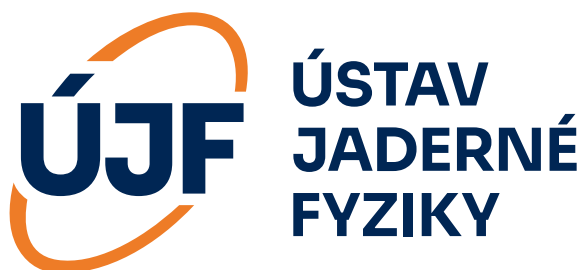


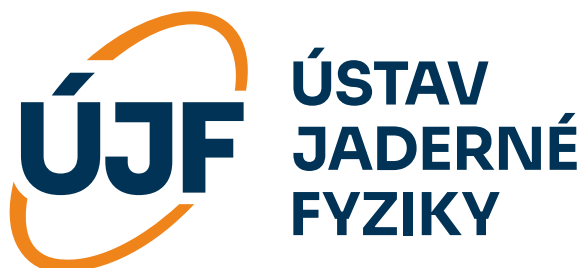
JAN DOBEŠ A KOLEKTIV AUTORŮ



70. VÝROČÍ ÚSTAVU
JADERNÉ FYZIKY AV ČR



JAN DOBEŠ A KOLEKTIV AUTORŮ



70. VÝROČÍ ÚSTAVU
JADERNÉ FYZIKY AV ČR

© ÚSTAV JADERNÉ
FYZIKY AV ČR,
v. v. i., 2025

ISBN:
978-80-11-07022-9



Slovo ředitele Ústavu jaderné fyziky AV ČR



▪ Ředitelé ÚJF AV ČR za posledních 20 let – zleva: Petr Lukáš, Jan Dobeš a Ondřej Svoboda. Foto: ÚJF – D. Šebek

Vážené kolegyně a kolegové, vážení přátelé vědy. Kniha, kterou právě držíte v ruce, má za cíl ukázat významné momenty z vývoje Ústavu jaderné fyziky Akademie věd České republiky (ÚJF) za posledních přibližně 20 let. Kniha volně navazuje na dříve vydanou publikaci u příležitosti 50. výročí založení ústavu. Ve shonu dnešní doby bývá jen málo času ohlížet se za minulostí a bilancovat. Tato kniha pro mě byla příležitostí se na chvíli zastavit a společně s kolegy a kolegyněmi si připomenout, co se v ústavu za poslední dvě desetiletí podařilo a kam se věda a výzkum za tu dobu posunuly.

Za posledních dvacet let prošel ÚJF výraznou transformací. Zejména technické vybavení ústavu doznalo díky neutuchající snaze mých předchůdců až překotného rozvoje a obměny. Došlo k modernizaci řady klíčových zařízení a přístrojů, některé byly nahrazeny novými a podařilo se vybudovat i zcela nové laboratoře a pracoviště s unikátním vybavením. Tyto inovace s sebou přinesly nové experimentální možnosti, kterých se naši vědci a vědkyně chopili s vervou sobě vlastní.

Jedním z klíčových momentů byla výstavba haly a instalace nového tandemového urychlovače Tandetron a jeho spuštění v roce 2005, které umožnilo rozšíření kapacit pro pokročilé experimenty v aplikované jaderné fyzice a posílení našich kompetencí v iontových technologiích. Ve stejném roce byla zahájena úzká spolupráce s Archeologickým ústavem AV ČR, Praha vedoucí ke vzniku České radiouhlíkové laboratoře s mezinárodním kódem CRL. Tato laboratoř výrazně přispěla k lepší dostupnosti přesnějších metod datování historických artefaktů v České republice a je doposud jedinou svého druhu v naší republice. ÚJF se také aktivně zapojil do projektu NMI3, který poprvé naplno otevřel možnosti využití řady zařízení ústavu evropskou neutronovou komunitou.

Rok 2007 přinesl zásadní institucionální změnu – ÚJF se stal veřejnou výzkumnou institucí. Téhož roku byl na cyklotronu U-120M proveden první experimentální test násobící soustavy s externím zdrojem neutronů, což znamenalo významný posun v oblasti studia neutronové fyziky i transmutací. Postupně byly vyvíjeny další zdroje rychlých neutronů na bázi lithiových, berylliových i těžkovodních terčů k experimentálnímu výzkumu v oblasti jaderné fyziky, materiálového inženýrství nebo testování elektroniky a detektorů.

V roce 2008 byl uveden do provozu neutronový difraktometr MEREDIT, navržený kompletně v ÚJF. Založení dceřiné společnosti RadioMedic s. r. o. otevřelo cestu k navýšení výroby radiofarmak v ČR pro medicínské aplikace, především pak pro pozitronovou emisní tomografii. V roce 2009 proběhla instalace iontové mikrosondy na Tandetronu rozšiřující

možnosti analýzy a vytváření struktur na submikronové úrovni. ÚJF soustavně rozvíjel i oblast neutronové fyziky – klíčové bylo především zapojení do projektu Evropského spalačního zdroje (ESS), které vyústilo v návrh difraktometru BEER. Difraktometr s příhodně zvoleným názvem pro naši zemi byl vybrán mezinárodní vědeckou komunitou k realizaci s nejvyšší prioritou.

K zásadním momentům inovačních snah patří určitě také spuštění nového cyklotronu TR-24 v roce 2015. Ten se stal klíčovým přístrojem ÚJF, přinášejícím nové možnosti zejména v oblasti výzkumu a vývoje produkce radionuklidů. Posledním velkým počinem byla výstavba první laboratoře urychlovačové hmotnostní spektrometrie v ČR vybavené moderním systémem MILEA, která byla otevřena v roce 2022. Toto pracoviště společně provozované spolu s Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze a Archeologickým ústavem AV ČR, Praha významně rozšířilo dostupnost ultracitlivého stanovení řady radionuklidů nejen pro využití v radiouhlíkové datovací metodě.

V průběhu let se ústav intenzivně propojoval s domácí i mezinárodní akademickou sférou – stal se členem nové velké mezinárodní výzkumné infrastruktury FAIR, rozvíjena byla spolupráce s mezinárodně etablovanými pracovišti, jako například CERN, BNL nebo SPIRAL-2. Vlastní zařízení ústavu byla sdružena do národní velké výzkumné infrastruktury CANAM a dodnes jsou v rámci této infrastruktury nabízena externím uživatelům. Provoz i rozvoj těchto výzkumných infrastruktur byl řadu let podporován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR a ústavu se dařilo a daří dotační příležitosti úspěšně využívat.

Ústav se v uplynulém desetiletí podílel také na inovačním programu Akademie věd ČR Strategie AV21, kde se zapojil do programů zaměřených na nové materiály, jadernou energetiku a aplikace vesmírné fyziky. Rostoucí význam pro ústav představuje také řešení projektů Evropské komise a mezinárodní spolupráce prostřednictvím konsorcií, např. RADNEXT, ARIEL, SANDA, ReMade, NEPHEWS, RIANA, EUROFUSION a další.

Život v ústavu narušila v posledních dvou dekádách i řada negativních událostí, ať už to byly povodně v roce 2013, pandemie nemoci COVID-19 v letech 2020 a 2021 nebo eskalace ozbrojeného konfliktu na Ukrajině v roce 2022, která znamenala ukončení 65 let trvající spolupráce ÚJF s SÚJV Dubna. Ústavu se však vždy podařilo obtíže úspěšně překonat a v řadě případů se uzavřením jedné cesty objevily příležitosti nové.

ÚJF hraje v českém i evropském výzkumném prostředí důležitou roli v rozvoji jak základního, tak aplikovaného výzkumu v oblasti jaderné fyziky, materiálových věd a souvisejících disciplínách. Jeho odborné kapacity sahají od experimentálního studia fundamentálních procesů v jaderné a částicové fyzice až po inovativní aplikace urychlovačových a neutronových metod v medicíně, průmyslu a energetice. Úspěchy ústavu jsou výsledkem širokého spektra znalostí a zkušeností jeho pracovníků a pracovníc – vědců, inženýrů, techniků i administrativních specialistů. Právě jejich odbornost a nadšení umožňují ÚJF nejen přispívat k celosvětovému pokroku v jaderné fyzice, ale také aktivně utvářet moderní technologie a praktické výsledky, které mají přímý dopad na společnost.

Děkuji za současné i minulé vedení ÚJF všem spolupracovníkům a spolupracovnicím, kteří se podíleli na této bezesporu úspěšné cestě. Významné investice do infrastruktury, rozvoj výzkumných směrů a zapojení do mezinárodních projektů vytvořily pevné základy pro budoucí základní i aplikovaný výzkum v ÚJF a umožňují nám hledět s optimismem do budoucnosti.

Ondřej Svoboda

Ředitel Ústavu jaderné fyziky AV ČR

Obsah

Slovo ředitele Ústavu jaderné fyziky AV ČR	5
Obsah	9
Redakční poznámka	11
01 Cyklické urychlovače ÚJF	13
02 Laboratoř Tandetronu	31
03 Dvě dekády rozvoje a využití Laboratoře neutronové fyziky	49
04 Aktivační a rentgenfluorescenční analýza	67
05 Generátory rychlých neutronů	89
06 CANAM – Centrum urychlovačů a jaderných analytických metod	107
07 Radiouhlíková laboratoř CRL	123
08 Laboratoř AMS – Společné pracoviště ÚJF AV ČR, FJFI ČVUT a ARÚ AV ČR, Praha	131
09 Oddělení radiofarmak ÚJF v letech 2005–2025	139
10 Oddělení teoretické fyziky ÚJF	155
11 Jaderná astrofyzika na Oddělení jaderných reakcí ÚJF	171
12 Výzkum ostatků Tycha Braha	177
13 Kosmické paprsky pomohly odhalit, kdy přišli první lidé do Evropy	185
14 Radiace v bouřkových oblacích: zrod atmosférické fyziky vysokých energií v ČR	193
15 Po stopách stop detektorů stop	199
16 Výzkum srážek ultrarelativistických těžkých iontů	205
17 Skupina relativistických srážek těžkých iontů	211
18 Elektronová spektroskopie ÚJF v KATRIN (KARlsruhe TRItium Neutrino experiment)	219
19 Příběh difraktometru BEER	227
20 Popularizace vědy a ústavu	233
21 Práce se středoškolskou mládeží	239
22 RadioMedic	243
23 Významné události ÚJF v letech 1990 až 2024	247

| Redakční poznámka

Publikace byla zpracována k příležitosti 70. výročí založení Ústavu jaderné fyziky Akademie věd České republiky (ÚJF AV ČR). Jejím hlavním záměrem je přehlednou formou informovat o vývoji a aktuálním stavu odborného zaměření, vědecké produkce a výzkumné infrastruktury ústavu s akcentem na období od roku 2005.¹

V jednotlivých kapitolách publikace jsou prezentovány klíčová výzkumná a experimentální zařízení, laboratoře a odborná oddělení ústavu. Jsou představeny některé zajímavé výsledky dosažené na domácí infrastruktuře i aktivity týmů zapojených do mezinárodních kolaborací. Prostor je věnován činností v oblasti popularizace vědy a ústavu a práci se studenty středních škol. Zmíněna je i spin-off firma založená ÚJF.

1 *Publikace Ústav jaderné fyziky AV ČR – 50 let – Řež 1955-2005, Redakce: Vlastislav Brabec, Jaroslav Dittrich, Emilie Těšínská, Ústav jaderné fyziky AV ČR, 250 68 Řež, 2005, ISBN: 80-239-5526-8 přináší přehled hlavních výsledků dosažených během padesátileté historie Ústavu jaderné fyziky AV ČR (ke stažení na www.ujf.cas.cz/70)*

Publikace je koncipována jako sborník příspěvků. Po výběru témat byli osloveni různí autoři s žádostí o přípravu jednotlivých kapitol. Přitom omezením a doporučením byla zejména délka textů s ohledem na celkový rozsah knihy, důraz na konkrétní výsledky a jejich dopad na posouvání hranic základního výzkumu nebo aplikačního potenciálu a obsahová přenositelnost pro širší odbornou veřejnost. Jinak je respektována odborná autonomie příspěvků a metodologický rámec, autorský styl a používaná terminologie jednotlivých zpracovatelů.

Publikace nemá charakter historické monografie.² Historické prvky jsou do textů ve větší nebo menší míře začleněny pouze jako rámcový doprovod, jehož cílem je kontextualizace aktuálních vědeckých témat. Jedinou výjimku představuje chronologicky vedený seznam významných událostí z let 1990–2024, který byl sestaven na základě dostupných vnitroústavních podkladů, nikoliv jako výsledek systematického archivního výzkumu. Tento přehled proto plní spíše orientační a referenční funkci.

Chtěli bychom vyjádřit vědomí redakční rady o skutečnosti, že některé činnosti a výsledky ústavu mohly zůstat v publikaci nezachyceny, přičemž tato absence není hodnotovým soudem, ale technickou nutností vyplývající z rozsahových limitací jak individuálních kapitol, tak celé knihy.

Závěrem rádi děkujeme všem autorům sborníku za jejich vstřícnost k naší žádosti o příspěvek, aktivní přístup k jeho realizaci a trpělivost při komunikaci s redakčním týmem. Na jednotlivých kapitolách publikace mají svůj podíl i Přemysl Beran, Václav Burjan, Giovanni Ceccio, Gergely Farkas, Zdeněk Hons, Zbyněk Horák, Martin Kákona, Ivana Krausová, Václav Kroha, Vasyľ Lavrentěv, Gergely Németh, Štěpán Piskoř, Vasyľ Rjuchtin, Zdeněk Řanda, Vladimír Strunga, Jakub Šlegl, Milan Štefánik, Ivo Tomandl a Václav Zach, jimž rovněž patří naše poděkování.

2 *Publikace citovaná v poznámce pod čarou 1 obsahuje fundovanou a obsáhlou studii Emilie Těšínské Z historie Ústavu jaderné fyziky AV ČR, která se ale zabývá obdobím po roce 1989 jen stručně.*

5 | Cyklické urychlovače ÚJF

 Jan Štursa, David Chvátil

Oddělení urychlovačů ÚJF



Oddělení urychlovačů ÚJF AV ČR (dále též OU) dlouhodobě provozuje tři urychlovače: dva urychlovače iontů – cyklotrony U-120M a TR-24 – a urychlovač elektronů – mikrottron MT25. Tato zařízení poskytují svazky urychlených částic pro široké spektrum experimentů základního výzkumu i aplikací. Během uplynulých dvaceti let prošly zejména izochronní cyklotron U-120M a mikrottron MT25 řadou modernizací. Zařízení byla doplněna podpůrnými technologickými podsystémy, nezbytnými terčovými stanicemi a ozařovacími přípravky pro potřeby experimentátorů. Cyklotrony U-120M a TR-24 a nově i mikrottron MT25 jsou součástí velké výzkumné infrastruktury CANAM (Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods).

Izochronní cyklotron U-120M

Urychlovač byl původně navržen a provozován od roku 1977 jako urychlovač kladných iontů H^+ (10–36 MeV), D^+ (10–20 MeV), ${}^3He^{2+}$ (17–54 MeV), ${}^4He^{2+}$ (20–40 MeV), které byly vyváděny pomocí deflekčního vysokonapěťového systému. Dosahované vyvedené proudy byly v řádu jednotek μA . Postupnými náročnými technologickými inovacemi pracovníky Oddělení urychlovačů byl v 90. letech modernizován a přidána možnost urychlování záporných iontů H^- , D^- (vývod H^+ resp. D^+ pomocí přebíjecího mechanismu, tj. $H^- \rightarrow H^+$ resp. $D^- \rightarrow D^+$). Vyvedené proudy se zvýšily o řád a umožnily realizovat celou řadu nových aplikací, zejména přípravu radionuklidů pro produkci radiofarmak pro nukleární medicínu a generování neutronových svazků pro intenzivní ozařovací experimenty. V uplynulých dvaceti letech byl urychlovač unikátně provozován jak v režimu záporných, tak v režimu kladných iontů. Je třeba konstatovat, že urychlené svazky ${}^4He^{2+}$ a především ${}^3He^{2+}$ jsou v rámci evropských laboratoří dostupné jen výjimečně, a tedy velmi žádané.



▪ Obr. 1: Izochronní cyklotron U-120M s ionto-optickou trasou pro transport iontů ze záporných režimů. Foto: Archiv OU



▪ Obr. 2: Diagnostická jednotka pro trasu A. Foto: Archiv OU

| Modernizace

Od roku 2006 prošel cyklotron rozsáhlým programem modernizace jednotlivých technologických podsystémů, např.:

- U vysokofrekvenčního generátoru byly nahrazeny původní zastaralé poruchové zesilovače a navržen nový vysokofrekvenční modulátor.
- Na vstupu do trasy pro přebité ionty byl nainstalován a upraven nový korekční magnet.
- U vakuového systému byl zprovozněn nový rozvod kapalného dusíku z centrálního tanku pro chlazení vymrazovaček difuzních vývěv. Byla zvýšena čerpací rychlost uvnitř duantu (urychlovací elektroda) vyvrtáním otvorů, což snížilo ztráty H^+ , D^+ iontů a zvýšilo proud vyvedených H^+ , D^+ iontů o cca 20 %. Postupnou revizí celého systému vč. přetěsnění rezonanční soustavy bylo dosaženo mezních tlaků až 10^{-5} Pa.
- Pro diagnostiku svazku byl proveden návrh a realizován čtyřkolimátor na trase pro přebité ionty a navržena nová diagnostická jednotka na trase A pro vývod svazku z kladných režimů. Dále byly navrženy a zprovozněny nové integrální sondy č. 2 a č. 3 s novým ovládáním a vizualizací pro operátory cyklotronu, které slouží pro měření urychlených svazků uvnitř urychlovací komory. Pro radiační testování byl vyvinut a realizován X-Y polohovač ozařovaných vzorků a ve spolupráci s ODZ

byl navržen a realizován „beam degrader“. Toto zařízení umožňuje dálkově a cíleně snižovat energii svazku vyvedeného do vzduchu průcho-dem přes hliníkové destičky různé tloušťky na žádanou hodnotu bez nutnosti časově náročného přeladování cyklotronu.

- Pro řídicí systém byl nainstalován nový zobrazovací panel, provede-na vizualizace parametrů cyklotronu, zprovozněno nové měření teplot, tlaků a průtoků v chladicí soustavě. Postupně probíhala a stále probíhá náhrada řídicího systému urychlovače s přechodem na moderní PLC platformy včetně nové vizualizace.
- Cyklotron je unikátním urychlovačem rovněž díky matematickému modelu se simulačními podprogramy, které vyvinul v OU kolega Milan Čihák. Tyto programy umožňují studovat vliv geometrie iontových zdrojů na dynamiku a ztráty urychlených svazků. Simulací trajektorií (s využitím reálných dat z magnetických měření) urychlovaných a extrahovaných iontů je mož-no určit jejich polohy na vstupu do ionto-optických tras s odchylkou v řádu milimetrů. Programy umožňují on-line stanovení energií vyvede-ných svazků s průměrnou přesností ± 200 keV, což je klíčové pro expe-riimentátory.
- V roce 2021 započala příprava komplexní opravy cyklotronu, jejímž hlav-ním důvodem byly zkratky dvou korekčních cívek, které vedly k omezení provozu cyklotronu v plném rozsahu energií. Téměř celý rok 2022 byl cyklotron odstaven a byla provedena rozsáhlá rekonstrukce. Zejmé-na je třeba zmínit magnetická měření před demontáží a po ní, přesné zaměření vakuové komory, demontáž všech cyklotronových subsysté-mů vč. ionto-optické trasy a vakuové komory samotné. Byly opraveny zkratované korekční cívky a opravena centrální oblast poškozená výbo-ji. Opravy uzavřelo odstranění vakuových netěsností vodního chlaze-ní starých harmonických cívek a navržení a instalace tvarově složitých harmonických cívek s cílem zvýšit účinnost extrakce iontů z kladných

„Oddělení urychlovačů ÚJF AV ČR dlouhodobě provozuje tři urychlovače: dva urychlovače iontů – cyklotrony U-120M a TR-24 – a urychlovač elektronů – mikrotron MT25.“



▪ Obr. 3: Demontovaná urychlovací komora s magnetickou strukturou.
Foto: Archiv OU

režimů. Po zpětné instalaci všech podsystémů byl cyklotron úspěšně uveden do provozu, byly ověřeny urychlovací režimy s využitím nových magnetických měření a zejména bylo prokázáno, že rekonstrukce skutečně zlepšila parametry urychlených a vyvedených iontů.

| Shlukovací systém pro nTOF na U-120M

V rámci projektu CANAM byla realizována a ověřena funkce shlukovací soustavy (buncher) pro multi-orbitální interní klíčování svazku H^- iontů. Ionty jsou po vertikálním vychýlení pomocí vysokého napětí na deflekčním systému směřovány na přebíjecí uhlíkovou fólii, kde ztrácejí oba elektrony a mění se na holé kladné ionty, tedy protony, které jsou vyvedeny na externí Be terč. Díky shlukovací soustavě mají pulsy generovaných neutronů

větší časové rozestupy a mohou být proto využity k měření doby letu neutronů (TOF – Time-of-Flight), z níž se určí jejich energie.

Všechny tyto kroky zásadně přispěly ke kvalitě poskytovaných urychlených svazků, zlepšily technické možnosti urychlovače a především podstatně rozšířily jeho experimentální možnosti, provozní spolehlivost a spektrum využití.

| Využití cyklotronu U-120M

Cyklotron byl intenzivně využíván interními uživateli, národními a mezinárodními institucemi pro celou řadu experimentů základního výzkumu i aplikací. Interní zákazníci z oddělení ústavu – Oddělení jaderných reakcí (OJR), Oddělení fyziky těžkých iontů (OFTI), Oddělení dozimetrie záření (ODZ), Oddělení radiofarmak (ORF) – řešili využíváním urychlených svazků vlastní projekty, ale v mnoha případech spolupracovali na řešení projektů s dalšími institucemi a experimentátory. Uvádíme pro představu ne zcela vyčerpávající seznam spolupracujících institucí:

„Cyklotrony U-120M a TR-24 a nově i mikrottron MT25 jsou součástí velké [ústavní] výzkumné infrastruktury CANAM.“

NÁRODNÍ

VŠ, univerzity

FJFI – Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, MFF UK – Matematicko-fyzikální fakulta UK, FS ČVUT – Fakulta strojní ČVUT, ÚTEF – Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT, UNOB – Univerzita obrany Brno, Ostravská univerzita, ÚFCH VŠCHT – Ústav fyzikální chemie Vysoké školy chemicko-technologické, VUT Brno – Vysoké učení technické v Brně

Ústavy Akademie věd České republiky

ÚOCHB – Ústav organické chemie a biochemie AV ČR, v. v. i., ÚFCH JH – Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, v. v. i., MBÚ – Mikrobiologický ústav AV ČR, v. v. i., FZÚ – Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i.

Průmysl

RadioMedic s.r.o., ADVACAM s.r.o., SIEMENS s.r.o., 5M s.r.o., CVŘ – Centrum výzkumu Řež s.r.o., BD sensors s.r.o. pro ESA (Evropská vesmírná agentura)

ZAHRANIČNÍ

Vědecké a výzkumné instituce

CERN – European Organization for Nuclear Research, HZDR – Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, GSI – Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, MPI – Max Planck Institute Munich, IAEA – International Atomic Energy Agency Vienna, INFN LNS Catania – Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud

Univerzity

Technische Universität Dresden, UiO – University of Oslo, Delft University of Technology, AGH University of Krakow, University of Catania



■ Obr. 4: Terče pro cyklotron U-120M. Foto: Archiv OU

Ozařování pro projekty

KATRIN – stanovení hmotnosti neutrina

XENON – hledání temné hmoty

FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research

RADNEXT – evropský infrastrukturní projekt vedený CERNem, který zpřístupňuje testovací zařízení napříč Evropou pro radiační testy elektroniky a elektronických komponent nabitými částicemi a rychlými neutrony

EUROFUSION – evropské konsorcium pro vývoj energie z jaderné fúze

Na základě požadavků experimentátorů byla pracovníky OU navržena a realizována celá řada nezbytných terčových systémů (interních pevných vč. rotačního, externích pevných, kapalinových i plynových) vč. ovládání a vizualizace, ozařovacích a kolimačních přípravků. Pro ozařování rychlými neutrony byly v OJR vyvinuty generátory rychlých neutronů reakcemi urychlených svazků s terčovými materiály D_2O , Be, Li.

Následují příklady projektů využívajících svazky U-120M.

Astrofyzikální experimenty

Určení asymptotického normalizačního koeficientu: Byla studována reakce $^{18}O(n,\gamma)^{19}O$ pomocí nepřímé metody ANC (Asymptotic Normalization Coefficient). Tato metoda zahrnuje studium reakce $^{18}O(d,p)^{19}O$, což pomáhá lépe pochopit procesy, které probíhají ve hvězdách a ovlivňují jejich vývoj.

Trojan Horse metoda: Poprvé na světě byla použita metoda Trojan Horse k analýze účinných průřezů reakcí $^2H(d,p)^3H$ a $^2H(d,n)^3He$. Tato metoda umožňuje stanovení faktoru $S(E)$ pro oblast energií od 1,5 MeV až po keV, což je klíčové pro pochopení jaderných reakcí při nízkých energiích, které jsou běžné v astrofyzikálních prostředích (spolupráce OJR, INFN LNS Catania).

Produkce homologů supertěžkých prvků

Produkce krátkodobě žijících radionuklidů, které slouží jako modely pro supertěžké prvky. Tyto radionuklidy vznikají při reakcích (3He,x) s terči

ze Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Yb, Lu, Hf, Ta a W. Vzniklé radionuklidy se využívají pro vývoj chemických systémů, které pomáhají při výzkumu supertěžkých prvků (spolupráce FJFI ČVUT, UiO, GSI).

Excitační funkce, účinné průřezy reakcí

Excitační funkce mapují závislost účinných průřezů (tj. pravděpodobností dané reakce) v závislosti na energii dopadajícího urychleného svazku. To je důležité pro plánování experimentů a přípravu radionuklidů, které se používají v medicíně, průmyslu nebo vědeckém výzkumu. Tyto úlohy byly prováděny především ve spolupráci s ORF.

„Využitím neutronového zdroje s produkční reakcí $p+Li(C)$ byly měřeny účinné průřezy pro fúzní projekt IFMIF v rámci programu F4E (Fusion for Energy) a projektů koordinovaných IAEA.“

Poprvé na světě byly změřeny excitační funkce reakcí

$^{231}\text{Pa}(p,2n)^{230}\text{U}$ a $^{231}\text{Pa}(d,3n)^{230}\text{U}$. Byl navržen a vyroben nový terčový držák pro ozařování ^{232}Th pro produkci ^{230}U (spolupráce: Joint Research Centre – Institute for Transuranium Elements (JRC-ITU), výzkumný institut spadající pod EK a specializující se na výzkum v oblasti jaderné bezpečnosti a zabezpečení).

Měření excitačních funkcí reakcí protonů na přírodní směsi neodymu ($^{\text{nat}}\text{Nd}$) má významný dopad na experiment SNO+ (pokračování experimentu Sudbury Neutrino Observatory), který se zaměřuje na hledání bezneutrinového dvojitého beta rozpadu (spolupráce TU Drážďany).

Prvenství držíme rovněž ve studiu excitačních funkcí reakcí ^3He na ^{165}Ho , ^{159}Tb a ^{103}Rh , které poskytují cenné informace o jaderných vlastnostech těchto prvků.

Reakce deuteronů na yttriu $^{89}\text{Y}(d,x)$ v rozmezí energií 4–20 MeV je důležitá pro přípravu délejšího pozitronového zářiče ^{89}Zr s poločasem rozpadu 78,41 h.

Protonové svazky byly rovněž využity pro změření excitační funkce reakce $^{226}\text{Ra}(p,2n)^{225}\text{Ac}$, která má zásadní význam pro budoucí výrobu velice žádaného radionuklidu ^{225}Ac pro terapii rakovinných nádorů. Je třeba zdůraznit, že náročná příprava tohoto radionuklidu včetně vybudování specializovaného pracoviště je předmětem zájmu kolegů z ORF.

Příprava nekonvenčních radionuklidů

Nekonvenční radionuklidy jsou méně běžné izotopy, které dosud nejsou etablovány v klinické praxi nebo se v ní používají jen krátce. Rozšiřují možnosti diagnostiky i terapie v nukleární medicíně, zejména v oblasti tera-
nostiky. Příprava níže uvedených radionuklidů probíhala v úzké spolupráci s ORF.

Izotopy ^{86}Y a ^{124}I slouží hlavně k diagnostice a plánování cílené radionuklidové terapie. Pro jejich produkci byl navržen a vyroben unikátní tangenciální terč.

„Urychlené svazky $^4\text{He}^{2+}$ a především $^3\text{He}^{2+}$ jsou v rámci evropských laboratoří dostupné jen výjimečně, a tedy velmi žádané.“

^{68}Ga , ^{64}Cu a ^{61}Cu jsou nekonvenční pozitronové zářiče pro zobrazování nádorových tkání. Pro jejich přípravu byly navrženy a modifikovány vhodné produkční terče.

Izotop $^{99\text{m}}\text{Tc}$ je sice nejrozšířenějším radionuklidem v nukleární medicíně, tedy velmi konvenčním, nicméně jeho příprava na cyklotronu nikoliv. V době krize výroby ^{99}Mo v jaderných reaktorech pro přípravu generátorů $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ byla vyvinuta alternativní přímá příprava $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Positronový radionuklid ^{83}Sr pro plánování terapie jeho izotopem ^{89}Sr , který je β^- zářičem používaným k paliativní léčbě kostních metastáz. Pomocí ^{83}Sr lze provést PET sken a optimalizovat tak terapeutický plán. Pro produkci byl navržen a vyroben terčový držák i příprava RbCl terčů ve spolupráci s HZDR Drážďany.

^{211}At pro cílenou terapii rakovinných nádorů. Byl navržen a upraven unikátní terčový držák s diagnostikou s možností kontraktu a pravidelných dodávek zahraničním zájemcům.

Příprava kalibračních zdrojů

Pro přípravu kalibračního zdroje $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$ bylo ve spolupráci s ORF a OFTI postupně navrženo a otestováno několik generací plynových terčů, které se vyrovnávaly se stále rostoucími požadavky projektu KATRIN. Na nich připravené ^{83}Rb je po dalším zpracování základem zeolitových a implantovaných kalibračních zdrojů pro velké experimenty KATRIN a XENON.

Experiment KATRIN – viz samostatný příspěvek D. Vénose et al. *Elektronová spektroskopie ÚJF v KATRIN* a O. Lebedy v příspěvku o ORF.

Produkce fluorescenčních nanodiamantů

Fluorescenční nanodiamanty (FND) byly a jsou připravovány ve spolupráci s ÚOCHB pro neinvazivní vyšetřování a zobrazování na buněčné úrovni v reálném čase. Pro produkci FND byly vyvinuty pevné terče vč. technologie přípravy lisovaných nanodiamantových vrstev a kapalinové terče pro ozařování koloidních roztoků FND. ÚOCHB poskytuje tyto FND různým výzkumným institucím po celém světě.

Radiační poškození elektronických komponent

Radiační odolnost elektronických komponent (radiation hardness) je schopnost elektroniky a polovodičových součástek odolat degradaci vlivem ionizujícího záření. Testování se provádí jak urychlenými ionty, tak rychlými neutrony.

Bylo provedeno ozařování a testovány silikonové pixelové čipy a komponenty pro inovaci vnitřního dráhového systému detektoru a programovatelných hradlových polí pro detektor ALICE (spolupráce OFTI, CERN ALICE).

Bylo realizováno testování elektronických komponent, vzorků slunečních panelů a dalších součástek urychlenými ionty (účastníci RADNEXT).

Bylo realizováno testování a kalibrování detektorů typu TimePix pro zobrazování nabitých částic pro spol. ADVACAM.

Ozařování biologických vzorků

Biologické vzorky, jako jsou lidské kožní buňky a glioblastomy, jsou ozařovány pro výzkum účinků radiace na živé tkáně. Tento výzkum je klíčový pro pochopení radiačních účinků a vývoj nových léčebných metod. Bylo provedeno ozařování biologických vzorků (roztok D plasmidů pBR322, normální lidské kožní fibroblasty a U87 glioblastomy), pro které byly navrženy a vyrobeny vhodné terčové držáky (spolupráce ODZ).

Měření jaderných dat

Tato měření pomáhají rozšířit údaje o jaderných reakcích a zlepšit knihovny jaderných dat pro aplikace v energetických i dalších oblastech.

Využitím neutronového zdroje s produkční reakcí $p+\text{Li}(\text{C})$ byly měřeny účinné průřezy pro fúzní projekt IFMIF v rámci programu F4E (Fusion for Energy) a projektů koordinovaných IAEA.

Neutronová pole terčové stanice se zdrojovou reakcí $p+\text{Li}(\text{C})$ v oblasti 18–33 MeV byla využita zejména pro měření účinných průřezů a kalibrační testy detektorových systémů (spolupráce MPI Mnichov, FJFI ČVUT, UNOB).

Generování a využití polí rychlých neutronů

Pole rychlých neutronů jsou využívána pro měření účinných průřezů, které jsou důležité např. pro fúzní programy. Dále jsou využívány pro testování radiační odolnosti elektronických komponent nebo kalibraci detektorů kosmického záření. Tato měření pomáhají zlepšit naše chápání jaderných reakcí a jejich aplikací. O generátorech rychlých neutronů viz rovněž příspěvek P. Béma v této publikaci.

Neutronová pole generovaná s využitím zdrojových reakcí $p(^{37})\text{D}_2\text{O}$ a $p+\text{Be}$ na terčích vyvinutých v laboratoři OJR byla využita pro testování kalorimetru ATLAS-CERN.

Bylo realizováno testování fúzních komponent pro účastníky EURO-FUSION (spolupráce OJR).

Byly testovány elektronické systémy pro spol. SIEMENS s.r.o. a detektory typu TimePix pro spol. ADVACAM s.r.o.

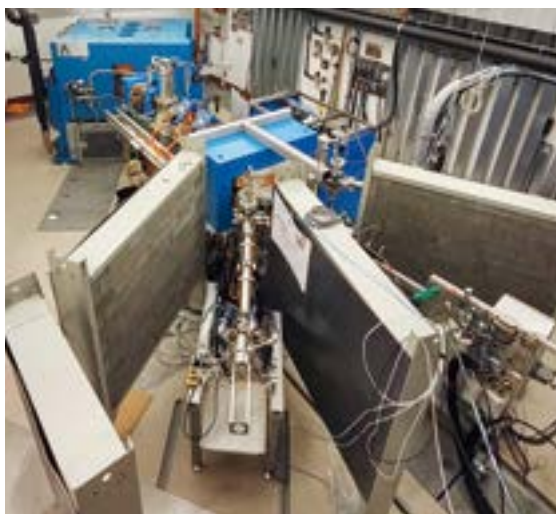
Produkce konvenčních radionuklidů pro přípravu radiofarmak

Cyklotron byl intenzivně využíván pro zajištění komerční výroby radionuklidů ^{18}F pro PET diagnostiku a ^{81}Rb pro výrobu generátoru k plicní diagnostice pro spol. RadioMedic, s.r.o. (spolupráce ORF).

Od roku 2006 cyklotron prošel rozsáhlým programem modernizace, který zásadně zvýšil jeho technické možnosti, spolehlivost i univerzálnost využití. Díky těmto úpravám se cyklotron stal nepostradatelnou součástí domácí i mezinárodní vědecké komunity a platformou pro široké spektrum výzkumných a aplikačních projektů.

Cyklotron TR-24

Výběr nového cyklotronu byl dán nabídkou produkčních cyklotronů poskytujících pouze svazky urychlených protonů. Tyto urychlovače odpovídaly ekonomickým možnostem ÚJF. Hlavním požadavkem byla maximální možná energie urychlených protonů a zejména proudy několik stovek μA . Byl zvolen cyklotron TR-24 kanadské firmy ACSI s energiemi protonů 18–24 MeV a max. proudem 300 μA ,



■ Obr. 5: Cyklotron TR-24 s neutronovým generátorem HPNG. Detailnější popis v tématu Generátory rychlých neutronů. Foto: Archiv OU

v té době jediný finančně dostupný model těchto parametrů. Cyklotron urychluje H^- ionty produkované iontovým zdrojem typu CUSP umístěným na axiální injekci. Vývod svazku je uskutečněn efektivní metodou přebíjení ($H^- \rightarrow H^+$).

