiť do iných ka-

tegórií, ako napríklad SGRT (Surface Guided Radiation Therapy), či elektromagnetický sledovací systém alebo Gating.

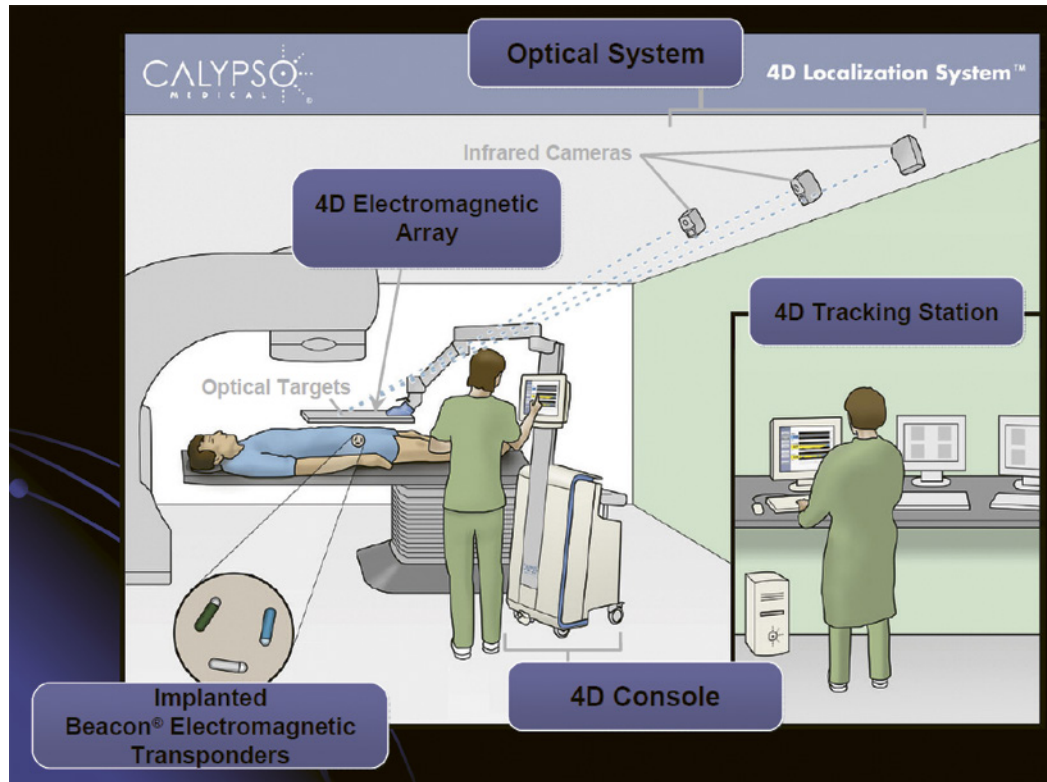
SGRT využíva systém detektorov (kamier), ktoré sledujú povrch tela pacienta na základe rôznych biosignálov (termoluminiscencia), alebo tento povrch skenujú priamo. Kombináciou viacerých detekčných modalít povrchu tela sa zvyšuje presnosť detekcie. Systém sa využíva nielen na nastavenie správnej polohy pacienta, ale aj na sledovanie pohybov počas samotného žiarenia, pričom pri veľkej odchýlke je možné žiarenie prerušiť (Kügele *et al.*, 2019; Al-Hallaq *et al.*, 2022) the patients were positioned by aligning skin markers to the room lasers. For the surface based setup (SBS). Príklad takéhoto systému je možné vidieť na Obrázku 4.

Na princípe elektromagnetizmu funguje napríklad systém Calypso – Obrázok 5. Podobne, ako jednoduchý lokalizačný marker, sa aplikuje do nádoru, ktorý je pohyblivý, alebo zle identifikovateľný na CT skene. Na rozdiel od štandardných, jednoduchých lokalizačných zŕn ktoré iba na základe svojej vysokej hustoty v prostatickom tkanive umožňujú korekciu nastavenia, Calypso zrná aktívne a sústavne poskytujú informáciu o svojej polohe, ktorá je detegovaná špeciálnym detektorom, a korekcia polohy pacienta môže byť vykonávaná v reálnom čase (Upstate Cancer Center, no date a; *Improving the Accuracy of Radiotherapy Using the Calypso System | Varian*, 2017).

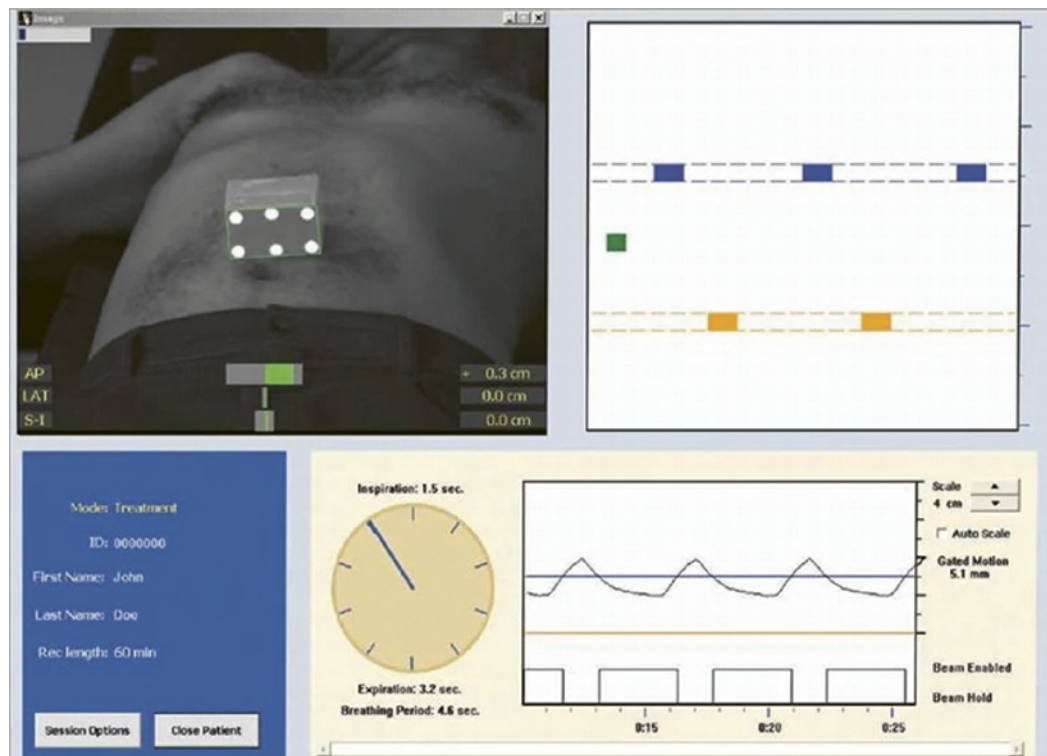
↑
Obr. 4 Catalyst TM SGRT systém sledujúci live povrch tela pacienta; obrázok a) reprezentuje referenčný povrch, obrázok b) povrch nasnímaný pred zahájením liečby a obrázok c) znázorňuje registráciu týchto dvoch povrchových máp, na základe ktorej je potom vypočítaná potrebná korekcia pacienta (Kügele *et al.*, 2019)



Obr. 5 Názorné rozložení v ožarovni pre sSystém Calypso s príslušenstvom (Calypso 4D Localization System | Swedish Medical Center Seattle and Issaquah, no date)



Obr. 6 Názorná ukážka gatingového systému; vľavo na obrázku kamera snímajúca polohu marker blocku – fantómu, dole zaznamenávaná dýchacia krivka (Real-time Position Management | Varian, no date)



Gating je technika umožňujúca monitorovať dýchacie pohyby pacienta. Špeciálna kamera sleduje polohu fantómu – markera umiestneného na pacientovi v oblasti, ktorá sa vplyvom dýchania hýbe. Pred skenom sa zaznamená tzv. dýchacia krivka, ktorá zaznamenáva amplitúdu zdvíhu fantómu v čase. Na základe tejto krivky je potom možné naskenovať a následne žiariť pacienta len napríklad v určitej dychovej fáze, či v hlbokom nádychu (Upstate Cancer Center, no date; Korreman, 2015). Vďaka tomu je možné redukovať cieľo-

vý objem, či značne ušetriť okolité zdravé tkanivá pred ožiarom. Príklad softvéru pre gating techniku je možné vidieť nižšie na Obrázku 6.

Ako je teda možné vidieť, techniky SRS sú čím ďalej tým sofistikovanejšie a zložitejšie a chybovosť tu nemá priestor, preto zabezpečenie kvality musí tvoriť neodlučiteľnú súčasť celého procesu. Avšak vďaka tomu je možné ožarovať nádory aj na veľmi ťažko dostupných miestach, znižovať ožarovaný objem, a teda znižovať toxicitu okolitých tkanív pri zvyšovaní dávky na samotný nádor.



Mgr. Ján Ivančík

jan.ivancik@ousa.sk

Absolvoval s vyznamenaním Fakultu matematiky fyziky a informatiky (FMFI) UK v Bratislave v študijnom odbore biomedicínska fyzika. Po ukončení štúdia začal pracovať vo svojom odbore od roku 2018 ako klinický fyzik na Onkologickom ústave sv. Alžbety, kde pôsobí doteraz. V práci sa venuje predovšetkým plánovaniu externej rádioterapie a dozimetrii na lineárnom urýchľovači. Popri tom od roku 2019 pokračuje externe na doktorandskom štúdiu v odbore biofyzika na FMFI UK v Bratislave.

Nuclear Power in France and its Contribution to Reaching EU's Climate Objectives: Yesterday, Today and Tomorrow

Part 2

Jan Barták, Noël Camarcat
NucAdvisor

V první části tohoto článku jsme poskytli stručný přehled francouzského jaderného programu, který byl realizován v posledních třech desetiletích 20. století, čímž se Francie stala světovým lídrem v podílu jaderné energie ve svém energetickém mixu. Popsali jsme historii evolučního reaktoru generace III+ – EPR – a analyzovali dosavadní výsledky, výzvy, obtíže a ponaučení od raných fází projektu přes výstavbu až po uvedení reaktorů EPR do provozu ve Francii, Finsku, Číně a Velké Británii.

V části II stručně popisujeme nedávno oznámený program výstavby nových jaderných elektráren ve Francii s reaktory typu EPR2, což je upravená verze EPR integrující dosavadní zkušenosti z výstavby reaktorů EPR v různých zemích. Program zahrnuje také zahájení výstavby prvního prototypu SMR do roku 2030 a zmiňuje několik exportních příležitostí.

In Part I of this paper we provided a brief overview of the French nuclear programme that was implemented in the last three decades of the 20th century, making France the world leader in the share of nuclear power in its energy mix. We described the history of the evolutionary Generation III+ reactor – the EPR – and analysed the track record, challenges, difficulties, and lessons learnt from the early design stages through construction and up to commissioning of the different EPR projects in France, Finland, China and the UK.

In Part II we outline the recently announced nuclear new build programme in France that will deploy the EPR2 reactor, an evolution of EPR integrating the experience feedback from the construction of EPR reactors worldwide. The programme also plans the construction of the first SMR prototype by 2030 and several export opportunities are being developed.

1. The French nuclear new build programme and development strategy

In face of the accumulation of difficulties in the construction of EPRs, and of the failure of France in the competition for the new NPP in the United Arab Emirates in 2009 an effort was undertaken by the French Government and the nuclear industry to reorganise the overall industrial delivery structure for nuclear new build and to improve its governance. EDF was given a leading role in this new structure, progressively becoming a vertical-

ly integrated group covering operation and maintenance of the French nuclear fleet, integrating Framatome (ex AREVA NP) and shortly also the manufacturing of nuclear turbines, taking a leading role in the marketing, development, design, engineering, and construction of new units in France and abroad.

To mobilise and organise the French nuclear industry and the supply chain, a single professional union – the GIFEN (Grouping of French nuclear energy industrialists¹) – was created in 2018. GIFEN brings together compa-

nies operating nuclear facilities, including very big companies, medium-sized, small sized and micro enterprises, professional organisations, and associations. GIFEN covers all types of industrial activities (studies, manufacturing, construction, maintenance, etc.) as well as all areas of nuclear electricity production (fuel cycle, research, power generation, equipment manufacturing, dismantling, etc.).

1.1. The EPR2 reactor and the near-term programme for 3 EPR2 twins

In February 2022, President Macron announced the decision to launch the construction of 6 EPR2 reactors in France, and asked EDF to start a feasibility study for an additional 8 reactors. The first reactor should be operational around 2035, the programme of the three twin-unit NPPs is expected to cost above 50 billion euros. The President also announced that a first demonstration SMR – the NUWARD 2×170 MW_e reactor, should start construction by 2030. He also requested EDF to study, in cooperation with the safety authority, the possibility of extending the lifetime of the existing fleet beyond 50 years.

The announcement was made during a visit to the Belfort factory manufacturing nuclear turbines, at the occasion of a buy-back operation of this strategic industrial facility from GE by EDF. The business was acquired by GE in 2015 as a part of a portfolio during its merger with the French equipment giant Alstom.

The EPR2 is a new model of high-power nuclear reactor developed by EDF from the EPR. It incorporates experience feedback from other EPR projects (FLA3, Taishan 1 and 2, Hinkley Point C1 and 2 and OL3) to improve its constructability and to reduce its cost and construction times. The EPR2 incorporates increased post-Fukushima nuclear safety requirements.

The necessity to integrate the experience feedback from the design, construction, and commissioning of the first EPRs and implement a certain number of modifications for the future series of EPRs appeared as early as 2010. Both EDF and AREVA worked on the

development of such nuclear new build project in Poland. In 2014, the development was moved to a dedicated project structure and the tag EPR NM (New Model) was given to the modified design. The safety options file was submitted by EDF to the safety authority in 2016. Several important design parameters were frozen by EDF's new build engineering division in 2017. Specifically, the thermal power level was chosen identical to Taishan's 4,590 MW_{th} in order to keep the primary circuit components as close as possible to those of Taishan. This concerns both the design parameters, the fabrication processes, and the fabrication plants. The Nuclear Island Building was simplified with respect to Flamanville 3 and Taishan (see details below). Engineering teams were requested to adopt industrial standards for equipment such as piping, cables, pumps, doors etc. with and without nuclear requirements. The number of safety trains was reduced from 4 to 3, which led to the abandonment of some maintenance capabilities, and ultimately to the reduction of the availability factor k_d .

This subsequent technical configuration of the concept was then named EPR2. A new safety options file was submitted to the nuclear safety regulator (ASN) who approved it (2018) allowing the launch of the basic design phase in 2017 and its completion in 2021. In July 2023, EDF submitted an official request for the authorisation of construction of two EPR2 reactors at the Penly NPP site in Normandy.

We will distinguish three types of evolutions of the EPR2 compared to the FLA3 EPR, as the result of different aspects of the experience feedback:

1. Design changes (see Table 3)
2. Evolutions resulting from the opinion of the safety authorities to ensure smooth EPR2 licensability (see Table 4)
3. Evolutions in design engineering, equipment manufacturing, plant construction and overall project organisation management and governance (see Table 5)



Tab. 3 The most important design changes of EPR2 compared to FLA3 EPR

N°	Design change	Comment
1	Increased core power from 1,570 MW _e to 1,650 MW _e	Core power equivalent to the Taishan EPR
2	Evolution and optimisation of fuel management	UO ₂ /MOX
3	Reduction of the number of safety trains from 4 to 3	Concerns the following systems and equipment: safety injection systems, SG emergency feedwater systems, Ultimate Containment Heat Removal System (EVU)
4	Improving the architecture of certain auxiliary systems	New back-up emergency water system (SEM)
5	Simple concrete containment with a metallic liner	Simplifies the Nuclear Island Building construction for equivalent safety containment performances, in particular the design pressure in LOCA and Severe Accident
6	Suppression of the "two-room" concept allowing certain maintenance activities during reactor operation	Maintenance of safety trains in operation Not possible for a reactor with 3 safety trains
7	Suppression of the nuclear auxiliary systems building (BAN)	The systems it contained are relocated either in the Fuel Building or in the effluents treatment building
8	Simplification of the core catcher design	Related to the civil works optimization, but has entailed a new severe accident safety analysis of the core catcher
9	Increased size of certain buildings: reactor building, fuel building, safeguards auxiliaries building	Objective: improved constructability and simplified operation and maintenance



Tab. 4 The most important evolutions resulting from opinions expressed by the safety authority

N°	Issue	Comment
1	Break Preclusion	Authorized by ASN letter 15/09/2021 taking into account specific modifications negotiated with EDF
2	Military aircraft crash	Under review by ASN at the time of this writing

It should be pointed out that the six EPR2 programmes (3 twin units, 2 with direct cooling by seawater and one with indirect river cooling using cooling towers) is conceived as a single programme maximising the series effect with design changes limited to the strict minimum, using identical equipment and the same suppliers and contractors across the programme wherever feasible.

1.2. NUWARD™ – the French SMR designed to replace coal-fired power plants

It is not the objective of this paper to present in detail the NUWARD SMR project. It is, however, an important component of the new dynamic of the French and European nuclear sector and it is in this context that we shortly present it here.