V roce 2015 byla uskutečněna přijímací zkouška s dodavatelem a cyklotron uveden do provozu. Pracovníci OU se aktivně účastnili celé realizace projektu včetně sjednání kontraktu. Byla navržena dispozice a umístění cyklotronu ve staré budově po demontovaném VdG generátoru. Na základě simulací MCNPX byly stanoveny rozměry betonových stěn a stropu cyklotronové haly pro odstínění generovaného γ záření a zejména neutronových toků. Byly rovněž navrženy stropní průchody pro kabely, vzduchotechniku a další media do haly (kobky) cyklotronu. Ze získaných geologických rozborů z mnoha různých lokalit lomů bylo stanoveno prvkové složení a vybrán lom s vhodnou štěrkovou příměsí do betonu zajišťujícím efektivní odstínění přilehlých prostor. Na základě výběrového řízení byla ve spolupráci s firmou Šmeral Brno navržena a instalována stínící vrata do kobky cyklotronu. Pracovníci OU vypracovali plán instalace a zapojení napájecích zdrojů cyklotronu, realizaci silového elektro přívodu, zprovoznění technologických okruhů (chlazení cyklotronu, vzduchotechniky, rozvodu technologických plynů a stacionární dozimetrické sítě atd.). Byla vypracována a úspěšně schválena dokumentace požadovaná Státním ústavem pro jadernou bezpečnost a vzniklo nové pracoviště III. kategorie.

V následujících letech bylo věnováno značné úsilí návrhu technologických podsystémů nezbytných pro realizaci a provoz nových terčových stanic. Byly vypracovány návrhy a zakoupeny potřebné komponenty včetně výkonných čerpadel pro autonomní vysokotlaký (10 bar) a nízkotlaký (3,5 bar) vodní chladicí okruh. Pro řízení a ovládání terčových stanic a dalších experimentálních zařízení včetně doplňujících technologických podsystémů cyklotronu TR-24 byla vybrána a navržena koncepce řízení na bázi PLC. Byly zakoupeny nezbytné elektronické komponenty, např. ovládací vizualizační software, byly navrženy a zprovozněny přídatné technologické okruhy (monitor spotřeby budovy a technologie cyklotronu TR-24, čerpání RA

nádrží v hale cyklotronu, monitor stavu záložního zdroje, blokáda vstupu do haly cyklotronu).

Generování polí rychlých neutronů

V rámci projektu CANAM LC&FNG byl vyvinut výkonný proton-neutronový generátor (HPNG) pro generování neutronového pole s maximálním tokem $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ při proudu 300 μA . Navržený unikátní chladicí systém umožňuje přenos výkonu $\leq 2,5 \text{ kW/cm}^2$ (lokálně $\leq 4 \text{ kW/cm}^2$). Pro bezpečný provoz HPNG bez rizika rozprášení toxických Be mikročástic svazkem je nezbytné zajistit na povrchu Be teplotu nepřevyšující 800 °C. Nutným úkolem je tedy zajistit monitorování tohoto parametru. V současnosti probíhá vývoj dvou unikátních metod měření teploty na terči zatíženém svazkem:

1. Měření teploty povrchu Be optickou metodou s využitím optického vlákna (spolupráce se Západočeskou univerzitou v Plzni). Proběhlo testování radiační odolnosti optických vláken a pokračuje vývoj metod vhodných pro dálkové měření.
2. Měření teploty povrchu Be disku Pt čidly tloušťky několika μm nanesenými na tenké vrstvě Si nebo Al_2O_3 , které jsou rovněž difusně spojené s povrchem terče (spolupráce s firmou TTS s.r.o. z Prahy). Proběhla srovnávací měření teplot čidel ve svazku a mimo svazek.

I při třetinovém výkonu cyklotronu 24 MeV/100 μA a odpovídajícím neutronovém toku $\sim 6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ je HPNG velice účinným generátorem rychlých neutronů a potenciálním testovacím zařízením technologických komponent diagnostiky fúzního reaktoru ITER.

Využití cyklotronu TR-24

Ve spolupráci s ORF byla zahájena testovací příprava velice žádaného radionuklidu ^{225}Ac reakcí $^{226}\text{Ra}(p,2n)^{225}\text{Ac}$ pro cílenou terapii rakovinných nádorů ve stádiu metastáz. Bylo provedeno optimální doladění provozního režimu, upraveny parametry diagnostiky a prvků ionto-optické trasy tak, aby bylo dosaženo homogenního rozložení urychleného svazku na krycí fólii terče. Lokální zvýšení hustoty svazku (tzv. „hot spots“) je naprosto nežádoucí a mohlo by vést ke kritickému úniku ozářeného produktu s obsahem radia.

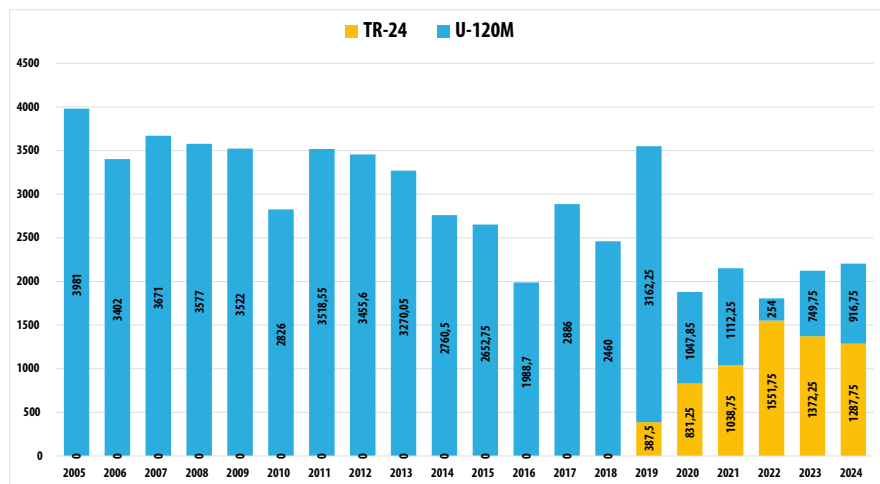
Po realizaci nového plynového terče pracovníky ORF a OFTI opakovaně probíhalo dlouhodobé ozařování radionuklidu pro přípravu kalibračního zdroje ^{83}Rb s aktivitou 10 GBq. Radionuklid je určen pro experimenty KATRIN (měření hmotnosti neutrina) a XENON (hledání temné hmoty).

Cyklotron byl rovněž intenzivně využíván pro zajištění komerční výroby radionuklidů ^{18}F pro PET diagnostiku a $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ generátoru pro monitorování funkce plic pro firmu RadioMedic s.r.o.

Zprovozněním nového cyklotronu bylo možné celou řadu aplikací z U-120M převést na TR-24 a dále rozšířit spektrum nabízených experimentálních možností zejména díky řádově vyšším proudům poskytovaných urychlených protonových svazků.

Mikrotron MT25

Mikrotronová laboratoř vznikla na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT a je umístěna v Praze v krytech pod horou Vítkov. V roce 2003 převzal mikrotronovou laboratoř Ústav jaderné fyziky AV ČR. V letech



▪ Obr. 6: Počet provozních hodin cyklotronu U-120M a TR-24 v letech 2005–2024.
Zdroj: Statistika OU



▪ Obr. 7: Záběry z mikrotronové laboratoře. A: Vývody svazků elektronů jsou opatřeny kvadrupólovými dublety, které slouží k fokusaci, na konci trasy vpravo je umístěn W konvertor sloužící pro konverzi elektronů na fotonový svazek. B: Pohled na otevřený mikrotron, na okrajích urychlovací komory je měděné vinutí zajišťující homogenní magnetické pole, v levé části rezonátor, napravo vývod svazku. Foto: Archiv OU

2001–2006 došlo ke komplexní modernizaci mikrotronu, která byla zaměřena na zvýšení středního proudu urychlených elektronů, na zlepšení kvality svazku a zvýšení spolehlivosti při dlouhodobém provozu.

Energie urychlených elektronů je 6–25 MeV. Primární elektronové svazky lze konvertovat pomocí vhodného terče na sekundární svazky fotonů (brzdné záření), popř. pomocí jaderných reakcí na neutrony. Energetické spektrum fotonových svazků je spojité, horní hranice energie brzdného záření je rovna energii urychlených elektronů. Výtěžek neutronů ve fotojaderných reakcích je $2,5\text{--}5 \times 10^{11}$ neutronů za sekundu v závislosti na materiálu konverzního terče.

Využití mikrotronu MT25

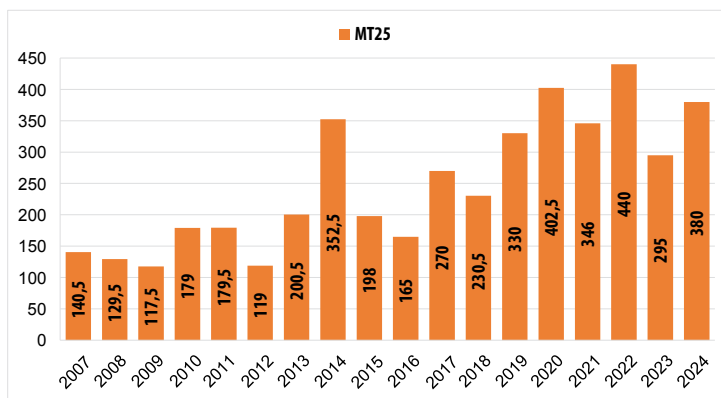
V uplynulých letech byly elektronové svazky využívány zejména pro radiační síťování, radiační polymerizaci, ozařování biologických vzorků, pro produkci fluorescenčních nanodiamantů a testování různých typů detektorů. Elektronové svazky se využívají i pro výzkum v potravinářském průmyslu zejména pro ozařování kolagenů a také pro radiační sterilizaci různých vzorků. Fotonové svazky slouží rovněž pro účely IFAA (Instrumentální fotonová aktivační analýza), kterou se stanovují vybrané prvky v různých mate-

riálech, pro ozařování biologických vzorků a pro ozařování krystalů PbWO_4 , u nichž se následně proměřuje změna optických vlastností. Jak elektronové, tak fotonové svazky jsou používány pro testování radiační odolnosti materiálů, zejména pro kosmický průmysl a pro testování a kalibraci různých typů detektorů ionizujícího záření. V neutronových polích jsou testovány

„Na základě požadavků experimentátorů byla pracovníky OU navržena a realizována celá řada nezbytných terčových systémů včetně ozařovacích a kolimačních přípravků.“

detektory ionizujícího záření a testuje se radiační odolnost elektronických součástek. Mikrotronová laboratoř spolupracuje s mnoha vysokými školami a ústavu AV ČR. Provádí se zde experimenty pro fakulty ČVUT, VUT Brno,

TU Liberec a Jihočeské univerzity a ústavu AV ČR ÚSMH, ÚOCHB, ÚMCH, FZU, FGÚ a ÚFM Brno a rovněž pro ELI Beamlines, VÚPP, VZLU, CSO, ÚJV a další. Ze zahraničních partnerů zmiňujeme zejména dlouhodobé spolupráce s univerzitami v Mainzu, Darmstadtu, Užhorodu a Rize. Mikrotron je využíván i pro komerční ozařování, v poslední době to byly např. firmy Advacam, Kyocera, Toseda a Eurostandard. Mikrotronová laboratoř také zajišťuje ve spolupráci s FJFI výuku studentů a pro studenty různých vysokých škol měření v rámci jejich diplomových a disertačních prací.



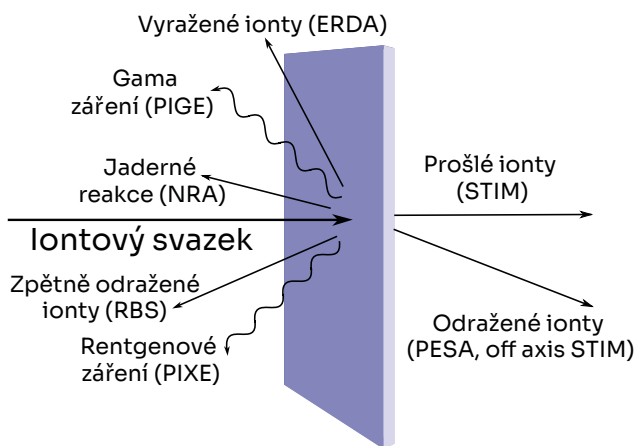
▪ Obr. 8: Počet provozních hodin mikrotronu MT25 v letech 2007–2024.

Zdroj: Statistika OU

2 | Laboratoř Tandetronu

 **Anna Macková, Vladimír Hnatowicz**

Oddělení neutronových a iontových metod ÚJF



▪ Obr. 1: Procesy sledované při interakci energetických iontových svazků s materiálem včetně uvedených anglických zkratk iontových analytických metod. Zdroj: Archiv ONIM

Ústav jaderné fyziky Akademie věd České republiky (ÚJF) je významným výzkumným centrem v oblasti jaderné fyziky. Jedním z klíčových zařízení ÚJF je lineární urychlovač Tandetron 4130 MC (dále jen Tandetron). Tento urychlovač hraje zásadní roli ve vývoji a aplikaci jaderných analytických metod a výzkumu interakcí pevných látek s nabitými částicemi v České republice.

Jaderné analytické metody využívají urychlené ionty ke studiu a modifikaci materiálů. Fyzikální princip je založen na interakci iontových svazků s materiálem, která vyvolá řadu dějů umožňujících detailní analýzu jeho složení a struktury. Pružné a nepružné srážky energetických iontů produkovaných urychlovačem Tandetron s atomy a atomovými jádry vzorku vedou například k emisi charakteristického rentgenového záření, k pružnému rozptylu primárních iontů, k vyražení terčových atomů a molekul vzorku a k jaderným reakcím spojeným s produkcí nabitých částic a energetického elektromagnetického záření (Obr. 1). Tyto projevy jsou následně detekovány a analyzovány, což umožňuje získat informace o prvkovém složení (kvalitativní i kvantitativní), struktuře a vlastnostech materiálu. Současně tyto procesy, se zvolením vhodných parametrů iontového svazku, mohou vést ke změně fyzikálních vlastností pevných látek, zvláště povrchů.

„Laboratoř Tandetronu nyní disponuje srovnatelným přístrojovým vybavením jako přední evropské laboratoře v oboru.“

Materiálový výzkum tradičně patří k progresivním technologickým oblastem. Vzhledem k neustálé miniaturizaci jsou dnes základní struktury daleko za analytickými limity většiny konvenčních metod. Jaderné analytické metody se pro studium těchto struktur hodí, protože používají sondy podobných nebo mnohem menších rozměrů (částice, záření) a poskytují rozlišení v závislosti na typu metody v nanometrech až mikrometrech. Nabízejí také velmi nízké detekční limity pro stanovení stopových prvků.

Kromě samotné analýzy slouží iontové svazky také pro modifikaci povrchových vrstev materiálů. Iontová implantace je proces, při kterém jsou ionty zaváděny do tenké vrstvy na povrchu, což může změnit jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Tento proces je využíván například k vytvoření nových materiálů s unikátními vlastnostmi a tvarem nebo ke zlepšení vlastností již existujících.

V posledních 20 letech došlo k významnému instrumentálnímu a vědeckému rozvoji v Laboratoři Tandetronu. Ta nyní disponuje srovnatelným

přístrojovým vybavením jako přední evropské laboratoře v oboru a působí v ní tým vědců a operátorů s vysokou erudicí v oblasti iontových analytických metod a syntézy materiálů iontovými svazky a současně s vysokým podílem žen a zahraničních mladých vědců. Ve spolupráci s univerzitami jsou v laboratoři školeni studenti univerzit MFF UK, FJFI ČVUT a UJEP v rámci společně akreditovaných studijních programů. Laboratoř Tandetronu je v současné době součástí konsorcií mezinárodních projektů EU Horizon a figuruje v síti předních iontových center v Evropě RADIATE.

Laboratoř Tandetronu nachází uplatnění v širokém spektru vědeckých oborů, zvláště pak v oborech:

- **Fundamentální studium interakcí nabitých částic:** Měření účinných průřezů, výzkum energetických ztrát v materiálech, vznik radiačních defektů, modifikace elektronové struktury materiálů iontovými svazky, modelování průchodu nabitých částic krystalickými strukturami, strukturální analýza iontovou transmisní mikroskopií.
- **Mikroelektronika:** Výzkum a vývoj nových polovodičových materiálů pro elektronické součástky.
- **Optoelektronika:** Studium a vývoj materiálů pro optické aplikace.
- **Nanotechnologie:** Charakterizace a modifikace nanostruktur pro pokročilé materiály v senzorice a flexibilní, udržitelné mikroelektronice.
- **Biomedicína:** Analýza biologických vzorků a tkání. Zkoumání vlivu energetických iontů na buněčné tkáně pro radiobiologii.
- **Archeologie:** Zkoumání artefaktů kulturního dědictví.
- **Energetika:** Výzkum materiálů pro energetiku (fúzní a štěpné reaktory) a ukládání energie (Li-iontové baterie).
- **Životní prostředí:** Výzkum vzorků životního prostředí, stanovení stopových prvků, studium biologických vzorků prostředí s ohledem na studium globální změny klimatu.

Kompetence v mikro a nanotechnologiích

V Laboratoři Tandetronu lze provádět detailní analýzy a modifikace materiálů na mikro a nanotechnologické úrovni. Iontové metody umožňují vy-

tváření nanostruktur, modifikaci elektronové struktury materiálů a syntézu nových materiálů s unikátními fyzikálními vlastnostmi.

Laboratoř Tandetronu v ÚJF je klíčovým zařízením pro aplikovaný jaderný výzkum v různých vědeckých oborech, což z ní činí nepostradatelný nástroj pro pokročilý materiálový výzkum a technologický rozvoj.

| Výstavba budovy Laboratoře Tandetronu a instalace urychlovače Tandetron

Historie vývoje jaderných analytických metod v ÚJF sahá do 60. let minulého století. Všeobecná potřeba univerzálnější metody pro analýzu hloubkových koncentračních profilů vedla tehdy k oživení staršího urychlovače Van de Graaffova typu (VdG) vertikální konstrukce a k postupnému vybudování zařízení pro analýzy materiálů metodami elastického rozptylu nabitých částic (metody RBS – Rutherfordovský zpětný rozptyl, ERDA – analýza elasticky dopředně vyražených částic) a metodami PIXE (částicemi indukovaná emise rentgenovského záření) a PIGE (částicemi indukovaná emise gama záření). Rozsah analýz na VdG urychlovači poměrně rychle rostl. Po-dařilo se zvýšit jeho spolehlivost a pořídit jednoduchá zařízení pro analýzy metodami RBS a PIXE. Tato zařízení byla postupně nahrazována novými a podstatným způsobem tak zvýšila rozsah a kvalitu prvkových analýz. Starý VdG urychlovač však časem přestal vyhovovat jak svou kapacitou, tak i energií urychlených iontů. Podstatným omezením bylo také to, že VdG urychlovač produkoval pouze iontové svazky protonů a částic alfa.

K vyhodnocení analýz byly vyvinuty v 90. letech vlastní počítačové programy a byl získán software pro vyhodnocování spektroskopických dat zahraniční provenience. Navázali jsme spolupráci s dalšími skupinami, zejména v Německu (Rossendorf) a Finsku (Helsinki). Nejen k udržení dosavadní úrovně, ale i s perspektivou rozšíření metodického arzenálu jaderných analytických metod a možností uplatnění v oblasti nanotechnologií, se v ÚJF v 90. letech začalo uvažovat o významném posílení úrovně výzkumu v této oblasti a pořízení nového urychlovače.

Po řadě rozvah o typu nového urychlovače bylo rozhodnuto pořídit urychlovač tandemového typu nizozemské firmy High Voltage Engineering Europa nazývaný Tandetron 4130 MC s maximálním terminálovým napětím 3 MV. Za hlavní výhodu tohoto urychlovače byl považován elektronický zdroj vysokého napětí, který nevyžaduje žádné pohyblivé součástky ve srovnání s urychlovači typu VdG.

Umístění nového urychlovače s vodorovnou konfigurací, zcela odlišnou od vertikálního uspořádání urychlovače VdG, nebylo v řežském areálu snadné. Protože ÚJF nevladl vhodný pozemek nebo objekt, byla k původní budově VdG přistavena zcela nová experimentální hala s kancelářskými prostory. Výstavbu zkomplikovala nečekaná skutečnost, protože stavební pozemek tvořila pětimetrová historická navážka. Stabilitu nové stavby musely proto zajistit piloty. Na samotné instalaci urychlovače a jeho uvedení do provozu v roce 2005 se významně podíleli naši pracovníci (Obr. 2). Slavnostního otevření laboratoře se tehdy zúčastnila řada oficiálních hostů a kolegů z dalších akademických i vysoko-

„Připravujeme nové materiály, struktury, kompozitní vrstvy, nano- a mikrostrukturované materiály na bázi polovodičových krystalů, skel, polymerů, polymerních kompozitů s nanočásticemi a 2D materiály ve spolupráci s řadou českých a zahraničních pracovišť.“

školských pracovišť. Funkce urychlovače byla demonstrována urychlením iontů uhlíku a jejich pružným rozptylem (poprvé v ČR). Rychlou instalaci a uvedení do provozu vysoce hodnotila i Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE), která nákup urychlovače zprostředkovala a finančně podpořila. O tuto podporu se zasloužili zejména tehdejší ředitel J. Dobeš a vedoucí laboratoře V. Hnatowicz, současný vědecký emeritní pracovník ÚJF AV ČR.

Význam urychlovače Tandetron spočívá v jeho schopnosti produkovat široké spektrum iontů od vodíku po zlato nebo wolfram s energiemi

od 600 keV až po 30 MeV pro vícenásobně nabitě ionty. Energetické iontové svazky umožňují provádět přesné kvalitativní a kvantitativní prvkové analýzy, stanovovat obsah prvků i ve stopových koncentracích, modifikovat na atomární úrovni povrchy a vytvářet nanostruktury a mikrostruktury. Realizovány jsou také experimenty, které přispívají k lepšímu porozumění produkce materiálů v oblasti nanovědy, materiálového inženýrství, vlastnostem hmoty a interakcím nabitých částic s hmotou.

| Instrumentální a vědecký vývoj v Laboratoři Tandetronu od instalace urychlovače

Počáteční vybavení a zdokonalování (2005–2009)

Postupné vybavení laboratoře pro analýzy materiálů pomocí urychlených částic a pro iontovou implantaci trvalo několik let. Některá zařízení byla



▪ Obr. 2: Obrázek ze stavby haly a stěhování urychlovače. Foto: Archiv ONIM



▪ Obr. 3: První RBS kanálovací analytické zařízení instalované v Laboratoři Tandetronu v roce 2006. Foto: Archiv ONIM

zakoupena, další navržena, zkonstruována a vyrobena v ÚJF a v českých firmách. S rostoucími zkušenostmi z provozu urychlovače a využití jednotlivých zařízení byla instrumentace iontových tras postupně zdokonalována. První větší akvizicí byla koncová stanice s přesným dvouosým goniometrem a softwarem na měření metodou elastického rozptylu iontů v módu kanálování v monokrystalických materiálech dodaná americkou firmou National Electrostatics Corp. (NEC), Obr. 3. Tato sofistikovaná metoda umožňuje ze spektrometrických dat stanovit hloubkové profily defektů a do jisté míry i jejich charakter. Zakoupená zařízení nám často byla inspirací pro jejich dílčí zdokonalení nebo pro konstrukci jejich lepších variant. Následně byl postaven vlastní robustní goniometr a vyvinut software pro ovládání jeho přesných motorů ve vakuu v programu LabView.

Tak byla uvedena do provozu originální zařízení pro analýzy látek metodou RBS, pro studium struktury pevných látek metodou kanálování iontů v monokrystalických materiálech a analýzu prvkového složení metodou

PIXE. Metoda RBS kanálování stojí stále v popředí zájmu studia polovodičů a možností vytváření nových optických vlastností cíleným zaváděním defektů do elektronické struktury i prostřednictvím iontové implantace. Vzhledem k možnosti urychlovat různé ionty stále rostl zájem i o modifikaci látek iontovou implantací. Rozsáhlá práce byla odvedena na vývoji softwaru pro řízení všech experimentálních zařízení, pro samotné měření a sběr dat. Po zralém uvážení jsme nakonec i pro tento účel zvolili osvědčenou platformu LabView.

V tomtéž období byl postaven a zprovozněn spektrometr vyražených částic s měřením doby letu (ToF) pro metodu ToF – ERDA. Toto zařízení umožňuje měřit hloubkové profily lehkých iontů včetně vodíku, které jsou obtížně měřitelné, pokud vůbec, jinými analytickými metodami.

Velkou pomocí při budování nové laboratoře nám byly intenzivní kontakty s tehdejšími Ion Beam Center, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, kde v té době měli velmi dobré přístrojové vybavení a velké zkušenosti s podobnými analýzami. Radou i spoluprací nám pomohl zejména Rainer Grötzschel.

Významným počinem bylo zprovoznění iontové mikrosondy v roce 2009, unikátního zařízení svého druhu v ČR, které patří k nejvyužívanějším technikám v Laboratoři Tandetronu v současné době. Iontová mikrosonda umožňuje zaostřit svazek protonů, částic alfa a některých dalších lehkých iontů o energii jednotek MeV na velikost okolo jednoho mikrometru. Významným projektem v té době, který umožnil investice do přístrojového vybavení, byl projekt Centra excellence řešený v letech 2006–2011 pod vedením V. Hnatowicze a zaměřený na přípravu, modifikaci a charakterizaci materiálů energetickým zářením.

Výzkum a aplikace (2012–2015)

V roce 2010 byla základní výzkumná zařízení v ÚJF – urychlovače U-120M a Tandetron 4130MC a zařízení na reaktoru LVR-15 – sdružena do infrastrukturního projektu CANAM (Center of Accelerators and Nuclear Ana-

lytical Methods). Ten byl zahrnut do Cestovní mapy velkých výzkumných infrastruktur ČR a od roku 2012 podpořen MŠMT. Naše experimentální zařízení a zkušenosti tak mohly být poskytovány externím výzkumníkům v rámci otevřeného uživatelského přístupu. To významně přispělo k navázání řady mezinárodních i národních vědeckých spoluprací, které trvají dodnes, přineslo nové vědecké úkoly, směry a současně umožnilo získávat grantovou podporu a rozvíjet instrumentálně, vědecky i personálně naši laboratoř.

V roce 2012 byly významně zlepšeny parametry mikrosvazku urychlovače Tandetron (fokuzace a stabilita) a bylo nově instalováno zařízení pro vyvedení externího svazku iontů z vakua. To umožnilo provést první ozařová-



▪ Obr. 4: Stav iontových tras v roce 2014 před instalací samostatné trasy iontové implantace a nové komory mikrosvazku. Foto: Archiv ONIM

ní živých buněk v jejich přirozené atmosféře těžkými energetickými ionty pro aplikace v dozimetrii a radiační medicíně. Pro zlepšení parametrů mikrosvazku protonů urychlovače Tandetron byl pořízen přídavný iontový zdroj, který umožnil výrazné zvýšení iontového proudu. S těmito parametry může být iontová mikrosonda využívána pro iontové obrábění a litografii. Významně byly rozvinuty možnosti mikrosvazku, a to na iontovou litografii, a současně se započalo s vývojem unikátního softwaru, který nyní slouží pro iontovou litografii a umožňuje jakoukoliv 2D a případně 3D strukturu převést iontovým svazkem na povrch materiálu. Cílili jsme především na mikrozařízení, flexibilní elektroniku a senzoriku (Obr. 5).

V roce 2013 byly jaderné analytické metody široce využity v oblastech, jako jsou výzkum mikro- a nanostrukturovaných materiálů pro mikroelektroniku, optiku, laserové technologie, fotoniku, spintroniku a biomedicínu. V tomto období jsme se také zabývali studiem fundamentálních interakcí energetických iontů s pevnou látkou, což je nezbytné pro následné aplikace, například pro přípravu nano-strukturních materiálů iontovou implantací.

Další vylepšení a nové techniky (2014–2016)

V roce 2015 byla naprojektována nová vakuová komora pro iontovou implantaci a syntézu nanostruktur za zvýšené či snížené teploty. Postupně jsme komoru dovybavili a nyní umožňuje průběžné měření teploty během implantace, implantace za zvýšené teploty až na 800 °C a případně za snížené teploty pomocí kapalného dusíku. Implantace při definované zvýšené teplotě je podstatná pro dynamickou rekonstrukci struktury implantovaných materiálů. Současně umožňuje in situ diagnostiku těkavých látek, které mohou z některých materiálů unikat během implantace. Radiační zátěž vzorků při zvýšené teplotě je zásadní pro experimenty zkoumající nové materiály pro fúzní reaktory i reaktory štěpné, kde musí materiály odolat vysoké teplotě a velké expozici ionizujícího záření, které způsobuje defekty s následným křehnutím materiálu. Nové instrumentace pro iontovou implantaci byly využity k vytváření nanočástic v polovodičových krystalech s aplikačním potenciálem v elektronice či optoelektronice

nebo v laserových technologiích, a k vytváření vodivých a polovodičových struktur v grafen oxidu změnou elektronové struktury po ozáření energetickými ionty.

Vývoj a aplikace techniky litografie (2017–2018)

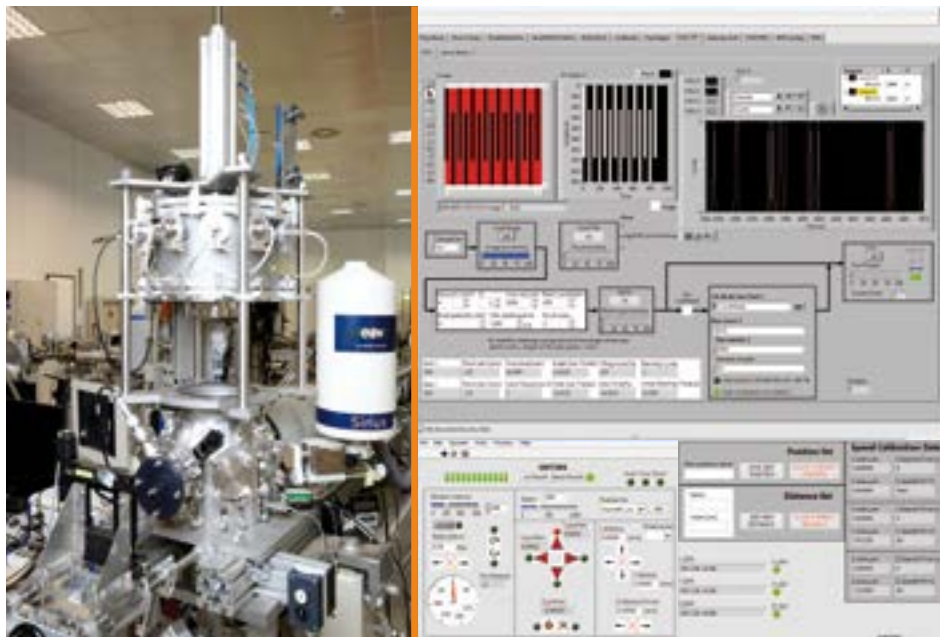
V roce 2017 se výzkum v laboratoři zaměřil mimo jiné na vývoj a aplikaci techniky litografie s využitím iontových svazků, a to i svazků těžších iontů, jako uhlík a kyslík, které jsou v této technice používány raritně. Nová komora mikrosvazku s otočným držákem vzorků pro vytváření složitých 3D mikrostruktur je na Obr. 5 vlevo společně s ukázkou softwaru na bázi

„V roce 2021 se v Laboratoři Tandetronu uskutečnilo několik unikátních experimentů. Proběhlo testování radiační odolnosti nových materiálů pro výplně orbitálních satelitů ve spolupráci s českými firmami a ESA.“

LabView vyvinutého pro iontovou litografii na Obr. 5 vpravo. Metoda byla použita pro mikrostrukturování v grafen oxidu (GO). Tento materiál vykazující 2D strukturu je povahou elektronové struktury nevodič. Při psaní iontovým mikrosvazkem dochází vlivem působení

iontů k modifikaci struktury GO a vytvoření vodivé mikrostruktury. Vztah mezi parametry iontového svazku (energie, tok, hmotnost iontů) a redukcí kyslíku ve fólii GO je klíčový pro zvýšení mobility elektronů, což přímo souvisí s využitelností zařízení založených na GO. Na Obr. 6 vidíme mikrostruktury připravené iontovou litografií. Souběžně jsme se věnovali rozšiřování komplementárních technik a tak, jak jsme se začali zabývat výzkumem a vývojem nových materiálů, rostla potřeba je přímo na pracovišti analyzovat a připravovat. Vybavili jsme se depozičními technikami pro vytváření tenkých vrstev a analytickým zařízením optické elipsometrie pro rychlé analýzy optických vlastností struktur připravených iontovou implantací.

V roce 2018 významně pokročil vývoj nové komory mikrosvazku umožňující umístění větších vzorků a až 3 detektorů pro souběžné analýzy RBS, PIXE

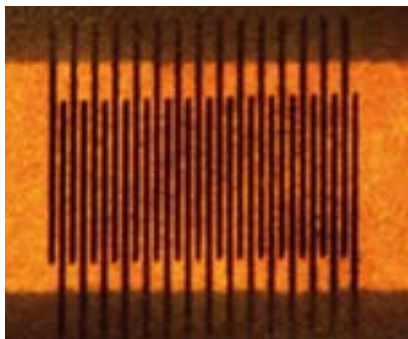


▪ Obr. 5: Nová komora mikrosvazku s otočným držákem a možností měření souběžné analýzy, iontové litografie a transmisní iontové mikroskopie (vlevo) a ilustrační náhled LabView softwaru umožňujícího přímou litografii mikrosvazkem do povrchu materiálu (vpravo). Foto: Archiv ONIM

a PIGE. Výsledkem byly 2D mapy prvkového složení s laterálním rozlišením lepším než 1 mikrometr počítačově rekonstruovatelné do 3D obrazu.

Výzkum a aplikace (2020–2023)

V Laboratoři Tandetronu byla dokončena instrumentace dalšího externího svazku (svazek iontů vyvedený z vakua) pro prvkovou analýzu artefaktů a objemných vzorků na vzduchu (Obr. 7). Byly provedeny PIXE a RBS mikrosvazkové analýzy umožňující prvkové mapování v artefaktech kulturního dědictví s využitím externího svazku, což vyžaduje specifickou instrumentaci v řízení a kontrole vakua. Dalším významným výzkumným počinem byly studie zaměřené na iontovou a laserovou litografii pro mikrostrukturování v hybridních nanokompozitech a materiálech na bázi grafenu, které na-



■ Obr. 6: Flexibilní super mikro-kondenzátory připravené iontovou litografií přímo vytvořené energetickými fokusovanými svazky uhlíku. Foto: Archiv ONIM

cházejí uplatnění v pokročilé flexibilní mikroelektronice, senzorech plynů i biomolekul.

V roce 2021 se v Laboratoři Tandetronu uskutečnilo několik unikátních experimentů. Proběhlo testování radiační odolnosti nových materiálů pro výplně orbitálních satelitů ve spolupráci s českými firmami a ESA. Rozsáhlá série měření a komplexní zpracování spektroskopických dat z iontové mikrosondy byly využity pro prvkové mapování složení bezobratlých živočichů



■ Obr. 7: Vývod externího svazku iontů do vzduchu s přídatnými detektory pro charakterizaci prvkového složení metodami RBS, PIXE a PIGE. Foto: Archiv ONIM

želvušek z ledovcových předpolí a pro sledování distribuce živin v lokalitách významně ohrožených změnami klimatu. Úspěšně byla použita nová instrumentace 3D prvkového mapování s využitím mikrosondy s otočným vzorkovníkem a polem detektorů na biologické vzorky a nové porézní hybridní materiály s využitím pro pěstování a třídění buněk, sensoriku plynů.

V roce 2022 byl v Laboratoři urychlovače Tandetron modernizován spektrometr pro detekci lehkých prvků s vysokou citlivostí metodou měření doby letu (ToF). Testování prokázalo desetinásobné zlepšení citlivosti při detekci vodíku spojené s lepším časovým i energetickým rozlišením měřených částic než před modernizací.

Závěr a současnost

V současné době jsou hlavními výzkumnými směry Laboratoře Tandetronu příprava a charakterizace mikro- a nanostrukturovaných materiálů, které jsou zajímavé pro základní i aplikovaný výzkum v materiálových, environmentálních a biomedicínských vědách. Iontové analytické metody se používají při zkoumání materiálů pocházejících z materiálového výzkumu, průmyslu, mikro- a nanotechnologií, elektroniky, optiky a laserové technologie, a při chemickém, biologickém a environmentálním výzkumu obecně. Neustále zlepšujeme vybavení laboratoře, aby bylo konkurenceschopné v evropském vědeckém prostoru a rozšiřujeme portfolio našich iontových metod. Laboratoř Tandetronu je úzce propojena s dalšími iontovými centry, zejména s konsorciem RADIATE sdružujícím nejdůležitější iontová centra v Evropě. Současný stav instrumentace s novými trasami, komorami a přístrojovým vybavením je znázorněn na Obr. 8.

Hlavním laboratorním příslušenstvím jsou zařízení pro charakterizaci materiálu pomocí jaderných analytických metod (RBS, RBS-channeling, ERDA, ERDA-TOF, PIXE, PIGE a iontová mikrosonda s 1 μ m laterálním rozlišením, 3D prvková tomografie) a dále zařízení pro vysokoenergetickou implantaci, implantaci jednotlivých iontů s velmi malými fluencemi pro vytváření izolovaných defektů pro kvantové technologie a ozařování biologických vzorků na vzduchu i analýzy pomocí externích svazků (Obr. 8).

K Laboratoři Tandetronu patří komplementární vybavení s různými depozičními metodami a charakterizačními metodami (např. AFM, CVD a magnetronové naprašování tenkých vrstev, optická charakterizace a povrchová modifikace materiálů s využitím laseru, dále skenovací elektronová mikroskopie a Ramanovská spektroskopie s AFM). Kvalifikace personálu a parametry experimentálních zařízení laboratoře jsou plně srovnatelné s obdobnými světovými laboratořemi. Díky tomuto vybavení je laboratoř v České republice ojedinělá a je schopna vyhovět všem specifickým požadavkům českých i zahraničních výzkumných organizací.

Připravujeme nové materiály, struktury, kompozitní vrstvy, nano- a mikrostrukturované materiály na bázi polovodičových krystalů, skel, polymerů, polymerních kompozitů s nanočásticemi a 2D materiály ve spolupráci s řadou českých (MFF UK, VŠCHT Praha, Masarykova univerzita, Ústav fy-



▪ Obr. 8: Současný stav instrumentace v Laboratoři Tandetronu – nová trasa pro iontovou implantaci uprostřed, obsazeno všech 5 výstupů magnetu urychlovače. Foto: Archiv ONIM

ziky plazmatu AV ČR, UJEP atd.) a zahraničních (BAM v Berlíně, Německo; HZDR Dresden-Rossendorf, Německo; Univerzita v Messině, Itálie; IFIN HH v Bukurešti, Rumunsko; Univerzita v Oslu, Norsko a další) pracovišť.

Naše pracoviště je velmi populární na Dnech otevřených dveří, kde naši techničtí pracovníci uvádějí diváky do tajů vakuové fyziky a techniky a vysvětlují, čím se v Laboratoři Tandetronu zabýváme. Již 50 let jsou

„Rychlou instalaci [Tandetronu] a uvedení do provozu vysoce hodnotila i Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE), která nákup urychlovače zprostředkovala a finančně podpořila.“

naše urychlovače pod péčí V. Semiána. Pod jeho vedením technický tým operátorů realizoval myšlenku V. Vosečka, tehdejšího i současného vedoucího provozu urychlovače Tandetron, na přemístění starého VdG urychlovače do Technického muzea v Praze, kde je od roku 2013 insta-

lován v točitém schodišti a návštěvníci se mohou seznámit s jeho historií. Tento počín kvitoval s velkou radostí profesor Č. Šimáně, první ředitel Ústavu jaderné fyziky, předchůdce ÚJF.

Laboratoři Tandetronu prošlo mnoho studentů, inženýrů, operátorů, vědců a dalších pracovníků, každý z nich se podílel na vývoji naší laboratoře.

Nové výzkumné směry a projekty velkého národního i mezinárodního významu řešené v Laboratoři Tandetronu

Jedním z klíčových projektů je **AMULET (Advanced MULTiscale materials for key Enabling Technologies)**, který je řešen v období let 2024–2028. Tento projekt se zaměřuje na pokročilé inženýrství víceškálových materiálů od subnanometrového designu až po integraci do funkčních architektur pro reálné využití v klíčových nosných technologiích. Laboratoř Tandetronu se podílí na výzkumu víceškálového inženýrství pokročilých materiálů, použití iontových svazků pro vytváření komplexních hierarchic-

kých systémů na mikro a nano úrovni s aplikacemi v senzorice, mikroelektronice a optice.

Dalším významným projektem řešeným v období let 2024–2028 je **FerrMion (Feroické multifunkcionality)**. Ten zkoumá a vyvíjí technické aplikace feroických materiálů, jako jsou feroelastické slitiny s tvarovou pamětí či multiferoika kombinující jedinečné elektrické, magnetické a mechanické vlastnosti. Laboratoř Tandetronu se podílí na multiškálovém popisu a mikrostrukturním inženýrství feroických materiálů prostřednictvím ozařování energetickými iontovými svazky, které mohou měnit krystalickou strukturu a vnitřní morfologii slitin a tím zlepšit jejich mechanickou odolnost, případně feroelektrické vlastnosti.

Projekty EU Horizon

Laboratoř Tandetronu se podílí na několika projektech v rámci programu EU Horizon. Infrastrukturní projekt **RIANA (Research Infrastructure Access in Nanoscience & Nanotechnology)**, probíhající v období let 2024–2028, podporuje výzkum v oblastech nanověd a nanotechnologií. RIANA nabízí komunitě z těchto oblastí přístup k předním evropským výzkumným infrastrukturám a k pokročilým technikám relevantním pro syntézu, charakterizaci a analýzu materiálů.

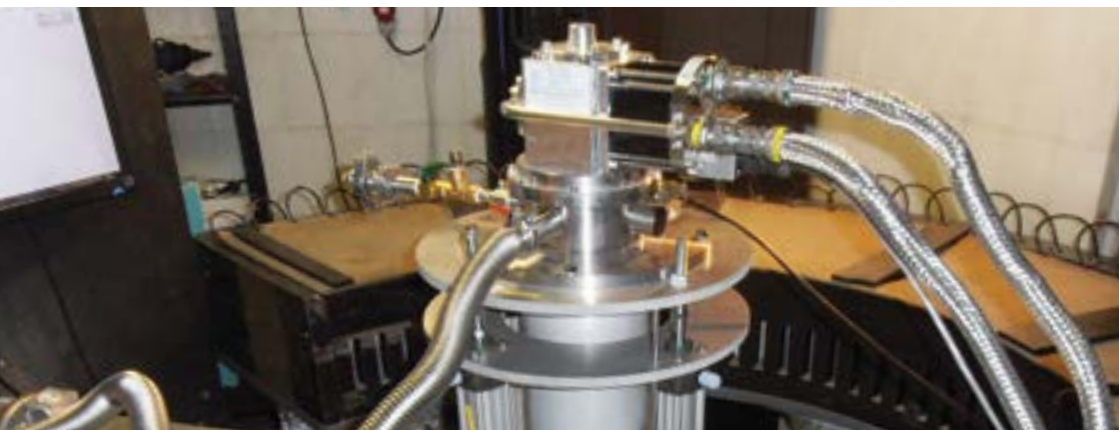
V současné době jsme také součástí dalšího významného projektu **ReMade@ARI (REcyclable MAterials DEVELOPMENT at Analytical Research Infrastructures)** řešeného v období let 2021–2027. Ten je zaměřen na vývoj inovativních, udržitelných materiálů pro klíčové komponenty v různých sektorech, jako jsou elektronika, baterie, vozidla, stavebnictví, obaly, plasty, textilie a potraviny. ReMade@ARI poskytuje vědcům analytické nástroje pro detailní zkoumání vlastností a struktury recyklovatelných materiálů.

8 | Dvě dekády rozvoje a využití Laboratoře neutronové fyziky



Pavel Strunz, Pavol Mikula, Jiří Vacík

Oddělení neutronových a iontových metod ÚJF



Neutrony mají specifické místo v portfoliu různých typů záření používaných ke studiu hmoty. Jejich vlastnosti a interakce – jak jaderné, tak i ty vycházející z vlnově-částicového dualismu – velmi dobře slouží od objevu neutronu v roce 1932 k poznání v oblasti jaderné fyziky. Navíc též již po mnoho desetiletí napomáhají materiálovému výzkumu a určování koncentrací prvků či izotopů v látkách v mnoha vědních oborech.

Laboratoř neutronové fyziky (dále též LNF) – která využívá jako neutronového zdroje výzkumného reaktoru středního výkonu LVR-15 provozovaného Centrem výzkumu Řež s.r.o. – je unikátní laboratoří v České republice, ale obdobnou laboratoří nedisponují, s výjimkou Německa, ani sousední státy. Navíc v posledních letech došlo ke snížení počtu neutronových zdrojů v Evropě jako celku, což zvýrazňuje důležitost LNF i v evropském kontextu.

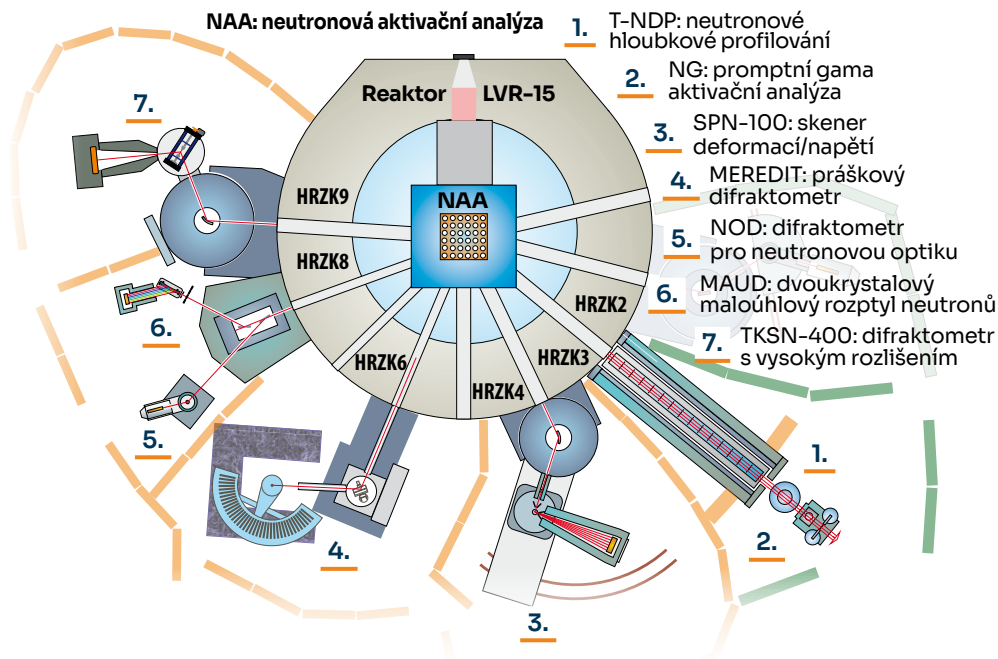
Vybavení Laboratoře neutronové fyziky poskytuje možnosti výzkumu ve dvou směrech. Za prvé je to využití jaderných analytických metod ke zkoumání koncentrací a koncentračních profilů zásadních prvků ve zkoumaných látkách (instrumenty s názvy T-NDP, NG, NAA). Za druhé je možné na difraktometrech laboratoře zkoumat technologicky důležité materiály pomocí neutronové difrakce (difraktometry SPN-100, MEREDIT, NOD, MAUD a TKS-400 pro specifická použití), viz Obr. 1. Tato zařízení používají jak výzkumníci z vědeckých skupin ústavu pro svůj vlastní výzkum, tak i externí vědecké skupiny v rámci otevřeného přístupu (Open Access) k vědeckým zařízením. Ozařování neutrony probíhá na horizontálních kanálech reaktoru LVR-15. Rozvoj a aplikace metody neutronové aktivční analýzy (NAA), která k ozařování využívá vertikální kanály reaktoru, jsou podrobněji popsány v samostatném příspěvku J. Kučery et al. *Aktivční a rentgenfluorescenční analýza*.

Specifickou součástí LNF je od roku 2010 Laboratoř nanomateriálů (LN). Jedná se o produkční a analytickou laboratoř, která vytváří fyzikálně, chemicky či technologicky zajímavé nanomateriály a zároveň je schopna tyto analyzovat několika ne zcela běžnými technikami. Navíc využívá neutronové metody dostupné v laboratoři. Hlavní pozornost je zaměřena na funkční nanomateriály, jako jsou tenké iontové baterie s pevným elektrolytem, binární a ternární kompozity s unikátními kombinacemi vlastností kovů a keramiky nebo polymerní membrány s nano- či mikro-póry s kontrolovanou průchodností.

Poslední dvě dekády navázaly na předchozí zaměření difrakční části LNF na oblast neutronové optiky, konkrétně na studium reflexních a fokusač-

ních vlastností elasticky ohnutých dokonalých monokrystalů a jejich využití při návrhu nových experimentálních zařízení využívající rozptylu termálních neutronů. Tato optika nalezla uplatnění u nás i ve světě hlavně v práškové difrakci, v malouhlovém rozptylu neutronů s vysokým rozlišením a při měření residuálních napětí v polykrystalických látkách. Neutro-

Instrumentace Laboratoře neutronové fyziky



▪ Obr. 1: Instrumentace Laboratoře neutronové fyziky umožňuje využití tří jaderně-analytických metod a pěti difrakčních technik. Zdrojem neutronů je výzkumný reaktor LVR-15 (Centrum výzkumu Řež s.r.o.). Využití: **NAA** (neutronová aktivační analýza): charakterizace nízkých koncentrací prvků pro biologii, biomedicínu, environmentální vědy, geologii, archeometrii, materiálové vědy atd.; **NG**: fotonové silové funkce, prvková analýza, případně tomografie; **T-NDP**: nedestruktivní analýza koncentračních profilů lehkých prvků; **SPN-100**: mapování makrodeformací v polykrystalických materiálech; **MEREDIT**: analýza fází (krystalografických, magnetických) a in situ zkoumání materiálů; **NOD**: testy neutronové optiky; **MAUD**: studie mikrostruktury (precipitace fází ve slitinách, porosita v keramikách atd.); **TKSN-400**: makro- a mikrodeformace v kovech, in situ termo-mechanické zkoušky. Zdroj: Archiv CANAM

nooptické prvky, zejména fokusující monochromátory, byly v rámci spolupráce poskytnuty kolegům v několika zahraničních laboratořích (GKSS Geeshacht, HMI Berlin, ILL Grenoble, KURRI Kumatori, Sapporo University, Hanaro Daejeon, Pinstech Pakistan, LAHN Argentina, FRM II Mnichov, Malaysian Nuclear Agency, Bangi, BATAN Indonesia).

Dvacet let činnosti Laboratoře neutronové fyziky do roku 2025 bylo zahrnováno vývojem technické základny, účastí ve významných projektech, včetně mezinárodních, i podstatnými vědeckými výsledky. O těchto počinech budou pojednávat následující sekce.

Laboratoř si udržela poměrně stabilní personální obsazení, kdy každý z výše zmíněných instrumentů měl a má kontinuálně svého vědeckého



▪ Obr. 2: Neutronový práškový difraktometr MEREDIT v uspořádání s kryostatem. Foto: Archiv CANAM

pracovníka zodpovědného za jeho provoz (instrument responsible). Zařízení LNF též napomohla při vzdělávání studentů a vzniklo díky nim několik disertačních prací.

| Technická modernizace laboratoře

V posledních dvou dekáдах došlo k výraznému vylepšení technické základny LNF. Zřejmě nejzásadnějším rozšířením bylo pořízení neutronového difraktometru MEREDIT v roce 2007 a jeho vybavení kryostatem o pár let později. Difraktometr využil některé prvky, zejména multidetektor, z neutronového difraktometru od reaktoru ve švédském Studsviku uzavřeného v roce 2005. Práškový difraktometr MEREDIT (Obr. 2) slouží vědecké komunitě komplementárně k standardním rentgenovým difraktometrům, což v sobě obsahuje i unikátní možnost studia magnetických struktur.

Velmi podstatné vylepšení znamenala koncem druhé dekády století instalace nového zrcadlového neutronovodu od SwissNeutronics AG na bázi superzrcadel s povrchem tvořeným aperiodickými dvojrstvami Ni/Ti, který nahradil starý, již radiačně degradovaný neutronovod z 90. let předchozího století. Nový neutronovod umožnil

„Laboratoř neutronové fyziky, která využívá jako neutronového zdroje výzkumného reaktoru středního výkonu LVR-15 (CVŘ s.r.o.) je unikátní laboratoř v ČR, ale obdobnou laboratoři nedisponují, s výjimkou Německa, ani sousední státy.“

téměř řádové zvýšení toku termálních a epitermálních neutronů pro dvě jaderné analytické metody – Neutron Depth Profiling (NDP) a Prompt Gamma Activation Analysis (PGAA). NDP spektrometr byl instalován u ústí nového neutronovodu a je tvořen multifunkčními vakuovými komorami vybavenými několika typy detekčních systémů.

Zásadní bylo též vybavení tří difraktometrů novými 2D polohově citlivými detektory. To umožnilo rychlejší a spolehlivější sběr dat pro SPN-100 dif-

raktometr pro měření reziduálních napětí v materiálech, pro MAUD malouhlový difraktometr a pro TKS-400 difraktometr pro studium deformačních mechanismů v kovech. SPN-100 difraktometr byl vybaven oscilačním radiálním kolimátorem pro lepší definování skenovaného objemu materiálu a robotickým ramenem pro přesnější skenování vzorku a pro jeho polohování ve třech různých směrech.

„Zcela zásadní pro vybavení a chod laboratoře bylo zařazení zastřešující ústavní infrastruktury CANAM na tzv. Cestovní mapu českých výzkumných infrastruktur v letech 2012 až 2019.“

V laboratoři nanomateriálů bylo postupně instalováno několik základních experimentálních zařízení, které dohromady tvoří sestavu umožňující přípravu tenkých vrstev nanomateriálů: experimentální depoziční systém typu UNIVEX, systém deposice tenkých vrstev iontovým naprašováním (Duoplasmatron),

systém pro přípravu, modifikaci a implantaci tenkých vrstev iontovými svazky nízkých energií (Low Energy Ion Facility – LEIF) a dva systémy pro přípravu tenkých epitaxních vrstev z molekulárních svazků (Molecular Beam Epitaxy) – MBE I (2012) a MBE II (2024), přičemž MBE II je specificky zaměřen na přípravu tenkých hybridních vrstev a feroických nanočástic. Pro specifickou analýzu vlastností tenkých vrstev byly zavedeny diagnostické metody mikroskopie atomových sil (Atomic Force Microscopy – AFM) a difrakce odražených rychlých elektronů (Reflection High Energy Electron Diffraction – RHEED).

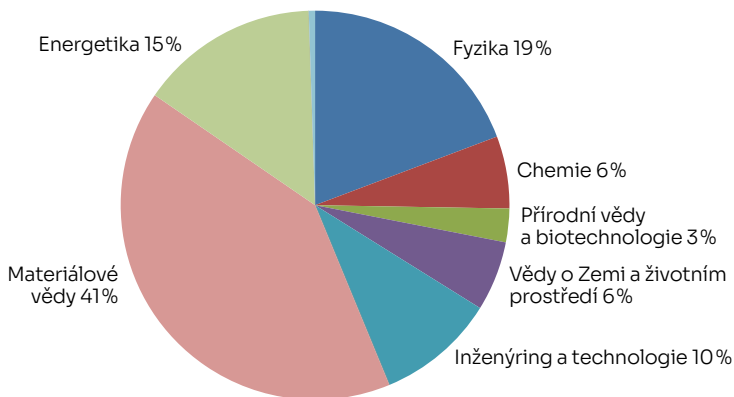
Kolega P. Mikula studoval disperzní vícenásobné reflexe buzené v cylindricky elasticky deformovaných dokonalých krystalech, což přiblížilo možnost aplikace tohoto jevu pro produkci svazků neutronů s velmi přesně definovanou energií. V extrémním případě vícenásobné reflexe poskytuje neutronový svazek blízky parametrům rovinné vlny. Vysoce kolimovaný a monochromatický svazek průřezu několika čtverečních centimetrů lze také využít pro neutronovou radiografii.

V průběhu dvou dekád došlo také k výraznému softwarovému pokroku. Byl vytvořen jednotný základ pro ovládání difraktometrů. Kolega J. Šaroun úspěšně vyvinul a dále rozvíjí program pro Monte Carlo (MC) simulace neutronooptických prvků, který slouží široké neutronové komunitě k virtuálnímu testování a optimalizaci nových komponent difraktometrů či celých nově navrhovaných neutronových instrumentů. V mnoha případech byly u nás provedeny MC simulace pro experimentální neutronová zařízení budovaná v zahraničních laboratořích (např. ILL, FRM II, HZB).

Účast v projektech

Od roku 2004 se Laboratoř neutronové fyziky účastní infrastrukturních evropských projektů zaměřených na otevřený přístup (Transnational Open Access to Large-Scale Facilities) pro akademické uživatele k zařízením neutronové fyziky. Jednalo se o projekt NMI3 (Integrated Infrastructure Initiative for Neutron Scattering and Muon Spectroscopy) v rámci FP6 výzvy, následovaný pokračovacím projektem v rámci FP7. Později navázal podobný projekt SINE2020 (World Class Science and Innovation with Neutrons in Europe 2020) v rámci HORIZON 2020. Jako nedávný úspěch

Využití experimentálního času v oblastech výzkumu EU



■ Obr. 3: Podíl jednotlivých oborů na využití měřicího času na horizontálních i vertikálních kanálech v LNF. Zdroj: Archiv CANAM

je třeba zmínit, že laboratoř je od roku 2024 členem projektu NEPHEWS (Neutrons and Photons Elevating Worldwide Science) v rámci programu Horizon Europe. U tohoto projektu se zejména jedná o podporu uživatelů ze zemí s horším přístupem k neutronovým zdrojům. Mezi vybranými zeměmi s prioritním přístupem je jako přidružený stát EU též Ukrajina.

Zcela zásadní pro vybavení a chod laboratoře bylo zařazení zastřešující ústavní infrastruktury CANAM na tzv. Cestovní mapu českých výzkumných infrastruktur v letech 2012 až 2019. Financování LNF ze zdrojů MŠMT – více viz článek J. Dobeše v tomto sborníku – výrazně napomohlo k technickému rozvoji zmíněnému v předchozí sekci.

Každoročně poskytuje LNF okolo pěti set měřicích dnů (beam days) pro akademické uživatele v několika oborech. Mezi ty nejvíce zastoupené patří materiálové vědy, fyzika, energetika, strojírenství a technologie, chemie, vědy o Zemi a životním prostředí (Obr. 3). Uživatelé našich zařízení jsou z menší části interní (17 %), z větší externí. Jich je pak 39 % z České republiky a okolo 44 % ze zahraničí.

Od roku 2010 se pracovníci laboratoře zapojili do pre-konstrukční a konstrukční fáze Evropského neutronového spalačního zdroje (ESS) ve švédském Lundu. V jeho rámci dodá ČR do ESS neutronový difraktometr pro materiálový výzkum (viz článek P. Lukáše v tomto sborníku).

ÚJF se v roce 2022 stal členem evropského uskupení League of Advanced European Neutron Sources (LENS) sdružujícího zdroje neutronů poskytované pro výzkumné účely. To napomohlo – podobně jako členství v European Neutron Scattering Association od roku 1994 – zvýšení mezinárodní prestiže LNF.

V laboratoři se řešila řada vědeckých projektů podpořených GAČR. K nejvýznamnějším patřila v letech 2014–2018 účast na projektu Excelence GAČR „Multidisciplinární výzkumné centrum moderních materiálů“ (AdMat). LNF se zapojila i do mezioborové spolupráce mezi akademickými

kými ústavy v rámci Strategie AV21. Od roku 2024 je v rámci projektu FERRMION z prestižní výzvy Špičkový výzkum OP JAK studována v LNF problematika feroických kompozitů na nanoškále.

| Významné výsledky

Vlastní výzkum v laboratoři nebo i výzkum iniciovaný externisty, na kterém se ale vědci z LNF velmi významně podíleli, byl značně různorodý, což zcela odpovídá multidisciplinárnímu využití provozovaných zařízení neutronové fyziky. V oblasti výzkumu kovů neutronovou difrakcí byla LNF zaměřena na magnesiové slitiny a kompozity, slitiny s tvarovou pamětí, vysokotep-

„Každoročně poskytuje LNF okolo pěti set měřicích dnů pro akademické uživatele v několika oborech. Mezi ty nejvíce zastoupené patří materiálová věda, fyzika, energetika, strojírenství a technologie, chemie a vědy o zemi a životní prostředí.“

lotní slitiny, na techniku aditivní výroby (3D tisk) a na silně plastic-ky deformované materiály. Dominantním výzkumem na analytickém zařízení T-NDP byly vrstvy pro nové typy Li-ion baterií, nicméně metoda Neutron Depth Profiling (NDP) je v laboratoři využívána i při výzkumu v oblasti fundamentální fyziky, nových materiálů, biologických tkání či senzoriky. Metoda NAA byla nejvíce využívána v oborech

geologie, geochemie, geomykologie, kosmochemie, výzkum životního prostředí, zemědělství a výživa, kulturní dědictví, materiálový výzkum, jaderné technologie a také pro forenzní studie.

Za posledních zhruba 20 let působení laboratoře vznikla směs multidisciplinárních výsledků. Některé z těch podstatných jsou vyzdvíženy v následujících odstavcích.

Analýza rozložení lithia v ultratenkých lithium-iontových bateriích v pevné fázi

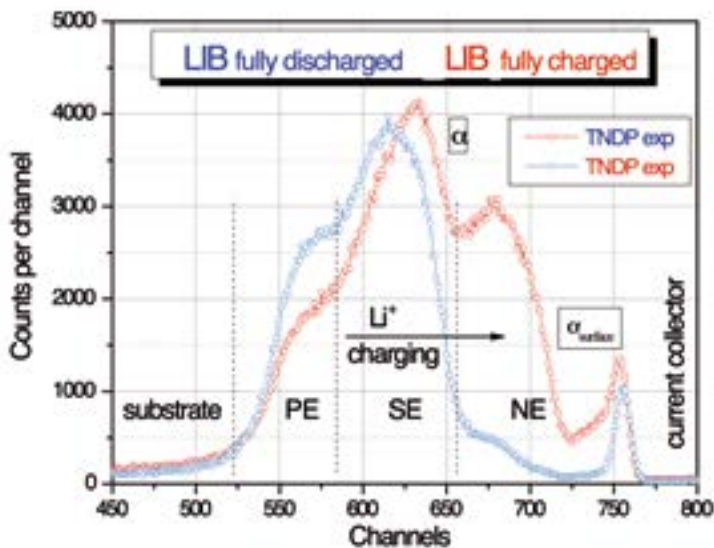
Efektivní dobíjecí baterie jsou klíčové pro rozvoj elektrifikace dalších ob-

lastí lidské činnosti i pro ukládání energie. Lithium iontové baterie s elektrolytem v pevné fázi patří v tomto směru mezi velmi slibné cesty, nicméně je na nich stále co zlepšovat, případně vyvíjet nové typy. Pomocí jaderné analytické metody NDP byla studována distribuce lithiových iontů v tenkém vzorku baterie v průběhu nabíjení a vybíjení. Velmi tenký (μm) vzorek baterie s pevným elektrolytem byl připraven pomocí magnetronového odprašování. Byla pozorována silná závislost rozložení lithia na stavu nabití tohoto funkčního vzorku Li-iontové baterie (Obr. 4). Výsledek potvrdil účinnost metody NDP pro měření rozložení atomů lithia přímo v průběhu nabíjení a vybíjení.¹

Výzkum římské ozdobné vojenské přilby z druhého století

Na difraktometru MEREDIT byly zkoumány fragmenty římské ozdobné vojenské přilby z druhého století našeho letopočtu. Přilbice byla nalezena při vykopávkách římského vojenského tábořiště Gerulata situovaného poblíž

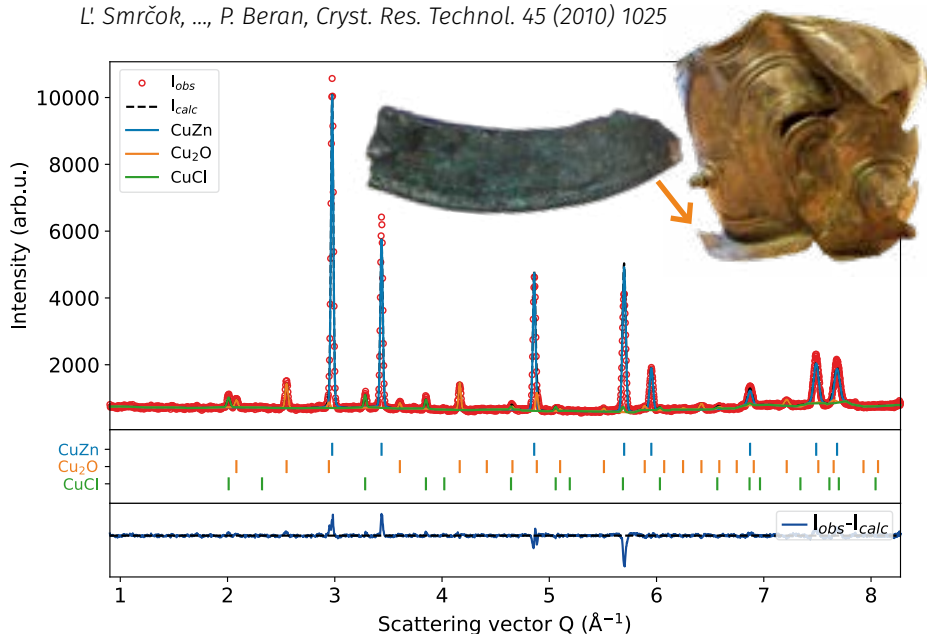
1 I. Tomandl, J. Vacík a další, *Radiation Effects and Defects in Solids* 175 (2020) 394



▪ Obr. 4: Porovnání spekter NDP pro plně nabitou a plně vybitou baterii.
Zdroj: Archiv CANAM

vesnice Rusovce (Slovenská republika). Nedestruktivní hloubková analýza pomocí neutronů umožnila získat informace o základním materiálu skrytém pod silnou vrstvou korozních produktů bez nutnosti jejího odstranění. Navíc lze analýzou korozních produktů samotných získat i další cenné informace o podnebí či půdním složení místa nálezů. Analýza vyvrátila prvotní domněnku, že přilbice je bronzová. Přilbice byla vyrobena z mosazi s obsahem zinku okolo 18%. Toto složení naznačuje, že byla vyrobena cementací, výrobním procesem běžně používaným Římany, a odpovídá podobným římským mosazným nálezům z období prvního století našeho letopočtu. Difrakční analýza (Obr. 5) povrchové korozní vrstvy ukázala, že její hlavní složky jsou kuprit (Cu_2O) a nantokit (CuCl). Tyto minerály byly identifikovány také jako součásti korozních produktů různých bronzových artefaktů od byzantských mincí po švédské ozdoby a jsou hlavními produkty koroze měděných slitin.²

2 L. Smrčok, ..., P. Beran, *Cryst. Res. Technol.* 45 (2010) 1025



■ Obr. 5: Neutronový difraktogram z měření přilby (přilba vpravo nahoře) a ukázka jejího fragmentu (nahore uprostřed). Foto: Archiv CANAM

Příspěvek ke studiu primordiální nukleosyntézy – účinný průřez reakce ${}^7\text{Be}(n,p)$

Oblasti kosmologie se dotklo zkoumání účinného průřezu reakce ${}^7\text{Be}(n,p)$ s termálními neutrony, která hraje důležitou roli v primordiální nukleosyntéze. Její účinný průřez byl studován několika skupinami ve světě, avšak s různými výsledky. Na svazku termálních neutronů v LNF bylo provedeno nové mimořádně náročné měření této reakce. V zahraniční spolupráci s PSI, kde byl izotop ${}^7\text{Be}$ vyroben, a s CERN ISOLDE, kde byl naimplantován do tenké kovové fólie, byl připraven vysoce radioaktivní terčik o aktivitě $\approx 1 \text{ GBq}$. Získaná hodnota účinného průřezu $\sigma[{}^7\text{Be}(n,p_0)] = 43800 \pm 1400 \text{ barnů}$ souhlasí v rámci experimentálních chyb s některými dříve publikovanými daty, ale výrazně se liší od jiných studií. Předpokládá se, že takovéto výsledky byly ovlivněny náročností experimentu s radioaktivními terčiky ${}^7\text{Be}$.³

Vysokoteplotní mikrostruktura Co-Re slitin pro aplikace v energetice

Ve spolupráci s kolegy z TU München a TU Braunschweig jako součást hledání materiálů pro lopatky plynových turbín odolných proti extrémním teplotám až 1200°C byla studována vysokoteplotní mikrostruktura nových Co-Re slitin. Ty mají potenciál zvýšit účinnost turbín, která roste se zvyšováním pracovní teploty. V našem konkrétním případě pomohl experiment rozptylu neutronů prováděný in situ odhalit vysokoteplotní mikrostrukturu. Byly testovány legovací příměsi poskytující slitině kujnost a pevnost při provozní teplotě. Karbidy tantalu se ukázaly být vhodnou vysokoteplotní zpevňovací fází až do provozu při teplotě 1200°C . Je též známo, že kujnost slitiny je značně zvýšena příměsí bóru. Neutronový rozptyl prokázal, že tato příměs není překážkou pro vysokoteplotní stabilitu slitiny.⁴

Asymetrická pomalá dynamika skyrmionové mřížky v MnSi

Podle teoretických studií jsou excitace systému s nejnižší energií tzv. „phononové“ módy skyrmionové mřížky. Očekává se, že jejich disperzní křivky

3 I. Tómadl a další, *Phys. Rev. C* 99 (2019) 014612

4 L. Karge, ..., P. Strunz a další, *Acta Materialia* 132 (2017) 354; P. Strunz a další, *Met. Mater. Int.* 24 (2018) 934

pro složku propagačního vektoru (q_z) rovnoběžnou s magnetickým polem budou asymetrické podél strun skyrmionů, což naznačuje, že magnetické excitace mají různé závislosti q podél $+q_z$ a $-q_z$. Takovou předpověď lze testovat pouze technikou spin-echo, která je citlivá na tyto nízkoenergetické excitace. Studie ukazuje, že asymetrická magnetická disperze je skutečně přítomna ve skyrmionovém stavu. Zjištění přispívají k hlubšímu pochopení skyrmionů jako exotických magnetických stavů s potenciálními aplikacemi při ukládání dat s vysokou hustotou a při kvantových výpočtech. Studie publikovaná v

„V laboratoři bylo postupně instalováno několik základních experimentálních zařízení, které dohromady tvoří sestavu umožňující přípravu tenkých vrstev nanomateriálů.“

Nature Physics vznikla ve spolupráci několika institucí z Japonska, Velké Británie, Švédska a České republiky. Spoluautor z LNF byl hlavním navrhovatelem neutronového experimentu a podílel se na plánování a provádění neutronových měření dynamiky skyrmionové mřížky v monokrystalu MnSi na zařízení IN15 (spin-echo) v ILL (Grenoble, Francie).⁵

Atomová struktura a magnetické uspořádání na dlouhou vzdálenost kvazikrystalových aproximantů v systému Tb-Au-Si

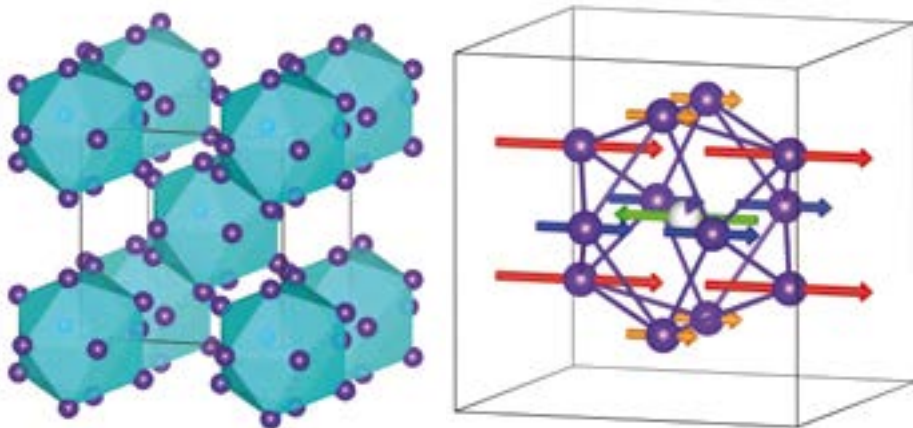
Kvazikrystaly jsou struktury, které jsou v 3D prostoru uspořádané, ale neperiodické. Strukturu kvazikrystalů lze naopak popsat jako periodickou za použití vyšších dimenzí (4D–6D), tedy v hyperprostoru. K určení jejich celkového uspořádání je však nutné znát jejich lokální strukturu. Ta není přímo dostupná a je nutno si vypomoci tzv. kvazikrystalovými aproximanty. Kvazikrystalové aproximanty jsou běžné periodicky uspořádané krystaly, které mají podobné chemické složení a lokální strukturu (popřípadě atomové klastry) jako jejich odpovídající kvazikrystaly. Doposud nebyly objeveny magnetické kvazikrystaly. Vložením prvků vzácných zemin s volnými nepárovými elektrony do struktury však byly připraveny kvazi-

krystalové aproximanty s magnetickým uspořádáním. Pomocí neutronové práškové difrakce byl studován jeden z takových systémů, ikosaedrický kvazikrystalový aproximant o složení $\text{Tb(14)Au(70)Si(16)}$. Experiment byl proveden na difraktometru MEREDIT při pokojové teplotě a za použití kryostatu při 4 K, tedy pod teplotou magnetického uspořádání, které nastává pod 9 K. V kombinaci s rtg. difrakcí na monokrystalu se podařilo popsat nejen atomovou strukturu této sloučeniny, ale také vůbec poprvé popsat magnetické uspořádání v kvazikrystalovém aproximantu (Obr. 6). Magnetická struktura $\text{Tb(14)Au(70)Si(16)}$ je tvořena feromagneticky uspořádanými spiny elektronů na ikosaedricky koordinovaných Tb atomech. Ve středu tohoto feromagnetického ikosaedru pak leží antiferomagneticky položený moment částečně obsazené pozice Tb.⁶

Výzkum fotonové silové funkce metodou dvoukrokové gama kaskády

Možné posílení fotonové silové funkce (tj. zprůměrované pravděpodobnosti přechodů gama s určitou energií a multipolaritou) pro přechody

6 G. Gebresenbut, ..., P. Beran a další, *J. Phys.-Condens. Matter* 26 (2014) 322202



• Obr. 6: Vlevo jsou znázorněny ikosaedry atomů Tb umístěné v základní strukturální buňce. Vpravo pak je znázorněné uspořádání magnetických momentů na atomech Tb vedoucích ke kvazi-ferromagnetickému uspořádání na dlouhou vzdálenost v kvazikrystalovém aproximantu $\text{Tb(14)Au(70)Si(16)}$. Foto: Archiv CANAM

s velmi nízkou energií publikované dříve skupinou norských a amerických fyziků mohlo mít vážný důsledek pro pochopení rozpadu vzbuzených stavů jader s excitační energií 5–8 MeV. Proto ověření, případně vyvrácení, tohoto jevu představuje významný badatelský příspěvek v oblasti nízkoenergetické jaderné fyziky. V LNF bylo na svazku termálních neutronů provedeno měření reakce $(n, \gamma\gamma)$ na terčiku ^{95}Mo . Metodou dvoukrokových kaskád se testovaly různé varianty fotonových silových funkcí. Na rozdíl od experimentů provedených v Oslo pro reakci s lehkými nabitými částicemi a v Budapešti pro reakci $(n, \gamma\gamma)$, ve kterých bylo dříve publikované posílení silové funkce pozorováno, nebylo po analýze obdržených γ spekter uvedené posílení potvrzeno. Naopak experimentální data z LNF jsou v daleko lepším souladu s doposud přijímanou teorií rozpadu vzbuzených stavů jader.⁷

Reziduální napětí v materiálech vyrobených aditivní technologií

Využití neutronové difrakce pro měření reziduálních napětí v materiálech pomáhal v první dekádě tisíciletí v laboratoři nastartovat M. Vrána. Za čtvrtstoletí byla metoda využita v množství měření testovacích vzorků i technologických komponent.