France has considerable experience with compact reactors for propulsion systems, used on its fleet of submarines and aircraft carriers. Several concepts of SMRs were de-

veloped over the recent years. Not surprisingly, one of them was the "SEANERGY" submerged SMR concept. In a move to concentrate and focus the efforts of the industry in one common direction, considering the existing experience and expertise, and based on extensive market research and analysis, the decision was made to develop a GEN III+, pressurised water SMR NPP to generate a total net electrical power of 340 MW_e from two independent reactor modules of 170 MW_e each to offer flexible operation. NUWARD™ is an integral-PWR that fully integrates the main components of the Nuclear Steam Supply System (NSSS) including control rod drive mechanisms, steam generators and pressurizer within the Reactor Pressure Vessel (RPV). Adopting a shortened RPV, the NSSS is installed in a steel containment submerged in an underground water pool allowing for enhanced in-factory manufacturing. It is developed under the leadership of EDF with the

N°	Category	Topic	Proposed solutions
1	Engineering	Engineering management	Application of systems engineering principles Digitisation of the engineering process – PLM platform Detailed design better consolidated at First Concrete Date
2		Improved constructability	Design and civil construction simplification Use of 3D/4D ¹ models and BIM ² Extended use of prefabricated parts and modules
3		Improved industrialisation	Work with supply chain in “extended enterprise” mode, early involvement of supply chain Standardise equipment references and reduce their number, simplify specifications
4	Procurement	Procurement and supplier selection	Optimised allotment of work packages and procurement strategy (best value for money) Better on-site work and logistics organisation Better contracting methods (incentives, shared objectives, pain/ gain) Optimise procurement (volumes, number of references)
5	Construction	Project organisation, management and governance	Professionalise project management, staffing, training, best practice sharing Improve cost and schedule controls – implement EVM ³ Full control by EDF project management of key contracts (allotment, supplier selection)
6		Management and supervision of suppliers of equipment and services	EDF industrial division to follow & evaluate supply chain competences, qualification, risk assessment, inspections Contract management culture Reinforce relationship with safety authority
7	Competence retention and development		Develop Knowledge Management to capture experience feedback on design standards, project management methodologies etc. Bring people with experience from previous projects, anticipated and highly professional recruitment process Competence retention Important effort in training and competence building Welding schools



Tab. 5 Main evolutions in design engineering, equipment manufacturing, plant construction and overall project organisation management and governance [3]

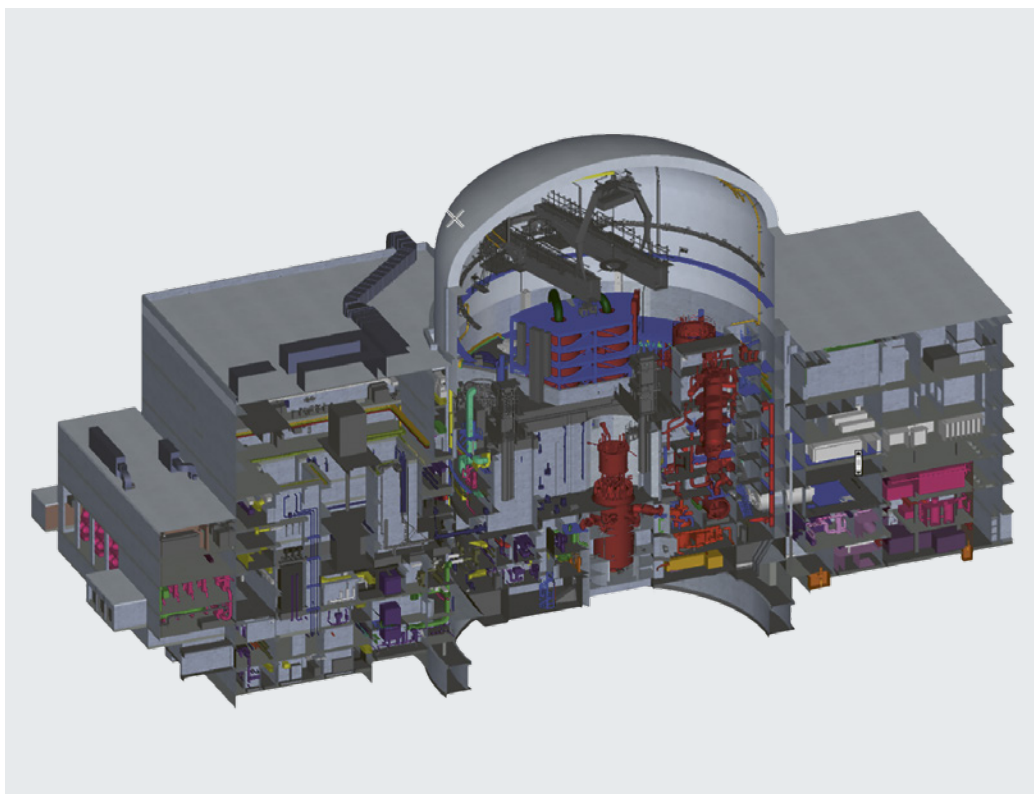


Fig. 6 General view of the EPR2 reactor (3D model)

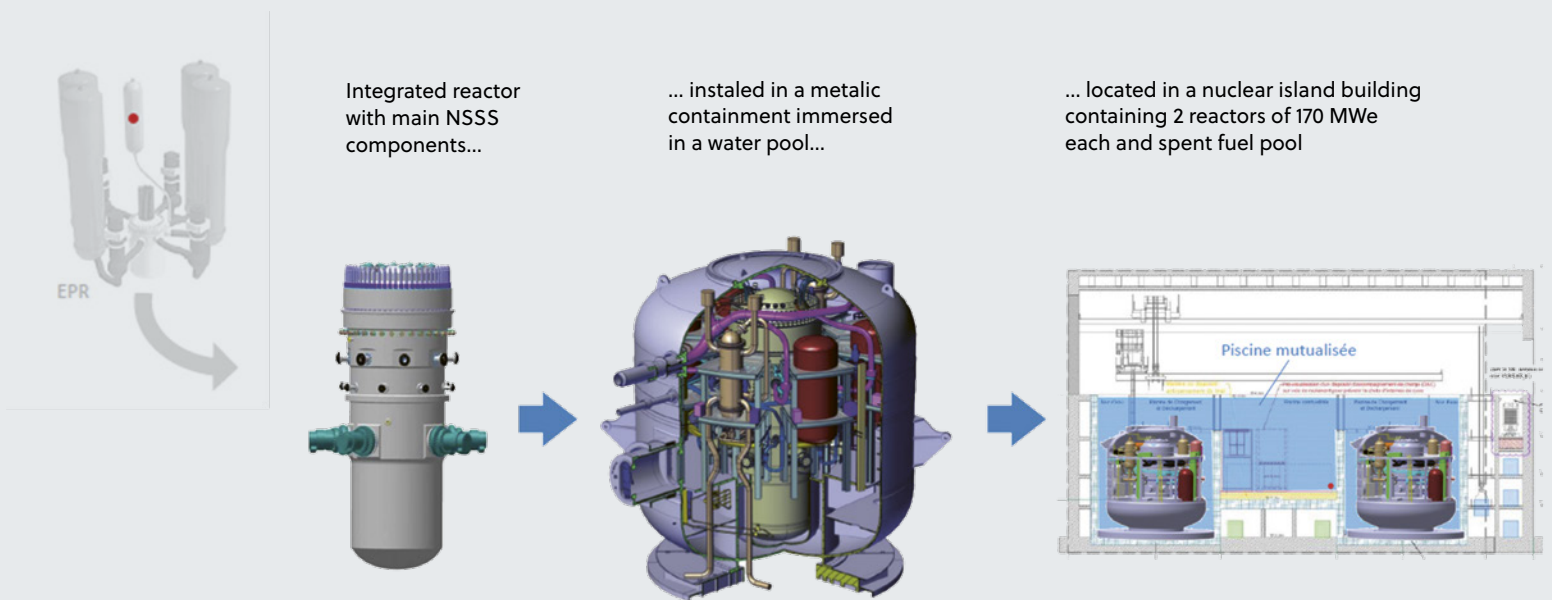


Fig. 7: The NUWARD™ SMR concept

support of the CEA, Naval Group and Technicatome, bringing together the best expertise and experience in the relevant fields that are called to contribute to the success of the project.

The main target of NUWARD™ is the replacement of existing fossil electricity and combined heat and power sources in the range of 200–400 MW_e. Considering only countries already using nuclear power or open to nuclear power, EDF identified more than 3,300 installations in this market segment, of which 60% are more than 20 years old, 30% are more than 30 years old. From the French perspective this is a clear export target since in France there are no fossil-fired generation facilities in this segment. Despite this export focus, it is obvious that to trigger the export dynamics, a reference plant should be built and licensed in the home country. It was therefore decided to build the FOAK NUWARD™ in France. A dedicated company – NUWARD, a subsidiary of EDF, was created in early 2023. The design is driven by the industrialisation objectives and is resolutely turned to be an all-European endeavour, involving European partners in development, European supply chain, European regulators, specif-

ically the Czech and Finnish regulators (SUJB and STUK), with others expected to join in the near future.

1.3. Projects, plans and ambitions for nuclear new build abroad and international cooperation

Despite the prevailing unsupportive attitude and policies in relation to nuclear power in the EU and in France in the last two decades, the French nuclear industry succeeded in winning nuclear new build contracts abroad, even though it has ceded the global leadership to the Russian Group Rosatom.

We have already mentioned the EPR projects at Taishan in China and at Hinkley Point in the UK.

The most probable next project should be the Sizewell C twin-unit EPR in the UK, where the negotiations with the UK government are progressing. The UK government contributed £ 100 million to Sizewell C in 2022, followed by another £ 170 million in 2023 with the objective to foster the development of the project, demonstrating its strong support for the development of large-scale nuclear power to ensure Britain's future energy supply based on reliable, affordable, low carbon power. The

money will be invested into the project to help bring it to maturity, attract investors, and advance to the next phase in negotiations. The Sizewell C project will be an exact replica of Hinkley Point C, thus bringing down construction costs.

EDF is in advanced negotiations in India for the construction of 6 EPR units at Jaitapur in the Maharashtra state on the west coast of India. EDF submitted to NPCIL⁵ in April 2021 a binding offer for the engineering and procurement scope for the construction of the six EPRs.

EDF is one of the three bidders participating in the tender for the Dukovany 5 NPP in the Czech Republic, proposing an EPR1200 reactor, a scaled-down version of the EPR, presumably based on the EPR2 concept.

EDF is in discussions with the governments of the Netherlands and Sweden, two countries that recently announced their intention to build new nuclear units.

The objective of EDF is to develop European long-term partnerships and benefit from synergies across different EPR projects in Europe, from developing European supply chains, and local industrial capabilities.

With the wind progressively turning in favour of nuclear power driven by the geopolitical context, growing public acceptance, climate imperatives and simply physical realities, we may expect and hope that more countries will embark on nuclear power and allow the industry to progress, increase its level of maturity and excellence, create highly qualified jobs. Unflinching long-term political and institutional support will be a key success factor in this endeavour.

1.4. The EU Green Deal and nuclear power in France and in Europe

Nuclear power provides about one quarter of electricity in the EU, it is the largest source of low-carbon electricity. The ambitious GHG emissions-cutting targets by 2030 and carbon neutrality target in 2050, as formulated in the EU Green Deal, cannot be achieved without a major contribution of nuclear power. Relying

on gas as a back-up to intermittent renewables, developed massively (and – in the authors' view – excessively) in the EU is not only unsustainable from the climate perspective, from the resource availability perspective but also from the geostrategic perspective as the recent Russian aggression in Ukraine has painfully and tragically demonstrated. Different studies have shown that the economically optimal share of intermittent renewables in the grid is somewhere around 35% in Europe, not to speak about technical constraints. If we discard fossil fuels, the only low-carbon option is nuclear. The overall resource of biomass and geothermal – other dispatchable low-carbon sources – is too low to contribute at the required scale. In the UK, no longer in the EU but traditionally pragmatic, the Climate Change Committee reckons the UK needs around 40% of the low-carbon electricity to be reliable (or "firm") rather than intermittent. Today, the only proven "firm" and large-scale, low-carbon technology is nuclear.

Up to now, we have seen two competing approaches: the "German" one, opposed to nuclear power, promoting the maximum use of renewables, and using gas as back-up, and the "French" one combining intermittent renewables with dispatchable nuclear power. The member states supporting the former seem to be losing ground, the number of member states supporting the latter is growing, especially in countries with limited renewable resources. The EU green taxonomy negotiations resulted in a compromise to consider both gas and nuclear as transitional solutions to a "green" electricity generation system based solely on renewables. The war in Ukraine has reshuffled the cards significantly; physical, and geopolitical realities are increasingly imposing themselves.

The first decision we would expect from the European Commission in redefining the road map of the Green Deal in the post-Russian-aggression-to-Ukraine world would be to prohibit shutting down operating nuclear power plants on any other than safety grounds (decided solely by independent

safety authorities), and to maximise efforts to extend the lifetime of existing nuclear power plants in all member states that operate them. The decision of France to launch without delay the programme of 3 twin-unit nuclear plants using the EPR2 reactor is a tangible and measurable contribution to the reduction of CO₂ emissions in the EU, to reaching the Green Deal climate goals and to increasing energy security of France and of the EU.

2. Conclusion

The success of the French nuclear programme (1973–2000) was the result of a national ambition driven and supported without faltering by all the political parties that succeeded one another in power. Beyond the success of the construction, the nuclear operator EDF and the nuclear industry have demonstrated the ability to operate and maintain the fleet over the years with a high level of performance, despite a much more complex environment of the electricity sector in the last 20 years, marked by the shift from a monopoly situation through unbundling to the electricity market mechanism that required some very artificial measures to “create” competition in a country where the bulk of generation capacities remained in the hands of EDF.

Nuclear power requires long-term commitment, sustained political and institutional support. The growing political influence of ecological parties, forged in the fight against nuclear power, put them in the position of kingmakers. To win elections, dominant political parties, right and left, made concessions to the ecologists. In Germany and Belgium, this resulted in the decisions to abandon nuclear power altogether. In France, this resulted in the decision to close the fast reactor Superphénix, in the decision to reduce the share of nuclear power to 50% as early as 2025 (later postponed to 2035, hopefully to be abandoned soon) and to shut down the 2 reactors at Fessenheim. The term “shameful nuclear” was coined in France. This was clearly not the environment to support ambitious nuclear programmes. Without unfettered po-

litical support, receiving contradictory and ever-changing political messages and instructions, the nuclear industry was in a wait-and-see attitude, unable to develop a long-term strategy, minimising investment in people, technology, innovation. This is not the only cause but one of the causes that contributed to the difficulties of the EPR development. Other causes, in particular those listed in the Folz report have been recalled in this paper.

In recent months we observe positive shifts in France and in the EU, imposed by objective physical and geopolitical realities and underpinned by clear positions of reputed international scientific and technical institutions on the indispensable role of nuclear power in combatting climate change and for ensuring energy security. The European Commission included nuclear power in the taxonomy and clearly stated that nuclear power is a solution to reach the Green Deal objectives in countries that elect to use it. In France, the state is creating the necessary strategic and financial framework, setting policies, making decisions to allow a genuine nuclear renaissance to take shape. The programme for the construction of six EPR2 reactors is now clearly framed. The nuclear industry can again develop a long-term vision, it is working hard to improve its designs, industrial quality in the factories and the management of its projects and construction sites, working hard to learn the lessons from the past, to recruit, train and develop the required talent. All this does not happen overnight, but the momentum is back, and this is extremely encouraging.

References:

- [1] J.M. Folz. "RAPPORT au Président Directeur Général d'EDF - La construction de l'EPR de Flamanville" 2019 (in French)
- [2] Serge Marguet. "La technologie des Réacteurs à Eau Pressurisée", EDP Sciences, 2019 (in French)
- [3] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2022.02.18_Audit_EPR2_RolandBerger_Synthese-1.pdf « La synthèse de l'audit sur les coûts du réacteur EPR2 commandé en 2019. » (in French)

1 Groupement des Industriels Français de l'Energie Nucléaire in French

2 4D: 3D model plus time evolution

3 Building Information Model

4 Earned Value Management

5 Nuclear Power Corporation of India Limited



Jan Barták

jan.bartak@nucadvisor.com

MSc in nuclear engineering, PhD in nuclear reactor thermal hydraulics, Jan Barták has a track record of more than thirty-five years of work in the power industry, power engineering, nuclear safety analysis, thermal hydraulic modelling, simulation and training.

Extensive experience in international projects and business development activities (worked in Central and Eastern Europe, India, Thailand, Indonesia, Turkey), in the management of international teams.

Over the last 15 years Jan worked on the development and construction of large infrastructure projects including nuclear new build, covering a broad range of development activities: project structuring and organization, partnerships, economics, financing, preparation and negotiation of large contracts. Jan has experience of working with governments, international organisations, and financial institutions. He served as board member in several energy companies and has considerable executive management experience. He joined NucAdvisor in 2019 as partner expert and in 2021 was elected Chairman of the Board.



Noël Camarcat

noel.camarcat@nucadvisor.com

From 1979 to 2006 he worked as researcher and then as manager of R&D teams, programs and facilities at CEA. He was Fuel Cycle Director from 1994 to 2000, and later Nuclear Weapons Director at CEA/DAM Île-de-France and deputy Director of Laser Mégajoule (LMJ).

In 2007, he joined EDF's Generation and Engineering Directorate (DPI) and in 2015 he was appointed Director in charge of R&D relationships in the Division for Nuclear New Build (DIPNN). He has served as customer for nuclear R&D programs inside EDF and outside. He was EDF's project sponsor of the lifetime extension program of the Kozloduy 5 unit in Bulgaria, carried out in partnership with Rosatom Group.

After retiring from EDF in 2020, he took up the position of Senior Professor of Nuclear New Build at École des Mines de Paris University where he created courses on EPR2, multirecycling in PWRs and in SMRs. He joined NucAdvisor as an expert partner in January 2021.

Z knihy **Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností.**

14. část

Ze vzpomínek Zdeňka Kříže, díl čtrnáctý

Tak, jak se od poloviny padesátých let vyvíjely jaderné technologie, vyvíjel se i názor na bezpečnost a zejména pravidla v tomto novém odvětví. Prvotní linie byla zaměřena především na nešíření jaderných zbraní, vznikla Mezinárodní atomová agentura (MAAE), ale začínaly se formovat i národní dozory. V Československu vznikla Československá atomová komise (ČSKAE) a skupinka jaderných inženýrů kolem Ing. Jiřího Beránka a Ing. Zdeňka Kříže začala formulovat první pravidla jaderné bezpečnosti.

O počátcích jaderného dozoru v Československu poutavě píše Ing. Zdeněk Kříž, z jehož knihy „Vznik a historie státního dozoru nad jadernou bezpečností Československé komise pro atomovou energii (1970–1992)“, vám přinášíme některé vzpomínky na začátky tohoto mladého, ale dynamicky se rozvíjejícího odvětví.

Zavádění dozoru na výzkumných reaktorech

První výzkumný reaktor v bývalém Československu VVR-S byl spuštěn v roce 1957, kdy dozor nad jadernou bezpečností u nás neexistoval. Dozor zasáhl do schvalovacího řízení výzkumných zařízení reaktorů postupně, jak byly uváděny do provozu nebo u nich docházelo k významným rekonstrukcím a změnám. Týkalo se to spuštění kritického souboru ŠR-0A a ŠR-0B v Plzni, spuštění kritického souboru LR-0 a jeho přeměny z těžkovodního kritického souboru TR-0, spuštění školního reaktoru VR-1 v Praze a řady rekonstrukcí řežského reaktoru VVR-S a jeho přeměny na výzkumný reaktor LVR-15.

Výzkumné reaktory patří pod definici jaderných zařízení, jsou však podstatně jednodušší než jaderné elektrárny a rovněž jejich riziko pro okolí je podstatně nižší v důsledku mnohem nižšího tepelného výkonu a tím množství radioaktivních látek ve vyhořelém palivu. Na druhé straně však u nich existu-

je značná variabilita ve výkonu, způsobu využívání a konfiguraci aktivní zóny, což vyplývá z jejich využití, tj. potřeb experimentů a podmínek pro ozařování.

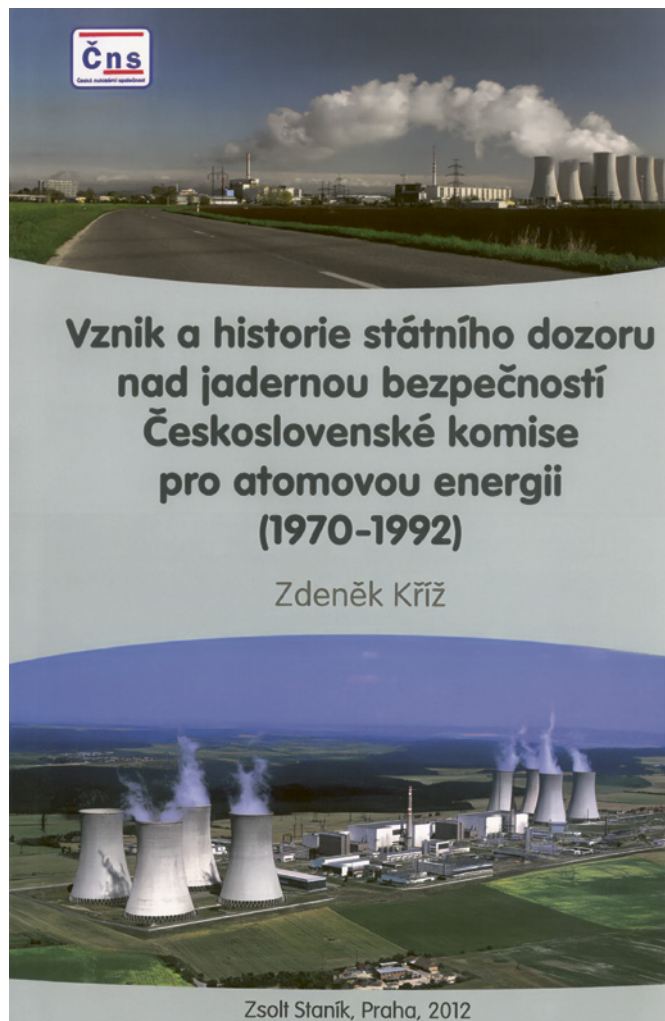
Od počátku se projevoval odlišný postoj k bezpečnosti ze strany jejich provozujících organizací. Elektrárenské společnosti ČEZ a SEP se soustředily primárně na splnění, resp. zkrácení stanovených termínů výstavby s cílem maximální výroby elektřiny, tj. převažovaly u nich hlavně ekonomické zájmy. Provozovatelé výzkumných zařízení (ÚJV, Škoda, JFI) se chovali vstřícněji a neviděli činnost dozoru jen jako ohrožení plnění výroby elektřiny, protože neměli tak vyhraněné ekonomické zájmy. Přitom všechny případy měly svá specifika s ohledem na odlišnost jednotlivých výzkumných reaktorů i aktivit, které na nich probíhaly. Bylo to například několik rekonstrukcí výzkumného reaktoru VVR-S v Řeži v 70. a 80. letech, při kterých došlo ke zvýšení výkonu, k záměně paliva a jeho obo-

hacení. V roce 1987 bylo rozhodnuto provést zásadní rekonstrukci tohoto reaktoru, protože k 31. 12. 1987 měl reaktor dosáhnout plánované životnosti – 30 let provozu. Provozní kontroly ukazovaly, že nádoba reaktoru ze slitiny hliníku je již na konci své životnosti a bude ji třeba vyměnit. Koncem roku 1987 byl proto reaktor odstaven pro provedení zásadní rekonstrukce. Při ní byla vyměněna téměř všechna zařízení, zvýšen jeho výkon a současně s tím i podstatně zvýšena bezpečnost reaktoru. Po téměř jeden a půl roce odstávky bylo v květnu 1989 zahájeno jeho spouštění pod novým označením LVR-15. Dále to byl přechod výzkumného reaktoru TR-0 (moderovaného těžkou vodou) na výzkumný reaktor LR-0 (moderovaný lehkou vodou) v důsledku změny orientace našeho jaderného programu na reaktory VVER. V průběhu tohoto přechodu byl reaktor TR-0 provozován po určitou dobu s tzv. vložnými zónami LR-0. V roce 1992 byla provedena rekonstrukce kritického souboru ŠR-0A v Plzni, ale krátce poté bylo rozhodnuto reaktor definitivně odstavit a vyřadit z provozu. Byl to vlastně dosud jediný případ vyřazení jaderného zařízení z provozu v České republice.

Ve snaze stanovit zásadní požadavky jaderné bezpečnosti pro výzkumná jaderná zařízení bylo rozhodnuto vložit základní bezpečnostní požadavky do jednoho předpisu a aplikovat na ně stejný režim dozoru jako na jaderné elektrárny s uvážením jejich podstatně nižšího rizika, tzn. aplikovat na ně odstupňovaný přístup hodnocení jaderné bezpečnosti. K návrhu předpisu byla ustavena pracovní skupina, kterou tvořili Miroslav Voříšek – pracovník ÚJV, guru výzkumných reaktorů u nás, dále Karel Matějka z FJFI, Evžen Listík a Pavel Pitterman z ÚJV a za státní dozor Pavel Kovář a Mirek Hrehor. První návrh předpisu sice obsahoval řadu technických požadavků na projekt a provoz výzkumných jaderných zařízení, byl však svou strukturou, terminologií a obsahem značně odlišný od již vydaného výnosu ČSKAE č. 2 o zajištění jaderné bezpečnosti při projektování jaderné energetických zařízení. Vedení státního do-

zoru požadovalo maximální možnou podobnost obou předpisů, zejména v terminologii a v požadavcích, které byly analogické. Trvalo téměř rok, než se podařilo s M. Voříškem dohodnout vyvážené znění předpisu, které respektovalo technické odlišnosti výzkumných reaktorů od jaderných elektráren a současně přejímalo ty požadavky jaderné bezpečnosti, které platily pro obě kategorie jaderných zařízení. Nakonec se tento záměr podařil a byl vydán výnos ČSKAE č. 9 o zajištění jaderné bezpečnosti výzkumných jaderných zařízení. Podle našich informací mělo obdobný předpis v té době jen několik zemí na světě, které provozovaly větší počet výzkumných reaktorů. (USA, SSSR, Francie, Indie a Japonsko).

V případě ověřování zvláštní odborné způsobilosti vybraných pracovníků výzkumných reaktorů bylo rovněž třeba ověřit psychickou způsobilost těchto pracovníků psychologem obdobně jako u operátorů jaderných elektráren. V případě ÚJV se stalo, že při prvním ověření psychické způsobilosti žádný z více než deseti převážně zkušených operátorů reaktoru testem neprošel. Standard požadavků na psychologickou část zkoušky nebyl v té době stanoven a tak bylo možné, že se v testu projevil subjektivní přístup zkoušejícího psychologa. S touto oblastí nebyly žádné zkušenosti, výsledek testů se však jevil jako neodpovídající realitě. Proto bylo po zvážení situace doporučeno, aby ÚJV zvolil jiného psychologa. Výsledek testů byl podstatně odlišný a reaktor mohl zahájit provoz. Tato situace se dnes pochopitelně již stát nemůže, neboť i pro tuto oblast existují standardy hodnocení, které možnost subjektivního hodnocení prakticky vylučují.



Ing. Zdeněk Kříž

Ukončil s vyznamenáním v roce 1964 studium na Fakultě technické a jaderné fyziky ČVUT jako jaderný inženýr. Po ukončení studia nastoupil do Ústavu jaderného výzkumu v Řeži (ÚJV Řež), kde pracoval jako výzkumný pracovník v úseku jaderné energetiky. V roce 1970 přešel do nově vzniklého oddělení jaderné bezpečnosti a záruk Československé komise pro atomovou energii (ČSKAE). Zde se aktivně podílel na rozvoji a prosazování státního dozoru nad jadernou bezpečností. Postupně prošel různými funkcemi až po funkci hlavního inspektora jaderné bezpečnosti (1989–1992). V roce 1993 přijal nabídku pracovat v Mezinárodní agentuře pro atomovou energii (MAAE) ve Vídni. Zde jeho hlavními úkoly bylo využívání provozních zkušeností prostřednictvím systému IRS a podpora činnosti orgánů dozoru v jaderné energetice. Podílel se na přípravě několika doporučení a účastnil se řady misí MAAE. Kromě několika výzkumných zpráv je autorem asi čtyřiceti prezentací, článků a publikací věnovaných dozorcí činnosti. Po návratu z MAAE v roce 2001 nastoupil opět do ÚJV Řež jako vedoucí vědeckého sekretariátu. V období 2001–2011 byl předsedou Poradního výboru pro jadernou bezpečnost předsedkyně SÚJB Dany Drábové a od roku 2004 externím členem Výboru pro bezpečnost jaderných zařízení ČEZ, a. s.

Pracujte s technologiemi pro 3. tisíciletí

www.ujv.cz/kariera



Pracoviště ÚJV ŘEŽ, a. s.

- Husinec-Řež – sídlo společnosti
- Praha 8, Palmovka – divize ENERGOPROJEKT PRAHA
- Praha 5, Nemocnice Na Homolce – PET Centrum Praha
- Brno, Masarykův onkologický ústav – PET Centrum Brno
- Husinec-Řež – PET Centrum Řež
- Plzeň – pracoviště divize integrita a technický inženýring
- Uherský Brod – pracoviště divize ENERGOPROJEKT PRAHA
- JE Dukovany
- JE Temelín

Dceřiné společnosti

- Centrum výzkumu Řež s.r.o. (Husinec-Řež; Plzeň)
- RadioMedic s.r.o. (Husinec-Řež)
- ŠKODA PRAHA a.s. (Praha, Duhová ul.)
- Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. (Plzeň, Plzeň-Borská pole, Plzeň-Bolevec)

Historie radiofarmak v ÚJV Řež, a. s.

Ing. et Ing. Jan Adam, Ph.D., Ing. Jiří Prokop, Ing. Patrik Špátzal, MBA
ÚJV Řež, a. s.

Článek je zaměřen na chronologický popis historie divize Radiofarmaka v ÚJV Řež. Již téměř 70 let uplynulo od doby, kdy byl v Řeži u Prahy založen tehdejší Ústav jaderné fyziky ČSAV, který později sehrával důležitou roli u příslovečného „všeho jaderného“, co se v tehdejší ČSSR, později ČSFR a konečně ČR odehrávalo. Nejinak tomu bylo i v oboru radiofarmak – od začátků produkce reaktorových radionuklidů pro terapii přes dlouhotrvající etapu radiofarmak pro jednofotonovou emisní tomografii, koketování s produkcí ^{99m}Tc , až po éru pozitronové emisní tomografie.

The article focuses on chronological description of the history of the radiopharmaceuticals in ÚJV Řež. Almost 70 years passed since the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences was founded in Řež and played a crucial role in proverbial “all things nuclear” happening in then-called ČSSR, later ČSFR and finally ČR. Radiopharmaceutical field was no exception – from the beginning of reactor-made radionuclides for therapy through long era of single-photon emission tomography nuclides, ^{99m}Tc attempts to the positron emission tomography era.

Divize Radiofarmaka společnosti ÚJV Řež hraje v současnosti coby největší dodavatel radiofarmak pro pozitronovou emisní tomografii (PET) v České republice nezastupitelnou roli. Tři výrobní centra v Praze, Brně a v Řeži se starají o to, aby všechna pracoviště nukleární medicíny vybavená PET skenery měla každý den čím vyšetřovat pacienty. Jsou tak hrdými nositeli odkazu dlouhé historie produkce radiofarmak v Řeži, která se začala nad Vltavou psát již před skoro sedmdesáti lety. V následujících řádcích se proto pokusíme tuto bohatou historii alespoň krátce představit.

Začátky

Dne 11. 6. 1955 byl založen Ústav jaderné fyziky ČSAV v Řeži, coby základní československé pracoviště jaderných oborů. V tomto roce začala za technické pomoci SSSR výstavba areálu v Řeži a již v roce 1957 byl spuštěn výzkumný jaderný reaktor VVR-S (několik minut před půlnocí 25. 9. 1957). ÚJF ČSAV Řež se tak stal jediným provozovatelem velkého zdroje umělých radionuklidů v ČSSR. V roce 1958 byl zahájen rutinní provoz reaktoru a následně zavedena ozařovací služba pro externí výzkumná pracoviště. V roce 1960 byl zahájen

vývoj výrobních postupů a aparatur pro zavedení rutinní výroby sloučenin značených nuklidy ^{31}P , ^{35}S , ^{24}Na , ^{64}Cu , ^{42}K , ^{203}Hg , ^{75}Se .

1972–1974

V roce 1972 byla provedena delimitace, ÚJF ČSAV Řež byl rozdělen na dva samostatné ústavy, ÚJV (Ústav jaderného výzkumu) a ÚJF-ČSAV. ÚJV přešel organizačně do podřízenosti Československé atomové komise (ČSKAE), se zaměřením na aplikovaný výzkum a provozování reaktoru. ÚJF zůstal v podřízenosti ČSAV, se zaměřením na základní výzkum a vybudování experimentálního cyklotronového pracoviště. Cyklotron U-120M byl na ÚJF uveden do provozu roce 1977. V roce 1973 byl ÚJV zapojen do úkolu rozvoje vědy a techniky (RVT) „Mírové využití jaderné energie z biologického a lékařského hlediska“. Byl koncipován první projekt v ČSSR, specializovaný na výzkum, vývoj a zavedení hromadné výroby radioaktivních preparátů pro medicínské a humánní použití.

Roku 1974 byla zahájena hromadná výroba preparátů orthojodhippuran OJH ^{131}I a Bengálská červeň BČ ^{131}I pro jaterní diagnostiku. V pravidelných 14denních cyklech byla radiofarmaka

OJH ¹³¹I a BČ ¹³¹I dodávána na jednotlivá oddělení nukleární medicíny po celé ČSSR.

1975–1980

V rámci státního plánu byl ÚJV pověřen koordinací komplexního řešení problematiky radiofarmak v celé šíři, od pilotních studií, vyhledávání nových radiofarmak, vývoj výrobních postupů a aparaturního uspořádání, vývoj analytických postupů, návrhu preklinických a klinických zkoušek, až po vytváření dokumentace pro schvalovací řízení pro různé radiofarmaceutické preparáty. V souladu s tímto pak po dobu více jak 15 let ÚJV spoluvytvářel směry a legislativu v oblasti radiofarmak nejen v ČSSR, ale i v rámci RVHP, s docela častým průnikem do kapitalistických států přes programy IAEA.

1980–2000

V následujících dvaceti letech se ÚJV zabýval produkcí mnoha nuklidů pro potřeby nukleární medicíny v ČR i řešením problémů naše hranice přesahující.

Mezi ně patřila například centralizovaná produkce izotopu ^{99m}Tc pro potřeby vyšetření, coby alternativa ke klasickým sorpčním generátorům, dostupným již tehdy, nicméně pouze na příslovečném „Západě“. Centralizovaná produkce přípravku Na^{99m}TcO₄ inj., byla zahájena v roce 1979. Prakticky byla realizována tak, že roztok izotopu byl dovezen z Řeže na centrální výdejní místo v Praze, odkud jej pak na jednotlivá oddělení nukleární medicíny rozvážely sanitní vozy. V letech 1979–1992 bylo vyrobeno cca 3 000 komerčních šarží; průměr 220 šarží ročně, pokrytí 32 % potřeby ^{99m}Tc v ČSSR.