Jako příklad řady studií týkajících se komponent připravených aditivní technologií (3D tisk) uvádíme měření reziduálních napětí v nerezové oceli 316L vyrobené pomocí Powder Bed Fusion (LPBF). V práci iniciované kolegy z VŠB Ostrava byl studován vliv smykového namáhání na strukturu a mechanické vlastnosti. LPBF je špičková aditivní výrobní technika s významnými výhodami oproti tradičním metodám, ale také přináší problém s vysokým zbytkovým napětím. Tato napětí, která mohou zhoršit vlastnosti materiálu, lze modifikovat optimalizací parametrů LPBF. Následné rotační kování snižuje poréznost a zlepšuje mechanické vlastnosti. Nicméně jeho vliv na reziduální napěťový stav je též třeba ověřit. Zbytková napětí před a po rotačním kování byla analyzována neutronovou difrakcí. Interpretace výsledků poskytla klíčové poznatky o tvorbě zbytkového napětí a jeho sni-

žování, což má významný dopad na odolnost obrobků vyrobených pomocí LPBF.⁸

Vliv koncentrace gadolinia na rychlost šíření dvojčat v hořčíkových slitinách

Dlouhodobá a úzká spolupráce LNF s kolegy z Matematicko-fyzikální fakulty UK přináší synergické efekty použití více různých sond a metod, které ve spojení poskytují mnohem podrobnější a širší obraz o deformačních procesech v materiálu. Při zkoumání vlivu gadolinia na dvojčatění v hořčíkových slitinách byly rozšířeny dřívější studie kombinující difrakční metody s akustickou emisí a elektronovou mikroskopií také o využití optické mikroskopie, EBSD a pokročilých výpočetních metod pro zpracování obrazu a materiálové modelování. Tým z LNF přispěl k vyhodnocení snímků ultra-vysokorychlostních kamer, včetně zlepšení kvality snímků prostřednictvím různých přístupů, stejně jako k identifikaci a měření růstu dvojčat. Studie představuje průkopnický experiment, který poprvé poskytuje kvantitativní pohled na rychlost šíření dvojčat v polykrystalických slitinách hořčíku. Zjištění posouvají pochopení jednoho z primárních deformačních mechanismů v těchto materiálech. Zejména byly rozšířeny možnosti přímého pozorování deformačních procesů v reálném čase použitím ultravysokorychlostní kamery a vylepšením kvality snímku pomocí algoritmu hlubokého učení. Ve spojení se simulacemi molekulární dynamiky byla zkoumána a modelována souhra mezi rychlostí šíření dvojčat a obsahem Gd. Výsledky byly později potvrzeny i dalšími výzkumníky se zdůrazněním relevance našich zjištění.⁹

Samouspořádávající se nanokompozity kobalt-fulleren

Systematicky bylo studováno chemické a fázové složení a magnetické vlastnosti filmů Co_xC_{60} ($0 < x < 50$). Vrstvy byly připraveny v LN fyzikálním naprášením z dobře kontrolované smíšené páry na substráty Si(100) s ná-

8 L. Kunčická, ..., G. Németh a další, *Additive Manufacturing* 59 A (2022) 103128

9 K. Máthis, ..., G. Farkas, G. Németh a další, *Journal of Alloys and Compounds* 948 (2023) 169635

slednou expozicí na vzduchu. Ve vrstvách byly pozorovány detaily uspořádaných nanostruktur s projevem nanomagnetismu, které se vyvíjely v závislosti na postupném zvyšování obsahu kobaltu. To umožňuje objasnit podstatu samoorganizace směsi. V samouspořádávajících se Co_xC_{60} nanokompozitních filmech vystavených po depozici působení vzduchu byl též pozorován výjimečný magnetický efekt. Magnetické hysterezní smyčky měřené za nízkých teplot pod blokovací teplotou a při režimu ochlazení v poli vykázaly vertikální posun laditelný pomocí Co koncentrace x . Bylo ukázáno, že posun smyčky je způsoben výměnnou interakcí Co spinů na rozhraní Co-CoO vzniklou z důvodu formování Co/CoO klastrů ve filmu. Tento efekt otevírá prostor zajímavému využití nanokompozitů Co_xC_{60} .¹⁰

Výhled

Laboratoř neutronové fyziky je živou větví košatého stromu laboratoří Ústavu jaderné fyziky. Zůstává čínorodou sestavou unikátních výzkumných metod a vědeckých i technických pracovníků udržujících je v chodu, vylepšujících je a zejména je využívajících ve špičkové vědě. Předpokládáme mnoho dalších let její činnosti, která přinese jak externím uživatelům, tak i interním výzkumníkům řadu důležitých zjištění ve značné části výše zmíněných oborů. A o to jde v laboratoři především – o rozšíření poznání, které může přinést nové obzory a výhledově i snadnější život pro Homo sapiens sapiens.

10

V. Lavrentiev a další, *Carbon* 103 (2016) 425; V. Lavrentiev a další, *Nanotechnology* 28 (2017) 125704

o | Aktivační a rentgen-fluorescenční analýza



Jan Kučera, Jiří Mizera, Jan Kameník,
Jan Borovička, Marek Fikrle

Oddělení neutronových a iontových metod ÚJF

Rozvoj a využívání metod neutronové aktivační analýzy (NAA), fotonové aktivační analýzy (FAA) a rentgenfluorescenční analýzy (RFA) má v ÚJF dlouholetou tradici pro výhodné vlastnosti při stanovení hlavně stopových a ultra-stopových koncentrací prvků v mnoha typech materiálů. Již počátkem 70. let minulého století svěžila americká NASA pracovníkům ÚJF, jako jednomu z mála pracovišť na světě, vzorky měsíčních hornin z expedic Apollo 11 a Apollo 12 k analýze metodou nedestrukční, tzv. instrumentální NAA (INAA). Na tehdejší úspěchy jsme v ÚJF navázali zejména po příchodu skupiny NAA z ÚJV, Řež (po dvouletém intermezzu v Českém ekologickém ústavu) v r. 1994. Po převzetí mikrottronové laboratoře od FJFI ČVUT v r. 2003 jsme ve zvýšené míře začali využívat mikrottron MT25 jako zdroj energetických fotonů pro metodu FAA. Také pro metodu RFA jsme získali nový zdroj budicího záření místo dřívějších radionuklidových zdrojů, což přispělo k rozvoji této metody. Kromě rozšíření personálních kapacit přispěla k rozvoji aktivit ve využívání uvedených metod i postupná obměna vybavení pro spektrometrické měření záření gama a modernizace nebo vybudování nových zařízení pro ozařování v reaktoru LVR-15 a na mikrottronu MT25.

Vývoj instrumentace a metodiky

Nahradili jsme zastaralou mikroprocesorovou řídicí jednotku pro ovládání potrubní pošty (PP) pro krátkodobé ozařování v jaderném reaktoru LVR-15 pro účely NAA. Dedikovaný program v PC nyní řídí a dokumentuje nejen ozařování vzorků, ale i jejich následné gama-spektroskopické měření. Současně byly všechny elektromagnetické ventily podtlakového systému PP přemístěny z reaktorové haly do laboratoře a doplněny manuálními ventily pro rychlý havarijný návrat ozařovacího pouzdra v případě poruchy. Modernizace tak zvýšila nejen komfort pro obsluhu PP, ale významně i jadernou bezpečnost provozu PP.

Využití mikrotronu MT25 pro FAA se většinou omezuje na stanovení prvků tvořících při aktivaci energetickými fotony střednědobé a dlouhodobé radionuklidy. Výjimkou byl v 80. letech minulého století rozsáhlý projekt prospekce zlatonosných rud, pro nějž byla pro stanovení zlata přes krátkodobý izotop ^{197m}Au instalována PP. Navázali jsme na tento úspěšný projekt vývojem a instalací nové automatizované PP s dobou transportu 6 s, čímž jsme rozšířili portfolio prvků stanovitelných metodou FAA především o hlavní prvky horninových materiálů.

„Již počátkem 70. let minulého století svěřila k analýze americká NASA pracovníkům ÚJF, jako jednomu z mála pracovišť na světě, vzorky měsíčních hornin z expedic Apollo 11 a Apollo 12.“

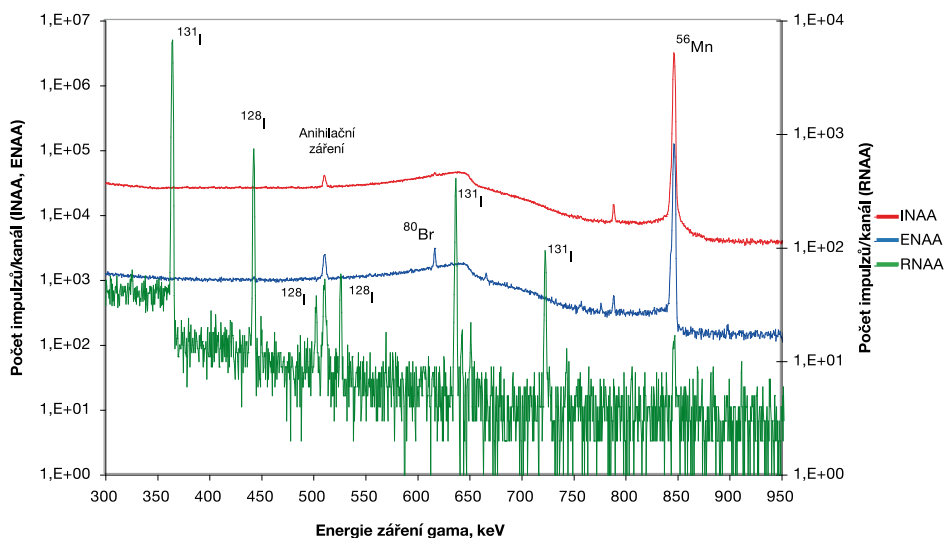
Pro metodu RFA jsme získali nový spektrometr SPECTRO MIDEX vybavený rentgenkou s Mo anodou jako excitačním zdrojem a Si driftovým detektorem s elektrickým Peltierovým chlazením. Spektrometr je vybaven motorizovaným XYZ stolkem na vzorky, jenž umožňuje skenování a mapování různě velkých ploch vzorku v závislosti na velikosti použitého kolimátoru. Prostor mezi vzorkem a detektorem může být proplachován He, což dovozuje stanovení i prvků s nižším protonovým číslem (Na, Mg), jejichž stanovení v normální atmosféře není možné.

V oblasti metodiky jsme zavedli k_0 standardizaci v metodě nedestrukční, instrumentální NAA (k_0 -INAA), která vede ke zvýšení efektivity analýz, protože nevyžaduje současné ozařování a měření standardů všech stanovených prvků jako při relativní standardizaci. Kombinací několika režimů ozařovací, vymírací a měřicí doby lze stanovit až 65 prvků v jednom vzorku. Vypracovali jsme několik nových postupů pro stanovení prvků metodou INAA. Porovnali jsme meze detekce (LOD – limit of detection) a spolehlivost výsledků stanovení Te ve vzorcích aerosolů na teflonových filtrech a v promývacích roztocích třemi variantami metody INAA. Zjistili jsme, že k nejlepším výsledkům vede měření dceřiného produktu ^{131}I , který vzniká jadernou reakcí $^{130}\text{Te}(n,\gamma)^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I}$. Stanovení stopových koncentrací F v geologických, environmentálních a biologických materiálech je při použití klasických analytických metod obtížné. Proto jsme vypracovali metodu INAA založenou na ozařování rychlými neutrony získanými na cyklotronovém generátoru reakcí $p(19\text{ MeV}) + \text{Be}$ a měření ^{18}F vznikajícího reakcí $^{19}\text{F}(n, 2n)^{18}\text{F}$. Tento radionuklid rovněž vzniká v metodě IFAA reakcí $^{19}\text{F}(\gamma, n)^{18}\text{F}$.

Analytické možnosti metody FAA jsme výrazně rozšířili vývojem postupů pro stanovení prvků tvořících krátkodobé radionuklidy, z nichž některé emitují pouze nespécifické anihilační záření 511 keV. Vyvinuli jsme metody pro stanovení F, N a O a aplikovali je při analýze různých materiálů. Instalace nové PP na mikrotroonu MT25 pro rychlý transport vzorku umožnila vyvinout a úspěšně otestovat nedestruktivní metodu IFAA pro základní geochemickou prvkovou charakterizaci („silikátovou analýzu“). Tato metoda může, stejně jako obdobná krátkodobá varianta INAA, doplnit nebo zastoupit použití konvenčních metod. Výhodou oproti INAA je možnost analýzy větších, a tedy reprezentativnějších vzorků.

Nejcitlivější variantou metody NAA je radiochemická NAA (RNAA), v níž se vyseparují jednotlivé radionuklidy nebo jejich skupiny vzniklé aktivací neutrony. Lze tak dosáhnout LOD až na hladině sub-ng g^{-1} pro řadu prvků. Proto jsme této variantě věnovali značnou pozornost i v nedávné době. K dříve vypracovaným metodám RNAA pro stanovení 17 prvků jsme v posledních letech přidali nové postupy pro stanovení dalších prvků. Jednalo

se o stanovení Ag, Cs, Rb, Re, Si a 13 prvků vzácných zemin. Pro stanovení Ag v biologických materiálech jsme zvolili srážení AgCl v posledním separačním kroku a dosáhli jsme LOD na úrovni ng g^{-1} , o více než jeden řád nižší než v nedestrukční metodě při selektivním ozařování epitermálními neutrony (metoda ENAA). Pro stanovení prvků vzácných zemin v biologických a geologických materiálech jsme rovněž použili srážecí metodu (separaci štavelanů po předcházející izolaci uhličitánů a hydroxidů), zatímco pro stanovení Cs a Rb jsme použili selektivní sorpci na fosfomolybdenanu amonném. Jód patří mezi prvky obtížně stanovitelné klasickými analytickými metodami. Proto jsme porovnali možnosti stanovení jódu v biologických vzorcích dvěma nedestrukčními postupy (INAA, ENAA) a také metodou RNAA založenou na selektivní extrakci elementárního jódu. Metodou RNAA jsme dosáhli nejnižších hodnot LOD na úrovni $0,5 \text{ ng g}^{-1}$ z důvodů, které jsou zřejmé z Obr. 1 – snížením pozadí způsobeného aktivací interferujících radionuklidů.



▪ Obr. 1: Spektra záření gama při stanovení I metodami INAA, ENAA a RNAA ve vzorku NIST SRM-1575 Pine Needles (^{128}I – analytický radioizotop, ^{131}I – radioaktivní stopovač, ostatní píky – nečistoty). Zdroj: Archiv ONIM

Testovali jsme také tři nové postupy RNAA pro stanovení ultrastopových koncentrací Re v biologických a environmentálních vzorcích. Všechny testované metody poskytly vysoké a dobře reprodukovatelné výtěžky a LOD v sub-ng g⁻¹ oblasti; dvě metody s kapalinovou extrakcí vedly k nejvyšší radiochemické čistotě vyseparovaného Re, extrakce v pevné fázi byla pracovně nejjednodušší. Ve spolupráci s americkým National Institute of Standards and Technology (NIST) jsme vypracovali unikátní postup RNAA pro stanovení Si v biologických vzorcích destilací SiF₄ a následném měření záření β radionuklidu ³¹Si kapalinovou scintilační spektrometrií, což vyžadovalo vysokou radiochemickou čistotu vyseparovaných frakcí. Společným rysem postupů RNAA pro stanovení prvků vzácných zemin, Ag, Cs, I, Rb, Re, a Si bylo použití námi zavedeného postupu pro rozklad biologických a geologických vzorků alkalicko-oxidačním tavením vzorků ve směsi Na₂O a NaOH, který je podstatně rychlejší než jiné metody rozkladu, přičemž jsme dosáhli výtěžků vyšších než 95 % pro více než 20 prvků. Můžeme konstatovat, že v oblasti použití RNAA jsme se stali jednou z mála laboratoří na světě, která má vypracované postupy pro velký počet prvků a je stále schopna tyto analýzy provádět.

| Aplikace v různých oborech vědy a techniky

Životní prostředí

Před zhruba 20 lety jsme použili metodu INAA pro studium prvkového složení atmosférických aerosolů z předměstí Prahy. Nejvyšší obohacení prvků S, As, Se, Sb proti složení částic pocházejících z eroze zemské kůry jsme zjistili v jemné frakci. Toto znečištění většinou pocházelo ze spalovacích procesů, a proto jsme studovali ve spolupráci s ÚCHP AV ČR i složení aerosolů ze spalování severočeského hnědého uhlí bez nebo s přídavky vápence či hašeného vápna. Tyto přídavky vedly k celkovému snížení emisí a k významnému snížení obsahu řady prvků, např. S, As, Sb v nejjemnějších částicích aerosolů.

V rámci sledování imisí spojených se zprovozněním pražského tunelového komplexu Blanka jsme analyzovali vzorky prachu a aerosolů odebíra-

ných v navazující ulici V Holešovičkách před a po zahájení provozu tunelu. Prvková analýza půdních lipidů z lokalit v Krkonošském národním parku prokázala jejich vhodnost jako citlivých biogenních indikátorů poškození ekosystému dlouhodobou kyselou atmosférickou depozicí. Dále jsme studovali prvkové složení fytolitů, které mají významný potenciál pro paleobotanický, paleoekologický a archeologický výzkum.

Prvky vzácných zemin, Th a U jsme stanovili metodami INAA a RNAA v půdách a zemědělských plodinách pěstovaných v okolí závodu na výrobu superfosfátu v souvislosti s možnou kontaminací životního prostředí (ŽP) uvedenými prvky. Výsledky ukázaly na nevýznamnou kontaminaci lokálně pěstovaných plodin v souladu s literaturou.

Ke kontrole výsledků stanovení Hg v kontaminovaných půdách metodou atomové absorpční spektrometrie jsme použili metodu RNAA. Vzorky pocházely z okolí spalovny komunálního odpadu u Hradce Králové, bývalého závodu na výrobu fungicidu fenylrtuti u Příbrami a bývalého dolu na cinabarit (HgS) v lokalitě Jedová Hora u Hořovic. Ve všech případech jsme našli dobrou shodu výsledků obou metod a také přetrvávání znečištění po dlouhou dobu. Výroba fenylrtuti skončila na konci 80. let minulého století, důl na HgS byl uzavřen v 60. letech 19. století. Během tak dlouhé doby může docházet i k transformaci anorganických forem Hg na pro člověka více toxickou formu methylrtuť.

V rámci infrastruktury CANAM nebo bilaterálních dohod jsme se zabývali i znečištěním ŽP v zahraničí. Metodu INAA jsme použili pro stanovení až 46 prvků ve vzorcích ŽP a zemědělských plodinách z oblasti severního Gondaru v Etiopii známé zvýšeným výskytem chorob pohybového aparátu, poruch zraku, sluchu a mentální retardace. Výsledky ukázaly silnou kontaminaci obilovin terigenními prvky, zejména hliníkem. Pravděpodobná je i inhalace aerosolů při spalování uhlí s vysokým obsahem aluminosilikátů (jílů) na vnitřních otevřených ohništích. Zvýšený příjem hliníku je rizikovým faktorem pro rozvoj neurodegenerativních onemocnění. Metodou INAA jsme stanovili až 36 prvků v lignitu z povrchového dolu v lokalitě Afşin-E-

Ibistan v jihozápadním Turecku, který se spaluje v přilehlých dvou elektrárnách s celkovým výkonem 2795 MW. Nalezli jsme zvýšené koncentrace řady toxických prvků. INAA jsme rovněž použili pro analýzu půd a biomonitorů znečištění ovzduší v několika lokalitách v Istanbulu. Z výsledků stanovení až 26 prvků jsme zjistili, že z testovaných 3 druhů biomonitorů je listí lípy stříbřité (*Tilia argentea*) nejvhodnější pro monitorování znečištění ovzduší v městské aglomeraci. Jiný biomonitor – tkáň

„Výsledky přinesly nové poznatky o chemii telluru při havárii jaderného reaktoru a šíření radiotoxického ^{132}Te a jeho dceřiného produktu ^{132}I .“

dvou druhů ryb – jsme využili pro zjištění kontaminace řeky Mara v Tanzánii po průsaku odkalovací nádrže z povrchového zlatého dolu. Z výsledků naší metody INAA a rentgenfluorescenční analýzy provedené na univerzitě v Dar es Salaamu jsme zjistili, že tkáň bahníka (*Protopherus aethiopicus*) je lepším bioindikátorem kontaminace než tkáň

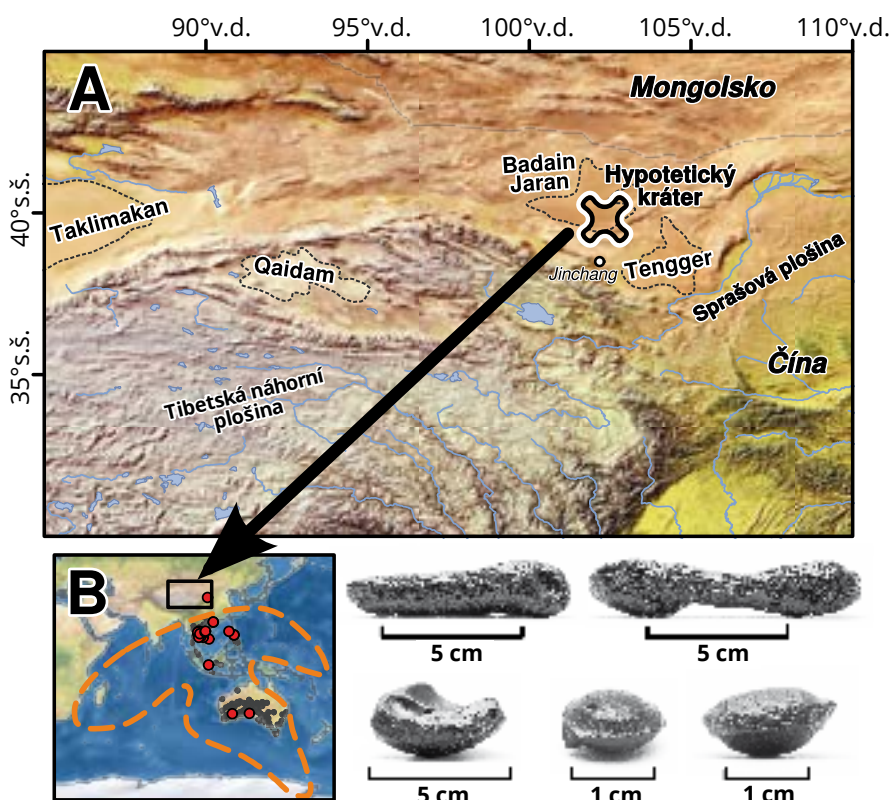
sumce (*Clarias mossambicus*), protože vykazovala vyšší koncentrace řady prvků v rybách ulovených na dolním toku řeky Mara (pod průsakem) než u těch z horního toku.

Geo- a kosmochemie

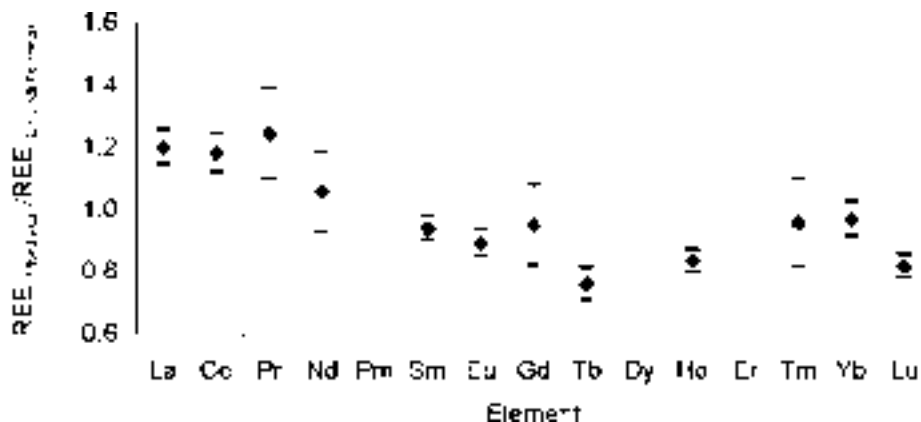
Aplikace NAA a FAA pro geochemickou charakterizaci vzorků hornin a minerálů v geochemickém a kosmochemickém výzkumu našla uplatnění v celé řadě projektů řešených ve spolupráci s domácími i zahraničními pracovišti. V tomto výzkumu jsme nejen využívali analytického potenciálu aktivních metod, ale podíleli jsme se aktivně i na interpretaci získaných dat.

Nejrozsáhlejším a nejvýznamnějším objektem studia byly tektity a další impaktová skla, která vznikají při dopadu (impaktu) velkých vesmírných těles na zemský povrch. K nejznámějším tektitům patří zeleně zbarvené vltavíny. Kromě nich jsme v ÚJF analyzovali metodami INAA australoasijské tektity, irgizity z kráteru Žamanšin v Kazachstánu a sklo z Libyjské pouště, a též jejich potenciální zdrojové materiály. Při studiu impaktových skel

jsme navrhli a ověřovali originální hypotézy týkající se jejich vzniku. V případě vltavínů jsme vypracovali teorii zahrnující do jejich sedimentárních zdrojových materiálů z okolí mateřského kráteru Ries v Bavorsku těž vegetaci a organický půdní profil. Pro australoasijské tektity, jejichž nálezy pokrývají šestinu zemského povrchu (Obr. 2), jsme zpochybnili konsenzuální lokalizaci dosud nenalezeného kráteru v Indočině a navrhli alternativní lokalizaci v pouštích severozápadní Číny, mj. na základě výsledků INAA čínských pouštních písků a spraší.



▪ Obr. 2: Australoasijské tektity (vpravo dole) a předpokládané místo dopadu impaktoru. A – hypotetický kráter, B – pádová oblast tektitů. Foto: Archiv ONIM, foto tektitů: T. Hellebrand, mapové podklady: Natural Earth



▪ Obr. 3: Obsahy prvků vzácných zemin (REE) stanovené metodou RNAA v meteoritu Morávka normalizované na střední obsah REE v chondritech.

Zdroj: Archiv ONIM

Analýzou sedimentů z několika zahraničních lokalit (sibiřský poloostrov Nordvik, slovenské Brodno, španělské Puerto Escaño) jsme v rámci rozsáhlého společného projektu několika domácích výzkumných pracovišť přispěli k detailní korelaci hraničního intervalu geologických období jury a křídý. Výsledky INAA indikovaly geochemické anomálie kolem hraničního intervalu. K výzkumu dávných přírodních katastrof přispěla i INAA sedimentů ze zaniklého šumavského jezera, v nichž byly objeveny geochemické stopy gigantické erupce sopky Laacher See v Německu před 13 tisíci lety.

Další projekty využívaly NAA při výzkumu různých geologických materiálů a procesů v domácích i zahraničních lokalitách. K nejvýznamnějším projektům patřil výzkum radiační alterace přírodní organické hmoty. V rámci tohoto výzkumu jsme analyzovali vzorky uhlí, fosilních pryskyřic a bitumenů z několika domácích typových uranonosných lokalit.

Značnou pozornost jsme také věnovali rozborům meteoritů, protože prvkové složení pomáhá při jejich klasifikaci. Ve vzorcích z meteoritu Morávka, jehož pád v r. 2000 patří k nejlépe dokumentovaným v historii studia me-

teoritů, jsme kombinací metod INAA (pro stanovení 27 prvků), RNAA (pro stanovení prvků vzácných zemin, Cs a Rb) a FAA (8 prvků) přispěli, spolu s výsledky mineralogické analýzy a dalších metod, ke klasifikaci Morávky jako běžného chondritu (kamenného meteoritu) typu H5–H6. Ve slovin-ském meteoritu Jesenice z r. 2009 jsme stanovením 31 prvků metodami INAA a ENAA potvrdili klasifikaci jako běžného chondritu L6. Těmito me-todami jsme také stanovili až 43 hlavních a stopových prvků ve čtyřech slovenských meteoritech a známém ruském meteoritu Čeljabinsk.

Geomykologie

Specializujeme se také na pro-blematiku akumulace stopových prvků v houbách. Velké houby ne-boli makromycety mají schopnost hromadit velmi vysoké koncen-trace stopových prvků v plodni-cích. To je zajímavé jak z hlediska bezpečnosti potravin, protože houbaření je v Česku široce rozší-

„Zjistili jsme, že v oblasti ložiska Mokrsko obsahují plodnice hub i vyšší jednotky mg kg^{-1} zlata v sušině, což jsou nejvyšší zjištěné obsahy tohoto kovu v organismech vůbec (v přirozených podmínkách).“

řeným koníčkem, tak z hlediska přírodovědného obecně. Pro analýzu hub využíváme INAA pro stanovení až 25 prvků. Z nich se z hlediska akumulace zatím jeví nejzajímavější zlato, stříbro, arzén a halogenidy.

Zlato

Zlato lze pomocí INAA analyzovat s vysokou citlivostí a je vskutku pozo-ruhodné, jak efektivně houby tento drahý kov v plodnicích akumulují. Pro-jevuje se to zejména ve zlatonosných oblastech. Zjistili jsme, že v oblasti ložiska Mokrsko ve středních Čechách obsahují plodnice hub i vyšší jed-notky mg kg^{-1} zlata v sušině, což jsou nejvyšší zjištěné obsahy tohoto kovu v organismech vůbec (v přirozených podmínkách). Přeborníky v akumulaci zlata jsou žampiony, ale především pýchavka obecná. Biologické mecha-nismy stojící za tímto jevem nejsou zatím známe, ale lze předpokládat, že akumulace zlata v žampionech a pýchavkách souvisí se schopností těchto hub akumulovat měď.

Stříbro

Dalším drahým kovem akumulovaným v houbách je stříbro, jehož vysoké obsahy v plodnicích hub jsou typické jak pro čisté, tak kontaminované lokality. Věnujeme se zejména hyperakumulátorům tohoto kovu, což jsou, zjednodušeně řečeno, druhy hub s abnormálně vysokou schopností stříbro akumulovat. Takovou houbou je např. muchomůrka šiškovitá (*Amanita strobiliformis*), která může mít obsahy stříbra tisícinásobně vyšší (přesahující i $1\,000\ \mu\text{g g}^{-1}$ v sušině) než v půdě. Kromě objevu hyperakumulačních schopností tohoto druhu jsme ve spolupráci s VŠCHT a GLÚ AV ČR zjistili, že houba tento kov do plodnic čerpá přibližně ze svrchních 11 cm půdy, že stříbro do houby z půdního prostředí vstupuje prostřednictvím transportérů určených pro měď a že je v buňkách vázané na speciální proteiny ze skupiny tzv. metalothioneinů.



▪ Obr. 4: Muchomůrka šiškovitá – hyperakumulátor stříbra. Foto: J. Borovička

Arzén

Zdravotně rizikovým prvkem v plodnicích hub je arzén. Obsahy arzenu v houbách mohou být dosti vysoké, což je v Česku podpořeno jeho poměrně vysokými obsahy v půdách, ať už přirozenými nebo v důsledku znečištění ŽP. Objevili jsme řadu druhů hub s velmi vysokou schopností akumulovat As v plodnicích, ať už se jedná třeba o plesňák čekankový (*Thelephora penicillata*), jelenku obecnou (*Elaphomyces granulatus*) nebo některé druhy baněk (*Sarcosphaera* spp.). Takové druhy obsahují stovky až tisíce μg arzenu na gram sušiny. Informace o celkovém obsahu arzenu však nestačí pro hodnocení jeho zdravotní rizikovosti, protože ta u arzenu záleží především na jeho chemické formě (speciaci). Ta může být opravdu pestrá: doposud bylo z hub identifikováno více než 14 sloučenin arzenu, z nichž některé jsou netoxické (arzenobetain), karcinogenní (kyselina dimethylarsinová) nebo toxické (anorganické formy). Proto úzce spolupracujeme s týmem doc. Waltera Goesslera (Univerzita ve Štýrském Hradci, Rakousko), na jehož pracovišti probíhají speciální analýzy v námi vytypovaných druzích hub. Výsledkem této spolupráce probíhající od roku 2016 bylo 12 společných odborných článků, přinášejících mimo jiné i objevy doposud zcela neznámých arzenových sloučenin (homoarsenocholin, arzenocholin sulfát, arzenobetain amid).

Kromě dlouhodobého výzkumu akumulace stříbra a arzenu se nově zaměřujeme na stanovení halogenů v plodnicích hub, zejména chlóru a bromu, které některé houby akumulují ve zvýšené míře. Ve spolupráci s týmem doc. Waltera Goesslera jsme zahájili i studium speciace chlóru v houbách, která se ukazuje být velice zajímavá a teoreticky by mohla vést k objevu některých specifických nebo i biologicky aktivních látek. Analytické možnosti neutronové aktivace jsou však mnohem širší a mohou poskytnout uplatnění pro geomykologický výzkum i řady dalších prvků, protože naše znalosti o většině z nich jsou v této oblasti stále spíše jen sporé.

Materiálový výzkum

Soustředili jsme se hlavně na analýzu materiálů, které je obtížné převést do roztoku pro klasické analytické metody bez ztrát analytů nebo zabráně-

ní kontaminaci. Ve spolupráci s VŠCHT Praha jsme metodou INAA stanovili 21 prvkových nečistot v oxidu grafitu a grafenu připravených různými metodami. V navazující studii využívající INAA jsme ve speciálně čištěném grafenu zjistili podstatně nižší koncentrace prvkových nečistot a u takto připraveného grafenu se ukázalo, že praktická nepřítomnost nečistot vede ke ztrátě elektrokatalytické aktivity grafenu.

V rámci projektu s King Abdullah University of Science and Technology (KAUST) v Saudské Arábii jsme provedli INAA jednostěnných uhlíkatých nanotrubiček (Single-Wall Carbon Nanotubes, SWCNT) a zjistili jsme, že

„Naši nejvýznamnější práci v oboru kulturního dědictví bylo studium ostatků Tycha Braha metodami INAA, RNAA a μ -PIXE.“

v partnerské instituci prováděné analýzy metodou ICP-OES podhodnocují výsledky stanovení přechodných kovů používaných jako katalyzátory při výrobě SWCNT. Přesná znalost obsahu těchto kovů ovlivňuje možnost použití SWCNT v elektrochemických a biomedicínských aplikacích.

Vlastnosti feroelektrických materiálů, např. perovskitů, záleží jak na složení matrice, tak na obsahu jistých prvkových příměsí. Proto jsme ve spolupráci s Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT vypracovali metodu INAA pro stanovení příměsi vanadu v krystalech SrTiO_3 dopovaných tímto prvkem s využitím diskriminační spektrometrie záření gama. Tímto postupem jsme snížili hodnotu LOD vanadu až 2,5krát proti standardní metodě INAA.

Velké fyzikální experimenty, jako např. SuperNEMO (hledání důkazu dvojitého rozpadu β bez emise neutrina), vyžadují materiály a prostředí bez rušivého vlivu přirozeného radioaktivního pozadí. Ve spolupráci s Fakultou matematiky, fyziky a informatiky Komenského univerzity v Bratislavě jsme vypracovali metodu RNAA pro stanovení stop přirozených radionuklidů ^{232}Th a ^{238}U na úrovni 10^{-4} mBq ve stínění a v konstrukčních materiálech detektoru pro experiment SuperNEMO.

Zemědělství a výživa

Použili jsme metody INAA a RNAA ve spolupráci s lisabonskou univerzitou pro studium biofortifikace obilovin selenem zaměřené na snížení jeho deficitu u obyvatel Portugalska, který může přispívat ke zvýšenému výskytu kardiovaskulárních chorob. Ve srovnání s neošetřenou pšenicí jsme zjistili podstatné, až šestnáctinásobné zvýšení obsahu selenu v zrnech dvou druhů pšenice pěstované v půdě s přidavkem tohoto prvku.

S již zmíněnou rychlou metodou IFAA pro stanovení dusíku v obilovinách a dalších biologických materiálech jsme prokázali podobnou přesnost a preciznost výsledků v porovnání s destrukčními metodami podle Kjeldala a Dumase. Sledovali jsme také vliv způsobu pěstování (konvenčního a organického) na obsah dusíku.

V rámci projektu s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE) jsme metodami ENAA a RNAA stanovili obsah esenciálního stopového prvku jódu ve vzorcích stravy ze 6 asijských států. Zjistili jsme, že ve většině zemí denní příjem jódu ze stravy bez použití jodizované soli nedosahuje doporučené hodnoty 150 µg pro dospělé, která je potřebná pro správnou funkci hormonů štítné žlázy. Výjimkou je typická japonská strava s vysokým zastoupením mořských plodů a řas s vysokým obsahem jódu.

„Metody NAA, FAA a RFA jsou v ÚJF dlouhodobě a úspěšně rozvíjeny a aplikovány v celé řadě vědních a technických oborů.“

Jiným esenciálním stopovým prvkem pro organismy je křemík. Hraje důležitou roli při vývoji kostí a pojivových tkání a také může snižovat příjem hliníku (rizikový faktor pro vznik Alzheimerovy nemoci a podobných neurodegenerativních poruch) v gastrointestinálním traktu. Hlavním zdrojem křemíku ve stravě jsou celozrnné obiloviny, v nichž se však vyskytuje v biologicky nedostupné formě fytolitů. Zajímavým zdrojem dostupného křemíku je pivo, v němž je obsažen ve formě rozpustné kyseliny orthokřemičité. Proto jsme ve spolupráci s VŠCHT Praha studovali obsah křemíku

v surovinách a meziproduktech při výrobě piva (voda, slad, sladina, chmel, mladina) a v hotovém pivu metodou ENAA, protože ve stopových koncentracích je křemík obtížně stanovitelný klasickými analytickými metodami. Zjistili jsme, že největší množství křemíku se dostává do piva ze sladu a že koncentrace křemíku v několika druzích českých piv se pohybuje v rozmezí 14 – 44 mg l⁻¹. Konzumace piva tak může významně přispívat k doporučenému dennímu příjmu křemíku 20–50 mg. Pro stanovení nejnižších koncentrací křemíku v biologických a environmentálních vzorcích jsme vypracovali výše zmíněnou unikátní metodu RNAA, která poskytla LOD na úrovni 0,5 µg g⁻¹.

Pracovní lékařství

Ve spolupráci se Státním zdravotním ústavem, Ústavem hygieny a epidemiologie 1. LF UK v Praze a dalšími hygienickými orgány jsme použili metodu INAA při studiu složení aerosolů v pracovním prostředí v závodu na výrobu V₂O₅ a v jiném závodu při výrobě konstrukcí a nádob z austenitické nerezové oceli pro farmaceutický, potravinářský a chemický průmysl. Metodu RNAA jsme uplatnili pro stanovení koncentrací toxických prvků v bioindikátorech expozice z pracovního prostředí – vlasech, nehtech, krvi a moči profesionálně exponovaných pracovníků a porovnali jsme je s hodnotami zjištěnými v kontrolních, profesionálně neexponovaných skupinách. Zjistili jsme, které pracovní operace jsou nejrizikovější a vyhodnotili jsme, které bioindikátory profesionální expozice jsou nejvhodnější z hlediska citlivosti a časové odezvy. Přispěli jsme rovněž k upřesnění hodnot obsahů toxických prvků v tkáních neexponované populace („normální“ hodnoty). Nejnáročnější se ukázalo stanovení vanadu v krvi a séru metodou RNAA, kde jsme dosáhli hodnoty LOD na úrovni nižších desítek pg ml⁻¹.

Kriminalistika

Metodou INAA vzorků segmentovaných vlasů jsme ve spolupráci s Policií České republiky pomohli objasnit příčinu smrti mladé ženy, o níž se předpokládalo, že mohla buď spáchat sebevraždu požitím arseniku (As₂O₃) nebo jí mohla být podávána toxická sloučenina As po delší dobu jinou

osobou, tedy že se mohlo jednat o vraždu. Vyloučili jsme chronickou expozici arzenu, což umožnilo určit jako příčinu smrti sebevraždu.

Ve spolupráci s Policejní akademií ČR a VŠCHT v Praze jsme zkoumali možnosti využití INAA pro identifikaci původu a způsobu přípravy omamných a psychotropních látek (OPL) a adulterantů (přídavných látek). Pro prvkovou charakterizaci OPL se ukázala velmi přínosná INAA s krátkodobými radionuklidy, protože umožňuje zjistit přítomnost halogenidů, zejména chloru, velmi rychle (během 30 min.) a rozhodnout o formě drogy a umožňuje také identifikovat přítomnost adulterantů s vysokým obsahem síry.

S Policejní akademií ČR jsme rovněž zkoumali využití INAA pro stanovení prvkového složení automobilových skel pro identifikaci původu stěpů nalezených při odhalování trestné činnosti. V pilotní studii jsme ve vzorcích skel od 17 výrobců stanovili metodou INAA obsah obvykle více než 25 prvků.

Jaderná bezpečnost

Pro modelový experiment chování významného a těkavého štěpného produktu ^{132}Te v kontejnmentu jaderného reaktoru v případě těžké havárie jsme ve spolupráci s Chalmers Technical University ve Švédsku, finským technickým výzkumným střediskem VTT a Univerzitou v Oslu testovali možné způsoby stanovení telluru metodou INAA v aerosolech na teflonových filtrech a v promývacích roztocích. Nejcitlivější způsob stanovení (viz Vývoj instrumentace a metodiky) jsme pak použili ke studiu chemického chování telluru v pilotním experimentu. Výsledky přinesly nové poznatky o chemii telluru při havárii jaderného reaktoru a šíření radiotoxického ^{132}Te a jeho dceřiného produktu ^{132}I .

Metodu INAA jsme také použili k prvkové charakterizaci izolačních vrstev kabelů bezpečnostních systémů jaderných elektráren (JE). Zjistili jsme, že některé součásti kabelů starší provenience obsahují vysoké koncentrace Sb v důsledku použití Sb_2O_3 jako zpomalovače hoření a řadu dalších příměsí dobře se aktivujících neutrony při dlouhodobém používání v kon-

tejnmentu jaderného reaktoru. Při údržbě, opravách a vyřazování reaktoru z provozu tak vzniká velké množství vysoce radioaktivního odpadu.

Pro všechny typy grafitem moderovaných JE je důležitá znalost prvkových nečistot v grafitu pro určení způsobu zacházení a případné likvidace po jeho výměně či po vyřazení JE z provozu. Proto litevské Centrum fyzikálních věd a technologií zorganizovalo mezinárodní porovnání pro stanovení nečistot v nukleárně čistém grafitu pro reaktor RBMK-1500 v JE Ignalina, jehož jsme se zúčastnili metodou INAA. Další metody zahrnovaly promptní gama ak-
tivační analýzu (PGAA) provedenou v centru MLZ v německém Garchingu na reaktoru FRM II a ICP-MS provedenou v litevském centru. Naše výsledky souhlasily s výsledky PGAA v rámci nejistot stanovení, zatímco výsledky

ICP-MS byly zatíženy značnými nejistotami v důsledku problémů s převedením grafitu do roztoku beze ztrát a kontaminací.

„Pro prvkovou charakterizaci OPL se ukázala velmi přínosná INAA s krátkodobými radionuklidy, protože umožňuje zjistit přítomnost halogenidů, zejména chloru, velmi rychle (během 30 min.).“

Pro jadernou kriminalistiku jsme vypracovali metodu NAA s předaktivační separací pro analýzu jaderných materiálů s vysokým obsahem uranu, jejichž analýza

metodou INAA má jen omezené možnosti vzhledem k vysoké aktivitě ^{239}U , dceřiného produktu ^{239}Np a mnoha štěpných produktů vznikajících při aktivaci neutrony. Naše metoda umožnila stanovení 14 stopových prvků pro účely zjišťování původu jaderných materiálů.

Měření dlouhodobých radionuklidů

Metoda NAA je výhodně použitelná i pro stanovení některých dlouhodobých radionuklidů, protože poskytuje až o několik řádů nižší hodnoty LOD než radiometrické metody (měření aktivity) nebo metody hmotnostní spektrometrie. Proto jsme NAA s předaktivační a následnou radiochemickou separací rozsáhle použili při stanovení šíření štěpného produktu

^{129}I ($T_{1/2} = 16,1$ mil. let) zejména jako vhodného indikátoru šíření emisí (aero-

soly a kapalně odpady) ze závodů na přepracování jaderného paliva a při haváriích JE v Černobylu a Fukušimě. Stanovili jsme ho také ve štítných žlázách skotu z okolí JE Temelín před a po jejím spuštění a nezjistili jsme žádné úniky po uvedení této JE do provozu. V poslední době tato metoda stanovení ^{129}I ztrácí na významu vzhledem ke zvýšené dostupnosti metody AMS (i v našem ústavu – viz příspěvek o laboratoři AMS v této publikaci), která poskytuje až o 3 řády nižší hodnoty LOD. Výhodné je použití INAA pro stanovení přirozené aktivity ^{40}K ($T_{1/2} = 1,25 \times 10^9$ let), ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,41 \times 10^{10}$ let) a ^{238}U ($T_{1/2} = 4,46 \times 10^9$ let) pro určení dávkového příkonu pro vyhodnocení luminiscenčních analýz v materiálech vhodných pro datování archeologických nálezů (OSL, TSL). Tyto analýzy jsme použili ve spolupráci s FJFI ČVUT ve vzorcích cihel z historických budov i ve spolupráci s australskou univerzitou v Adelaide.

Kulturní dědictví

Naší nejvýznamnější prací v tomto oboru bylo studium ostatků Tycha Braha metodami INAA, RNAA a μ -PIXE (viz samostatný příspěvek v této publikaci). Také jsme metodou INAA studovali prvkové složení pískovcových kvádrů, z nichž bylo postaveno 19 khmerských chrámů v Angkoru (Kambodža). Snažili jsme se vypátrat, jestli složení pískovců z těchto chrámů a dvou domnělých lomů souvisí se stářím chrámů postavených ve zlatém věku khmerské říše v rozmezí 9.–13. století. Nehomogenita pískovcových bloků z jednotlivých chrámů znemožnila nalézt korelaci mezi dobou jejich stavby a prvkovým složením pískovců.

Použitím metody IFAA pro nedestrukční stanovení dusíku v náramku ze starší doby bronzové jsme zjistili, že byl vyroben ze stromové kůry, nikoliv z kůže. Jeho stáří bylo zjištěno radiouhlíkovým datováním v našem ústavu v rozmezí 1408–1266 př. n. l.

Metodou INAA jsme také studovali ostatky Jana Zhořeleckého z dynastie Lucemburků (třetí syn císaře Karla IV.), jenž zemřel náhle ve věku 25 let z neznámých důvodů. Histochemickou reakcí provedenou v Ústavu patologie I. LF UK a VFN bylo zjištěno podezření na zvýšený obsah hliníku v jeho

kyčelní kosti. Naší metodou jsme zvýšený obsah hliníku nepotvrdili, našli jsme zvýšené koncentrace Mn, As, Sb, a obzvláště Ag, které však náhlou smrt vysvětlit nemohou. Příčina smrti Jana Zhořeleckého tak zůstává historickou záhadou.

Referenční materiály a kontrola jakosti výsledků chemických analýz

Metoda NAA a její varianty (INAA, ENAA, RNAA) má jako primární metoda měření nezastupitelnou významnou roli při přípravě certifikovaných referenčních materiálů (CRM) chemického složení, tj. testování homogenity a certifikaci obsahu prvků. Proto jsme ji rozsáhle uplatnili ve spolupráci s domácími a mezinárodními organizacemi při přípravě CRM environmentálních a biologických materiálů. Jednalo se o přípravu RM simulované-

„Metodou INAA jsme také studovali ostatky Jana Zhořeleckého z dynastie Lucemburků, jenž zemřel náhle ve věku 25 let z neznámých důvodů.“

ho aerosolu na polykarbonátovém filtru Nuclepore ve spolupráci s MAAE ve Vídni, sadu čtyř CRM půd (Analytika, s.r.o.) a CRM Single-Wall Carbon Nanotubes pro kanadský National Research Council (ve spolupráci s třemi dalšími předními NAA laboratořemi). V rámci spo-

lupráce s US NIST jsme se podíleli na certifikaci prvků v NIST SRM 1577c Bovine Liver. Naše výsledky stanovení ultrastopových koncentrací vanadu ($8,4 \pm 1,0 \text{ ng g}^{-1}$) a niklu ($44,0 \pm 6,4 \text{ ng g}^{-1}$) se shodovaly v rámci nejistot s příslušnými certifikovanými hodnotami NIST (odvozenými i z našich výsledků), které činily postupně $8,17 \pm 0,66 \text{ ng g}^{-1}$ a $44,5 \pm 9,2 \text{ ng g}^{-1}$.

Při certifikaci obsahu kyslíku v referenčním materiálu titanu ERM-EB090b jsme přispěli hodnotou stanovenou nedestruktivně IFAA jako jedinou alternativní metodou ke standardní metodě tavení v inertním plynu.

Pro kontrolu dlouhodobé stability jakosti našich výsledků metodou INAA při rozboru různých typů vzorků se pravidelně, přibližně jednou ročně, účastníme mezilaboratorních porovnání organizovaných vídeňskou MAAE. Pro vzorky geologického původu (půda, hornina) jsme poskytli výsledky

stanovení 34–42 prvků a pro materiály biologického původu 10–21 prvků. Radíme se mezi laboratoře s nejvyššími počty stanovených prvků s velmi dobrými výsledky.

Rentgenfluorescenční analýza (RFA)

Podobně jako NAA je i RFA metodou se širokým spektrem použití a má na našem pracovišti dlouholetou tradici, převážně pro analýzy historických slitin. První analýzy provedl v roce 1983 Jaroslav Frána a tím započal dlouhodobou mezioborovou spolupráci s nejrozličnějšími archeologickými pracovišti. Zkušenosti získané předešlou prací v oboru spektrometrie mu umožnily rozvinout metodu RFA, a to včetně tvorby softwaru pro vyhodnocení naměřených dat. Nejvýznamnější podíl měření provedených



▪ Obr. 5: Záchytná ploténka opaskové přezky. Sbírka Muzea T. G. M. Rakovník.
Foto: M. Frouz

do roku 2013 jsme provedli radioizotopem (^{241}Am) buzenou RFA. Na konstrukčně jednoduchém laboratorním zařízení jsme analyzovali několik tisíc nejružnějších artefaktů napříč historickými obdobími. Díky spolupráci s archeologickými pracovišti prakticky na celém území ČR vznikl základní soubor archeometrických dat.

Po získání moderního analytického vybavení – komerčního RFA spektrometru Midex – se možnosti metody významně posunuly. Pro rozšíření potenciálu využití metody RFA jsme zvolili variantu přístroje s automatickým posuvným stolcem, což umožňuje relativně snadné mapování na ploše přibližně 24×18 cm. Díky tomu se metoda RFA stala i v ČR výchozí analytickou metodou pro studium historických (nejen kovových) předmětů. Vzhledem k několika dekádám trvající spolupráci s archeologickými pracovišti se nám podařilo být součástí analytických týmů, které se zabývaly analýzou (v některých případech i v kombinaci s INAA) i velmi exkluzivních nálezů či souborů dat. Jako první jmenujme poměrně rozsáhlé analýzy měděných artefaktů z oblasti jižních Čech. Analyzovali jsme více než 250 vzorků surovin kovů ze starší doby bronzové. Společně s kolegy z Regionálního muzea v Teplicích jsme zkoumali více než stovku artefaktů z depotů z doby bronzové (od srpů a seker až po suroviny obdobné jihočeským). S numismatiky Národního muzea v Praze jsme proměřili (výhradně metodou RFA) prakticky celou denárovou část tzv. Chaurovy sbírky, uherské středověké dukáty, sbírku brakteátů z Levínské Olešnice, mince keltské, římské a mnohé další. Vždy se jednalo o cílený výzkum s počtem vzorků obvykle vysoce přesahujícím 100 kusů. Na pomyslný vrchol lze umístit účast na analytickém posouzení kovových artefaktů z Egypta z různých období (odebraných v evropských muzeích), tzv. depotu z Turska ze starší doby bronzové a královských klenotů (opasková přezka, prsteny, ozdoby koňského postroje) z Mšece a Řevničova z raného středověku.

Z gemologického hlediska lze opaskovou přezku díky užití českých a indických granátů spolu s antickým sklem v dokonale řemeslně zpracovaném zlatém šperku technikou přihrádkového emailu (cloisonné) řadit hned za České korunovační klenoty a Relikviář sv. Maura.

Závěr

Metody NAA, FAA a RFA jsou v ÚJF dlouhodobě a úspěšně rozvíjeny a aplikovány v celé řadě vědních a technických oborů. Přispívají tak k dobré reputaci našeho pracoviště doma i ve světě. Svědčí o tom široké zapojení do národních i mezinárodních projektů zaměřených na analýzu mnoha typů vzorků, která je jen obtížně proveditelná jinými metodami, pokud vůbec, nebo se jedná o nedestrukční analýzu cenných historických předmětů.

5 | Generátory rychlých neutronů

 **Pavel Bém**

Oddělení jaderných reakcí ÚJF a Oddělení urychlovačů ÚJF



Výzkum interakce protonů s deuterony nás v Oddělení jaderných reakcí dovedl v 90. letech k návrhu generátoru rychlých neutronů založeného na srážkách svazku protonů s průtočným terčem těžké vody. Mohli jsme využít protony s energií do 36 MeV cyklotronu U-120M po zdařilé implementaci urychlování v režimu záporných iontů, provedené kolegy z Oddělení urychlovačů. Nový generátor přispěl k zásadnímu posunu v programu laboratoře generátorů rychlých neutronů v Ústavu jaderné fyziky AV ČR (dále jen Laboratoř).

V polovině 90. let započal projekt IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) zaměřený na vybudování intenzivního zdroje fúzních neutronů pro testy radiační degradace materiálů budoucích termojaderných reaktorů (více v publikaci od str. 103). Ten spolu s experimentálním reaktorem ITER představuje nejnákladnější výzkumné mezinárodní projekty současnosti.¹ Dílčí úlohou modelových analýz zdroje IFMIF byla pověřena laboratoř KIT (Karlsruhe Institute of Technology). „Těžkovodní“ generátor Laboratoře jako jediný evropský dostupný zdroj vykazoval neutronové pole se spektrem blízkým zdroji IFMIF, proto specialisté KIT uvítali nabídku kooperace. Stali jsme se členy mezinárodního týmu řešitelů IFMIF s podporou evropské agentury F4E (Fusion for Energy) a s organizačním začleněním do národní Asociace EUROATOM-IPP CR.

To byl rámec dlouhodobé spolupráce Laboratoře s KIT zaměřené na neutroniku zdroje IFMIF. Kooperace (za účasti S. P. Simakova, mezinárodně respektované autority v oboru) posílila naši kompetenci v počítačových simulacích experimentů a vyhodnocování dat.

Vyvinuli jsme další neutronové stanice s terči Be a Li pro neutrony spojitého i mono-energetického spektra a zkoumali zejména aktivaci atomových jader materiálů relevantních pro fúzi. Výsledky vedly k přizvání do týmu evaluátorů neutronové databáze EAF (European Activation File) a k pověření pořádat pravidelná pracovní setkání EAF (2000–2016). Stalo se tak za programové koordinace laboratoře CEA Culham a z iniciativy předního člena týmu EAF, Jiřího Kopeckého (JUKO Research, dříve člena týmu Oddělení neutronové fyziky ÚJV). Terčové stanice jsme dále užili v národním programu Transmutace ADTT (zaměřeném na urychlovačem řízené reaktory) a v testech radiační odolnosti komponent elektroniky projektu ATLAS@CERN.

K fúzní tematice jsme se vrátili po instalaci produkčního cyklotronu TR-24 v roce 2015. Návrhem zdroje neutronů pro tento urychlovač jsme naplnili

1

S omluvou odkazujeme čtenáře pro výklad tohoto a dalších pojmů na webové stránky.

zprostředkovaný slib člena Rady vlády ČR pro výzkum a vývoj, že produkční TR-24 dozná i fyzikálního využití.

Rozsah aktivit Laboratoře v té plodné době přesahoval administrativní členění (a také PR mechanismy) napříč více odděleními ÚJF. Bylo proto cenné a významné, že v důležitých etapách vývoje jsme měli podporu tehdejších ředitelů ÚJF, teoretických fyziků s výjimečným smyslem pro experiment – kolegů Rostislava Macha a Jana Dobeše. Podstatnou podporu představovalo zařazení Laboratoře do výzkumné infrastruktury Centra urychlovačů a jaderných analytických metod (CANAM) ÚJF.

| Neutronová laboratoř na cyklotronu U-120M

V úvodu této kapitoly předložíme popis zařízení Laboratoře na „old-time“ cyklotronu U-120M s určitou omluvou autorům předchozí publikace k výročí 50 let ÚJF. Ti deklarovali důraz na základní výzkum jako poslání Ústavu

„Vyvinuli jsme další neutronové stanice s terčí Be a Li pro neutrony spojitého i mono-energetického spektra a zkoumali zejména aktivaci atomových jader materiálů relevantních pro fúzi.“

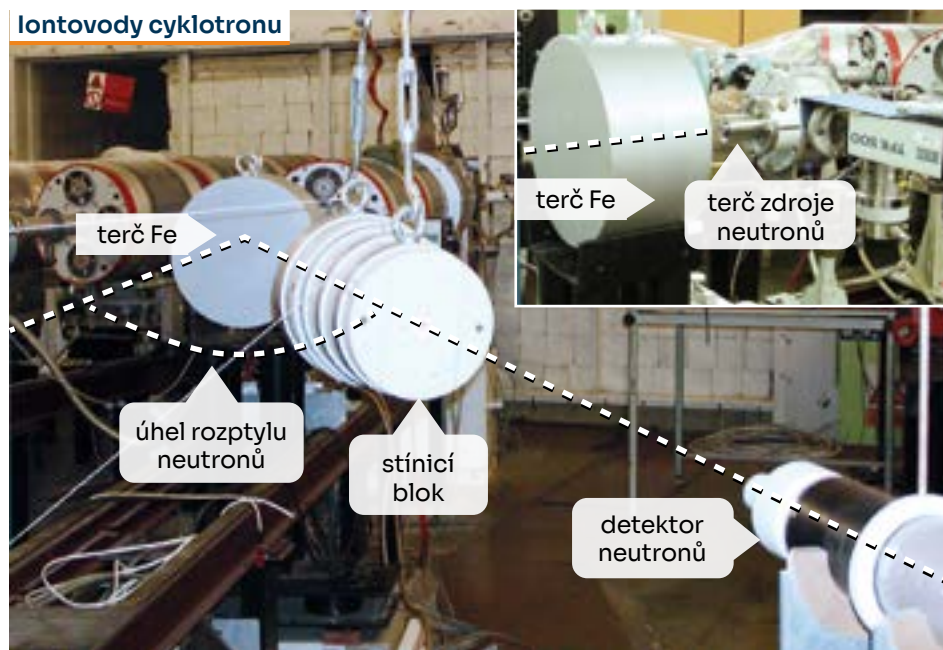
a vyhnuli se „metodickým pracím a výsledkům... jen jako součástí cesty ke konečnému fyzikálnímu závěru“.

Vývoj posouvá priority a dosah fyzikálních závěrů určuje především technologická poptávka: autor textu s disertanty koncem 90. let

měřili a publikovali „*parametry dvoupólové struktury $S(3/2+)$ matice excitovaného 16.75 MeV stavu jádra ^5He* “, tohoto mimořádného fyzikálního jevu a prazákladu všeho termojaderného. V daném případě šlo o nové dílčí fyzikální závěry k tehdy aktuální mezonové katalýze fúze (MCF). Dnes data-báze MCF a ostatně i ADTT (více na str. 96) je v archivech a komunita čeká na výkonnější techniku (!!) urychlovačů.

A konečně ještě jeden důvod, proč nelze techniku minout: základní výzkum jaderných reakcí vůbec, a s účastí neutronů zvláště, vede převážně přes její složitou až robustní formu.

Přítomnost techniky v úlohách Laboratoře budeme ilustrovat na příkladu srovnávacího měření (benchmark experiment) účinného průřezu reakce neutronů s jádry železa (Obr. 1a). Svazek urychlených iontů cyklotronu přichází evakuovanou trubicí a řídicí soustavou magnetů pro směrování svazku na terč neutronového zdroje (samostatná technická disciplína). Neutronům emitovaným do celého prostoru je pod vybraným směrem vystaven terč zkoumaného prvku (robustní železný disk), v něm neutrony rozptýlené do vybraného směru zaznamenává scintilační detektor. Lokace zdroje, zkoumaného terče a detektoru definují geometrické proměnné měření. Se změnou geometrie je opakovaně nastavován stínicí blok pro eliminaci pozadí. Nastává měření, sběr a zpracování dat, vyhodnocení a teprve nyní, srovnáním s modelovými predikcemi, se dostavuje „konečný fyzikální závěr“, pokud jste po cestě nenarazili na Cimrmanovu slepou uličku.



▪ Obr. 1: (a) Měření účinného průřezu transmise neutronů. Foto: Archiv CANAM

Experiment může probíhat v subtilnějším uspořádání při měření diferenčních veličin nebo naopak v podobě robustních měření integrálních veličin, byť miniaturní technikou detekce (aktivační detektory). Nejvíce komplikované jsou spektrometrie neutronů metodou doby letu (TOF – Time-of-Flight) a zkoumání neutronových reakcí s emisí nabitých částic. Ve verzi vyvíjené pro zdroje cyklotronu U-120M (Obr. 1b) prochází neutrony od zdroje kolimátorem ve stěně haly cyklotronu a dopadají na terčík zkoumaného jádra v evakuované „reakční“ komoře. Kolimovaný svazek neutronů končí ve „zhášeči“ (beam dump) stíněném pro zajištění akceptovatelné radiace v prostoru měřicí haly. Detektory nabitých částic mohou využívat časovou pulzaci svazku v metodě TOF.

Hlavní základnou Laboratoře jsou neutronové zdroje na svazcích cyklotronu U-120M. Ty produkují neutronová pole spojitého nebo mono-energetického spektra s energiemi do 36 MeV. Konstrukční řešení musí odvést tepelný výkon svazku z terčů různého složení (průtočný těžkovodní, toxický beryliový nebo hořlavý lithiový), definovat velikost svazku na terči a monitorovat jeho intenzitu a celkový náboj. Dále zajistit instalaci vzorků u terče (maximální hustotu toku), přesnou pozici na osu pole neutronů a manipulační prostor pro instalaci komponent v in situ typu experimentů.

Reakční komora



ústí neutronového kolimátoru

▪ Obr. 1: (b) Měření emise nabitých částic v reakcích s neutrony.

Foto: Archiv CANAM

Rozevlátý rukopis nezapomenutelného konstruktéra (Obr. 2) je odezvou na nutnost opakovaně a často transportovat neutronový zdroj při světově unikátním střídání s jinými stanicemi (pro přípravu radioizotopů) na jediném vývodu svazku urychlovače. Zde se patří připomenout a vyzdvihnout profesionalitu techniků a řemeslníků příručních

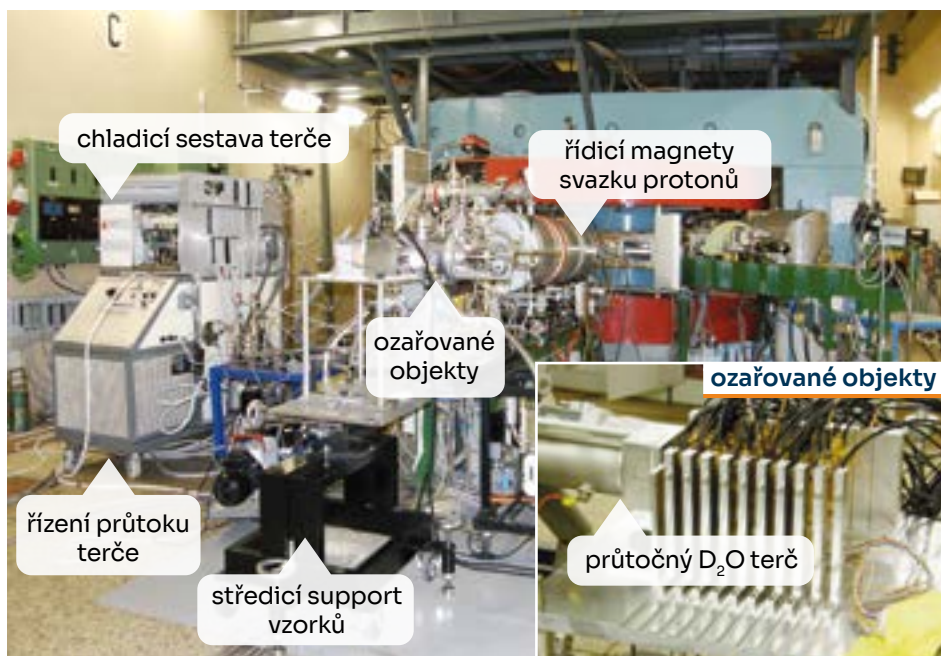
dílenských „hutí“ obou oddělení – urychlovačů a jaderných reakcí, a poděkovat jim.

Následující podkapitoly dají představu o výzkumných programech a výsledcích Laboratoře v experimentech s neutronovými zdroji cyklotronu U-120M.

Simulace neutronové odezvy látek a funkce technologických komponent

Neutronová mutagenese živé tkáně

Počátkem 90. let ÚJF přijal účast ve zkoumání vlivu neutronového záření na živé organismy v úloze řešené Vojenskou lékařskou akademií v Hradci



▪ Obr. 2: Terčová stanice generátoru neutronů cyklotronu U-120M s průtočným terčem těžké vody. Foto: Archiv CANAM

Králové a koordinované Ministerstvem obrany ČR. Neutronový zdroj s klasickou $d+Be$ reakcí jsme doplnili neutronovým kolimátorem pro lokální ozařování. Instalaci „objektů“ a vlastní výzkum mutagenese prováděli lékaři v Hradci. Nehodnotíme cíl ani etickou stránku úlohy, nicméně výsledkem ozařování byla rozsáhlá, bezpochyby profesionálně vyhodnocená a vzácná informace o odezvě živé tkáně na neutronovou radiaci. Výsledky byly do roku 1999 utajeny. Pokud k deklarované skartaci dat po uzavření projektu nedošlo, naše současné poznatky o neutronovém zdroji umožní re-evaluaci dat.

Neutronová odolnost elektroniky kalorimetru LHC CERN

V rámci experimentu ATLAS@LHC@CERN (s naší smluvní účastí v týmu řešitelů prostřednictvím Max Planck Institute, MPI Mnichov) jsme zajistili testování radiačních limitů funkce registrační elektroniky kalorimetru (Liquid Argon Calorimeter).

Instalace vzorku na osu neutronového pole



▪ Obr. 3: Test radiační odolnosti elektroniky kalorimetru LHC CERN: (a) Instalace komponent k terčové stanici. Foto: Archiv CANAM

Ozařované komponenty elektroniky



• Obr. 3: (b) Uspořádání komponent k průtočnému D_2O terči generátoru neutronů. Foto: Archiv CANAM

Protonová ozařování byla realizována na cyklotronu PSI (Proton Irradiation Facility, Villigen). Naše testy poskytly rychlé neutrony s volbou terčových stanic podle požadavků uspořádání aparatur v in situ typu experimentů (Obr. 3) včetně přítomnosti kryogenní techniky. Instalace zkoumaných komponent na osu neutronů probíhala se zaujatou až aktivistickou účastí externistů. Komponenty na předních deskách v průběhu dvoudenních

expozic přesahovaly očekávané maximum dávky 10^{16} n/cm². Demontáž silně aktivované sestavy aparatur, bezpečné uložení a následný transport do Mnichova k post-iradiačním vyhodnocením zajistil tým Laboratoře.

Předností testů v ÚJF byla vysoká časová stabilita toku neutronů (garantovaná kvalitou provozu cyklotronu) jako vyžadovaná podmínka testů. Výsledky PSI a Laboratoře vyhodnocené týmem ATLAS Hadronic Endcap Calorimeter byly základem konečné specifikace komponent aparatury HEC jako jedno z kritérií spolehlivosti projektu ATLAS, další z mnoha „neslepých Cimrmanových uliček“ na cestě k Higgsovu bosonu.

| Experimentální verifikace neutronových databází

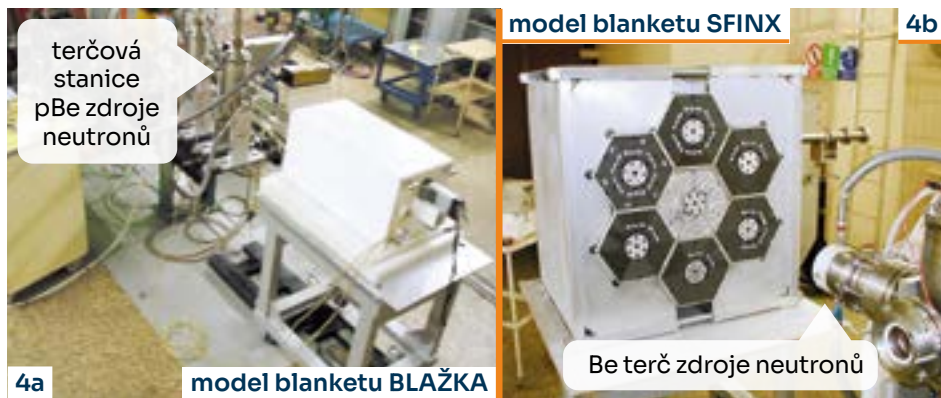
Urychlovačem řízené transmutory ADTT

Koncem 90. let byla mezinárodně formulována koncepce bezpečných podkritických reaktorů a transmutorů štěpných produktů řízených externím zdrojem neutronů (ADTT). Program národního konsorcia TRANSMUTACE pro výzkum ADTT (s členstvím ÚJF) pověřil Laboratoř experimentem pro počáteční výzkum modelu blanketu řízeného neutrony generátoru (Obr. 4a). Model BLAŽKA byl projektem Katedry jaderných reaktorů FJFI ČVUT, my jsme zajistili pole neutronů s částečně řízenou pulza-

cí pro zaznamenání výskytu „zpožděných neutronů“ (detektory KJR). Aktivní detektory pak sloužily v benchmark testu simulace polí v objemu zón reaktoru. Pro přítomnost aktivního štěpného materiálu (NK-10) v blanketu byl program sledován orgány MAAE a vedl k doprovodu bezpečnostních složek při přepravě modelu mezi ÚJF Řež a ČVUT Praha.

Test souběžného neaktivního modelu blanketu SFINX (Obr. 4b) reaktoru na roztavených solích (Molten Salt Reactors) koordinovali specialisté ÚJV Řež s vazbou na předpokládanou bilaterální spolupráci s ORNL USA v oblasti MSR.

Počáteční výsledky obou úloh a také výsledky měření relevantních aktivizačních neutronových dat prováděných pracovníky Laboratoře a kolegy z Oddělení jaderné spektroskopie byly předneseny na mezinárodní konferenci o jaderných datech NEMEA (NEMEA-4, Praha, 2007), jejímž pořádáním jsme byli pověřeni. Experiment BLAŽKA spolu s pokročilejším projektem Yalina (kooperace PNR-S Minsk – Argonne NL) byly pilotními evropskými experimenty. V následných letech program ADTT provází útlum, činnost národního konsorcia byla ukončena, získaná databáze je archivována s možností re-evaluace.