Druhou alternativou pro využití ^{99m}Tc byl extrakční generátor EGTC 30 pro přímé použití na odděleních nukleární medicíny. Vývoj a konstrukce probíhala v letech 1978–1980. Každé oddělení, které chtělo používat EGTC 30 muselo absolvovat v Řeži praktický zázvuk a pak v rutinním provozu prokázat, že zvládlo obsluhu tohoto generátoru a vyrobené ^{99m}Tc má požadovanou kvalitu. V letech 1980–1984 probíhala realizace programu malých ^{99m}Tc generátorů v ČSSR, byla vybudována síť ma-



lých extrakčních generátorů pro oddělení nukleární medicíny. Instalaci, servis, týdenní zásobování roztokem ⁹⁹Mo zajišťoval ÚJV.

Výroba sterilních kitů pro značení

Paralelně s touto problematikou se ÚJV začalo zabývat i produkcí, která nespadá přímo do oblasti radiofarmak, ale úzce s ní souvisí – výrobou sterilních kitů pro značení. Po roce 1980 se několik let neúspěšně vedla jednání o zavedení hromadné výroby souprav pro značení, tzv. kitů. Kity se tehdy musely draze dovážet ze zahraničí a sílil tlak na zavedení jejich výroby v ČSSR. Současně Státní ústav pro kontrolu léčiv požadoval zavedení hromadné výroby kitů ^{99m}Tc v ČSSR z důvodu sjednocení postupů přípravy kitů a standardizace jejich složení a kvality. V roce 1984 tak byly vypracovány postupy přípravy a analytické kontroly šesti kitů, v roce 1985 byla vybudována laboratoř lyofilizace a v letech 1989–1994 zavedena výroba celkem osmi různých kitů, zejména pro diagnostiku poruch ledvin, jater a kostí. V letech 1992–1994 pak byly provedeny změny, reflektující zpřísňující se požadavky státních autorit tak, aby bylo možno ve výrobě pokračovat. A to i s přihlédnutím k měnícím se podmínkám na trhu, souvisejících s příchodem konkurence kitů ze zahraničí.



Obr. 1 Areál ÚJV Řež
(zdroj: ÚJV Řež, a. s.)

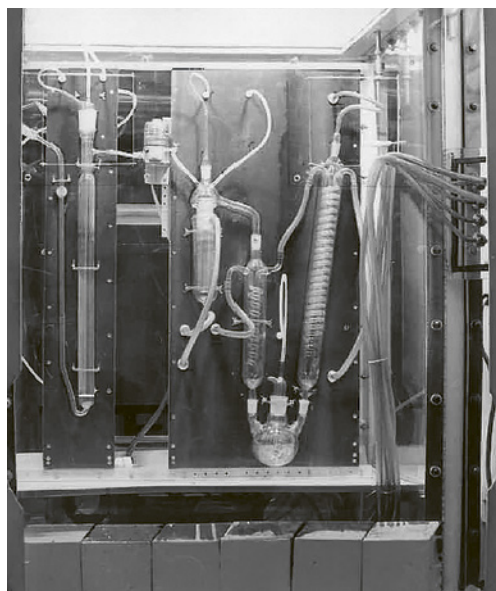
Zajímavosti z historie radiofarmak v ÚJV Řež

– Ve spolupráci IKEM RIP Prokop Málek, B. Vavrejn a odd. RF ÚJV Řež L. Kronrád byl vyvinut preparát Mercurascan 203Hg, se kterým bylo provedeno první scintigrafické zobrazení infarktu myokardu na světě – licence následně prodána firmě Squibb Corporation, USA

– Klinické hodnocení přípravku 11C-methionin v letech 2012–2014 ve spolupráci s Masarykovým onkologickým ústavem bylo historicky prvním provedeným KH s nuklidem uhlík-11 v ČR



Obr. 2 Extrakční generátor EGTC 30 (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)



1999–dodnes

Nová kapitola se začala psát na přelomu století. PET centrum Praha v Nemocnici Na Homolce vzniklo v roce 1999 jako unikátní modelový projekt Mezinárodní agentury pro atomovou energii, který měl za cíl otestovat, zdali lze provozovat v zemích na podobném stupni rozvoje, na kterém v té době Česká republika byla, tak technologicky složitou diagnostickou metodu, jakou je PET. Základem výroby PET radiofarmak je cyklotron. V době budování bylo PET centrum Praha osazeno prvním a jediným PET skenerem v republice.

PET/CT skener v Nemocnici Na Homolce nezůstal osamocen; začaly přibývat další – ve FN Hradec Králové, FN Plzeň, FN Olomouc, či v Brně. Právě v Brně u Masarykova onkologického ústavu bylo v letech 2007–2008 vybudováno a spuštěno druhé výrobní centrum – PET Centrum Brno, které umožnilo lepší geografické pokrytí dodávek a zálohování. Toto bylo důležité zejména proto, že radiofarmaka pro PET značená fluorem-18 musí být vyráběna k okamžitému použití – fluor-18 má poločas přeměny pouhých 109 minut.

Vzhledem k budování nových vyšetřovacích center bylo nutné zajistit, aby vyšetřovací látka byla dodána včas a v dostatečném množství.

Stále přibývajícím počtem PET skenerů a stoupající poptávkou po tomto druhu vyšetření na-

konec iniciovaly vybudování třetího výrobního centra přímo v areálu ÚJV v Řeži. To zahájilo pravidelnou činnost v roce 2012.

Ruku v ruce s vzestupem metody PET docházelo v ÚJV k postupnému utlumování produkce související s reaktorem, která přestávala být v nových legislativních a tržních podmínkách ekonomicky racionální. Mezi nejvýznamnější počiny této doby nicméně jistě patří snaha nabízet alternativní zdroje ^{99m}Tc v podobě vlastního sorpčního generátoru, coby přímé konkurence k již tehdy etablovaným. Především to ale byl pokus o vývoj nového typu extrakčního generátoru pro ^{99m}Tc v době tzv. „první techneciové krize“, kdy částečně zkolabovaly celosvětové dodavatelské řetězce sorpčních generátorů díky souběžným poruchám reaktorů, sloužících jako zdroj materiálu pro tyto generátory. Ani jeden z generátorů se ovšem tržně neprosadil.

Postupný přesun zájmu oddělení nukleární medicíny k metodě PET a široká dostupnost komerčních kitů vedla k postupnému útlumu reaktorových radionuklidů až k jejich úplnému zrušení, následovaném také zastavením výroby kitů v roce 2016.

Nelze také nezmínit že reaktor LVR-15 provozovaný dceřinou společností ÚJV Řež – Centrem výzkumu Řež – který stál u počátku éry radiofarmak ÚJV, byl v souvislosti s „techneciovými krizemi“ během první dekády 21. století integrován jako plnohodnotný člen do celosvětových dodavatelských řetězců pro zajištění zásobování sorpčních molybden/techneciových generátorů. Pravidelně zde běží ozařovací kampaně pro výrobu molybden-99.



Obr. 3 Příklady kitů produkovaných ÚJV Řež (zdroj: ÚJV Řež, a. s.)





Výroba PET radiofarmak se stala hlavní činností divize Radiofarmaka. Kromě produkce historicky v ČR nejpoužívanějšího produktu – tedy ^{18}F -FDG, fluorodeoxyglukosy, a fluoridu sodného ^{18}F -NaF pro diagnostiku kostních poruch, byla ve spolupráci s Masarykovým onkologickým ústavem provedena klinická hodnocení léčiv ^{11}C -methionin pro diagnostiku mozkových nádorů a ^{18}F -fluorocholin pro diagnostiku karcinomu prostaty, jater a adenomu přštítných tělísek. Obě radiofarmaka byla později registrována (2020 a 2021) a rozšířila tak škálu PET radiofarmak dostupných pacientům v ČR. V současné době má ÚJV Řež registrována čtyři PET radiofarmaka pro humánní využití a další v registračním řízení.



Ing. et Ing. Jan Adam, Ph.D.

jan.adam@ujv.cz

je absolventem Fakulty chemicko-technologické Univerzity Pardubice (Ing.) a Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity (doktorát). Po absolvování Ph.D. souvisejícího s designem léčiv nastoupil do ÚJV Řež, kde od roku 2012 zastává pozici manažera pro výzkum a vývoj Divize Radiofarmaka. Zde se podílí na vytyčování a realizaci strategických směrů rozvoje, modernizace, navazování spoluprací a rozšiřování portfolia radiofarmak pro medicínské účely. Pravidelně na toto téma také přednáší na univerzitách, odborných institucích či odborných setkáních.



Generační upgrade používaných výrobních zařízení v roce 2017 a nedávno provedená výměna cyklotronu v nejstarším centru v Praze, pak dále přispějí k udržení kvality nabízených služeb.

V současné době se ÚJV Řež snaží plynule rozšiřovat nabídku produkovaných radiofarmak a přispět tak k dalšímu zlepšování možností péče o pacienty v ČR. Společnost přitom využívá nejen vlastních zdrojů, ale navazuje i zahraniční spolupráce a implementuje licenční výroby. V plánu divize je také opětovné rozšíření do oblasti terapeutických a teranostických (kombinace terapie a diagnostiky) látek.



Obr. 4 Výroba SPECT radiofarmak
(zdroj: ÚJV Řež, a. s.)



Obr. 5 Cyklotron – výrobní srdce PET centra
(zdroj: ÚJV Řež, a. s.)

Jaderné zdroje energie pro vesmír

7. díl

Exotické možnosti mezihvězdného cestování

RNDr. Vladimír Wagner, CSc.
Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.

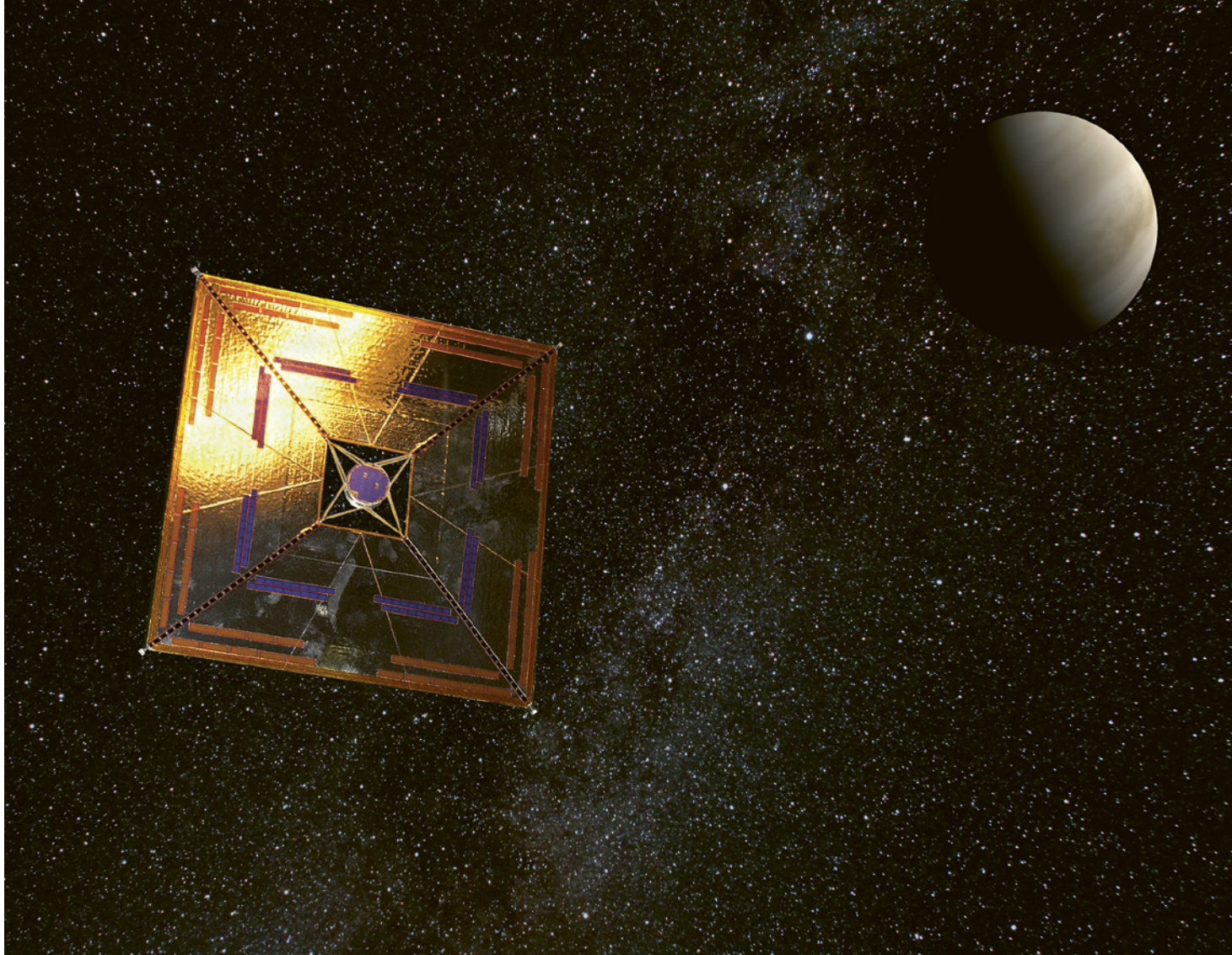
V závěrečné části seriálu se podíváme na některé z exotických možností mezihvězdného cestování. Některé, jako třeba využití slunečních plachetnic a laserových svazků, jsou založeny stále ještě na základech standardní fyziky. Jejich využití je tak v principu možné a závisí na technologických schopnostech lidstva. Jiné, jako je třeba warpový pohon, závisí na zatím neznámé exotické fyzice za Standardním modelem hmoty a interakcí a není zatím jasné, jestli jsou v principu vůbec možné.

Sluneční plachetnice

Již na počátku kosmické éry se v padesátých a šedesátých letech široce diskutovala idea sluneční plachetnice. O této možnosti však uvažoval už mnohem dříve Konstantin Ciolkovskij. V tomto případě se využívá tlak záření vyzařovaného Sluncem, které dopadá na plachtu vesmírného plavidla. Dominují fotony světla, tlak vyvíjený nabitými částicemi

slunečního větru je v normální situaci o dva až tři řády nižší. Hybnost, kterou mají jednotlivé fotony, je extrémně malá. I když je jich velký počet, musí tak mít plachta velkou plochu. Jde tak o nejdůležitější i nejviditelnější část plachetnice. Při zpětném odrazu předá foton hybnost, která je dvojnásobkem jeho hybnosti. Pokud je foton absorbován, předá pouze polovinu této hodnoty, tedy pouze velikost své hybnosti. Při absorpci se navíc téměř veškerá energie fotonu přemění na teplo, které plachtu ohřívá.

Ohřev plachty může být problémem, protože ji vysoké teploty mohou poškodit. Je tak třeba najít materiály, které mají co nejvyšší odrazivost. Zároveň je potřeba, aby byla plachta extrémně lehká, měla co nejnižší plošnou hustotu. Hmotnosti na jednotku plochy by měly být mnohem menší, než je $0,005 \text{ kg/m}^2$ (5 g/m^2). Zmíněná hodnota je plošnou hustotou reálné fólie z Mylaru® o tloušťce 2 mi-



krometry. To je v současné době nejlepší dostupný materiál. Použitý materiál musí být dostatečně pevný a odolný proti radiaci, dopadům mikrometeoritu a prachu i změnám teplot ve velmi širokém rozmezí.

V současné době se uvažuje o již zmíněném Mylaru® a také Kaptonu®. Mylar je obchodní název pro tenké fólie z polyethylentereftalátu (zkratka PET) s hustotou zhruba $1\,400\text{ kg/m}^3$. Kapton je polyimid vyvinutý v šedesátých letech firmou DuPont (chemicky 4,4'-oxydiphenylene-pyromellitimide), jehož hustota je také zhruba $1\,400\text{ kg/m}^3$. Oba materiály musí mít pro zlepšení odolnosti a odrazivosti speciální povrchovou vrstvu a také pokovení. Plošná hustota je tak na danou tloušťku vyšší, než by vyšla při výpočtu s využitím jejich hustoty. Kapton, který se už pro přípravu plachet použil, měl tloušťku 5 mikrometrů a plošnou hustotu zhruba 26 g/m^2 . V současné době jsou dostupné technologie výroby zmíněných fólií s tloušťkou až 0,9 mikrometrů. Výroba extrémně tenkých fólií s tloušťkou o řád až dva menší, jejichž pokove-

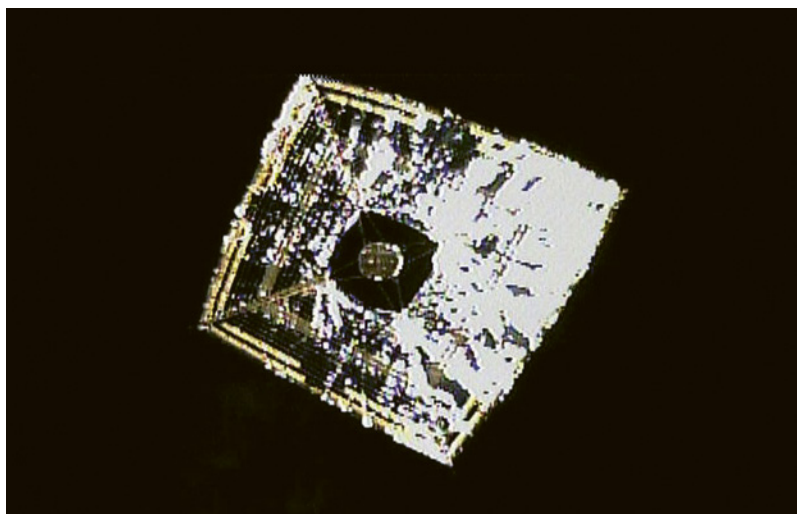
ní musí probíhat ve vakuu, je extrémní výzvou. V budoucnu se uvažuje o materiálech na bázi grafenu a různých typech nanomateriálů získaných velice specifickými postupy.