▪ Obr. 4: Test neutronové odezvy modulů blanketu reaktoru na fluoridových solích. Foto: Archiv CANAM

Kooperace ÚJF a KJR v této tematice vyústila v dlouhodobou součinnost, stala se základnou pro pedagogické působení specialistů ÚJF na katedře a vítaným trvalým zdrojem nastupující generace výzkumníků do Laboratoře i vedoucích pozic Ústavu.

Fúzní technologie

„Experimentální verifikace a kompletace neutronové databáze pro fúzní technologie“ je trochu formální vymezení obsahu několikaleté činnosti Laboratoře probíhající v kooperaci s laboratoří KIT. V základu spolupráce byla úloha kolegů KIT vypracovat aparát přesné simulace degradačních schopností neutronového pole a z naší strany zajistit dostupnost neutronového generátoru se spektrálním složením blízkým zdroji IFMIF.

Neutrony IFMIF budou produkovány v reakci deuteronů s proudícím kapalným lithiovým terčem. Pro simulování parametrů pole v testovacích modulech IFMIF rozpracovali kolegové v KIT program McDeLicious s bází dat průřezu reakcí $d+{}^{6,7}\text{Li}$. Měli jsme za úkol rozšířit databázi změřením účinných průřezů reakce s deuterony o energii 17 MeV na terčích ${}^7\text{Li}$. Naše výsledky spolu s daty při energii 40 MeV (Tohoku University) užili kolegové z KIT k úpravě teoretického modelu reakce v programu McDeLicious. Pokračovali jsme měřením a kompletací databáze pro cílový vývoj monitoru neutronového pole IFMIF s užitím aktivační techniky detekce. Úloha reagovala na absenci dat pro vysoké neutronové energie. Pro nové reakce jsme změřili účinné průřezy s těžkovodním zdrojem, jehož předností je spektrum ověřené nezávislou experimentální metodikou. Výsledky jsou součástí podkladů konečné konstrukce monitoru neutronového toku IFMIF/STUMM.²

„Naše výsledky spolu s daty při energii 40 MeV (Tohoku University) užili kolegové z KIT k úpravě teoretického modelu reakce v programu McDeLicious.“

2 P. Bém, V. Burjan, J. Dobeš, U. Fischer, M. Götz, M. Honusek, V. Kroha, J. Novák, S.P. Simakov and E. Šimecková, *The NPI Cyclotron-based Fast Neutron Facility, International Conference on Nuclear Data for Science and Technology 2007*

K dalšímu zpřesnění dozimetrické databáze STUMM jsme použili diferenciální benchmark test s užitím mono-energetických neutronů. Generátor se zdrojovou reakcí protonů na tenkém Li terči byl výpočetně simulován a „kalibrován“ spektrometrem zpětně odražených protonů.

| Aktivační databáze EAF

Samostatnou kapitolou činnosti Laboratoře se staly v úvodu zmiňované pracovní porady týmu European Activation File (EAF 2002-2011 a 2017, Praha). Účast více než dvaceti významných specialistů z evropských výzkumných center představovala možnost sdílení neběžných informací a kolaboračních příležitostí. Z řady příkladů vzpomeňme jeden z nejcitovanějších „konečných fyzikálních výsledků“ Laboratoře (analýza optického modelu deuteronových reakcí) založených na setkání s teoretiky IFIN Bukurešť.

Výsledky společných validačních studií se členy týmu (EASY-2007 Validation, JUKO Research, UKAEA Fusion, KIT) a agenda setkání byly vedeny v publikačním systému UAEC Culham. Z logiky činnosti pro fúzní technologie jsme byli účastníky pracovních setkání EFF/EAF sekce NEA Data Bank (Paříž). Vážít si můžeme také zvaných vystoupení na konzultačních jednáních Nuclear Data Section, IAEA (Vídeň) a zařazení našich výsledků jako součást expertních závěrů a doporučení NDS v tematice neutronových zdrojů [<http://www-nds.iaea.org/reports-new/indc-reports/>].

| Programové možnosti generátorů cyklotronu U-120M

Cestu k základnímu výzkumu neutronových reakcí na generátorech cyklotronu U-120M si Laboratoř rozšířila vybudováním sestavy pro detekci nabitých produktů reakcí a rovněž částečné metodiky TOF, pro kterou Oddělení urychlovačů zkoumá možnost řízeného cyklování. Navíc kolimovaný neutronový paprsek a nízké neutronové pozadí v hale umožní použít další detekční metody (4π -neutronové nebo gama detektory).

Završení úlohy databáze zdroje IFMIF a očekávatelný návrat koncepce jaderných reaktorů-transmutorů ADTT s požadavkem nových databází rychlých neutronů znovu nastaví téma, které bylo v nedávné minulosti v ÚJF úspěšně rozvíjeno řadou programů a specialistů. Vysokoenergetické neutrony se znovu stanou aktuálním nástrojem pro předrovnávané modelové studie (proces otevření vysoko-prahových kanálů reakce). Úloha může být pokračováním kooperace Laboratoře s NFS Spiral-2 (Medley).

HPNG, výkonný neutronový generátor cyklotronu TR-24

V roce 2015 byl v ÚJF instalován středně výkonný produkční cyklotron TR-24 s energiemi protonů do 24 MeV a intenzitou 0,3 mA (7,2 kW tepelného výkonu). Původnímu určení pro produkci radioizotopů odpovídá kompaktní kryogenní koncepce a jednoduchá základní sada komponent pro ovládání vyvedeného svazku a jeho směřování k terčovým stanicím.

Pro „slíbené“ užití TR-24 v jaderné fyzice by předností mohl být externí iontový zdroj skrývající možnost ovládat časovou (pulzní) strukturu vstříkovaného svazku. Spolu s již existujícím tunelem v budově z minulých let se tak nabízela možnost neutronové spektrometrie metodou doby letu (TOF). Představu o TOF ale zkomplikoval jev míchání orbit částic v cyklotronu zjištěný kolegy z Oddělení urychlovačů.

Druhou logickou možností fyzikálního využití TR-24 je produkce intenzivního pole rychlých neutronů (HPNG, High Power Neutron Generator), navíc s přepychem samostatné terčové stanice na jednom ze tří rozdělených vývodů svazků z cyklotronu.

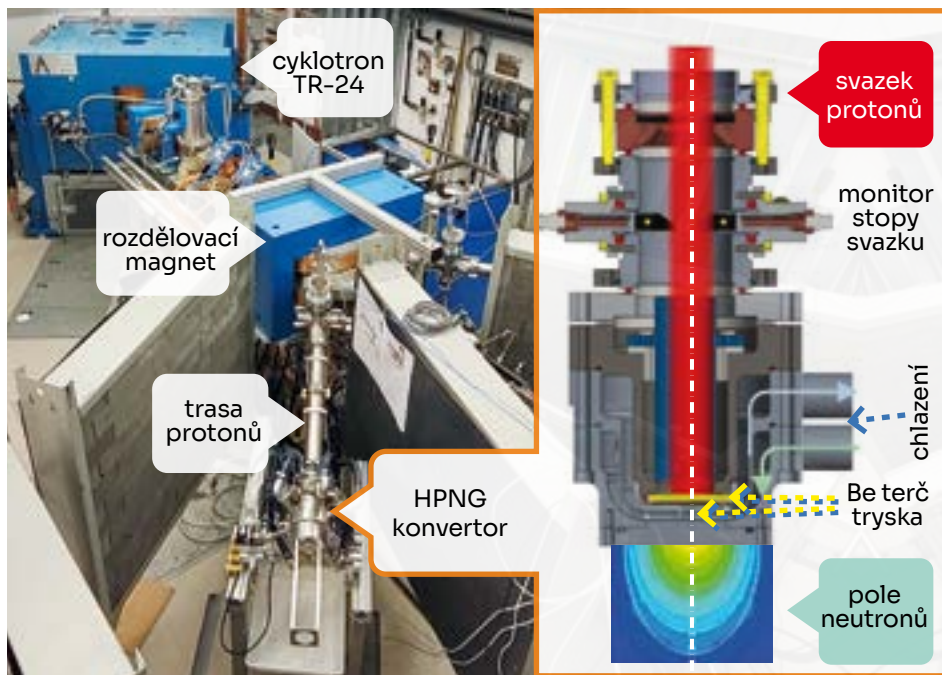
Pro parametry protonů TR-24 nabízí výpočetní simulace zdrojové reakce $p+Be$ „bodové“ neutronové pole s tokem $6 \times 10^{12} \text{ sr}^{-1}\text{s}^{-1}$ v přímém směru, řádově vyšší hodnotu ve srovnání se zdroji cyklotronu U-120M. Nicméně v technologických aplikacích je důležitým parametrem hustota toku (vázaná na hustotu svazku částic na terči) v těsné blízkosti terče. Ta by pro

nový zdroj nebyla předností, pokud bychom opakovali stejnou techniku chlazení terče, a tedy nutně stejnou hustotu toku protonů.

Odvod tepelné zátěže terčů neutronových konvertorů pro vysoké hustoty svazků je samostatným náročným oborem (projekt IFMIF, nerealizované projekty SORGINA a FAFNIR). Řešení konvertoru pro HPNG intenzivní zdroj neutronů na cyklotronu TR-24 a jeho programové zaměření je předmětem následujících podkapitol.

Proton-neutronový konvertor HPNG

Pro terč konvertoru jsme místo konfliktní techniky rotačních terčů zvolili verzi fixní, ale s originálním návrhem chlazení vnořenou tryskou. V simu-



• Obr. 5: Neutronový konvertor HPNG na svazku protonů cyklotronu TR-24.

Foto: Archiv CANAM

lačních výpočtech (kód ANSYS, kooperace s HVM Plasma) jsme zkoumali varianty tvaru trysky, abychom dosáhli maximálního přiblížení vzorku k terči, a tedy maximální hustotu generovaných neutronů. Souběžně jsme vybudovali na svazku cyklotronu stojan s distančním ovládáním polohy komory konvertoru pro monitorování parametrů svazku a měření tepelných charakteristik. Výzkum konvertoru probíhal na Oddělení urychlovačů s podporou CANAM.

„Výsledky společných validačních studií se členy týmu a agenda setkání byly vedeny v publikačním systému UAEK Culham.“

V experimentech s hliníkovým modelem terče (pro dočasné vyloučení nesnází s beryliem) jsme dosáhli limitní teoretické hodnoty přenosu tepla (4 kW/cm^2) pro daný rozměr trysky o řád vyšší ve srovnání se standardem pro běžné konvektivní chlazení terčů (cca $0,5 \text{ kW/cm}^2$).

V krátkodobých pilotních testech konvertoru s reálným Be terčem (Obr. 5) jsme potvrdili predikovaný neutronový tok řádu $10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a přibližovali se k dosud nepřekonané rekordní hustotě toku generátoru RTNS-II (Livermore Lab., z dob prvních testů fúzních materiálů, 1990, Japan-US Coop.).

Pilotní testy indikovaly očekávaný jev vodíkového sycení terčů (blistering) jako doprovodného efektu vysoké hustoty toku protonů. Provozní předcházení destrukci by vedlo ke krátké životnosti nákladných beryliových terčů. Snížení hustoty protonů, běžné ve zdrojích pro borovou záchytovou neutronovou terapii, by anulovalo přednost HPNG pro technologické radiační testy. Proto zkoumáme použití soudobých technik omezení blisteringu a jejich případný vliv na funkční parametry trysky konvertoru. Součástí je vývoj techniky řízení a monitorování velikosti stopy svazku a monitorování teploty povrchu rizikových Be terčů. Cílem je spolehlivý provoz dlouhodobých expozic zdroje HPNG s vysokou hustotou neutronového pole.

V dalších etapách lze uvažovat o modifikaci konvertoru založené na teoreticky predikovaných přednostech štěrbinové trysky. Měla by vést ke zvět-

šení rozměrů ozařovaných vzorků a možné instalaci konvertoru HPNG na nejvýkonnější produkční protonové cyklotrony. Samostatnou úlohou zůstává verifikace neutroniky zdrojové reakce $p+Be$ pro dílčí rozpor experimentálních dat a simulačních MCNPX výpočtů a rovněž motivovaná certifikačními podmínkami.

V režimu testů HPNG plánujeme s kolegy z ÚJP AV ČR pokračování předchozích studií neutronové odezvy magnetických sensorů ITER na generátoru U-120M. Pro skupinu MFF UK připravíme zdroj k testu radiačních defektů látek zkoumaných metodou PAS (Positron Anihilation Spectroscopy).

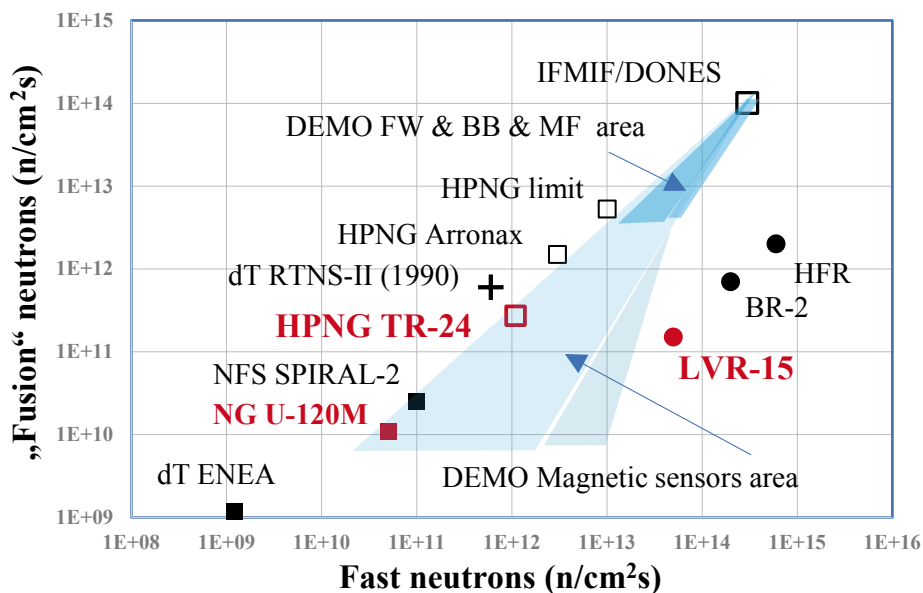
| Programové zaměření HPNG

Za grantovou podporu programu Laboratoře jsme dosud vděčili termojaderným technologům a jejich obavě z prahových reakcí fúzních neutronů vyvolávajících materiálové degradace a transmutační změny materiálů a komponent budoucích reaktorů. „Na druhé straně“ přízeň k těmto reakcím narůstá v komunitě radiofarmaceutů: použitelnost prahové reakce $(n,2n)$ k přípravě významného radionuklidu ^{225}Ac pro léčbu prostaty je zvažována s užitím neutronů budoucích deuteronových cyklotronů. K nabídce neutronů pro výzkum radiofarmak se uchyluje i samotný programový tým IFMIF/DONES. Nicméně kolegové z Oddělení radiofarmak ÚJF (přední evropské laboratoře v oboru a naši sousedé na TR-24) k neutronové přípravě ^{225}Ac projevují významnou zdrženlivost a zaměřují svoji pozornost v přípravě ^{225}Ac na ověřenou reakci protonů s radioaktivním terčem ^{226}Ra .

I nadále vycházíme z poznatku, že HPNG může být užitečný zejména pro radiační testy komponent diagnostiky fúzního plazmatu. Pro toto tvrzení připomeňme, že od prvních testů (1990) s řádově nedostačujícím tokem zdroje RTNS-II až do završení projektu relevantně intenzivního zdroje IFMIF/DONES v roce 2035 jsou jedinou testovací základnou materiálů pro ITER a DEMO výzkumné materiálové reaktory (Material Research Reactors, MRR), a to i přes nízký podíl neutronů fúzních energií (≥ 10 MeV). Odborná

literatura přesto vytrvale akcentuje požadavek testů se zdroji realisticky simulujícími prostředí DEMO reaktoru.

Zůstaňme u neutronů a ilustrujme vztah požadavků DEMO a simulačních schopností neutronových „testorů“ s pomocí grafu korelace hustoty toku „fúzních“ neutronů k celkovému toku neutronů rychlých (Obr. 6). Plochou je vyznačena přibližná množina spektrálního složení neutronů v útrobách DEMO různých koncepcí jako důsledku moderace primárních 14 MeV fúzních neutronů. Body ilustrují pole MRR reaktorů (HFR, BR-2, LVR-15) a urychlovačem řízených neutronových zdrojů. Z grafu je zřejmé, proč DONES zůstává jedinou alternativou pro testování materiálů první stěny a blanketu DEMO (FW-first wall, BB-breeder blanket, MF – manifold). Ilustruje také vhodnost polí MRR k testům v lokacích s nižší intenzitou pole DEMO (např. v lokacích magnetických čidel), ale s principiálně kon-



• Obr. 6: Korelace fúzních a rychlých neutronů ve spektrech výzkumných štěpných reaktorů, urychlovačem řízených zdrojů neutronů a termojaderného reaktoru.

Zdroj: Archiv CANAM

zervativními výsledky pro převahu tepelných neutronů. Diagnostici DEMO plazmatu nicméně zdůrazňují malé rozměry kanálů MRR, které znesnadňují provádění in situ testů funkčních parametrů komponent (např. za přítomnosti kryogenní techniky nebo řízených magnetických polí).

„V krátkodobých pilotních testech konvertoru s reálným Be terčem jsme potvrdili očekávaný neutronový tok řádu $10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a přibližovali se k dosud nepřekonané rekordní hustotě toku generátoru RTNS-II.“

Soudobé urychlovačem řízené neutronové zdroje (dT-ENEA Frascati, generátory U-120M ÚJF a NFS SPIRAL-2 v Ganilu) dostatečný manipulační prostor poskytují, ale nikoliv intenzitu pole.

Máme ambici využít konvertor HPNG na protonovém cyklotronu TR-24 k zaplnění mezery mezi DONES a současnými zdroji, navázat

na zdroj RTNS-II a poskytnout podmínky pro radiační in situ testy diagnostických komponent DEMO, kompatibilní s konzervativními testy na MRR středního výkonu (typu LVR-15 CVŘ) – viz korelační graf.

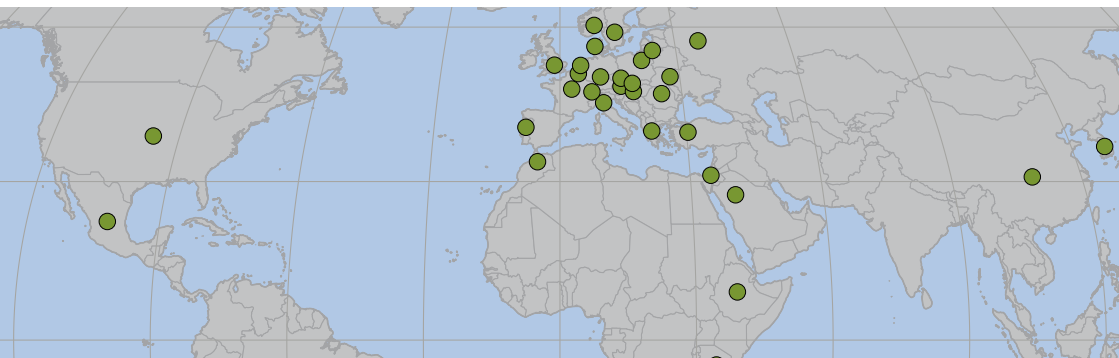
Další potenciální předností konvertoru může být využití zdrojové reakce $d+\text{Be}$, která při energiích deutronů 30–40 MeV vykazuje ve srovnání s reakcí $p+\text{Be}$ násobně vyšší výtěžek neutronů. Korelační graf ilustruje případné užití kompaktního HPNG konvertoru na dosud ojedinělém produkčním d-cyklotronu (40 MeV) ARRONAX a rovněž limit deutronové verze konvertoru, dosažitelný na očekávaných budoucích deutronových produkčních cyklotronech (IsoDAR, MIT).

Poděkování

Možnost sestavit tak rozsáhlý soubor aktivit a výsledků je velkou zásluhou celého týmu Laboratoře. V našem textu nezmiňujeme profesní ani osobnostní zaměření členů týmu, ale autor textu věří, že tak společně zavzpomínáme v jiném dokumentu pro jinou příležitost.

8 | CANAM – Centrum urychlovačů a jaderných analytických metod

 **Jan Dobeš**
Útvar ředitele ÚJF



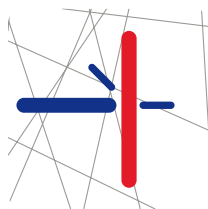
Ustavení výzkumné infrastruktury CANAM. Novela zákona o podpoře výzkumu a vývoje z veřejných prostředků z roku 2009 stanovila možnosti a podmínky pro poskytování účelové podpory velkých infrastruktur pro výzkum, vývoj a inovace jakožto jedinečných výzkumných zařízení provozovaných výzkumnými institucemi a poskytovaných v rámci otevřeného přístupu pro využití též dalšími výzkumnými a inovujícími organizacemi. Následně MŠMT, orgán státní správy ČR odpovědný za tuto oblast, přistoupil k mapování velkých výzkumných infrastruktur v ČR.

Základní výzkumná zařízení v ÚJF – v té době urychlovače U-120M a Tandatron 4130MC a zařízení na reaktoru LVR-15 – byla využívána řadou domácích i zahraničních spolupracujících institucí. Pracoviště v oblasti neutronové fyziky bylo přitom již zahrnuto od roku 2004 v infrastrukturním evropském projektu NMI3 – ACCESS to Large Facilities a poskytovalo otevřený přístup externím uživatelům. Svou kombinací tvořila zařízení ÚJF unikátní a synergický soubor v českém i v mezinárodním kontextu. Proto jsme se v ÚJF rozhodli je spojit a vytvořit projekt jedné výzkumné infrastruktury. Prvotní pojmenování projektu Centrum modifikace a analýzy materiálů ionty a neutrony bylo modifikováno na Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods – Centrum urychlovačů a jaderných analytických metod s akronymem CANAM.

Projekt CANAM byl předložen MŠMT a zahrnut již v roce 2010 do první verze Cestovní mapy velkých výzkumných infrastruktur ČR jako prioritní projekt. Na tomto základě byl následně připraven návrh projektu na poskytnutí účelové podpory velkých infrastruktur výzkumu pro CANAM. Ten po modifikování a připravení podkladů pro investiční rozšíření experimentální základny CANAMu a prenotifikaci projektu na DG Competition v Bruselu byl úspěšně završen udělením rozhodnutí o financování projektu v roce 2012.

Laboratoře CANAM

Aktivity výzkumné infrastruktury CANAM jsou organizovány v laboratořích spojených s jednotlivými základními výzkumnými zařízeními. V době ustavení CANAMu to byly tři laboratoře.



**Center of Accelerators
and Nuclear Analytical Methods
(CANAM)**

▪ Obr. 1: Logo infrastruktury CANAM. Zdroj: Archiv CANAM

Laboratoř cyklotronů a generátorů rychlých neutronů (LC&FNG – Laboratory of Cyclotrons and Fast Neutron Generators)

Na isochronním cyklotronu U-120M s $K=40$ jsou k dispozici svazky urychlených iontů (H^+ , H^- , D^+ , D^- , $^3\text{He}^{2+}$, $^4\text{He}^{2+}$) v širokém rozsahu energií 1–54 MeV a proudy od několika nA do desítek μA v závislosti na typu iontu a použití interního nebo externího svazku.

„Výzkumná infrastruktura CANAM je výjimečná synergickou dostupností čtyř iontových urychlovačů, instrumentace na neutronových svazcích výzkumného reaktoru LVR-15 a zdrojů rychlých neutronů.“

V roce 2016 byl do laboratoře začleněn nově pořízený cyklotron TR-24 poskytující protonové svazky s energií 18–24 MeV a dosažitelnými proudy až 300 μA .

Na svazcích iontů urychlených na cyklotronech je instalováno několik typů generátorů

rychlých neutronů, tj. s energií v řádu MeV. Na U-120M jsou k dispozici rychlé neutrony s energiemi až do 33 MeV a maximálním tokem $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Na TR-24 v produkční reakci $p+\text{Be}$ jsou generovány neutrony s energiemi $E_n \leq 24 \text{ MeV}$ a intenzivními toky v řádu $10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Výzkumný program LC&FNG se zaměřuje na studium jaderných reakcí významných pro astrofyziku, validaci jaderných dat, měření excitačních funkcí produkčních reakcí radionuklidů relevantních pro medicínské a jiné využití a přípravu těchto radionuklidů, studium radiačního poškození elektronických komponent a další. Rychlé neutrony mají své nezastupitelné použití v oblasti fúzních technologií.

Pro podrobnější informaci o aktivitách LC&FNG viz příspěvky J. Štursy a D. Chvátila *Cyklické urychlovače ÚJF* a P. Béma *Generátory rychlých neutronů* v této publikaci.

Laboratoř Tandetronu (LT – Laboratory of Tandetron)

Elektrostatický lineární urychlovač tandemového typu HVVE Tandetron

4130 s terminálním napětím 3 MV produkuje urychlené ionty od H^+ do Au^{n+} s energiemi v rozsahu 600 keV–24 MeV. Urychlené svazky jsou distribuovány do pěti tras obsazených instrumenty pro jaderné analytické metody a iontovou implantaci a pro iontovou mikrosundu.

Instrumentace LT je využívána hlavně pro syntézu, modifikaci a charakterizaci nano-/mikrostruktur, mnohvrstevnatých systémů a pevných materiálů. Rovněž jsou často studovány biologické a environmentální vzorky a předměty kulturního dědictví.

Činnosti LT se věnuje detailněji příspěvek A. Mackové a V. Hnatowicze *Laboratoř Tandetronu* v této publikaci.

„Projekt CANAM byl předložen MŠMT a zahrnut již v roce 2010 do první verze Cestovní mapy velkých výzkumných infrastruktur ČR jako prioritní projekt.“

Laboratoř neutronové fyziky (NPL – Neutron Physics Laboratory)

Centrum výzkumu Řež s.r.o. provozuje v řežském areálu výzkumný jaderný reaktor LVR-15 s maximálním neutronovým tokem v centru $10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Na několika kanálech reaktoru jsou instalována a používána vědecká zařízení Ústavu jaderné fyziky AV ČR.

Pět instalací využívá metody neutronové difrakce a rozptylu ve studiích struktury a mikrostruktury materiálů, jako jsou např. vysokoteplotní slitiny nebo materiály vyrobené aditivní technologií. Jedna instalace s kolimovaným neutronovým svazkem je určena pro analytické studie s termálními neutrony. Na vertikálních kanálech reaktoru jsou ozařovány vzorky pro další velmi citlivé komplexní analýzy a prvkové charakterizace metodami neutronové aktivační analýzy.

O aktivitách NPL více viz příspěvky P. Strunze *Dvě dekády rozvoje a využití Laboratoře neutronové fyziky* a J. Kučery a dalších *Aktivační a rentgen-fluorescenční analýza*.

V roce 2020, tehdy ještě ve stadiu budování, byla do infrastruktury CANAM začleněna LAMS. Ta byla vybudována v rámci projektu RAMSES jako společné pracoviště Ústavu jaderné fyziky AV ČR, Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT a Archeologického ústavu AV ČR, Praha.

Laboratoř urychlovačové hmotnostní spektrometrie (LAMS – Laboratory of Accelerator Mass Spectrometry)

LAMS je vybavena systémem MILEA (Multi-Isotope Low-Energy Accelerator) s tandemovým urychlovačem s terminálním napětím 300 kV. MILEA poskytuje výborné možnosti pro určení celé řady radionuklidů s vysokou citlivostí v mnoha aplikačních oblastech, jako jsou archeologie, kulturní dědictví, kvartérní geologie, paleobotanika, paleoekologie, klimatická změna, monitorování životního prostředí.

O LAMS pojednává více příspěvek J. Kučery a J. Kameníka *Laboratoř AMS — Společné pracoviště ÚJF AV ČR, FJFI ČVUT a ARÚ AV ČR, Praha* v této publikaci.

V roce 2024 byla zahrnuta do CANAM Laboratoř Mikrotronu, která dlouhodobě funguje v rámci Oddělení urychlovačů a které v předchozím období významně vzrostlo výzkumné uplatnění.

Laboratoř Mikrotronu (LM – Laboratory of Microtron)

Mikrotron MT25 je cyklický elektronový urychlovač s variabilní elektronovou energií od 0,5 do 25 MeV a s proudem od 0,5 do 20 μA . K dispozici jsou sekundární fotonové svazky produkované brzdným zářením na wolframovém terči a neutronové toky z fotojaderné reakce (γ , Pb) nebo z uranového fotoštěpení.

Na mikrotronu se mj. provádí za dobře kontrolovaných a monitorovaných podmínek studie radiační odolnosti a modifikace materiálů a testování detektorů. Fotonové svazky se používají pro fotonovou aktivační analýzu geologických, biologických a environmentálních vzorků.

O LM více v příspěvku J. Štursy a D. Chvátila *Cyklické urychlovače ÚJF*.

Podpora

V období 2012 až 2015 byl CANAM podpořen MŠMT projektem LM2011019 – CANAM – příspěvek k provozu a k reinvesticím Centra urychlovačů a jaderných analytických metod z programu Projekty velkých výzkumných infrastruktur. Cílem projektu byla podpora provozu a využití výzkumné infrastruktury CANAM pro domácí a vnější uživatele. Jak již napovídá název projektu, kromě provozních nákladů byla předmětem podpory i investiční složka s významnou položkou určenou na pořízení nového cyklotronu TR-24. Z dalších investic zmiňujeme přídavný iontový zdroj pro urychlovač Tandetron, XRF spektrometr a vakuové a detekční komponenty pro neutronové generátory. Ústav jaderné fyziky AV ČR se podílel ze svých zdrojů na nákladech projektu jednou třetinou.

V roce 2014 vyhlásilo MŠMT novou výzvu k podávání návrhů výzkumných infrastruktur s tím, že výsledky hodnocení budou sloužit jako podklad pro poskytnutí účelové podpory vybraným projektům pro nadcházející období 2016–2020/2022. Náš návrh byl hodnocen příznivě a CANAM byl v období

2016–2019 podpořen z programu MŠMT Projekty velkých výzkumných infrastruktur v projektu LM2015056 – Centrum urychlovačů a jaderných analytických metod. Na rozdíl od předchozího LM projektu bylo možno čerpat investiční prostředky pouze v prvním roce řešení projektu, nejvýznamnější pořízenou položkou byl automatický měnič vzorků pro měření metodou neutronové aktivační analýzy.

„V roce 2020 členové SAC [infrastruktury CANAM] vytvořili jádro nově ustaveného mezinárodního poradního sboru ÚJF.“

Investiční podpora a rovněž podpora výzkumných aktivit velkých infrastruktur za strany MŠMT se stala předmětem Operačního programu Výzkum, vývoj, vzdělávání. V projektu EF16_013/0001812 – Centrum urychlovačů a jaderných analytických metod – OP v období 2017–2020 jsme řešili tři výzkumné aktivity: Měření jaderných reakcí důležitých pro technologické aplikace, Syntéza nových nanostruktur fokusovanými energetickými

iontovými svazky a Studium materiálů pro lithiové iontové baterie. Investičně orientované programy se týkaly:

- modernizace cyklotronem řízených neutronových generátorů s vývojem systému shlukování svazku na cyklotronu U-120M a výkonného proton-neutronového konvertoru pro nově instalovaný kompaktní cyklotron TR-24,
- modernizace detekčních systémů na cyklotronu U-120M s instalací detekčního systému pro reakce typu (n , nabitá částice),
- modernizace iontového mikrosvazku a implementace koncového zařízení pro externí svazek na Tandetronu,
- modernizace přístrojového vybavení Laboratoře neutronové fyziky mj. s realizací nového neutronovodu se superzrcadly.

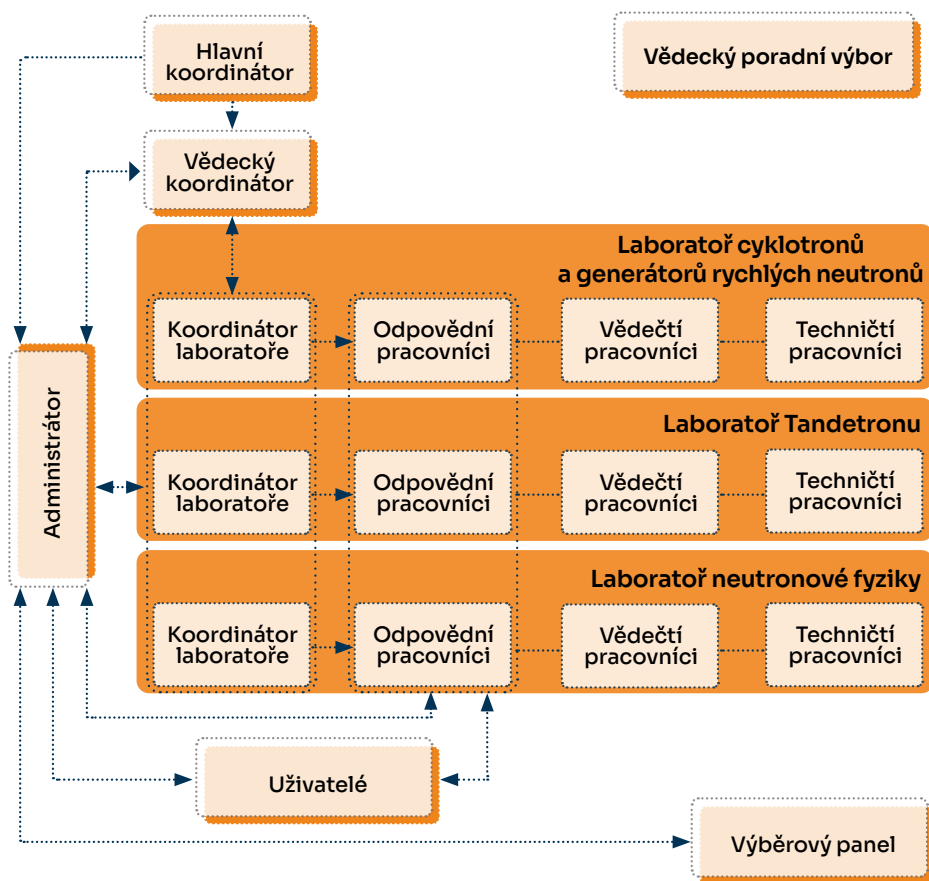
V roce 2016 MŠMT vyhlásilo výzvu k předkládání dokumentace pro účely 1. interim hodnocení velkých výzkumných infrastruktur s tím, že výstupy hodnocení budou sloužit pro rozhodnutí o poskytnutí účelové podpory MŠMT v letech 2020–2022. Projekt CANAM v tomto hodnocení obdržel známku 3. To znamenalo, že podpora MŠMT pro CANAM byla v roce 2020 zastavena a CANAM nebyl zařazen do aktualizované verze Cestovní mapy ČR velkých infrastruktur pro výzkum, experimentální vývoj a inovace pro léta 2016–2022.

V novém kole hodnocení velkých výzkumných infrastruktur MŠMT v roce 2020 byl neúspěšně podán infrastrukturní projekt CANAM PE3H (CANAM for Physical sciences and Engineering, Energy, Environmental sciences and Health and food), který představoval pokračování projektu CANAM s akcentem na aplikace ve vybraných oblastech.

Ukončení podpory projektu CANAM ze strany MŠMT znamená podstatnou změnu ve fungování této infrastruktury. Ústav stále podporuje otevřený uživatelský režim z institucionálních prostředků, nicméně s omezeními, která znamenají snížení počtu uživatelů přibližně na polovinu.

Dalším nástrojem, který umožňuje přístup externích uživatelů, je účast jednotlivých laboratoří CANAMu v řadě evropských infrastrukturních projektů, jako byly nebo jsou:

- RADNEXT – RaDIation facility Network for the EXploration of effects for indusTry and research,
- SANDA – Supplying Accurate Nuclear Data for energy and non-energy Applications,



- Obr. 2: Organizační struktura CANAM se třemi zakládajícími laboratořemi.

Zdroj: Archiv CANAM

- ARIEL – Accelerator and Research reactor Infrastructures for Education and Learning,
- ReMade@ARI – Recyclable Materials Developments at Analytical Research Infrastructures,
- SINE2020 – Science & Innovation with Neutrons in Europe in 2020,
- ENEN2+,
- EUROfusion,
- NEPHEWS – Neutrons and Photons Elevating Worldwide Science,
- RIANA – Research Infrastructure Access in Nanoscience & Nanotechnology.

Organizační schéma

V rámci organizační struktury ÚJF je CANAM zařazen jako výzkumný projekt. To znamená, že vedení CANAMu je plně odpovědné za provoz CANAM a jeho vědeckou kvalitu s vlastní rozhodovací působností v efektivním, ekonomickém a účelném využití finančních prostředků.

Organizační struktura projektu CANAM je popsána ve schématu na Obr. 2 (stav v období se třemi zakládajícími laboratořemi).