Velkou výzvou je zabalení velké a extrémně tenké plachty při její dopravě do vesmíru a následné její roztažení. Jeho spolehlivá realizace a napnutí plachty je klíčovou podmínkou pro úspěch. Jednou z možností je čtvercová plachta složená ze čtyř trojúhelníkových částí, které jsou odděleny a upevněny pomocí čtveřice vysouvatelých ráhén. Druhou možností je využití rotace. Plachtoví je sestaveno s dlouhých tenkých pásů (stuh), která se označují jako heliogyro, nebo plného rotujícího disku. Pomocí rotace se plachta roztáhne a odstředivé síly, které rotace způsobuje, ji pak udržují napnutou.

Tlak na plachtu velmi silně závisí na vzdálenosti od Slunce. Klesá s její druhou mocninou. V blízkosti Země, tedy ve vzdálenosti jedné astronomické jednotky (1 AU) od Slunce, což je zhruba 150 miliard kilometrů, se získá maximálně tlak $9,126\text{ }\mu\text{N/m}^2$ (tedy zhruba



Obr. 1 Umělecké zobrazení japonské sluneční plachetnice IKAROS u Venuše (zdroj: Wikimedia Commons, autor: Andrzej Mirecki)



↑
Obr. 2 Sluneční plachetnice IKAROS vyfocená malou kamerou po jejím oddělení (zdroj: JAXA)

9 N/km²). Vyšších tlaků a tím i změny rychlosti lze dosáhnout při blízkém průletu sluneční plachetnice okolo Slunce. Průlet ve vzdálenosti 0,2 AU od Slunce umožňuje dosáhnout tlaku na plachtu v periheliu 228 μN/m² (25× větší než u Země) a ve vzdálenosti dva poloměry Slunce od jeho středu, což odpovídá hodnotě 0,01 AU, by to dokonce bylo 91 260 μN/m² (o čtyři řády větší než u Země).

Sondy by se mohly dostat až do blízkosti Slunce, kde pozorujeme některé průlety komet, tedy už zmíněných 0,01 AU. Ten je 700 000 km, což je v tomto případě vzdálenost sondy od povrchu Slunce. Na plachtu v této situaci dopadá ze směru od Slunce na jednotkovou plochu výkon 10⁷ W/m² (10 MW/m²). Je tak nutné, aby měla co nejvyšší odrazivost a co nejméně z tohoto výkonu pohlcovala. Pokud by se plachta chovala jako absolutně černé těleso a veškerou energii ze Slunce pohlcovala a pak vyzařovala, byla by její teplota velmi vysoká 3 100 K. Pro odrazivosti 90, 95 a 99 % budou teploty postupně 1 750, 1 500 a 1 000 K. Odrazivost 99 % i vyšší je v současných možnostech a teplota se pak dostává pro specifické materiály na tolerovatelnou hodnotu.

Velice zajímavou možností, kterou v roce 2017 navrhl Grover A. Swartzlander z Rochesterského technologického institutu, je využití difrakce místo odrazu. Umožnil ji pokrok v materiálovém výzkumu, který dovoluje vytvářet velmi jemné mřížky na bázi velmi tenkého metamateriálového filmu. Na ní dochází

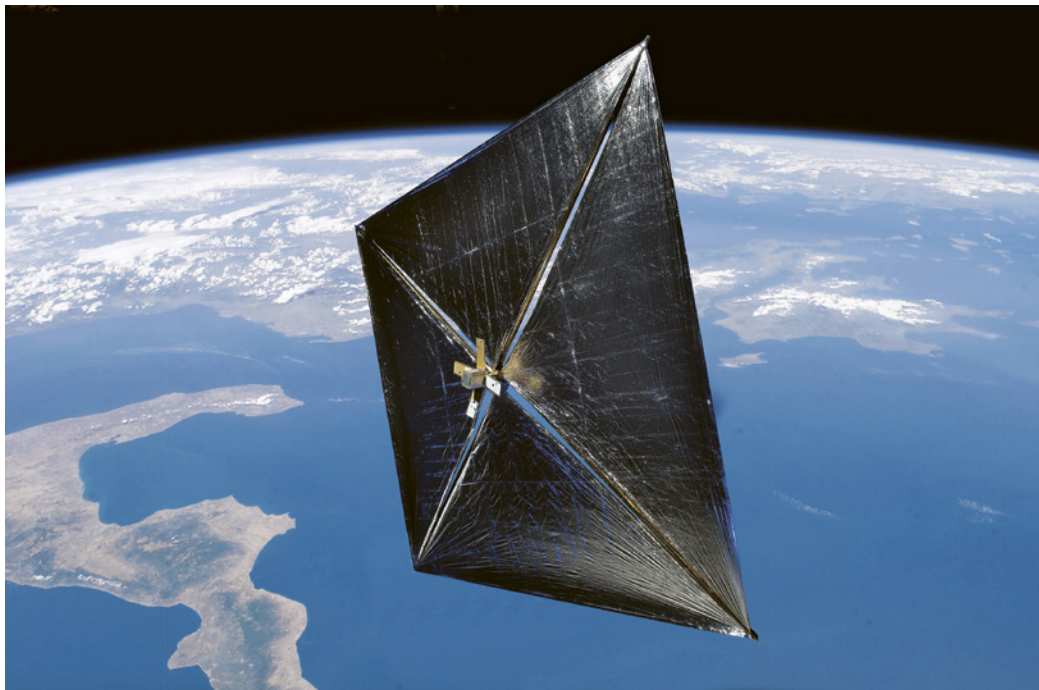
k difrakci a vytváří se radiační tlak. Výhodou difrakční sluneční plachetnice je možnost směrování světla a lepší schopnost manévrování, bez ohledu na to, z jakého směru světlo přichází. Zároveň lze omezit absorpci fotonů a tím i ohřev plachty. Difrakované světlo lze znovu využít v následné difrakční mříži a případně ve fotovoltaických bateriích.

Zatím realizované projekty

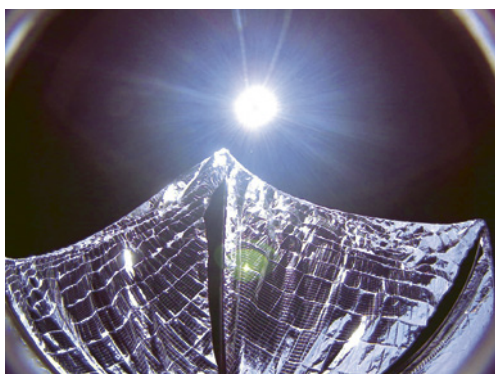
Až do konce minulého století šlo pouze o projekty na papíře či ve stádiu rané přípravy. Na sestrojení prvních prototypů sluneční plachetnice na přelomu minulého a tohoto století pracovala americká nezisková společnost Planetary Society. Projekt Cosmos 1 vypracovala ve spolupráci s Ruskem. Plachta plachetnice měla plochu 600 m² a byla z pohliníkové fólie Mylar o tloušťce 5 mikrometrů. Plachetnice měla být vynesena balistickou střelou Volny vypouštěnou z ponorky. Oba pokusy o její vypuštění do vesmíru uskutečněné v prvním desetiletí tohoto století však selhaly.

Prvním úspěšným projektem byl japonský IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun). Sluneční plachetnice byla vynesena raketou H-2 společně s japonskou sondou Akatsuki letící k Venuši dne 21. května 2010. Hned druhý den po vypuštění se zařízení IKAROS oddělilo. Plachta byla vyrobena z polyimidu o tloušťce 7,5 mikrometrů (jeho hmotnost byla pouhých 10 g/m²) a její plocha byla 196 m². Zatímco hmotnost celé sondy byla 360 kg, hmotnost plachty i s podpůrnými konstrukcemi byla pouhé 2 kg.

Úspěšné roztažení plachty proběhlo mezi 3. až 10. červnem 2010. O čtyři dny později vypustila sonda první kameru, která zachytila vzhled roztažené plachty. Druhá kamera byla vypuštěna o pět dní později. Podařilo se zaznamenat tlak na plachtu a zajistit pomocí plachty orientaci sondy. Kolem Venuše proletěla plachetnice 8. prosince 2010 a všestranně se otestovala její funkčnost. Během šesti měsíců se podařilo rychlost sondy pomocí plachty změnit o 100 m/s. Plachtění trvalo do roku 2012, kdy se vlivem degradace některých systémů plachty zhoršovala kontrola orienta-



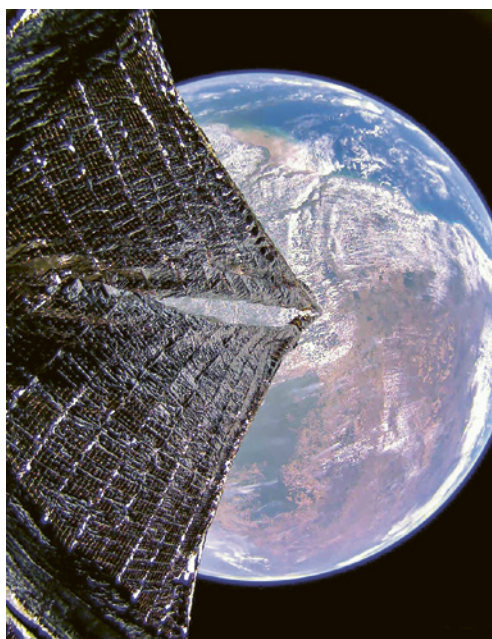
←
Obr. 3 Umělecký koncept Nanosail-D na oběžné dráze Země (zdroj: NASA)



←←
Obr. 4 Snímek LightSail 1 zachycený po svém rozvinutí na oběžné dráze 8. června 2015 (zdroj: The Planetary Society)

ce sondy. Projekt byl ukončen 28. března 2013 a celková změna rychlosti pomocí plachty byla okolo 400 m/s. Poté byla ještě čtyřikrát sonda probuzena z hibernace, naposledy v dubnu 2015. Pro japonskou kosmickou agenturu JAXA jde o předstupeň pro plachetnice, které by letěly k planetkám.

Malou zkušební sluneční plachetnici vyvinula a vypustila i organizace NASA. Ta měla plochu plachty pouze 9 m² a celá sonda byla umístěna do rozměru tří standardních modulů CubeSat. Družice ve standardizaci CubeSat jsou vypouštěny jako přívazek startu velkých družic. První start Nanosail-D v srpnu 2008 se nepodařil kvůli selhání rakety Falcon 1. Teprve druhý exemplář Nanosail-D2 se pomocí rakety Minotaur dostal 20. listopadu 2010 na orbi-



←
Obr. 5 Sluneční plachetnice LightSail 2 ve vesmíru (zdroj: The Planetary Society)

tu okolo Země ve výšce 650 km nad povrchem. V tomto případě se však plachta zkoušela spíše pro její využití pro brždění v horních vrstvách atmosféry. Pokud by družice na zemské orbitě měly levnou a lehkou plachtu, mohly by po ukončení činnosti pomocí ní řízeně vstoupit do atmosféry a shořet v ní.

Reálná sluneční plachetnice byla na sondě NEA Scout (Near-Earth Asteroid Scout). Šlo také o zařízení postavené na bázi platformy

CubeSat. Jednalo se o jeden z malých satelitů, které byly vyneseny při misi Artemis 1 na heliocentrickou dráhu. Plachta měla pomoci při cestování této sondy k asteroidům. Zároveň se plánovalo testování tohoto plachtění. Bohužel šlo o jednu ze sond, se kterými se po uvolnění nepodařilo navázat spojení.

Organizace NASA pracuje i na velkých slunečních plachtách, jako příklad může sloužit Sunjammer. V tomto případě měla mít plachta 1 200 m². Testy jejího prototypu probíhaly ve vakuové komoře. Projekt však byl v roce 2015 zastaven. I v současné době však NASA na budoucích projektech slunečních plachetnic a jejich využití pro pohyb ve Sluneční soustavě pracuje. Zároveň pracuje i na prvním prototypu difrakční sluneční plachetnice.

Právě v polovině desátých let dosáhla konečně úspěchu zmíněná společnost Planetary Society. Ta připravila sluneční plachetnici LightSail, která je také na bázi standardu CubeSat. Plachta z Mylaru o tloušťce 4,5 mikrometru má plochu 32 m². Sonda LightSail 1 byla vypuštěna 20. května 2015 raketou Atlas V na velmi nízkou oběžnou dráhu. Šlo pouze o test roztažení plachty. To se podařilo 8. června a mise tak splnila svůj cíl. Dne 14. června 2015 pak sonda shořela v atmosféře. Sonda LightSail 2 byla vypuštěna 25. června 2019 jako přívazek při startu rakety Falcon Heavy. Dostala se na dráhu ve výšce okolo 720 km. Původně měla mise probíhat rok, a pak měla sonda shořet v atmosféře. Sonda však dokázala zvyšovat svou výšku pomocí plachty a dařilo se testovat plachtění až do 17. listopadu 2022, kdy sonda v atmosféře nakonec opravdu zanikla. Další sondy by měly mít náročnější cíle. Měly by již mít vědecký program a také lepší možnosti ovládní plachty a samotného plachtění. Vydají se i dále od Země, například do Lagrangeova bodu L1. Zde už by neovlivňovaly sondu a plachtu zbytky atmosféry.

Je vidět, že se postupně získávají první reálné zkušenosti se slunečními plachtami ve vesmírném prostoru. Zatím však stále čekáme na úspěšný projekt s velkou plachtou reálně plachtící po Sluneční soustavě. Takový by se však mohl objevit poměrně brzy. Pro rea-

lizaci vyslání sluneční plachetnice mimo Sluneční soustavu pomocí blízkého průletu okolo Slunce je však třeba překonat velký počet výzev nejen v materiálové oblasti.

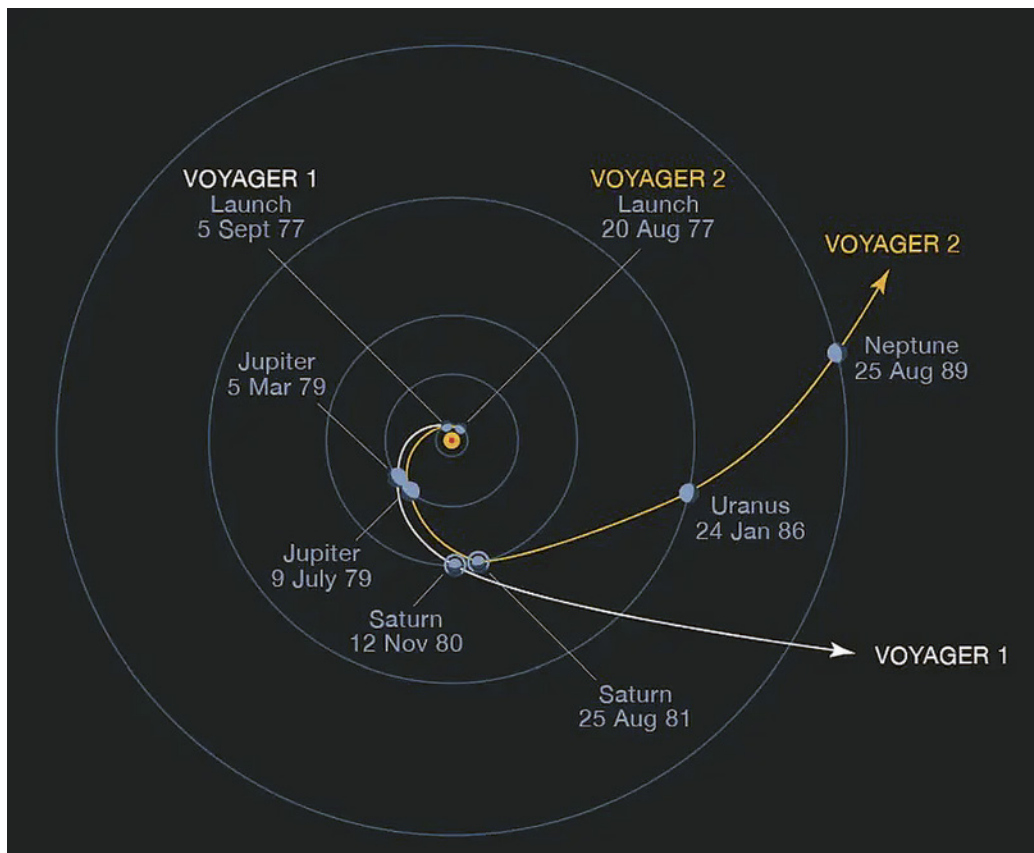
Lasery ozařovaná plachta

Plachetnice nemusí využívat sluneční záření, ale intenzivní velmi dobře kolimovaný svazek laseru. Plocha plachty tak nemusí být tak velká jako u sluneční plachetnice, ale na její jednotkovou plochu bude dopadat daleko vyšší výkon záření. Při nejbližších průletech sluneční plachetnice (0,01 AU) se předpokládá výkon dopadající na jednotku plochy okolo 10 MW/m². Pro relativistické plachetnice poháněné laserem se uvažuje až o hodnotách jednotek až desítek GW/m². V tomto případě se odrazivost povrchu stává ještě kritičtějším parametrem. Pokud by nedosahovala hodnot 99,999 % a více, tak plachta překročí zvladatelné teploty.

Ozáření laserovými svazky je možné využít pro další urychlení sondy, která byla urychlena blízkým průletem okolo Slunce. Když se sluneční plachetnice vzdálí od Slunce tak, že už je tlak slunečního záření malý, je možné ji urychlovat právě laserovým svazkem. Taková kombinace je vhodnější pro případ větších lodí, u kterých je zrychlení menší.

Můžeme využít čistě ozařování lasery. To je výhodné v případě urychlování velmi malých sond na velmi vysoké rychlosti, které jsou v jednotkách až desítkách procent rychlosti světla. Aby se toho dalo docílit, je potřeba mít pole laserů, jejichž celkový výkon se pohybuje v oblasti gigawatt. Lasery v systému musí být velice dobře sladěny a jejich svazky velmi dobře kolimované. Vhodnější je jejich umístění mimo atmosféru Země, například na Měsíci. Pokud se podaří dosáhnout odpovídající kolimace, mohlo by urychlování plachetnice probíhat až do vzdálenosti desítky astronomických jednotek. Výhodou umístění pohonu ve formě laserů na Zemi, případně na Měsíci, kdy laser není umístěn na samotné kosmické lodi je v tom, že on ani zdroje energie pro něj nemusí být urychlovány spolu s lodí.

Studii zaměřenou na odpovídající laserové pole pod označením DE-STAR (Directed Ener-



←
Obr. 6 Schematické zobrazení gravitačních manévřů meziplanetárních sond Voyager 1 a 2, které jsou nyní nejdále od Slunce a stále je s nimi udržováno spojení (zdroj: NASA)

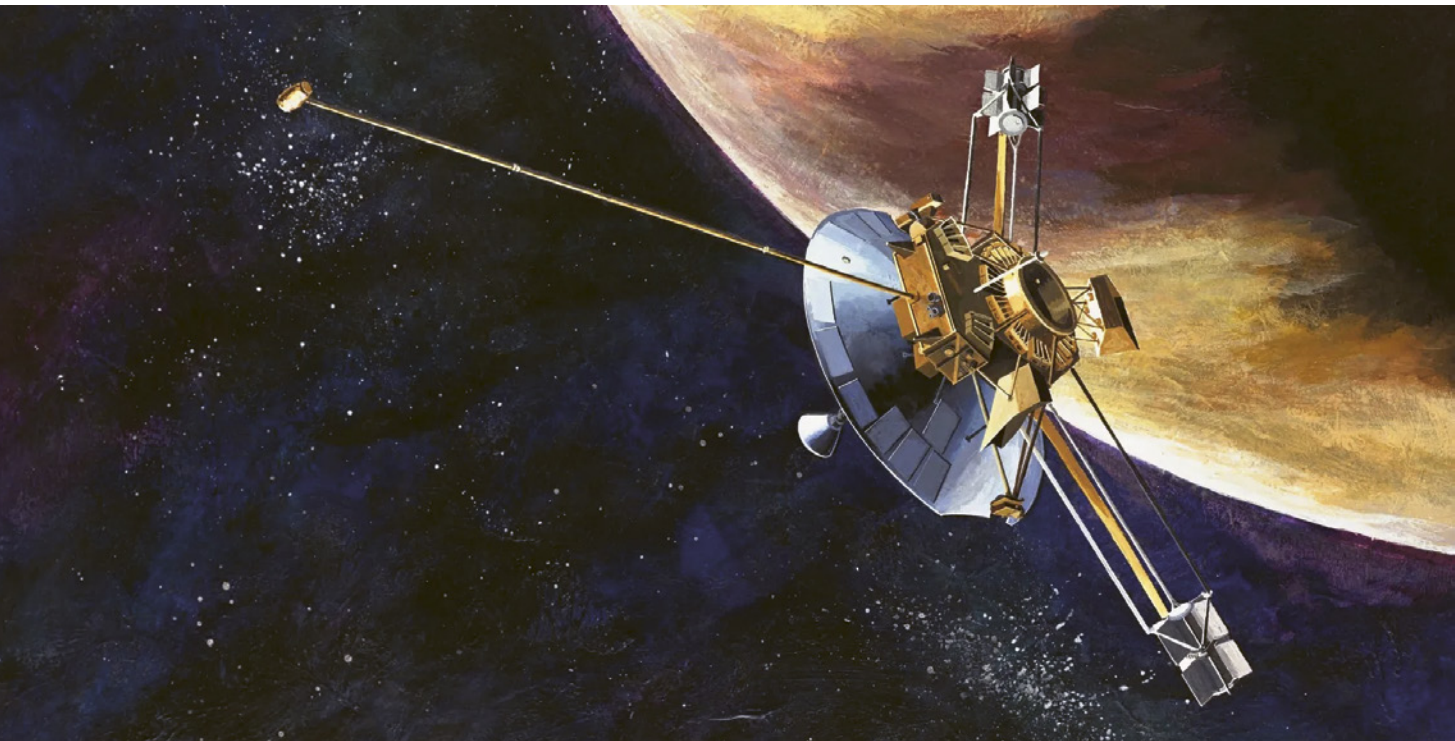
gy System for Targeting of Asteroids and ex- ploRation) vypracoval Philip Lubin se svými kolegy. Na vyslání velkého počtu mikroskopických sond pomocí urychlení polem výkonných laserů k nejbližším hvězdám je zaměřen projekt Breakthrough Starshot (Průlomový výstřel ke hvězdám).

Zatím jsme v cestě za reálnými slunečními plachetnicemi poháněnými slunečním zářením nebo laserovým svazkem teprve na začátku. Pokud se mají reálně vydat ke hvězdám, je třeba vyřešit celou řadu výzev. Jde o posun k extrémní miniaturizaci, extrémně odolným materiálům a velmi výkonným laserům s extrémními parametry. Nejde sice o jaderné technologie, ale je zde řada synergií. Extrémně tepelně i mechanicky odolné materiály potřebujeme i v pokročilých štěpných a fúzních systémech. Pokrok v oblasti laserů je klíčový pro inerciální fúzi. Velké systémy velmi výkonných laserů budou mít obrovské energetické nároky a ty může zajistit právě štěpná či fúzní jaderná energetika.

Využití gravitačního praku ve Sluneční soustavě

Všechny sondy, kterým se zatím podařilo získat třetí kosmickou rychlost potřebnou k opuštění naší Sluneční soustavy, využívaly k jejímu dosažení metodu gravitačního praku. Odborněji se mluví o gravitačním manévru. Využívá se při něm těsný průlet okolo planety. V soustavě spojené s planetou má sonda po průletu kolem ní stejnou velikost rychlosti, jakou měla při přiletu. V průběhu samotného průletu napřed velikost rychlosti a kinetická energie s ní spojená roste a při maximálním přiblížení je maximální, pak začne rychlost a odpovídajícím způsobem kinetická energie sondy klesat, až se dostane k původní hodnotě. V této souřadné soustavě je příletová část dráhy symetrická s tou odletovou.

Úplně jiná situace je v souřadné soustavě spojené se středem Sluneční soustavy. Při tomto pohledu může mít sonda po průletu okolo planety vyšší nebo nižší velikost rychlosti. S jakým znaménkem a jak velká bude změna velikosti rychlosti, závisí na geometrii



Obr. 7 První sondou, které gravitační manévry využívající velkou planetu umožnil opuštění Sluneční soustavy, byl Pioneer 10; na obrázku je umělecká představa jeho průletu kolem planety Jupiter (zdroj: NASA)

dráhy a vzájemném pohybu v souřadné soustavě spojené s centrem Sluneční soustavy, a tedy se Sluncem. V případě, že se má sonda vůči Slunci zrychlit, musí proletět za planetou, aby naopak zpomalila, musí proletět před ní (z pohledu směru jejího pohybu po oběžné dráze). Průlet v gravitačním poli různých těles tak lze využít nejen ke změně směru pohybu, ale i ke změně velikosti rychlosti. Pokud tak zvolíme vhodnou dráhu, můžeme i dost významně zvýšit rychlost naší kosmické sondy vůči Slunci a docílit překročení třetí kosmické rychlosti potřebné pro opuštění Sluneční soustavy. Zvýšení kinetické energie odpovídající zvýšení rychlosti sondy je rovné ztrátě kinetické energie a oběžné rychlosti tělesa, které je ke gravitačnímu manévru využito. Vzhledem k obrovskému nepoměru hmotnosti planety a sondy je změna rychlosti planety nepozorovatelná.

Gravitační manévry se využívají pro urychlení sond při cestě do vzdálenějších oblastí Sluneční soustavy, ať už se jedná o pásmo asteroidů, velké vnější planety, planetoidu Pluta a další objekty Kuiperova pásu, či dokonce pro výpravy za hranice Sluneční soustavy. Dá se však také využít pro zpomalení rychlosti,

když potřebujeme dostat náš kosmický aparát blíže ke Slunci k vnitřním planetám Sluneční soustavy. Průlet kolem měsíců velkých planet se dá využít ke zpomalení rychlosti pro zaparkování na orbitu okolo této planety.

Možnosti využití gravitačních manévrů se podrobně studovaly na počátku kosmické éry v počátcích šedesátých let v laboratořích NASA JPL. V polovině šedesátých let navrhl Gary Flandro „Velkou cestu“, při které by sonda vypuštěná za Země navštívila díky velmi příznivé konstelaci všechny velké planety a Pluto. Ta se sice nakonec nerealizovala úplně, ale Voyager 2 proletěl během pouhých dvanácti let kolem Jupiteru, Saturnu, Uranu i Neptunu.

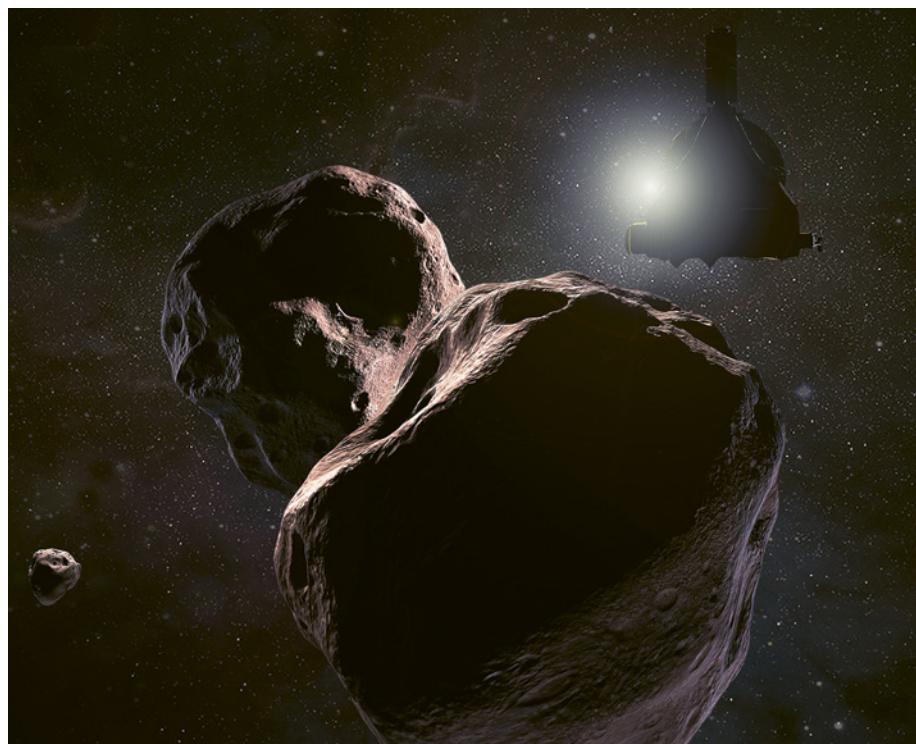
První sonda, která gravitační manévry využila pro cestu za hranice Sluneční soustavy, byl Pioneer 10, který startoval 2. března 1972. Průlet okolo Jupitera proběhl 3. prosince 1973 a sondu neposlal k žádné další planetě. Získala však dostatečnou rychlost, aby opustila Sluneční soustavu. Až do 23. ledna 2003 bylo možné zachytit její signály. V té době už byla ve vzdálenosti 80 AU. Sonda Pioneer 11, která odstartovala 6. dubna 1973, zrychlila gravitačním manévrem u Jupitera svou cestu k Saturnu. Po průletu okolo něj se pak vydala na

cestu mimo Sluneční soustavu. Z technických důvodů se odmlčela už v roce 1996.

Další sondou byl Voyager 1, který startoval 5. září 1977 a průlet kolem Jupitera využil k urychlení cesty k Saturnu. Jeho dráha byla optimalizována tak, aby mohl při průletu soustavou Saturnu a jeho měsíců z optimální blízkosti studovat největší měsíc Titan. Vybraná trajektorie však také udělila sondě takovou rychlost, že je v současnosti tou, která se vzdaluje ze Sluneční soustavy nejrychleji. Sonda předběhla Pioneer 10 a již v roce 2012 dosáhla hranice heliosféry, tedy dosahu slunečního větru, a začala studovat mezihvězdné prostředí. Je však stále v oblasti gravitačního vlivu Slunce, a ještě v něm velmi dlouho zůstane. Teprve zhruba za tři sta let dosáhne vnitřního okraje Oortova oblaku a poputuje jím několik tisíc let. V současné době je od Slunce vzdálena okolo 162 AU a radiový signál z ní k nám letí přes 22 hodin.

Jak bylo zmíněno, realizoval Voyager 2 téměř úplnou Velkou cestu. Při ní využil gravitační manévry u všech velkých planet. Jím dosažená rychlost je však v konečném důsledku nižší, než je tomu u Voyageru 1. Heliosféru tak opustil až v roce 2018 a v současné době je ve vzdálenosti jen něco přes 134 AU. Poslední pozemskou sondou, která dosáhla rychlosti potřebné k opuštění Sluneční soustavy, je New Horizons. Ta startovala 19. ledna 2006 a využila gravitační manévry u Jupitera k tomu, aby 14. července 2015 proletěla kolem soustavy Pluta a Charonu. Poté se vydala na cestu Kuiperovým pásem. Tam proletěla kolem tělesa Arrokoth a je možné, že navštíví ještě některé další. Pak se vydá za předchozími čtyřmi sondami ven ze Sluneční soustavy. Je dobré připomenout, že všechny tyto sondy mají radionuklidové zdroje energie, takže jsme s nimi v našem seriálu už setkali.

Je tak pouze pět umělých těles, které díky gravitačnímu manévru získaly dostatečnou rychlost, aby opustily Sluneční soustavu. Za dobu rozvoje kosmonautiky se však metoda gravitačního manévru stala běžným nástrojem pro dosažení různých těles ve Sluneční soustavě. Využívá se ke zpomalení rychlosti

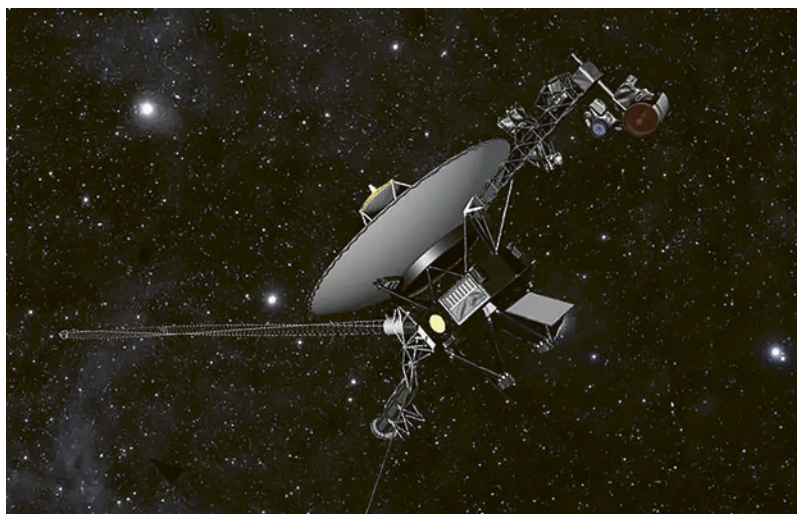


při cestě ke vnitřním planetám. Sonda Messenger tak například realizovala několik gravitačních manévru při průletu okolo Venuše a Merkura, než byla navedena na oběžnou dráhu okolo této planety nejbližší Slunci. Gravitační manévry při průletu okolo Země využily sondy při cestě k planetkám i kometám. K Saturnu se pomocí gravitačních manévru při průletu okolo Venuše, Země a Jupitera dostala sonda Cassini.

Celková dosažená rychlost je omezena hmotností tělesa, parametry jeho orbity a hlavně tím, jak blízko jeho povrchu může sonda proletět bez destrukce v jeho atmosféře. V případě využití více těles je třeba mít i vhodnou geometrii jejich postavení. K zesílení účinku gravitačního manévru lze využít Oberthův efekt. Změna rychlosti vesmírné sondy pomocí raketového motoru je tím vyšší, čím rychleji se sonda pohybuje. Tryskové pohony umožňují při vyšších rychlostech dosáhnout větší změny rychlosti. Motorický manévry tak je optimální provést v době největšího přiblížení sondy k tělesu využívaného pro gravitační manévry, kdy je jeho rychlost nejvyšší. Společné využití gravitačního a motorického manévru, které se označuje jako Oberthův



Obr. 8 Sonda New Horizons se pomocí gravitačního manévru dostala až k objektu Arrokoth nacházejícímu se v Kuiperově pásu; na obrázku je umělecká představa průletu sondy kolem tohoto objektu (zdroj: NASA/Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory/Southwest Research Institute/Steve Gribben)



↑
Obr. 9 Umělecká představa sondy Voyager na hranici Sluneční soustavy (zdroj: NASA)

manévr, umožňuje zajistit významnou změnu rychlosti. Pro Oberthův manévr lze využít i velmi těsný průlet okolo Slunce, který se nehodí pro čistý gravitační manévr. V tom případě je důležitá vysoká rychlost průletu perihéliem. V takovém případě to lze zkombinovat i s využitím principu sluneční plachetnice, o kterém se psalo v předchozí části. Gravitační manévry využívající tělesa Sluneční soustavy posílené kombinací s dalšími metodami sice umožňují cesty do mezihvězdného prostoru, ale pouze s rychlostmi v řádu stovek kilometrů za sekundu. Jde o rychlosti velmi malé oproti rychlosti světla. Cesta k nejbližším hvězdám v tomto případě potrvá řádově tisíce až desetitisíce let.