V čele projektu CANAM je hlavní koordinátor, výzkumné aktivity jsou řízeny vědeckým koordinátorem. Tyto dvě osoby spolu s koordinátory laboratoří tvoří koordinační výbor. Jednotlivé instrumenty mají ustanoveny své odpovědné pracovníky (instruments responsables). Vědecká strategie, politika, kvalita a výsledky jsou pravidelně hodnoceny vědeckým poradním výborem (Scientific Advisory Committee). Výběrový panel (Scientific Selection Panel) hodnotí projekty navržené k realizaci na CANAM. Administrativní a organizační složkou je User Office s osobou administrátora.

Scientific Advisory Committee (SAC) byl jmenován ředitelem ÚJF. Skládal se z 8 renomovaných vědců v oborech činnosti CANAM, 5 zahraničních a 3 domácích. Ti si ze svého středu zvolili předsedu. SAC pracoval v režimu prezenčních i virtuálních zasedání a své závěry a doporučení předkládal hlavnímu koordinátorovi CANAM a řediteli ÚJF. SAC byl činný v nezmě-

něném složení v období poskytování účelové podpory MŠMT pro CANAM jako velké infrastruktury výzkumu 2012–2019 v sestavě:

Assoc. Prof. Dr. Ir. Peter Bode, Delft University of Technology, Nizozemsko, předseda,

Dr. Pavel Yu. Apel, JINR, Dubna, Ruská federace,

Assoc. Prof. František Bečvář, DrSc. Univerzita Karlova, Praha,

Prof. Dr. David Rafaja, Technical University Bergakademie, Freiberg, Německo,

Prof. Dr. Jan John, ČVUT Praha,

Dr. Jiří Kopecký, JUKO Research, Alkmaar, Nizozemsko,

Dr. François de Oliveira Santos, GANIL, Caen, Francie,

Prof. Dr. Václav Švorčík, VŠCHT Praha.

„Rozsah vědecké specializace uživatelů a publikací dokládá, že CANAM jako výzkumná infrastruktura slouží multidisciplinární komunitě uživatelů.“

V roce 2020 členové SAC vytvořili jádro nově ustaveného mezinárodního poradního sboru ÚJF.

Scientific Selection Panel (SSP) monitoruje vědeckou kvalitu návrhů podaných k realizaci na zařízeních CANAM. Průběžně se skládá z 80–90 členů, z nichž polovina je ze zahraničí.

User office poskytuje uživatelům CANAMu administrativní a organizační zázemí a zajišťuje komunikaci mezi uživateli a laboratořemi. Zabezpečuje rovněž administrativní a organizační záležitosti CANAM.

Open access

Všichni uživatelé CANAM, včetně těch z hostitelského ÚJF, podléhají jednotným zásadám otevřeného přístupu. Ten je založen na následujících principech:

- aplikace systému open access v transparentním přístupu s rovným přístupem k uživatelům,
- posouzení návrhů experimentů dvěma nezávislými experty ze SSP,

- efektivní komunikace především přes web – user portal,
- zpětná vazby od uživatelů po dokončení výzkumných aktivit.

Informace o procesu podávání žádostí poskytuje web CANAM. Návrhy experimentů je možno podávat průběžně. Návrh by měl být popsán v cca jednostránkovém nebo dvoustránkovém dokumentu předkládaném prostřednictvím interaktivního user portalu. Koordinátoři laboratoří nebo Instrument Responsible (IR) osoby prohlédnou návrh a jmenují dva experty ze SSP podle vědního oboru návrhu a metody a přístroje vhodného pro experiment.

Experti ze SSP návrh posoudí a vyhodnotí na desetistupňové škále (0-9 bodů). Po zprůměrování těchto dvou hodnocení je návrh kategorizován následovně:

- $\geq 7 \rightarrow$ měřicí čas je přidělen přednostně,
- ≥ 4 a $< 7 \rightarrow$ měřicí čas je přidělen, když je měřicí čas dostupný v konkrétním zařízení (posouzeno IR),
- ≥ 2 a $< 4 \rightarrow$ měřicí čas může být přidělen, když je měřicí čas dostupný v konkrétním zařízení a když návrh pochází od nového uživatele (posouzeno koordinátorem laboratoře),
- $< 2 \rightarrow$ návrh je vždy zamítnut.

Technická proveditelnost experimentu je posouzena IR. Na základě vědeckého hodnocení a technické proveditelnosti je návrh schválen a je přidělen měřicí čas. O stavu návrhu jsou uživatelé informováni e-mailem. Webová stránka CANAM poskytuje informace o administrativních postupech, které je nutné dodržet pro osobní přítomnost během experimentu.

Po skončení experimentu uživatel do tří měsíců předkládá krátkou zprávu o experimentu a posléze informace o následných publikacích. V těch musí být řádně uvedeno využití infrastruktury CANAM.

Uživatelé

Uživatelé předkládají návrhy svých experimentů prostřednictvím portálu CANAM. Často spolupracující týmy z několika institucí se účastní jednoho

experimentu a/nebo využití jeho produktu (modifikovaný vzorek, radioisotop, data apod.). Týmy se zpravidla skládají z několika členů (někdy až mnoha) a jejich vedoucí jsou v návrzích uváděni jako navrhovatelé a spolunavrhovatelé. V rámci CANAMu jsou konzistentně do kategorie uživatelů zahrnováni pouze navrhovatelé a spolunavrhovatelé. Samozřejmě započtení ostatních členů týmu by podstatně zvyšovalo ve statistikách počet uživatelů.

Charakter zařízení a služeb CANAM vyžaduje značnou spolupráci a zapojení výzkumníků z CANAMu (obvykle osoby odpovědné za přístroj) do podporovaných výzkumných týmů. Toto zapojení, a to v závislosti na kvalifikaci uživatelů, se může týkat nestandardní přípravy experimentu, jeho provedení, vyhodnocení a případně i interpretace apod. V těchto případech jsou členové CANAM zahrnováni do týmu a z nich je určen i spolunavrhovatel.

Dále uvádíme několik statistických údajů z let 2012–2019, tedy z období, kdy provoz CANAMu byl podpořen z programu MŠMT Projekty velkých výzkumných infrastruktur.

Celkový počet experimentů 505, z toho podle afiliace navrhovatele:

- z univerzit – 164, tj. 32 %,
- z veřejných výzkumných subjektů – 313, tj. 62 %,
- z průmyslu – 26, tj. 5 %,
- z veřejného sektoru – 2, tj. <1 %.

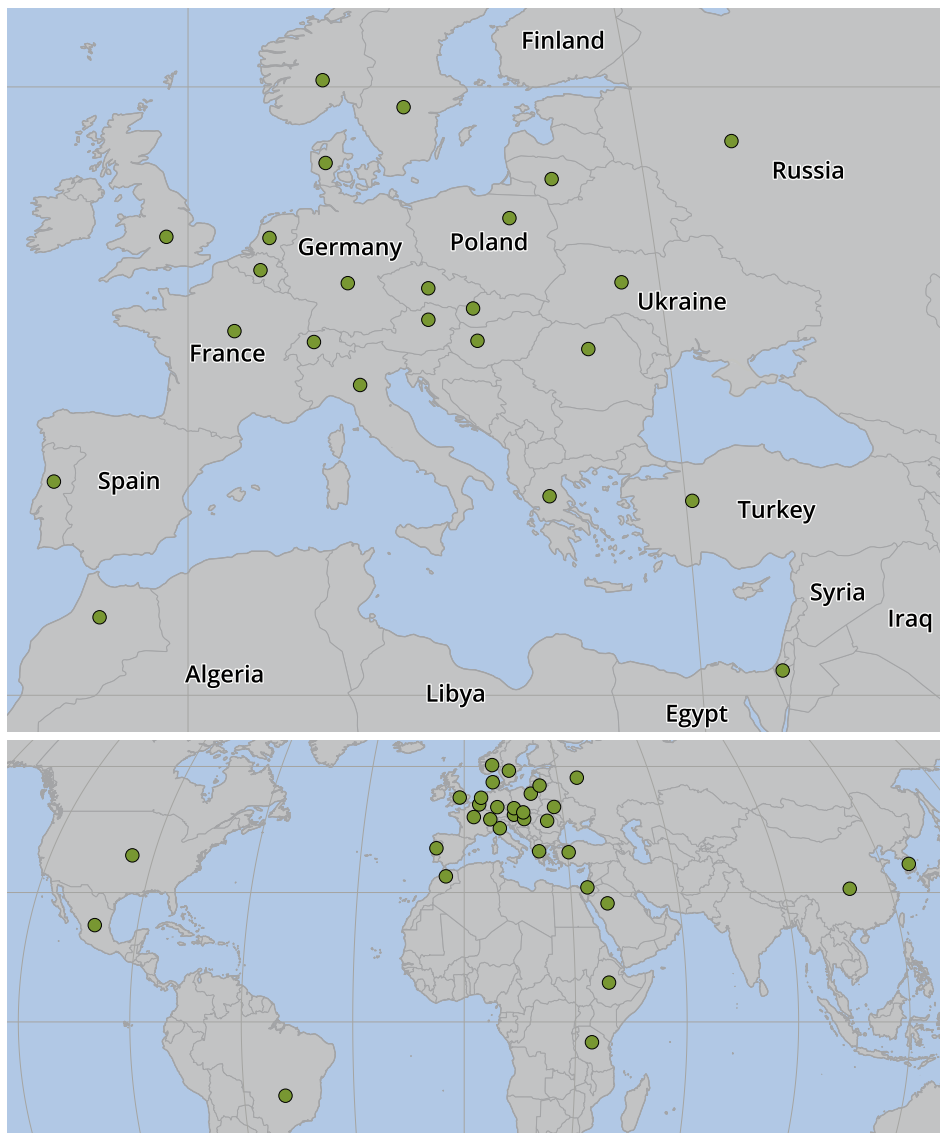
Podle země navrhovatele je těchto 505 experimentů rozděleno na:

- Česko – 303, tj. 60 %,
- EU bez ČR – 156, tj. 31 %,
- ostatní země – 45, tj. 9 %.

Počet uživatelů 1 245, z toho:

- z Česka – 808, tj. 65 %,
- ze zahraničí – 437, tj. 35 %.

Státy, ze kterých jsou uživatelé, jsou ilustrativně ukázány na obrázku:



■ Obr. 3: Státy, ze kterých jsou instituce uživatelů CANAM.

Ilustrace: Archiv CANAM, mapový podklad: Natural Earth

Celkový počet vyprodukovaných publikací je 457, z toho v impaktovaných časopisech 351. Rozsah vědecké specializace uživatelů a publikací dokládá, že CANAM jako výzkumná infrastruktura slouží multidisciplinární komunitě uživatelů (struktura oborů OECD, Frascati manual):

10301 – Atomic, molecular and chemical physics	10509 – Meteorology and atmospheric sciences
10302 – Condensed matter physics (including formerly solid state physics; supercond.)	10511 – Environmental sciences
10303 – Particles and field physics	10608 – Biochemistry and molecular biology
10304 – Nuclear physics	10610 – Biophysics
10305 – Fluids and plasma physics (including surface physics)	10611 – Plant science, botany
10306 – Optics (including laser optics and quantum optics)	10612 – Mycology
10308 – Astronomy (including astrophysics; space science)	20201 – Electrical and electronic engineering
10401 – Organic chemistry	20301 – Mechanical engineering
10402 – Inorganic and nuclear chemistry	20304 – Aerospace engineering
10404 – Polymer science	20305 – Nuclear related engineering
10405 – Electrochemistry	20501 – Materials engineering
10406 – Analytical chemistry	20504 – Ceramics
10505 – Geology	20505 – Composites
10506 – Paleontology	20506 – Coating and films
	20602 – Medical laboratory technology
	21001 – Nano-materials (production and properties)
	30107 – Medicinal chemistry
	30224 – Radiology; nuclear medicine and medical imaging
	60102 – Archaeology

Jak již bylo konstatováno dříve, omezení v otevřeném uživatelském režimu od roku 2020 znamená snížení počtu experimentů a uživatelů přibližně na polovinu.

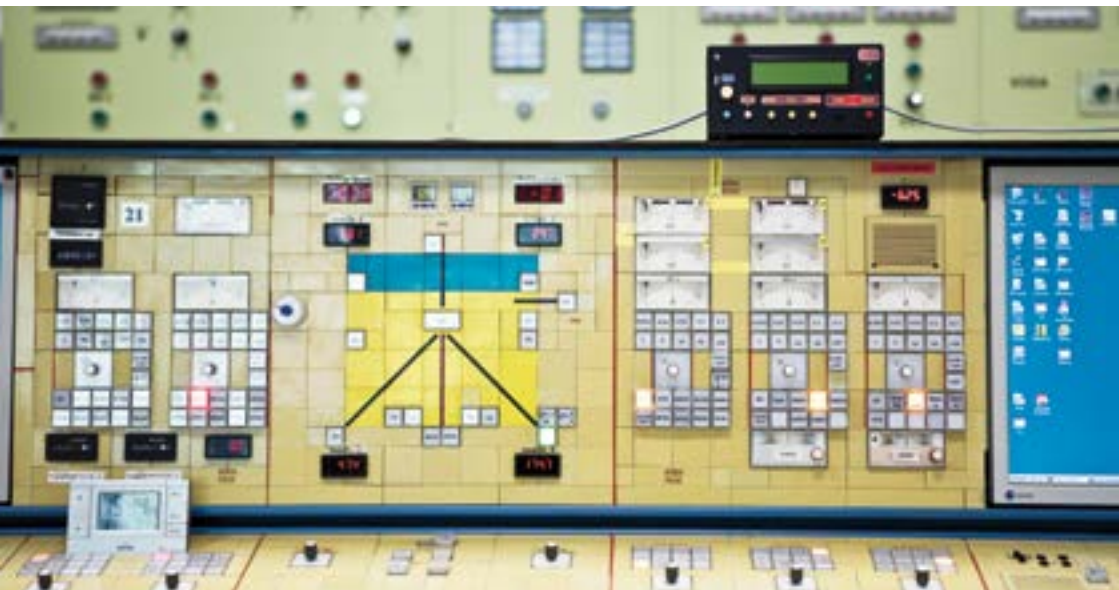
Závěr

Výzkumná infrastruktura CANAM je výjimečná synergickou dostupností čtyř iontových urychlovačů, instrumentace na neutronových svazcích výzkumného reaktoru LVR-15 a zdrojů rychlých neutronů. K dispozici je široké spektrum analytických, charakterizačních, modifikačních a produkčních

„Výběrový panel (Scientific Selection Panel) hodnotí projekty navržené k realizaci na CANAM.“

metod. CANAM je schopen poskytnout flexibilní přístup a reakci na aktuální požadavky náročných domácích i zahraničních uživatelů.

Podpora CANAMu z institucionálních prostředků, která umožňuje částečný „open access“, i účast CANAM laboratoří v evropských infrastrukturních a dalších projektech přináší nové spolupráce, impulzy a směry do budoucna a spolu s entuziastickým přístupem týmu CANAM zajišťuje jeho viditelné místo v systému velkých výzkumných infrastruktur.



■ Obr. 4: Detail řídicího pultu cyklotronu U-120M. Snímek z roku 2014. Foto: Archiv ÚJF

7 | Radiouhlíková laboratoř CRL



Ivo Světlík, Veronika Brychová,
Kateřina Pachnerová Brabcová

Oddělení dozimetrie záření ÚJF



Radiouhlíková datovací laboratoř vznikala po roce 2000 společným úsilím ÚJF AV ČR, v.v.i. a Archeologického ústavu Praha, AV ČR, v.v.i. Po validaci souvisejících analytických metod na reálných vzorcích se známým stářím byl v roce 2004 udělen laboratoři mezinárodní kód CRL.

Metoda stanovení aktivity ^{14}C byla původně založena na zpracování vzorků s hmotností datovatelné chemické formy uhlíku několika gramů. Po předúpravě byly vzorky spalovány a z přečištěného CO_2 byl syntetizován benzen. Aktivity ^{14}C byly poté radiometricky měřeny na nízkopozadovém kapalinovém scintilačním spektrometru QUANTULUS 1220.

Přibližně od roku 2011 prováděla laboratoř experimenty se zpracováním mikrovzorků pro měření ^{14}C pomocí AMS (Accelerator Mass Spectrometry). Vlastní měření byla v té době realizována ve spolupráci se zahraničními pracovišti.

Kromě vyšší kapacity analýz a několikanásobně menších nejistot měření je hlavní výhodou analýz ^{14}C s využitím AMS měření přibližně o tři řády nižší potřebná hmotnost vzorků. Zásadně se proto rozšiřují možnosti datování archeologických vzorků. Současně je také možné radiouhlíkové datovat

„Po validaci souvisejících analytických metod na reálných vzorcích se známým stářím byl v roce 2004 udělen laboratoři mezinárodní kód CRL.“

i jiné typy materiálů, u kterých shromáždění dostatečného množství pro radiometrické metody nebylo reálné, jde například o pylové koncentráty, semena, chitin, textilie, tuky, vosky. Při radiometrickém měření je totiž nezbytné čekat na radioaktivní přeměnu atomu ^{14}C . Při poločasu tohoto radionuklidu

5730 let pozorujeme za přibližně tři dny radiometrického měření přeměnu pouhé jedné milióntiny atomů ^{14}C , které jsou ve vzorku přítomny. Metoda AMS je založena na hmotnostní spektrometrii bez nutnosti čekat několik dní na potřebný počet registrovaných radioaktivních přeměn ^{14}C pro zajištění požadované nízké nejistoty měření. V průběhu přibližně hodinového AMS měření je pozorováno několik procent atomů ^{14}C ze vzorku, množství, které je dostatečné pro radiouhlíkové datování.

Projekty RAMSES a RES-HUM

V roce 2018 byl zahájen projekt RAMSES (Výzkum ultrastopových izotopů a jejich využití v sociálních a environmentálních vědách urychlovačovou hmotnostní spektrometrií; podrobněji viz příspěvek J. Kučery a J. Kameníka *Laboratoř AMS — Společné pracoviště ÚJF AV ČR, FJFI ČVUT a ARÚ AV ČR, Praha v této publikaci*), který umožnil stavbu budovy AMS laboratoří, nákup AMS systému MILEA (Multi Isotope Low-Energy Accelerator mass spectrometry) od švýcarské firmy Ionplus a také doplnění dalšího přístrojového vybavení laboratoře CRL, zejména: systém plynového chro-

matografu Agilent ve spojení s hmotnostním spektrometrem a průletovým analyzátozem MS-TOF (Pegasus BT od LECO) a frakčním kolektorem Gerstel (umožňující například izolovat reziduální mastné kyseliny ze vzorků archeologické keramiky a připravit je tak pro molekulárně-specifickou radiouhlíkovou analýzu, CSRA), systém pro IRMS (Isotope Ratio Mass Spectrometry) analýzu stabilních izotopů ^{13}C a ^{15}N , infračervený spektrometr (FTIR) nebo například systém GIS (Gas Interface System) pro přímé měření CO_2 , vhodný pro AMS měření vzorků o hmotnostech uhlíku pod 200 mikrogramů. Díky navazujícímu projektu RES-HUM (Připravení na budoucnost: Porozumění dlouhodobé odolnosti lidské kultury) bylo v roce 2024 vybavení laboratoře CRL dále rozšířeno o systém kapalinové chromatografie (LC) v analytickém a preparativním měřítku Infinity 1260 II (Altium), který umožní například ze silně degradovaných vzorků kostí izolovat pro radiouhlíkové datování aminokyselinu 4-hydroxyprolin (Obr. 1).



■ Obr. 1: Systém analytického a preparativního kapalinového chromatografu Infinity 1260 (Altium, CRL Řež). Foto: Archiv CRL

Zpracování vzorků pro radiouhlíkové datování v laboratoři CRL

Před vlastním AMS měřením jsou vzorky zpracovávány v chemické laboratoři. Cílem této předúpravy je odstranění kontaminantů a izolace vhodné chemické formy uhlíku, která stářím souvisí s datovanou událostí. Takovou sloučeninou je například kolagen, celulóza, keratin, konchiolin a další, obecně většinou stabilní biopolymery, které se přestaly obnovovat smrtí organismu. Izolovaná sloučenina se spolu s oxidačním činidlem CuO spálí a vzniklý oxid uhličitý je redukován za přítomnosti katalyzátoru na elementární uhlík.

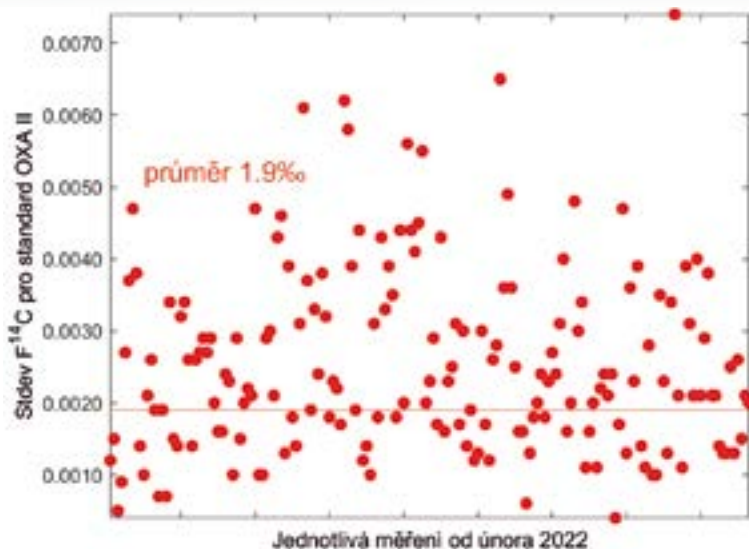
Nejčastějšími materiály CRL laboratoří jsou kosti, dřevo a zuhelnatělé zbytky rostlin, nicméně celkové portfolio vzorků je nesmírně pestré a zahrnuje také například nehty, textilie živočišného původu, slonovinu, papír, zubní kámen, uhličitánové schránky, vlasy, keramiku, vyčíněné kůže, peří a mnoho dalšího (Obr. 2a a Obr. 2b).



▪ Obr. 2a: Ukázky vzorků datovaných v laboratoři CRL: Zuhelnatělý materiál s prorostlými kořínky rostlin. Foto: Archiv CRL



■ Obr. 2b: Ukázky vzorků datovaných v laboratoři CRL: Zezdola kosti kontaminované konzervačním činidlem, hedvábí a peří z vycpaniny. Fotografie byly pořízeny pomocí pokročilého stereomikroskopu, kterým je laboratoř vybavena. Foto: Archiv CRL



• Obr. 3: Dole rozptýl měření radiouhlíkového standardu OXA II se známou aktivitou ^{14}C v období od února 2022 do března 2025. Na horním obrázku jsou dva iontové zdroje AMS MILEA. Obr. 3b vpravo nese zdroj viditelné stopy nečistot od cesia používaného k ionizaci elementárního uhlíku. Na obr. 3a vlevo je vyčištěn a připraven k dalšímu měření. Foto: Archiv CRL

AMS měření radiouhlíku na MILEA

Měření na našem AMS systému MILEA bylo zahájeno v únoru 2022 a od té doby se podařilo změřit přes 4 700 vzorků grafitů doprovázených více než 800 páry standardu kyseliny šťavelové (tzv. OXA II) známé aktivitou a pozadového vzorku. Průměrná pozadová aktivita je $52\,828 \pm 3151$ BP (BeforePresent, jednotky aktivity ^{14}C) a průměrný rozptyl měření standardních vzorků je pod 2‰ (Obr. 3).

Další aplikace analýz ^{14}C

Kromě klasického radiouhlíkového datování s využitím v archeologii, paleoekologii, geologii, antropologii a dalších disciplínách mají analýzy radiouhlíku i další uplatnění. Jde o datování pomocí radiouhlíkového bombového píku pro vzorky původem po roce 1950 s využitím zejména při ochraně ohrožených živočišných druhů a ve forenzním lékařství. Dále mají analýzy ^{14}C využití i v nedatovacích aplikacích, jako je sledování aktivity atmosférického $^{14}\text{CO}_2$ pro upřesnění parametrů globálního transportu uhlíku a kvantifikaci fosilního CO_2 v ovzduší původem z lokálních zdrojů, sledování ^{14}C v okolí jaderných elektráren, neboť ^{14}C je z hlediska dávkové zátěže populace nejvýznamnějším radionuklidem uvolňovaným do ovzduší za běžného provozu elektráren s lehkovodními tlakovými reaktory (JE Temelín a Dukovany), ověřování přírodního původu motorových paliv (HVO – Hydrogenated Vegetable Oil) a surovin používaných ve farmacii, potravinářství a kosmetice (suroviny připravené z fosilních zdrojů, jako jsou uhlí a ropa neobsahují ^{14}C). V poslední době narůstá také poptávka od spaloven komunálního odpadu po analýzách obsahu $^{14}\text{CO}_2$ ve spalínách (Obr. 4).



▪ Obr. 4: Odběr kumulovaného vzorku spalín do 150 ml „injekční stříkačky“ pro analýzu $^{14}\text{CO}_2$, spalovna odpadů v Liberci. Foto: Archiv CRL

Organická reziduální analýza

Další z aplikací provozovaných v rámci laboratoře CRL je organická reziduální analýza (ORA), která je již několik let s úspěchem využívána ke zkoumání různých typů archeologických artefaktů. Mezi jedny z nejčastěji do-

„Měření radiouhlíku na našem AMS systému MILEA bylo zahájeno v únoru 2022 a od té doby se podařilo změřit přes 4 700 vzorků grafitů.“

používání v minulosti. S využitím moderních analytických technik, včetně preparativního GC a systému AMS, tak lze dnes získat informace nejen o tom, co v nádobách naši předkové na konkrétní lokalitě zpracovávali, ale i kdy přesně k tomu v minulosti došlo.

„Nejčastějšími materiály CRL laboratoří jsou kosti, dřevo a zuhelnatělé zbytky rostlin, nicméně celkové portfolio zpracovávaných vzorků je nesmírně pestré.“

chovaných nálezů v archeologickém kontextu patří fragmenty keramických nádob (Obr. 5). Pokud byly původní keramické nádoby používány ke skladování, přípravě či podávání stravy bohaté na tuk, je možné z jejich fragmentů i po několika tisících letech extrahovat lipofilní rezidua, která se adsorbovala v porézní stěně nádob během jejich



■ Obr. 5: Keramická zásobnice z lokality Čejč (doba bronzová) před odběrem pro ORA v rámci projektu OP JAK RES-HUM. Foto: Masarykova univerzita v Brně

∞ Laboratoř AMS

– Společné pracoviště ÚJF AV ČR, FJFI ČVUT a ARÚ AV ČR, Praha



Jan Kučera, Jan Kameník

Oddělení neutronových a iontových metod ÚJF



Ozavedení urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS) v České republice, techniky, která umožňuje stanovení ultrastopových koncentrací dlouhodobých radionuklidů, jsme se snažili téměř 20 let. Teprve v r. 2018 se nám podařilo získat potřebné finanční zajištění v rámci projektu RAMSES operačního programu Výzkum, vývoj, vzdělávání (OP VVV) a zahájili jsme budování laboratoře AMS ve spolupráci tří institucí. Výsledkem našeho úsilí bylo ustanovení Společného pracoviště Ústavu jaderné fyziky AV ČR (ÚJF), FJFI ČVUT a Archeologického ústavu AV ČR, Praha (ARÚ). Vybudování laboratoře AMS, jejíž činnost byla zahájena v r. 2023, je bezpochyby jedním z nejvýznamnějších investičních počinů v nedávné historii ústavu.

Proč AMS a k čemu je tato unikátní metoda dobrá?

Metoda AMS umožňuje stanovení mnohých radionuklidů s mezemi detekce o 5–6 řádů nižšími ve srovnání s citlivými radiometrickými metodami, které detegují ionizující záření doprovázející radioaktivní přeměnu, z důvodů vyplývajících ze vztahu pro aktivitu A ,

$$A = \lambda N = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} N \quad (1)$$

kde λ je přeměnová konstanta, N je počet atomů a $T_{1/2}$ je poločas přeměny. Ze vztahu (1) je zřejmé, že čím větší je hodnota $T_{1/2}$, tím menší je hodnota A . Stanovení nízkých aktivit radiometrickými metodami je navíc ztíženo pozadím přirozeného radioaktivního záření. Od určité hodnoty $T_{1/2}$ (tisíce let a více) může být počítání atomů metodou AMS výhodnější. S malými

„Metoda AMS umožňuje stanovení mnohých radionuklidů s mezemi detekce o 5–6 řádů nižšími ve srovnání s citlivými radiometrickými metodami.“

vzorky a kratšími dobami měření (desítky minut místo desítek až stovek hodin) můžeme dosáhnout výsledků se stejnou nebo nižší nejistotou. V současnosti existují zařízení a postupy umožňující stanovení více než 30 radionuklidů. Rozvoj instrumentace AMS v posledních pár desetiletích vedl k nárůstu vědních a technických oborů, které využívají možnosti měření touto metodou. Jedná

se hlavně o environmentální vědy (studium procesů v atmosféře a hydrosféře), (paleo)klimatické studie, geologii (rychlost eroze, doba expozice, doba uložení), archeologii (datování artefaktů), biologii a medicínu (metabolické studie), jaderné vědy a technologie (monitorování emisí jaderných elektráren a palivového cyklu, zárukové analýzy) a rovněž astrofyziku a kosmochemii (stáří a původ mimozemských materiálů, pozůstatky výbuchů supernov).

Výstavba a vybavení laboratoře AMS

Laboratoř AMS je umístěna v nově vybudovaných prostorách objektu 231 (Obr. 1 a Obr. 2), které zahrnují sál urychlovače, chemické laboratoře pro přípravu vzorků, pracovny a technologické zázemí. Systém AMS jsme si

zvolili ve výběrovém řízení, v němž zvítězila nabídka švýcarské firmy Ion-plus AG se systémem MILEA (Multi-Isotope Low-Energy AMS). Moderní, kompaktní zařízení umožňuje stanovení ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{41}Ca , ^{129}I , U, Pu a dalších aktinoidů při nízkých provozních nákladech (terminálové napětí urychlovače max. 300 kV). MILEA dosahuje podobně příznivých parametrů jako AMS systémy s vyšším terminálovým napětím. Meze detekce vyjádřené jako nejmenší stanovitelný poměr radionuklidu k stabilnímu izotopu (pro aktinoidy nejdéle žijícímu radionuklidu) uvádí Tab. 1.

Tab. 1 – Meze detekce systému MILEA (bez $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca}$)

Izotopový pár				
$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	$^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$	$^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$
$<1,4 \times 10^{-15}$	$8-9 \times 10^{-16}$	$<2,6 \times 10^{-15}$	$4-<7 \times 10^{-14}$	$4,5 \times 10^{-13}$



■ Obr. 1: Budování nástavby objektu 231 pro laboratoř AMS. Foto: J. Kameník



▪ Obr. 2: Objekt 231 ÚJF AV ČR zahrnující prostory Laboratoře Tandetronu, věže cyklotronu TR-24 a Laboratoře AMS. Selektivně jsou upraveny barvy a doplněna kontura pro odlišení částí objektu. Foto: J. Kameník

Systém MILEA (Obr. 3) se skládá z odprašovacího iontového zdroje, v němž vzorek v pracovní poloze bombardují urychlené cesné ionty. Pneumaticky ovládaný manipulátor postupně zakládá vzorky v kovových katodách umístěných ve 40místném zásobníku. Ze svazku vytvořených záporně nabitých atomárních a molekulárních iontů urychlených v iontovém zdroji napětím cca 40 kV jsou průchodem elektrostatickým analyzátozem (ESA) a sektorovým magnetem vybírány ionty o určité energii a poměru m/z (m – hmotnost, z – náboj) vhodné pro další analýzu (nízkoenergetická část systému, tzv. injektor). Vybrané záporné ionty vstupují do vakuem izolovaného tandemového elektrostatického urychlovače, kde jsou urychleny až na hodnotu terminálového napětí. Poté prolétají kolizní celou proplacho-

vanou heliem (stripper), v níž ionty ztrácejí elektrony a současně dochází k destrukci přítomných molekulárních iontů. Ztrátou elektronů vzniklé kladné ionty jsou urychleny odpuzováním od terminálové kladné elektrody a vstupují do vysokoenergetické části systému. V ní jsou pomocí dvou sektorových magnetů a dalšího ESA vybírány ionty odpovídající analyzovanému stopovému radionuklidu, které jsou poté měřeny citlivým detektorem – izobutanem plněné ionizační komoře se dvěma sběrnými elektrodami. Naměřený počet iontů je vztahován na množství atomů referenčního stabilního (pro aktinoidy nejdéletrvajícího) izotopu, který se zjišťuje vychylováním svazku v cyklech s velmi krátkou mikro- až milisekundovou periodou do Faradayových detektorů umístěných mimo hlavní osu svazku jak před urychlovačem, tak i za ním. Ke stanovení ^{14}C v plynných vzorcích



- 1 Iontový zdroj s měničem vzorků
- 2 6 Elektrostatický analyzátor
- 3 5 7 Sektorový magnet
- 4 Urychlovač
- 8 Ionizační komora jako detektor
- 9 Rozhraní pro měření ^{14}C v plynném CO_2

▪ Obr. 3: Systém AMS MILEA. Foto: AV ČR – J. Plavec

$^{14}\text{CO}_2$, jejichž příprava k analýze je jednodušší než u grafitizovaných vzorků, jsme doplnili systém MILEA také rozhraním s přímým vstupem plynného oxidu uhličitého do iontového zdroje.

Součástí společného pracoviště jsou i chemické laboratoře, protože příprava vzorků je nedílnou součástí analýzy. V případě AMS bývá příprava vzorků časově a pracovně náročnější než vlastní měření. Laboratoř jsme také vybavili preparativním plynovým chromatografem pro molekulárně specifickou radiouhlíkovou analýzu a hmotnostním spektrometrem IRMS pro stanovení izotopových poměrů lehkých prvků.

Stanovení ^{14}C a radiouhlíkové datování

Celosvětově se metoda AMS nejčastěji používá k měření ^{14}C . Stejně je tomu i v naší laboratoři. Postupy přípravy vzorků, problematika měření a využití výsledků jsou podrobněji popsány v této publikaci v příspěvku I. Světlíka a spol. o radiouhlíkové laboratoři CRL, která je společným pracovištěm Oddělení dozimetrie záření našeho ústavu a ARÚ.

Stanovení kosmogenních radionuklidů ^{10}Be a ^{26}Al

Radionuklidy ^{10}Be a ^{26}Al , s poločasy přeměny postupně 1,39 milionu let a 0,71 milionu let, vznikají účinkem sekundárního kosmického záření, ze-

„Vznik laboratoře AMS významně rozšířil portfolio jaderných analytických metod nejen v ÚJF AV ČR, ale především v celé České republice.“

jména tříštivými reakcemi neutronů a míónů na jádrech Si a O v atmosféře a v povrchové vrstvě zemské kůry. Vznikají také v mimozemských tělesech při jejich pohybu ve vesmíru. Radiometrické měření v přírodě se vyskytujícími množství radionuklidů ^{10}Be a ^{26}Al je prakticky neschůdné. Zvýšená dostupnost metody AMS v posledních dvaceti letech znamenala revoluci v kvartérní geologii a klimatologii, čteněj-

ší uplatnění nachází také při studiu archeologických nálezů například ze starší doby kamenné. Množství ^{10}Be a ^{26}Al vytvořených *in situ* v minerálech, nejčastěji v křemenu, umožňuje stanovit dobu vystavení vzorku kosmické-

mu záření (stáří povrchu) nebo dobu jeho uložení pod vrstvou hornin či sedimentů (stáří uložení). Příprava vzorků je většinou založena na izolaci ^{10}Be a ^{26}Al z čistěných křemenných zrn spolu se známým množstvím stabilních izotopů ^9Be a ^{27}Al jako nosičů. Izolace jednotlivých frakcí Be a Al se nejčastěji provádí ionexovou chromatografií, selektivním srážením hydroxidů a jejich vyžíháním na oxidy, které tvoří vhodnou matici pro měření metodou AMS. Tuto metodu jsme si osvojili ve spolupráci s HZDR v Rossendorfu a vídeňskou univerzitou BOKU a použili pro datování stáří uložení nálezů z archeologické lokality Korolevo na západě Ukrajiny (viz příspěvek R. Garby a spol. v této publikaci).

V atmosféře vytvořené ^{10}Be , často označované jako meteorické ^{10}Be , se vymývá srážkami a ukládá se ve vrstvách sedimentů na povrchu Země a na dně oceánů. Jeho stanovení slouží např. k určení rychlosti sedimentace a půdotvorby, rekonstrukci solární aktivity a studiu paleoklimatu (paleosrážek).

Stanovení ^{129}I a aktinoidů

Metodiku stanovení dlouhodobého štěpného produktu ^{129}I ($T_{1/2} = 16,1$ milionu let) a vybraných aktinoidů, především ^{236}U ($T_{1/2} = 23,4$ milionu let), ^{237}Np ($T_{1/2} = 2,14$ milionu let), ^{239}Pu ($T_{1/2} = 24,1$ tisíce let) v naší laboratoři AMS vyvíjejí a používají pracovnice a pracovníci FJFI ČVUT. Zaměřují se na optimalizaci přípravy terčových materiálů zejména pro vzorky z životního prostředí a na vývoj perspektivních terčových matic, např. fluoridových sloučenin aktinoidů, s cílem dosažení vyšších iontových proudů pro lepší statistiku měření v porovnání s běžnějšími oxidy. Podílejí se také na vývoji aplikací pro studium šíření příslušných prvků v životním prostředí a pro jaderné forenzní aplikace.