Gravitačního manévru s využitím binárních kompaktních hvězdných systémů

Pro dosažení řádově vyšší změny rychlosti pomocí gravitačního manévru je potřeba využít binární či komplexnější systémy, které obsahují hmotnější kompaktnější tělesa. Ty se však vyskytují dále od nás. Než se na ně podíváme, řekněme si o možnostech urychlování a změny směru s využitím gravitačních manévru při mezihvězdném cestování, které nejsou tak dramatické. Mezihvězdná loď, která by chtěla změnit svou rychlost vzhledem ke galaktickému centru k tomu může využít průlet okolo Slunce nebo jiné hvězdy. Takový případ je popsán v knize Arthura Clarka „Setkání s Ramou“. Tyto změny však jsou srovnatelné s těmi, které umožňují tělesa Sluneční soustavy.

Získání rychlosti v řádu zlomku procenta, procenta až desítky procent rychlosti světla pomocí gravitačního manévru by mohl umožnit těsný binární systém složený z velmi hmotných objektů. Takovou možnost navrhl v roce 1963 fyzik Freeman J. Dyson. Šlo by o těsný systém dvou konečných stádií hvězd. Tedy o systém složený ze dvou bílých trpaslíků, dvou neutronových hvězd nebo dvojice černých děr, případně různé kombinace rozdílných konečných stádií hvězd.

I v případě dvojhvězdy složené z bílých trpaslíků lze dosáhnout poměrně vysokých změn rychlostí. Systém dvojice bílých trpaslíků, každý s hmotností Slunce a poloměrem Země s oběžnou periodou 100 s může umožnit při využití vhodné geometrie dráhy až 1 % rychlosti světla. Pokud půjde o neutronové hvězdy se stejnou hmotností, které mají poloměr okolo 10 km, a oběžnou periodou 0,005 s, lze dosáhnout až rychlosti přesahující čtvrtinu rychlosti světla. U černých děr hmotností Slunce je poloměr horizontu událostí ještě menší, zhruba 3 km, a podmínky pro gravitační manévr lze ještě vylepšit.

Je pochopitelně potřeba hlídat podmínky tak, aby neohrožovaly mezihvězdnou loď a její náklad. Problémem nejsou dosahovaná zrychlení, protože jde po celou dobu o volný pád v gravitačním poli. Problém by mohl nastat v případě, že bude loď v takové blízkosti povrchu neutronové hvězdy nebo horizontu černé díry, která povede k příliš velkému gradientu gravitačního pole. To by mohlo vest k takzvanému „špagetování“ kosmonautů i celé lodi.

Ovšem zmíněné binární systémy konečných stádií hvězd se velice těžko hledají. Bílí trpaslíci ještě svítí, ale docela málo. Pozorování neutronových hvězd ve viditelné oblasti je velice náročné. Snadněji lze nalézt, pokud se alespoň jedna komponenta projevuje jako pulsar. Díky radiovým signálům se podařilo objevit několik pulsarů v binárních systémech. Takže víme, že vhodné systémy existují. Víme také, že existují binární systémy černých děr. Ty se podařilo detekovat pomocí gravitačních vln, které vznikají při zániku tohoto systému jejich splnutím. Detektory gravitačních

vln LIGO a VIRGO zaznamenaly už desítky takových případů.

Celkově však zatím máme povědomí jen o velmi malém počtu takových kompaktních systémů. Dominantní část zůstává před námi utajena. V budoucnu bychom je však pozorovat mohli a daly by se vytvořit mapy jejich poloh v našem okolí. Gravitační vlny totiž vyzařují nejen při svém zániku, ale také při své existenci. Jde však o jinou frekvenci a intenzitu. Nemohou je zaznamenat současná zařízení LIGO a VIRGO. Jejich detekci by však mohl zajistit plánovaný vesmírný detektor gravitačních vln eLISE, na kterém pracuje evropská vesmírná agentura ESA.

K urychlení mezihvězdné lodi na rychlosti blízké rychlosti světla by se dala využít i osamělá černá díra. Musela by však rotovat. Vzhledem k tomu, že všechny hvězdy rotují a moment hybnosti se při jejich konečném kolapsu zachovává, tak by to neměl být problém. Rotující černá díra se označuje jako Kerrova. U takové černé díry existuje nad horizontem ergosféra, kde dochází k velice intenzivnímu strhávání časoprostoru ve směru rotace. Pro získání energie a rychlosti se využívá tzv. Penroseův proces. Je třeba vybrat vhodnou dráhu, která sondu zavede do ergosféry, ale nedostane ji pod horizont. Zároveň je třeba obětovat část hmotnosti lodi, která se nasměruje pod horizont a zvětší hmotnost černé díry. Díky tomu se zvýší rychlost a kinetická energie sondy, a to o hodnotu, která představuje velkou část klidové energie odvrženého materiálu. Moment hybnosti černé díry o něco poklesne, ale tato změna je zanedbatelná. Takové urychlování pravděpodobně pozorujeme ve formě relativistických výtrysků materiálu u galaktických černých děr, například v případě kvazarů. Velmi náročné bude v tomto případě zabránit destrukci mezihvězdného plavidla. I když se nám podaří získat mapu černých děr a kompaktních binárních systémů, zůstává základním problémem otázka, jak se k nim dostat. Před jejich využitím tak musí být otázka mezihvězdného cestování jinými způsoby už vyřešena.

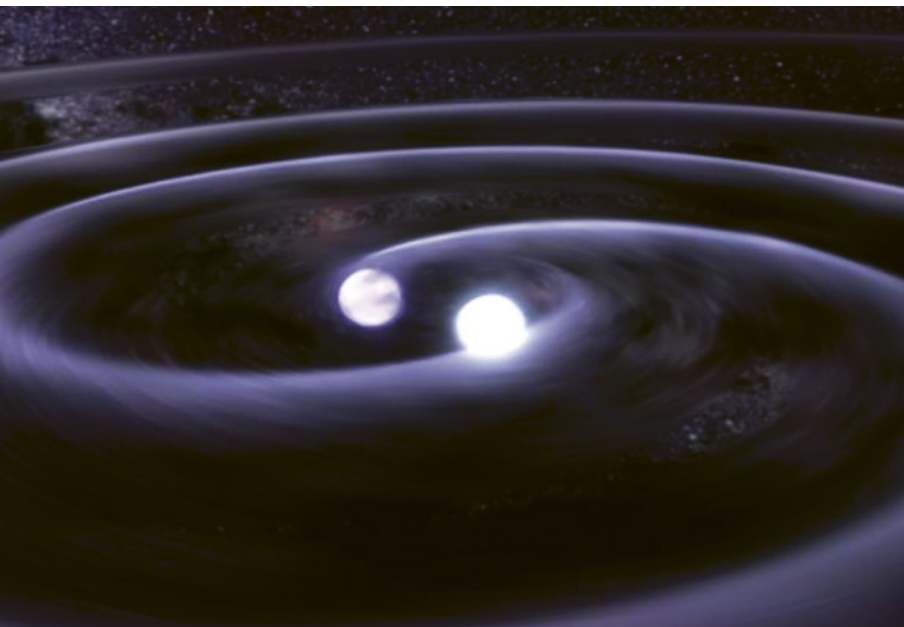
Fyzika za Standardním modelem

Forma hmoty pod horizontem černé díry se v rámci současné fyziky nedá popsat, zároveň nedokážeme popsat celou řadu dalších vlastností černých děr. Současný fyzikální popis je postaven na kvantovém Standardním modelu hmoty a interakcí, který popisuje strukturu hmoty a elektromagnetickou, silnou a slabou interakci, a nekvantové Obecné teorii relativity, která popisuje gravitační interakci. Je jasné, že nám chybí kvantová teorie gravitace a také Standardní model hmoty a interakcí má vlastnosti, ze kterých je jasné, že není tou konečnou teorií struktury hmoty.

I když zmíněné teorie popisují extrémně dobře známé fyzikální děje, a třeba experimenty na největším urychlovači LHC jen velmi těžko hledají odchylky od předpovědí Standardního modelu hmoty a interakcí, vidíme v našem vesmíru jevy, které nedokáže spolu s Obecnou teorií relativity vysvětlit. Jsou spojeny hlavně s kosmologickými teoriemi, tedy naší snahou popsat vývoj vesmíru jako celku. Zde se neobejdeme bez fenoménů, jako je temná hmota či temná energie, které jsou známkou nové exotické fyziky za Standardním modelem hmoty a interakcí i Obecnou teorií relativity. Jejich projevy jsou důsledkem velmi raného vývoje vesmíru, kdy panovaly extrémní teploty, hustoty hmoty i energie, které současné fyzikální teorie popsat nedokážou. Je tak možné, že exotická fyzika umožňuje i takové změny energie, časoprostoru a pohybu v něm, které zatím neznáme.

Pro pohyb objektů v časoprostoru platí podle speciální teorie relativity limita na rychlost. Žádný objekt nemůže mít větší rychlost, než má světlo ve vakuu. Ve vesmíru však existují objekty, které se od nás vzdalují rychlostí větší. Ovšem v tomto případě je to způsobeno rozpínáním časoprostoru – našeho vesmíru. A pochopitelně je v principu možné i smršťování časoprostoru.

Velikost současného rozpínání našeho vesmíru charakterizuje Hubbleova konstanta, jejíž hodnota je okolo 70 (km/s)/Mpc. Objekty v našem vesmíru ve vzdálenosti přesahující zhruba 14 miliard světelných let se tak od nás



Obr. 10 Těsná dvojhvězda složená ze dvou neutronových hvězd by mohla umožnit s využitím gravitačního manévru získat rychlost blízkou rychlosti světla (zdroj: NASA/Danna Berry)

vzdalují rychlostí větší, než je rychlost světla. Přesná hodnota vzdálenosti, ve které k tomu dochází, závisí na přesné hodnotě Hubbleovy konstanty, a také na tom, jak se v průběhu vývoje vesmíru mění. Díky pozorování velmi vzdálených supernov Ia typu dnes víme, že rozpínání našeho vesmíru se zrychluje. Zároveň náš Standardní kosmologický model předpokládá ve velmi raném stádiu našeho vesmíru jeho extrémně rychlé rozpínání, tzv. inflační etapu jeho rozpínání. Bez ní nelze vysvětlit některé jeho pozorované vlastnosti.

Kvantová gravitace, černé díry, červí díry a zakřívování prostoročasu

Je tak vidět, že se sice nemůže hvězdolet pohybovat větší rychlostí, než je rychlost světla, ale vzdálenost mezi ním a cílovým bodem se může zkracovat rychleji vlivem smršťování časoprostoru. Není tak vyloučeno, že existují možnosti, jak smršťovat či jinak modifikovat časoprostor nebo nalézt „zkratku“ s využitím dalších rozměrů, která propojí dvě místa v časoprostoru rychleji. Na takové představě jsou založeny všechny úvahy o využití černých a červích děr nebo warpu.

Nadsvětelné cestování by hypoteticky mohl umožnit průlet černou dírou. Tentokrát by musel hvězdolet letět pod horizont, ne pouze do ergosféry nad horizontem rotu-

jící Kerrovy černé díry. Poprvé byla tato možnost popsána ve Schwarzschildově metrice Ludwigem Flammem v roce 1916 a nezávisle pak podrobně Albertem Einsteinem a Nathanelem Rosenem v roce 1935. U černé díry se nemůže nic, co je pod jejím horizontem, dostat v žádném případě ven. Rovnice Obecné teorie relativity ukazovala řešení, která by mohla popisovat objekty, kde se nic nemohlo pod horizont událostí dostat a vše by naopak unikalo ven. Tato řešení se označila jako bílé díry. Bílé díry by přes singularitu měly být propojeny s černými děrami. Takové hypotetické propojení černé a bílé díry se označuje jako červí díra, která by mohla zajistit propojení mezi dvěma vzdálenými body časoprostoru. Druh červí díry (řešení rovnic Obecné teorie relativity) nalezený zmíněnými dvěma fyziky má název Einstein-Rosenův most nebo také Schwarzschildova červí díra. Hypoteticky by se dala využít pro cestu z jednoho místa časoprostoru do druhého za dobu i podstatně kratší, než by to světlu zabralo normální cestou. Jde o využití časoprostorové zkratky, která by v principu mohla propojovat nejen různá místa v našem časoprostoru, ale i různé časoprostory – vesmíry.

Řešení rovnic Obecné teorie relativity označované jako černé díry popisují objekty, které v našem vesmíru reálně pozorujeme. Jestli existují bílé díry a červí díry je otázka otevřená. Klíčovou vlastností je, že černá a bílá díra jsou propojeny singularitou. Ovšem singularita znamená, že současná fyzikální teorie, v daném případě Obecná teorie relativity, nedokáže daný jev popsat. Je na to potřeba obecnější kvantová teorie gravitace, kterou zatím neznáme. V případě černé díry hmota, která se dostane pod horizont, kolabuje a ve Standardním modelu hmoty a interakcí neexistuje forma hmoty, která by kolapsu zabránila. V současných fyzikálních teoriích tak dostaneme nekonečnou hustotu hmoty – singularitu. Nekonečné hodnoty hustoty nemohou v reálném světě existovat a singularita je tak čistě známkou selhání stávající teorie a potřebě nové, která umožňuje popis hmoty v těchto extrémních podmínkách.

Práce na skloubení teorie gravitace popisující chování časoprostoru a kvantové fyziky naráží na jejich nekompatibilitu, která se jen velmi těžko překonává a vede k řadě paradoxů. Přesto se díky práci na kvantové teorii gravitace podařila předpověď celé řady zajímavých jevů. Jde například o Hawkingovo záření, které vyzařují černé díry. Jeho intenzita je nepřímo úměrná hmotnosti černé díry. Zatím sice nebylo experimentálně pozorováno, ale na jeho existenci se většina odborníků shoduje. Ovšem u jiných jevů už je otázka jejich existence daleko otevřenější.

To se týká i červích děr. Většina dnes známých řešení Einsteinových rovnic Obecné teorie relativity popisující červí díru spojující dva body časoprostoru vycházejí nestabilní. A navíc je doba existence červí díry extrémně krátká, takže jí nestačí proletět žádný objekt s rychlostí nepřekračující rychlost světla. V roce 1962 to ukázali John A. Wheeler a Robert W. Fuller. Pro udržení stability červí díry po dobu, aby jí mohl prolétnout objekt podsvětelnou rychlostí, je potřeba exotické formy hmoty. Jde o takovou, která má zápornou hustotu energie a vede k velkému zápornému tlaku. Její využití pro stabilizaci červí díry navrhl Kip Thorne. V roce 1973 ukázali možnosti dosažení stabilních červích děr nezávisle i Homer Ellis a K. A. Bronnikov. Později se pak postupně našla celá řada řešení Obecné teorie relativity umožňující stabilní červí díry a možnosti jejího využití pro mezihvězdné cestování.

Získání exotické formy hmoty s uvedenými vlastnostmi nemusí být nepřekonatelnou překážkou. Mohla by to být třeba ta, která stojí za zrychlováním rozpínání vesmíru a je označována jako temná energie. Pokud existuje, tak je založena na některých vlastnostech kvantových fluktuací vakua spojených s kvantovou teorií gravitace. Tu však zatím neznáme. Ještě větším problémem je, že cestování červí dírou mezi dvěma vzdálenými místy časoprostoru může vést k problémům s plynutím času a umožnění cestování v čase do minulosti. Je velmi nepravděpodobné, že by to v reálném světě bylo možné.

Kritickým místem cestování s využitím červí díry je i průlet horizontem černé díry. Loď, která se dostane pod horizont, se už nemůže vrátit, ať už uvnitř černé díry červí díra je nebo ne. V případě černých děr hvězdného typu je případné vesmírné plavidlo vystaveno extrémnímu gradientu gravitačního pole a dojde k jeho „špagetování“ a destrukci, jak bylo zmíněno v části o využití gravitačního manévru u binárních systémů složených z neutronových hvězd a černých děr.

Hypotetickou možností mezihvězdného cestování s rychlostí větší, než je u světla, je warpový pohon, který je známý hlavně ze seriálu Star Trek. Při něm mezihvězdná loď deformuje prostoročas tak, že před lodí se prostor smršťuje a za lodí roztahuje. Ve skutečnosti nejde o pohyb lodi k danému místu, ale o takovou deformaci prostoru, že se k nám cíl přiblíží. Přípustnost takových řešení rovnic Obecné teorie relativity, které tuto možnost popisují, prokázal v roce 1994 Miguel Alcubierre. K realizaci je však třeba obrovské množství exotické záporné energie a zároveň i extrémní množství normální kladné energie. Kladná energie by se využívala pro stlačování prostoru před lodí a záporná pro jeho roztahování za ní. V roce 1996 ukázal Allen E. Everett, že zde stejně jako v případě červích děr narážíme na problém s plynutím času a existencí možnosti cestování do minulosti.

Připomeňme, že všechny možnosti mezihvězdného cestování popsané v této části jsou zatím čistě hypotetické a to, jestli existují a jaké jsou jejich reálné vlastnosti, závisí na exotické fyzice za Standardním modelem hmoty a interakcí a Obecnou teorií relativity. Teorii popisující tuto fyziku zatím nemáme. To je podstatný rozdíl od metod popsanych v částech o využití sluneční plachetnice a gravitačního manévru. Teprve, až se podaří tuto teorii vytvořit a potvrdit její platnost, bude možné posoudit, která z předložených možností v našem světě reálně existuje. A jedině pak bude možné začít uvažovat o technologických výzvách, které leží před jejich reálným využitím. Totéž se týká i dalších hypotetických možnostech cest „nadsvětelnou rychlostí“

mezi vzdálenými body prostoročasu v našem vesmíru či dokonce cestování mezi různými vesmíry, o kterých jsme zde ani nepsali.

Závěr

V závěrečné části našeho seriálu o jaderných zdrojích pro vesmír jsme se podívali na některé exotičtější možnosti pohonu pro mezihvězdné lety. Ty sice nejsou jaderné, ale často se bez jaderných zdrojů energie také neobejdou. Pět sond, které realizovaly gravitační manévry a letí nyní ven ze Sluneční soustavy, využívá pro zajištění elektřiny a tepla radionuklidové zdroje. Velmi výkonné lasery, které by napínaly plachty miniaturních i velkých plachetnic mířících k nejbližším hvězdám budou potřebovat obrovské zdroje energie, kromě solárních pravděpodobně půjde právě o ty jaderné. Je také možné, že se jako nejefektivnější cesta ukáže kombinace různých zdrojů pohonu.

V posledních letech se obnovuje zájem lidstva o vesmírné výboje. Do velké míry je to způsobeno pokrokem technologií raketových nosičů a proniknutí soukromých iniciativ, nejen v podobě firmy SpaceX Elona Muska, do této oblasti. Do realizace cest k Měsíci i do meziplanetárního prostoru se zapojuje stále více států i soukromých subjektů. Návrat na Měsíc už probíhá v podobě nových přistání automatů, které se dostaly na jeho odvrácenou stranu i do blízkosti jeho pólu. Vyvrcholením by měl být návrat člověka na Měsíc v rámci projektu Artemis. Stejně tak se zvyšuje zájem o Mars. Tyto aktivity se neobejdou bez jaderných zdrojů. Radionuklidové umožňují práci automatických marsovských průzkumníků Curiosity a Perseverance. Bez nových vesmírných radionuklidových zdrojů a štěpných reaktorů se neobejdou dlouhodobé základny na Měsíci a Marsu. S těmito zdroji už máme nejen ve vesmíru řadu praktických zkušeností. Jejich technologické vylepšování a efektivní využití by mohlo umožnit výzkum i osvojování Sluneční soustavy.

Pro cesty, byť jen automatů, k nejbližším hvězdám si budeme muset osvojit využití termojaderné fúze či dokonce antihmoty.

Zatímco zvládnutí realizace vesmírných termojaderných zdrojů energie je i přes nutnost zvládnutí stále extrémně náročných technologických výzev alespoň v realisticky dostupném výhledu, o tom, jak překonat technologické výzvy spojené s využitím antihmoty zatím nemáme ani nejmenší reálnou představu.

Při posuzování možnosti využití červích děr, warpového pohonu nebo dalších možností mezihvězdného cestování s využitím exotických vlastností časoprostorů narážíme na zásadní problém. Nemáme fyzikální teorii, která by umožnila rozhodnout, zda jsou hypotetické možnosti v našem světě možné. Teprve po vypracování této teorie a potvrzení možnosti existence červí díry a warpového pohonu pak narážíme na extrémně náročné technologické výzvy při jejich realizaci.

Kromě vyřešení problému s energií a pohonem leží před realizací lidské expanze do vesmíru celá řada extrémních výzev. Jde nejen o ochranu před radiací, zajištění potravin a dalších aspektů prostředí vhodného pro život a práci astronautů. Výzvy jsou nejen technologické, extrémně důležitá je také psychologie a udržitelné dlouhodobé fungování malých kolektivů v extrémně náročných a nezvyklých podmínkách. Otázka, zda se tyto výzvy podaří překonat, je úplně otevřená. Existují tak skeptici k přítomnosti člověka ve vesmíru, jako je například u nás známý popularizátor astronomie Jiří Grygar, i optimisté, ke kterým se řadím sám. O kosmonautiku a snahu o lidskou expanzi do vesmíru se zajímám už od klukovských let a fascinace tímto tématem u mě přetrvává. To byl i důvod, proč jsem si pro Jadernou energetiku připravil cyklus s populárnějším popisem možnosti zajištění energie a pohonu ve vesmíru dominantně zaměřený na jaderné zdroje. Doufám, že byl pro čtenáře zajímavý a alespoň část mé fascinace se mi na ně podařilo přenést.

Reference:

- Eugene Mallove, Gregory Matloff: The Starflight Handbook, A Pioneer's Guide to Interstellar Travel, John Wiley & Sons, Inc, USA, 1989
- Jeffrey Nosanov: Solar System Escape Architecture for Revolutionary Science, Phase 1 Final Report, JPL, 2013 California Institute of Technology
- Philip Lubin: A Roadmap to Interstellar Flight, submitted to JBIS April 2015
- Colin R. McInnes: Solar sailing: mission applications and engineering challenges. Philosophical Transactions A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 361 (2003). pp. 2989–3008. ISSN 1364-503X
- Colin R. McInnes: Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications, Springer-Verlag, 2004, ISBN 978-1-85233-1023
- Jerome L. Wright: Space Sailing, Gordon and Breach Science Publishers, 1992, ISBN 2-88124-803-9
- Mansell J. R., Bellardo J. M., Betts B. et al: LightSail 2 Solar Sail Control and Orbit Evolution, Aerospace 10(7) (2023) 579
- Swartzlander G. A.: Radiation pressure on a diffractive sailcraft, Journal of the Optical Society of America B, 34(6) (2017) C25
- Dubill A. L., Swartzlander G. A.: Circumnavigating the sun with diffractive solar sails, Acta Astronautica 187 (2021) 190
- Flandro G.: Fast reconnaissance missions to the outer solar system utilizing energy derived from the gravitational field of Jupiter, Astronautica Acta 12 (1966) 329
- Dyson F. J.: Gravitational Machines, arXiv:2305.10470v1
- Berg P.: The fundamental concepts of the gravity-assist manoeuvre, Eur. J. Phys 44 (2023) 025002
- Thorne Kip: Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy, W. W. Norton & Company, 1994
- Thorne Kip: The Science of Interstellar, W. W. Norton & Company, 2014
- Alcubierre M.: The Warp Drive: Hyper-fast Travel within General Relativity, arXiv: 0009013v1
- Everett A. E., Roman T.: Time Travel and Warp Drives: A Scientific Guide to Shortcuts through Time and Space, The University of Chicago Press, 2011
- Kaku Michio: Paralelní světy, Argo/Dokořán, 2007



RNDr. Vladimír Wagner, CSc.

wagner@ujf.cas.cz

vystudoval jadernou fyziku na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Během doktorandského studia se věnoval experimentálnímu studiu struktury deformovaných jader. Pracuje v Ústavu jaderné fyziky AVČR v Řeži a učí na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze. Mezi hlavní oblasti jeho vědeckého zájmu patří studium velmi horké a husté

jaderné hmoty pomocí srážek těžkých iontů. Je zapojen do výzkumu mezinárodních skupin provádějících experimenty v GSI Darmstadt (Německo) a v laboratoři CERN (Švýcarsko). Vede skupinu, která studuje možnosti transmutace jaderného odpadu pomocí urychlovačem řízených transmutorů a získává potřebná jaderná data pro pokročilé štěpné i fúzní systémy. Využívá k tomu zdroje neutronů v mateřském ústavu. Zajímá se také o energetiku a byl členem druhé nezávislé energetické komise NEK II, která vypracovala doporučení pro aktualizaci Státní energetické koncepce České republiky. Podílel se na publikaci Perspektivy české energetiky Současnost a budoucnost (Novela bohemia 2014) a napsal knihu Fukušima I poté (Novela bohemia 2014). Zabývá se také popularizací vědy a hlavně fyziky. Pravidelně přednáší pro středoškolskou mládež a veřejnost. Píše články pro internetové i klasické časopisy, které se popularizaci vědy věnují.

Aktuality

Společnost Elektrárna Dukovany II obdržela finální nabídky od tří uchazečů na stavbu nového jaderného zdroje v Dukovanech



Zdroj: Michal Šafránek

Společnost Elektrárna Dukovany II (EDU II), stoprocentní dceřiná společnost ČEZ, obdržela finální nabídky od tří uchazečů na stavbu nového jaderného zdroje v Dukovanech. Dodavatelé předložili závaznou nabídku na pátý blok Dukovan a nezávazné nabídky na další tři bloky. Americko-kanadský Westinghouse, francouzská EdF a korejská společnost KHNP měly na podání nabídek čas do dnešních 11 hodin dne 31. října 2023. Nyní proběhne ze strany EDU II posouzení nabídek jak z ekonomického, tak i obchodního a technického hlediska. Model hodnocení je nastaven za základě doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE/IAEA).

„Jsme rádi, že se potvrdil silný zájem všech tří uchazečů o stavbu nového jaderného zdroje v České republice. Od zahájení tendru v březnu loňského roku jsme viděli pečlivou přípravu od

všech uchazečů. Nyní provedeme vyhodnocení nabídek a podle smlouvy se státem předáme hodnotící zprávu ministerstvu průmyslu a obchodu, potažmo vládě ČR k finálnímu schválení,“ říká člen představenstva a ředitel divize nová energetika ČEZ Tomáš Pleskač.

Předpokládá se, že smlouvy budou finalizovány během příštího roku. Po finálním podpisu smluv bude následovat důkladná příprava projektové dokumentace tak, aby byl dosažitelný termín zahájení zkušebního provozu nového bloku v roce 2036. Dukovanský nový blok bude postaven vedle stávající elektrárny a v budoucnu nahradí část jejího výkonu. První blok Jaderné elektrárny Dukovany byl spuštěn v roce 1985.

Zdroj: www.cez.cz

Dana Drábová povede SÚJB dalších pět let

Vláda České republiky jmenovala dne 25. října 2023 na základě výsledku výběrového řízení a na návrh předsedy vlády České republiky Ing. Danu Drábovou, Ph.D. na služební místo předsedkyně Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, a to s účinností od 1. listopadu 2023 na dobu 5 let.

Státní ústav jaderné bezpečnosti, který vykonává od roku 1993 státní správu pro kontrolu bezpečnosti jaderné energie a ionizujícího záření v Česku, vede Dana Drábová již od roku 1999. Je tak nejdéle sloužícím státním úředníkem v nejvyšší pozici v zemi.

redakce



Zdroj: SÚJB

Zemětřesení na východě Slovenska neohrozilo provoz jaderných elektráren

Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky pozorně sleduje situaci v souvislosti se seizmickou událostí v Prešovském a Košickém kraji, která proběhla 9. října 2023. Podle EMSC (European Mediterranean Seismological Centre) mělo sílu zhruba 5 stupňů a ohnisko v hloubce 10 kilometrů. Epicentrum se nacházelo asi 20 km severozápadně od města Humenné. Šlo o jedno z nejsilnějších zemětřesení na Slovensku za posledních několik dekad.

Potenciální vnější ohrožení jaderných zařízení jako jsou záplavy, seizmické události, vítr aj. se pravidelně posuzují v 10letých intervalech v rámci povinných periodických hodnocení jaderné bezpečnosti jaderných zařízení na Slovensku. Tato hodnocení proběhla naposledy v roce 2016 pro lokalitu Jaslovské Bohunice a v roce 2017 v lokalitě Mochovce. V souladu s výsledky periodického hodnocení a zátěžových testů byla provedena rozsáhlá opatření také kvůli zvýšení seizmické odolnosti. Bloky obou slovenských jaderných elektráren jsou tedy dostatečně seizmicky odolné. Situace je navíc



nepřetržitě monitorovaná prostřednictvím lokální sítě seizmických stanic, které v okolí jaderných elektráren nezaznamenaly seizmickou aktivitu nad rámec běžného šumu.

Zemětřesení na východě Slovenska žádným způsobem neohrozilo jadernou bezpečnost a neovlivnilo normální provoz jaderných elektráren na Slovensku.

Zdroj: www.ujd.gov.sk

Zdroj: Slovenske elektrarne, a.s.

Zemřel Ing. Bedřich Fridrich



Dne 17. 9. 2023 zemřel ve věku 90 let Ing. Bedřich Fridrich, ředitel bývalého Ústavu pro výzkum, výrobu a využití radioizotopů (ÚVVVR). Ing. Fridrich se narodil 6. 3. 1933 v Jindřichově Hradci a po vystudování střední školy nastoupil r.1953 na Vojenskou technickou akademii (dnes Univerzitu obrany) v Brně, kde absolvoval se specializací radiochemie. Po absolvování nastoupil do Státního radiologického ústavu v Praze-Holešovicích, kde působil dlouhou dobu jako ředitel také akademik František Běhounek. Tento ústav byl v r. 1959 přejmenován na Ústav pro výzkum, výrobu a využití radioizotopů (ÚVVVR) a převeden z resortu ministerstva

zdravotnictví do resortu ministerstva chemického průmyslu. Zde pracoval Ing. Fridrich jako vedoucí výroby radiových zářičů pro onkologii. V té době absolvoval v tomto oboru i jednoroční stáž v Kanadě. Poté v r. 1963 přešel do Československé komise pro atomovou energii (ČSKAE), kam nastoupil jako specialista do odboru pro využití ionizujícího záření, kde se stal později jeho ředitelem. Působil rovněž ve Stále komisi pro atomovou energii, která sdružovala země východní Evropy. V r. 1983 byl jmenován do funkce ředitele ÚVVVR v již nově vybudovaných prostorách v Praze 10- Hostivaři, o jejichž výstavbu se během svého působení v ČSKAE významně zasloužil. Po roce 1989 z ÚVVVR vzniklo v rámci privatizace několik nových firem, z nichž většina prosperuje úspěšně dodnes - např. Beckman Coulter ČR (původně Immunotech, s.r.o.) v oblasti diagnostických souprav RIA a ELISA pro medicínu, Eckert & Ziegler Cesio s.r.o. a Isotrend, které se věnují vývoji a výrobě uzavřených radionuklidových zářičů, NUVIA Dosimetry, která zajišťuje služby v oblasti osobní dozimetrie, nebo Inspektorát pro ionizující záření, který je nyní součástí Českého metrologického institutu. Řada oborů, které se v ÚVVVR za působení Ing. Fridricha rozvinuly, tak pokračují ve své činnosti úspěšně i nadále.

J. Holub, L. Žilka

Konference NUSIM přilákala do Brna stovku jaderných odborníků

Česká nukleární společnost se opět postarala o významnou událost v oblasti jaderné energetiky. Ve dnech 5.–6. října 2023 se v brněnském hotelu Avanti konala tradiční jaderná konference NUSIM. Konference se stala jedinečnou platformou pro výměnu zkušeností managementu a pracovníků provozu českých a slovenských jaderných elektráren, podpůrných pracovišť, regulačních orgánů, specialistů výzkumu a vývoje v jaderné oblasti, dodavatelů zařízení a služeb pro jaderný průmysl.

Počátky pořádání NUSIMů sahají až do roku 1992. Zpočátku to byla československo-německá konference. Nukleární společnosti Československa a Německa těsně spolupracovaly a právě k výměně odborných informací sloužil tento podnik. Tak vznikl i název konference: jako zkratka z označení „Nuclear Societies Information Meeting“. První NUSIM se konal v Plzni a další konference se pořádaly každoročně s tím, že se země konání střídaly v cyklech, a tak účastníci NUSIMu měli možnost se potkat v ISARu, Piešťanech, Praze, Obrigheimu, Levicích, Třebíči, Erlangenu, Časté, Českých Budějovicích, Drážďanech, Bratislavě, Táboru, Liberci...

Letošní konference se zaměřila na řadu aktuálních témat v oblasti jaderné energetiky. Diskutovalo se o bezpečnosti dlouhodobého provozu jaderných elektráren, řízení konfigurací, využití projektových rezerv jaderných bloků i o nových technologiích v energetice. Probíraly se otázky ukončování



provozu JE i světové zkušenosti s vyřazováním jaderných elektráren. Kolegové ze Slovenska prezentovali čerstvé zkušenosti ze spouštění 3. bloku JE Mochovce. Hosté z Masarykovy univerzity představili přehled o vlivu geopolitické situace na dodávky plynu v Evropě. Kolega z Ústavu fyziky plazmatu obeznámil posluchače s novinkami ze světa jaderné fúze. Část konference byla pak věnována odborným prezentacím Sekce mladých ČNS a SNUS, což umožnilo mladým výzkumníkům představit své projekty a získat zpětnou vazbu od zkušenějších kolegů.

Konferenci zakončila technická exkurze do Centra přípravy personálu jaderných elektráren ČEZ. Účastníci měli jedinečnou příležitost nahlédnout do špičkově vybaveného školicího střediska s precizními modely jaderných elektráren typů VVER-440 a VVER-1000 i některých hlavních výrobních komponent.

Konference NUSIM 2023 se stala významnou událostí pro celou jadernou komunitu, přinesla mnoho cenných poznatků a informací, ale také zprostředkovala důležité diskuze a výměnu znalostí mezi odborníky napříč jadernými obory. Příští rok putuje štafeta na Slovensko. Na český NUSIM se můžeme opět těšit v říjnu roku 2025.

Larisa Dubská, viceprezidentka ČNS



Obr. 1: Prezident ČNS Daneš Burket zahajuje NUSIM 2023 (zdroj: EIRA s.r.o.)



Obr. 2: Plný sál během konference NUSIM 2023 (zdroj: EIRA s.r.o.)



www.jadernaenergie.online