„Tuto metodu jsme si osvojili ve spolupráci s HZDR v Rossendorfu a vídeňskou univerzitou BOKU a použili pro datování stáří uložení nálezů z archeologické lokality Korolevo na západě Ukrajiny.“

Závěr

Vznik laboratoře AMS významně rozšířil portfolio jaderných analytických metod nejen v ÚJF AV ČR, ale především v celé České republice. Přispěl k rozšíření možností spolupráce s domácími i zahraničními partnery v mnoha oborech vědy a výzkumu. Vzhledem k množství možných aplikací není náhodou, že jedna monografie o metodě AMS má podtitul *Ultrasensitivní analýza pro globální vědu*.¹

¹ Tuniz, C. et al. (1998). *Accelerator Mass Spectrometry. Ultrasensitive Analysis for Global Science*. CRC Press LLC.

8 | Oddělení radiofarmak ÚJF v letech 2005–2025

 **Ondřej Lebeda**

Oddělení radiofarmak ÚJF



Ilustrační foto AI

Oddělení radiofarmak (ORF), nejmladší v Ústavu jaderné fyziky (ÚJF), vzniklo v roce 1998. Jeho počátečním posláním byl výzkum a vývoj radiofarmak pro diagnostiku metodou PET (pozitronová emisní tomografie) a SPECT (jednofotonová emisní tomografie) s následným zajištěním jejich výroby v rámci jiné činnosti ÚJF. Záměrem bylo využít cyklotronovou kapacitu ÚJF, tehdy v České republice unikátní, pro pokrytí potřeb českého zdravotnictví. Tato zadání vyžadovala řešení celé řady problémů od přípravy radionuklidů na cyklotronu U-120M, přes jejich zpracování na radiofarmakum, klinická hodnocení, registraci až po distribuci na oddělení nukleární medicíny po celé republice.

Bez úzké spolupráce s Oddělením urychlovačů nebyla realizace takového záměru možná a úzká provázanost obou oddělení se vine naší historií jako červená nit, přestože se povaha činnosti ORF v průběhu posledních dvaceti let postupně proměnila. Odkazují proto čtenáře na příspěvek *Cyklické urychlovače* kolegů J. Štursy a D. Chvátila v této publikaci.

S těmito záměry souvisel vývoj radiofarmak na bázi fluoru-18 (^{18}F), dosud nejrozšířenějšího radionuklidu v pozitronové emisní tomografii. Za zmínku stojí např. dokončení preklinické studie látky FMISO vhodné k zobrazení hypoxické nádorové tkáně. Tato látka později prošla klinickým hodnocením a našla cestu do nemocnic. Zajímavé bylo rovněž úspěšné zvládnutí

„Několikaleté úsilí bylo završeno jak publikacemi, tak návrhem lékopisné monografie pro přípravu $^{99\text{m}}\text{Tc}$ na urychlovačích, která vznikala tři roky a od roku 2016 je součástí Evropského lékopisu.“

syntézy [^{18}F]fluorpropanoyl-Gluc-LysO-Tyr3-oktreotátu, sloučeniny k zobrazení neuroendokrinních nádorů a karcinoidů, které nesou somatostatinové receptory. S ohledem na nízký výskyt těchto typů nádorů nebyla tato látka předmětem klinických studií a registrace a dnes se k zobrazení těchto nádorů běžně používají podobná analoga somastatinu značená ^{68}Ga .

K významné změně došlo v roce 2008, kdy ÚJF založil samostatnou dceřinou společnost RadioMedic s.r.o. Následně byly v roce 2010 předměty jiné činnosti, výroba radiofarmak a vývoj nových fluorovaných sloučenin pro klinickou praxi, převedeny z ÚJF do této dceřiné společnosti. V květnu 2023 prodal ÚJF společnost RadioMedic s.r.o. novému vlastníkovi, jímž je ÚJV Řež, a.s. O RadioMedicu viz příspěvek J. Dobeše ve sborníku.

Tím zanikl vztah ÚJF k výrobě registrovaných radiofarmak. Kolegové specializovaní na chemii ^{18}F jsou dnes na plný úvazek zaměstnání ve firmě RadioMedic s.r.o. Nicméně do roku 2024 se v ORF rovněž věnovali výzkumu a vývoji jeho značených sloučenin. Z jejich výsledků zmiňují přípravu a kontrolu kvality stopovače FDDNP značeného ^{18}F pro diagnostiku Alzheimerovo-

vy choroby, a to včetně zajištění stálosti této labilní molekuly v roztoku. Ten byl opakovaně použit ke kontrole nové metody odstraňování amyloidních plaků na zvířecím modelu izraelskými kolegy. Rovněž bylo ve spolupráci s VŠCHT úspěšně označeno ^{18}F několik variant molekuly zacílené na receptory P2X_7 a jedna z nich posléze dodávána pravidelně do fakultní nemocnice v Linci k testům zobrazování zánětlivých procesů v mozku.

Po roce 2008 tedy vznikl přirozeně požadavek na hledání nových směrů výzkumu, jimž se věnují následující kapitoly.

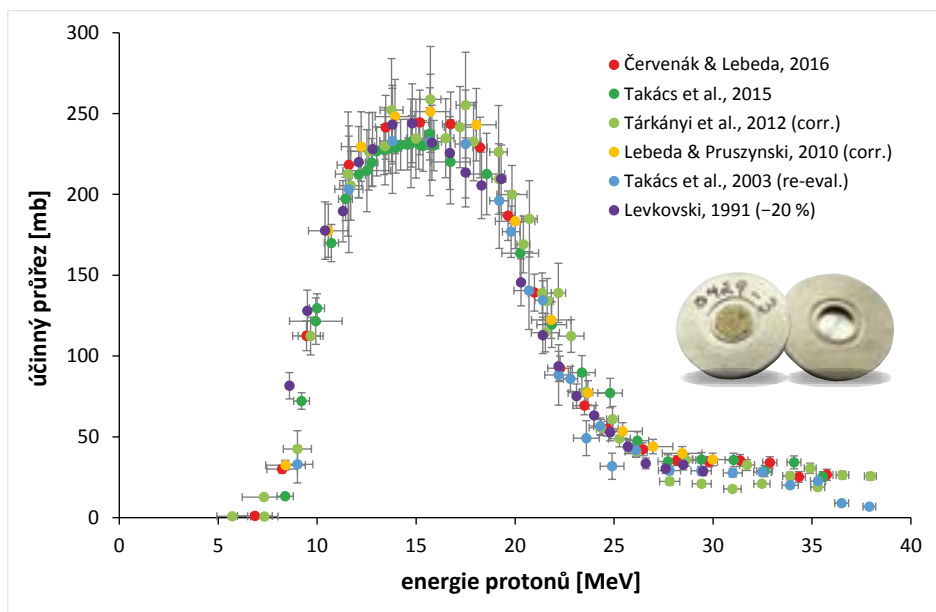
Měření jaderných dat pro přípravu radionuklidů

Cyklotron U-120M má vynikající potenciál k měření účinných průřezů jaderných reakcí, resp. excitačních funkcí (tedy pravděpodobnosti, že při dané energii částice dopadající na terč dojde k určité jaderné reakci). Tato data mají zásadní význam pro přípravu radionuklidů pro lékařské i jiné účely. Umožňují nejen předpovědět výtěžek daného radionuklidu, ale také obsah nežádoucích radionuklidových nečistot, a tedy navrhnout optimální podmínky jeho přípravy.

Éru systematického měření excitačních funkcí zahájila spolupráce s prof. Morgensternem z ITU Karlsruhe (nyní JRC Karlsruhe) na stanovení excitačních funkcí dvou jaderných reakcí pro přípravu jednoho z nových potenciálních radionuklidů pro cílenou terapii zářením α , a to ^{230}U ozařováním ^{231}Pa protony a deuterony reakcemi $^{231}\text{Pa}(p,2n)$ a $^{231}\text{Pa}(d,3n)$. Experimenty trvaly několik let a vyústily ve dvě publikace v prestižních časopisech v letech 2007 a 2008.

Následovalo měření excitačních funkcí protonů a deuteronů na přírodním molybdenu se zvláštním zřetelem ke vzniku $^{95\text{m}}\text{Tc}$, $^{96\text{m}+g}\text{Tc}$, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ a ^{99}Mo . Tyto reakce mají praktický význam hned v několika oblastech – první z nich slouží k přípravě stopovače technecia při stanovení jeho migrace v různých procesech a zároveň pro tzv. thin layer analysis (TLA), tedy metodu stanovující míru opotřebení mechanických částí strojů, např. automobilových motorů; druhá má zásadní význam pro monitoring cyklotronového svazku

a poslední dvě pak pro přípravu ^{99m}Tc na cyklotronech. Technecium- 99m je z historických důvodů nejrozšířenějším diagnostickým radionuklidem v nukleární medicíně a běžně se získává z tzv. radionuklidového generátoru $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$. V letech 2008–2009 došlo k závažným výpadkům výroby ^{99}Mo ve výzkumných jaderných reaktorech, které vyvolaly světovou krizi v dodávkách radionuklidových generátorů $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ a vedla k výzkumu alternativních možností výroby ^{99m}Tc . To nás přimělo k pokračování práce na testování cyklotronové přípravy ^{99m}Tc ve spolupráci s kanadskou firmou ACSI a tamními univerzitami. Měření výtěžků radionuklidových nečistot umožnilo vytvořit nástroj pro predikci jejich zastoupení pro různé scénáře výroby (izotopové složení terče, energetická ztráta, doba ozařování atd.). Díky výsledkům měření bylo možné odhadnout radiační zátěž pacienta



• Obr. 1: Nejspolehlivější publikované účinné průřezy pro vznik ^{99m}Tc reakcí $^{100}\text{Mo}(p,2n)$ – stav k roku 2016. Na fotografii lisovaný terč z vysoce obohaceného ^{100}Mo pro přípravu ^{99m}Tc v hliníkové podložce a podložka po kompletním rozpuštění terče v peroxidu vodíku. Foto: Archiv ORF

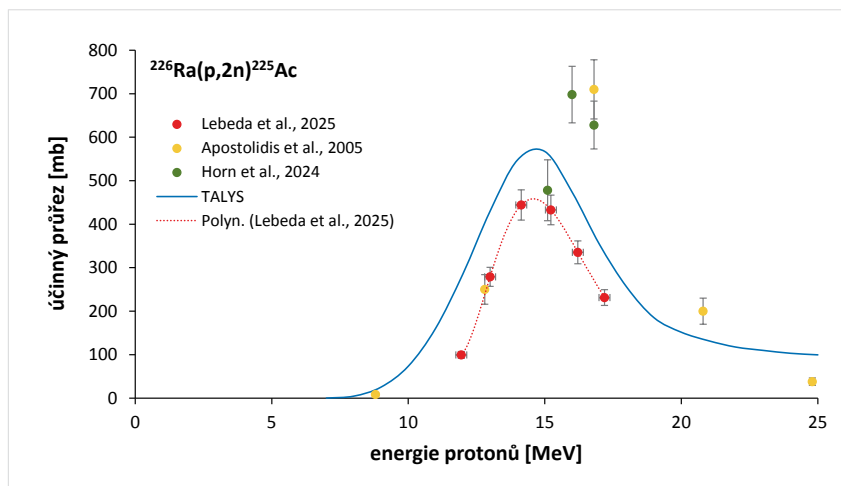
způsobenou přítomností těchto nečistot a stanovit jejich přijatelné limity. Výrobu jsme uskutečnili na vysoce obohacených terčích z ^{100}Mo , a to včetně separace $^{99\text{m}}\text{Tc}$ a testování jeho kompatibility s registrovanými kity (neaktivními prekursory) pro přípravu techneciových radiofarmak. Několikaleté úsilí bylo završeno jak publikacemi, tak návrhem lékopisné monografie pro přípravu $^{99\text{m}}\text{Tc}$ na urychlovačích, která vznikala tři roky a od roku 2016 je součástí Evropského lékopisu.

Uvedený výzkum přivedl oddělení k účasti na dvou projektech Mezinárodní agentury pro atomovou energii zaměřených jak na data pro monitoring cyklotronového svazku, tak pro přípravu diagnostických a terapeutických radionuklidů. V centru naší pozornosti se ocitly jednak dosud nezměřené excitační funkce, jednak funkce již změřené, avšak s výsledky zatíženými příliš velkou nejistotou nebo značným rozptylem publikovaných hodnot. Šlo o reakce $^{\text{nat}}\text{Ti}(p,x)$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(d,x)$, $^{\text{nat}}\text{Ti}(^3\text{He},x)$ a $^{\text{nat}}\text{Cu}(d,x)$ pro monitoring svazku, $^{89}\text{Y}(d,x)$ pro přípravu pozitronového zářiče ^{89}Zr , $^{165}\text{Ho}(^3\text{He},xn)$ vhodné jako benchmark predikčních kódů jaderných reakcí apod. Podíleli jsme se na zpracování rozsáhlých publikací systematicky zpracovávajících dostupný experimentální materiál za účelem poskytnutí doporučených účinných průřezů více než stovky jaderných reakcí světové komunitě uživatelů.

Zajímavou kapitolu tvoří excitační funkce reakcí protonů na přírodním Nd zaměřené na vznik radionuklidů ovlivňujících experimenty zaměřené na dvojitý β rozpad. Jedním z hlavních kandidátů bezneutrinového dvojitého β rozpadu je ^{150}Nd zastoupený v přírodní směsi jen 5,64 %. Neodym zpracováváný na povrchu Země pro účely experimentu může být aktivován kosmickým zářením. Jeho aktivace protony hraje roli v odhadu rušivých efektů a stanovení zvýšeného pozadí během experimentů pátrajících po bezneutrinovém dvojitém β rozpadu, jako je Sudbury Neutrino Observatory plus liquid scintillator (SNO+). Experimentální data jaderných reakcí protonů na neodymu prakticky zcela chyběla. Z tohoto důvodu jsme ve spolupráci se skupinou prof. Zuberu z Technické univerzity v Drážďanech proměřili účinné průřezy reakcí protonů v intervalu energií 10–30 MeV vedoucích ke vzniku řady radionuklidů se zřetelem k radionu-

klidům s dlouhým poločasem rozpadu. Zvláštní pozornost bylo třeba věnovat ochraně terčových fólií z neodymu, který se během několika málo desítek minut rozpadá na vzduchu na práškový oxid.

V letech 2018–2020 jsme se zaměřili na excitační funkce pro vznik tera-nostického páru $^{197\text{m,g}}\text{Hg}$ reakcemi protonů a deuteronů na zlatě. Jak už je pravidlem, přinesla tato práce i excitační funkce pro vznik několika dalších radionuklidů, izotopů zlata a rtuti. Obě částice umožňují získat prakticky beznosičový preparát vhodný ke značení sloučenin, přičemž deuterony výrazně zvyšují zastoupení spíše terapeutického $^{197\text{m}}\text{Hg}$ i absolutní výtěžky obou izomerů v porovnání s protony. Jelikož spektra záření γ svědčila o nekonzistentních intenzitách tabelovaných linek emitovaných při rozpadu $^{197\text{m}}\text{Hg}$, rozhodli jsme se pro detailní měření spektra čisté, chemicky separované $^{197\text{m,g}}\text{Hg}$. Skutečně se prokázala nutnost revize rozpadového schématu $^{197\text{m}}\text{Hg}$, ke které došlo ve spolupráci dr. Kondevem z Argonne National Laboratory. Nové údaje jsme pak zpětně aplikovali na stanovené excitační funkce vlastní i dříve publikované.



■ Obr. 2: Účinné průřezy jaderné reakce $^{226}\text{Ra}(p,2n)$, v níž vzniká ^{225}Ac . Naše měření v kontextu velmi rozptýlených a nekonzistentních hodnot dvou předchozích experimentů a předpovědi modelového kódu jaderných reakcí TALYS. Zdroj: Archiv ORF

O rok později jsme se věnovali excitačním funkcím protonů na přírodním dysprosiu, $^{nat}\text{Dy}(p,x)$, se záměrem zvážit možnosti přípravy izotopů terbia, zejména terapeutického zářiče β^- ^{161}Tb . Odměnou za vynaloženou námahu byla navíc data pro vznik dalších dvanácti izotopů holmia, dysprosia, terbia a gadolinia. Ačkoliv zamýšlená jaderná reakce je pro přípravu ^{161}Tb nevhodná kvůli nízkým výtěžkům, jsou účinné průřezy cenným materiálem pro predikční kódy jaderných reakcí a stejně jako všechna naše publikovaná data se stala součástí mezinárodní databáze EXFOR.

Pomyslným vyvrcholením aktivit v této oblasti bylo stanovení účinných průřezů jaderných reakcí $^{226}\text{Ra}(p,xn)$, které mají zásadní význam pro přípravu kaskádního zářiče α , aktinia-225 (^{225}Ac), včetně radionuklidových nečistot. Dosavadní měření byla zatížena velkým rozptylem a systematickými chybami, které se nám podařilo výrazně omezit. Tento experiment už vyžadoval zapojení radiochemických separačních metod a patřil k těm nejnáročnějším, nicméně poskytl poměrně jasnou představu o optimálních parametrech výroby tohoto mimořádně slibného terapeutického zářiče.

Terče, terčové systémy a příprava radionuklidů

Urychlovače na rozdíl od jaderných reaktorů umožňují ozařovat všechna tři skupenství hmoty. Pestrost daná těmito možnostmi má za následek také široké spektrum technických řešení pevnolátkových, kapalinových a plynových terčů. Každé z nich se musí vyrovnat s řadou požadavků, zejména účinného chlazení terčového materiálu během ozařování, elegantní separace radionuklidu z terče a případné recyklace obohaceného terčového materiálu.

První zkušenosti získané do roku 2005 přinesly terče pro přípravu ^{81}Rb , ^{123}I , ^{18}F a ^{211}At , které reprezentují všechny tři varianty: první dva terče jsou plynové, neboť ^{81}Rb a ^{123}I vznikají reakcemi $^{82}\text{Kr}(p,2n)^{81}\text{Rb}$ a $^{124}\text{Xe}(p,2n)^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$, druhý kapalinový, neboť ^{18}F se připravuje ozařováním vody vysoce obohacené o kyslík-18 reakcí $^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$ a třetí terč je pevnolátkový, neboť ^{211}At vzniká reakcí částic α na přírodně monoizotopním bismutu $^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)^{211}\text{At}$. První plynové terče vznikly ve spolupráci

se skupinou Ing. Vognara z Laboratoře Mikrotronu MT25, a to včetně aparatury zajišťující recyklaci vysoce obohacených plynových náplní. Terč pro výrobu ^{18}F byl dílem kolegů z OU, postupně byl vylepšován a využit i naším oddělením, terč pro přípravu ^{211}At vznikl v úzké spolupráci s OU a po optimalizaci byly výsledky publikovány – jde totiž o poměrně unikátní řešení dvojitého skloněného interního terče, které je možné uplatnit jen na několika málo typech cyklotronů.

V následujícím období došlo k bouřlivému vývoji dalších terčů a zvládnutí přípravy celé řady radionuklidů. Pozornost byla nejprve upřena na tehdy nové, důležitější pozitronové zářiče ^{124}I a ^{86}Y . Pro oba byl nejprve vyvinut univerzální externí pevnolátkový tangenciální terč s oboustranným chlazením



• Obr. 3: Vlevo jeden z prvních modelů držáku externího pevnolátkového skloněného terče s vodním a heliovým chlazením pro přípravu ^{124}I . Vpravo původní model plynového terče pro přípravu izotopů rubidia. Dole modely rozebrané na součástky. Foto: Archiv ORF

(voda/helium), přičemž příprava ^{124}I spočívala v ozáření $^{124}\text{TeO}_2$ s přidavkem 6 % Al_2O_3 nanesené tavením na platiniridiovou podložku. Separace probíhá suchou destilací, při níž dochází k rekonstituci sklovité terčové vrstvy umožňující opakované ozařování terče bez nutnosti recyklace. Tatáž podložka se sedimentovaným ^{86}Sr v podobě uhličitanu sloužila k přípravě ^{86}Y , pro účely separace byla vrstva rozpuštěna v minerální kyselině a produkt oddělen selektivním zachytem na různých typech filtrů z alkalického roztoku. Ve snaze vyhnout se opakovanému rozpouštění terče jsme přistoupili k otestování poměrně neotřelého řešení, a to tzv. roztokového terče, v němž se ozařuje koncentrovaný roztok dusičnanu strontnatého, který eliminuje nutnost rozpouštění. Pro tyto účely byl využit adaptovaný kapalinový terč pro ^{18}F spojený s nově navrženou a postavenou terčovou aparaturou s upravenou separační metodou, na jejímž výstupu byl opět roztok způsobilý k ozařování.

Roztokový terč jsme jako jedni z prvních použili také k pilotní přípravě ^{68}Ga ozařováním roztoku $^{68}\text{ZnCl}_2$, která je alternativou k radionuklidovému generátoru $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$. K účinné separaci sloužila kolonka plněná zcela běžným sorbentem C18 a optimalizace výtěžku a obsahu radionuklidových nečistot umožnila připravit radionuklid vyhovující požadavkům na lékařské použití. Dnes je cyklotronové ^{68}Ga již etablovaným přípravkem popsaným v samostatném článku Evropského lékopisu.

Zájem o nekonvenční pozitronové zářiče nás vedl k dalšímu vývoji pevnolátkových terčů pro přípravu pozitronových zářičů ^{61}Cu , ^{64}Cu (teranostický radionuklid umožňující jak terapii zářením β^- , tak zobrazení doprovodným zářením β^+), ^{89}Zr , ^{52}Mn . První z nich lze připravovat nízkoenergetickým deuteronovým svazkem na přírodním niklu, přičemž velmi tenkou aktivovanou vrstvu je možné odleptat a samonosný terč tloušťky 1,0–1,5 mm použít opakovaně. Druhý vyžaduje elektrolytické nanášení vysoce obohaceného ^{64}Ni na zlatou podložku a zajištění účinné recyklace terčové vrstvy. Zbýlé dva lze získat ozařováním samonosných terčů z yttria a chromu protony. Separace probíhá ve všech případech iontovou nebo extrakční chromatografií.

Podobně jsme zavedli přípravu teranostického zářiče $^{197\text{m,g}}\text{Hg}$ a ^{203}Pb ozářováním terčů ze zlata a thallia protony a deuterony. Oba radionuklidy se účinně separují extrakční chromatografií.

Zkušenosti s plynovými terči jsme v uplynulých dvaceti letech zúročili také v postupném vývoji účinnějších a účinnějších způsobů přípravy ^{83}Rb . Jde o mateřský radionuklid pro přípravu emanačního generátoru $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$. Tento generátor představuje významný vklad našeho ústavu do mezinárodního projektu KATRIN, jehož cílem je stanovení klidové hmotnosti elektronového neutrína pomocí precizního měření předpokládané deformace koncové části β spektra tritia. Plyný izotop $^{83\text{m}}\text{Kr}$ emituje konverzní



• Obr. 4: Zleva: a) ozářený zlatý terč a jeho roztok v lučavce královské; b) následná separace $^{197\text{m,g}}\text{Hg}$ na koloně; c) niklový terč po ozáření deuterony a odleptání aktivované vrstvy kyselinou chlorovodíkovou; d) krystaly dusičnanu thallného vypadlé z přesyceného roztoku thallného terče rozpuštěného v kyselině dusičné. Foto: Archiv ORF

elektrony o velmi přesné energii právě v této oblasti a umožňuje kvantifikovat vliv tritiového plazmatu na elektrony detekované v experimentu. Je jedním z předpokladů docílení rekordní citlivosti, která dosáhne až na úroveň $0,2 \text{ eV}/c^2$, tedy pouhých $1,8 \times 10^{-36} \text{ kg}$! Stanovení hmotnosti elektronového neutrina přitom představuje jednu z velkých otázek fyziky, neboť ji nelze odvodit z teorie, může vést k rozvoji fyziky nad rámec tzv. Standardního modelu a má výrazný dopad na kosmologické modely – jde totiž o jednu z nejpočetnějších, ale zároveň nejméně snadno detekovatelných částic ve vesmíru. Existuje ve třech formách, elektronové, mionové a tauonové, přičemž se podařilo prokázat, že nejméně dvě tyto formy klidovou hmotnost mají. Jejich hodnota však zůstává zahalena tajemstvím.

V našem případě nejde jen o přípravu samotného radionuklidu, nýbrž o jeho zakotvení ve vhodné matici tak, aby

bylo zajištěno, že nebude docházet k vysoce nežádoucímu uvolňování ^{83}Rb a naopak dceřiný $^{83\text{m}}\text{Kr}$ bude s vysokou pravděpodobností matici opouštět, tedy emanovat. Po řadě experimentů byla identifikována jako optimální matrice jedna z forem zeolitu, přírodního iontoměniče na bázi hlinitokřemičitanů s definovanou porozitou. Kromě experimentu KATRIN nalézají emanační generátory uplatnění rovněž v experimentech XENON zaměřených na hledání temné hmoty ve vesmíru.

„Teprve velkorysá dotace Akademie věd ČR dovolila zahájení prací, a to v letech 2016–2017. Šlo o významné rozšíření výzkumných kapacit, které zahrnovalo vybudování radiochemické laboratoře a analytické laboratoře.“

Od roku 2017 byla po dlouhém období příprav zahájena měření spekter tritia a experiment KATRIN tak začal stanovovat postupně se snižující horní limit klidové hmotnosti elektronového neutrina až po současnou hodnotu $0,45 \text{ eV}/c^2$. Od té doby postupně rostly požadavky na aktivitu emanačních zdrojů, aby bylo vůbec možné dosáhnout vysoké statistiky a vyhodnotit nesmírně malé efekty ovlivňující kvalitu dosažených výsledků. Od roku

2021 se podařilo vyhovět vysokým nárokům experimentu a připravit opakovaně rekordně silné zdroje o aktivitě 10 GBq. Za tím účelem bylo nezbytné zdokonalovat terčové technologie tak, aby bylo vůbec reálné tuto aktivitu jednorázově vyrobit, a zároveň zcela změnit přístup k přípravě samotného generátoru, která nyní probíhá s pomocí dálkově ovládaných aparatur a zařízení v masivně stíněné horké komoře odpovídajících parametrů. V současné době se věnujeme vývoji terče nové generace, který by eliminoval nedostatky předchozích modelů a zvýšil robustnost celého postupu.

Více se o experimentu KATRIN dozví čtenář v příspěvku kolegů Dr. Vénose a Dr. Dragouna, zakládajících členů projektu. Jde o práci, která se prolíná činnostmi tří oddělení ústavu a bez jejich úzké spolupráce je nemyslitelná.



• Obr. 5: Nový kompaktní terč pro přípravu ^{83}Rb na cyklotronu TR-24 (vlevo). Záběry z přípravy emanačního generátoru $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$ v horké komoře (vpravo). Foto: Archiv ORF

Posledním významným projektem, kterým se Oddělení radiofarmak zabývá od roku 2022, je příprava jednoho z nejslibnějších zářičů pro cílenou terapii onkologických onemocnění, jímž je aktinium-225. Tento kaskádní zářič umožňuje deponovat vysoké dávky ionizujícího záření do velmi malých objemů tkáně, a zaměřit se tak na léčbu velmi malých nádorů a metastáz. Dosavadní způsoby přípravy ^{225}Ac nejsou zatím schopny saturovat ani požadavky výzkumu, tím spíše tedy očekávané klinické praxe. Ve spolupráci s německou firmou Eckert & Ziegler Radiopharma GmbH jsme proto zahájili ambiciózní projekt zaměřený na vývoj technologie přípravy tohoto radionuklidu protonovou aktivací radia. V roce 2024 se završila první významná etapa – dokončení výstavby nové laboratoře pro přípravu ^{225}Ac , slavnostně otevřené za přítomnosti premiéra Petra Fialy, předsedkyně Akademie věd ČR prof. Evy Zažímalové, členů správní rady spolupracující firmy a dalších vzácných hostů. Současně s výstavbou laboratoře probíhá už od počátku projektu řada experimentů a vývojových prací, které řeší tuto komplexní technickou výzvu současnosti.

Na závěr stojí za zmínku, že v srpnu 2014 pořádalo naše oddělení ve spolupráci s Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf konferenci 15th International Workshop on Targetry and Target Chemistry, která proběhla v Praze. Setkalo se na ní téměř 200 špičkových odborníků na přípravu cyklotronových radionuklidů z celého světa a patřila k nejlépe hodnoceným setkáním této tradiční akce, k níž dochází střídavě na starém kontinentě a v Americe s periodou dva roky.

Výstavba nových laboratoří, automatizace, značené sloučeniny a další témata

V letech 2011–2015 probíhal rozsáhlý investiční projekt oddělení urychlovačů, a to pořízení nového kompaktního urychlovače TR-24 a s ním úzce spojená výstavba věže objektu 231 se šesti patry nad halou cyklotronu. První dvě z nich měla v blízké budoucnosti sloužit výstavbě nových výzkumných radiochemických laboratoří, které byly logickým doplňkem cyklotronu a podmínkou jeho smysluplného využití pro výzkum přípravy nových radionuklidů.

Teprve velkorysá dotace Akademie věd ČR dovolila zahájení prací, a to v letech 2016–2017. Šlo o významné rozšíření výzkumných kapacit, které zahrnovalo vybudování radiochemické laboratoře a analytické laboratoře v 1. a 2. NP objektu 231. Nešlo přitom o dodávku komerčně dostupných řešení, nýbrž o promyšlený celek propojující automaticky ovládané terčové systémy v hale cyklotronu s polohorkými komorami, kde dochází ke zpracování ozářených terčů, separaci radionuklidů a transportu vzorků do analytické laboratoře vybavené moderní přístrojovou technikou (spektrometry záření α a γ , HPLC-MS apod.). Laboratoře vznikaly v úzké spolupráci zaměstnanců oddělení s dodavatelskou firmou Nuvia.

Zcela přirozeně jsme čelili rozporům mezi výší rozpočtu a svými představami. Nicméně díky vynikající spolupráci s dodavatelem jsme dokázali finanční prostředky vynaložit co nejefektivněji a ještě společnými silami vyvinout nová unikátní zařízení pro ozařování a zpracování zejména pevnolátkových terčů. Laboratoře tak tvoří spolu s cyklotronem TR-24 propojený a funkční komplex.

Samotný projekt výstavby laboratoře využil do jisté míry poznatků získaných v letech 2012–2015 při řešení dvou projektů TA ČR: Značení rekomb-



▪ Obr. 6: Interiér nových radiochemických laboratoří v objektu cyklotronu TR-24.
Foto: Archiv ORF

binantních fragmentů protilátek pomocí mikrofluidních systémů a FCB-modul pro konverzi radionuklidu F-18 na elektrofilní formu. První z nich měl za cíl navrhnout a postavit funkční automatizovaný systém pro separaci kovových radionuklidů a zároveň vyvinout vlastní technologii výroby mikrofluidních čipů ke značení radionuklidy. Druhý byl zaměřen na návrh a realizaci prototypu modulu pro tvorbu elektrofilní formy radionuklidu ^{18}F , která umožňuje přípravu některých značených látek pro zobrazování metodou PET.

Paralelně vznikla v objektu 221 malá laboratoř tkáňových kultur, která slouží k charakterizaci biologického chování značených sloučenin in vitro.

V roce 2022 jsme zkušenosti získané při budování těchto laboratoří a vývoji nových terčových systémů a dalších aparatur uplatnili při výstavbě laboratoře pro přípravu ^{225}Ac , zmíněné na konci předchozí kapitoly, která orgánicky uzavřela celek pracovišť našeho oddělení nad cyklotronem TR-24.

Pokud jde o problematiku značených sloučenin, věnovali jsme se jim zejména po vzniku firmy RadioMedic s.r.o. spíše nárazově kvůli omezené kapacitě pracoviště. Nicméně i tak vzniklo několik pozoruhodných prací. Jednou z nich byl výzkum možností radioaktivně značeného DOTA-puromycinu pro zobrazování a kvantifikaci proteosyntézy v nádorových tkáních i zobrazení bakteriálních infekcí metodou PET (ve spolupráci s CROMed, Budapešť). Dále šlo mj. o značení:

- a) monoklonálních protilátek trastuzumabu a nimotuzumabu terapeutickými β zářiči ^{177}Lu a ^{90}Y i diagnostickými zářiči ^{44}Sc a ^{86}Y , jež cílí na nádory s vysokou expresí receptorů růstového faktoru EGFR (ve spolupráci s Johannes Gutenberg-Universität v Mohuči),
- b) mikročastic ^{177}Lu a ^{131}I pro radioembolizaci jaterních nádorů,
- c) monoklonálních protilátek IgG M75 izotopem mědi ^{64}Cu pro diagnostiku hypoxických nádorů,
- d) PSMA-11 ^{68}Ga alternativní metodou v alkalickém prostředí,
- e) monoklonální protilátky cetuximab ^{89}Zr , radionuklidem vhodným k zobrazení procesů s pomalejší kinetikou apod.

Kromě toho se oddělení podílelo a podílí na řadě dalších projektů, z nichž mohu zmínit např. aktuálně běžící detailní proměření úhlové distribuce neutronů emitovaných v reakci protonového svazku s obohaceným kyslíkem-18, který pod záštitou Mezinárodní agentury pro atomovou energii řešíme spolu s Masarykovou univerzitou v Brně a CVŘ Řež.

Pracovníci oddělení se po celých dvacet let podíleli na výuce na vysokých školách a na vedení magisterských a doktorských prací. Zejména šlo o nám nejbližší Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT, 1. Lékařskou fakultu UK a Přírodovědeckou fakultu UK. Pracovali a pracují v oborových radách, vědeckých radách ústavu a fakult, Akademickém sněmu a rovněž v Evropské lékopisné komisi.



• Obr. 7: Otevření laboratoře pro přípravu ^{225}Ac v červnu 2024.

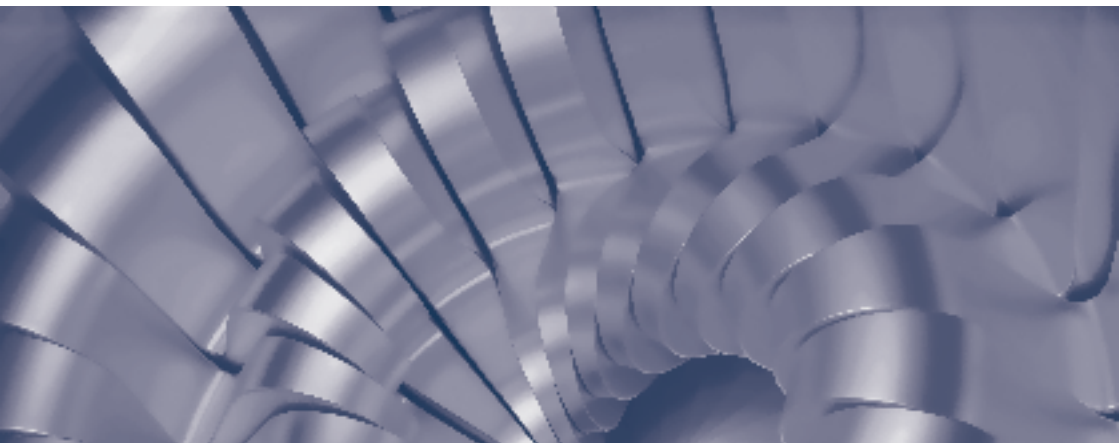
Foto: AV ČR – Jana Plavec

2 | Oddělení teoretické fyziky ÚJF



Jiří Adam, Ivan Horváth, Petr Bydžovský,
Pavel Exner, Vít Jakubský

Oddělení teoretické fyziky ÚJF



Úsilí o porozumění fyzikální reality našeho světa se odehrává v trvalém dialogu mezi experimentem a teorií, která výsledky pozorování sjednocuje a zasazuje do kontextu obecných principů a současně vytyčuje směry, jimiž se mají příští experimenty ubírat. Teoretická fyzika se svým širokým rejstříkem pojmů, metod a modelů tak patří k základům, na nichž naše civilizace stojí. Je také neododdělitelně spojena s matematikou, která je – slovy Galílea Galileiho – jazykem, jímž je kniha přírody psána.

Těžištěm výzkumu v Oddělení teoretické fyziky (OTF) Ústavu jaderné fyziky AV ČR je studium jaderných a subjaderných systémů a procesů, ale spektrum aktivit je podstatně širší. Zahrnuje hadronovou, leptonovou a kvarkovou fyziku, jakož i fyziku matematickou, používáme a rozvíjíme formalismus kvantové mechaniky a kvantové teorie pole včetně netradičních zobecnění a rozšíření. Kořeny zmíněných oblastí zájmů oddělení sahají do obtížných dob relativní izolace od mezinárodní fyzikální komunity. I tehdy usilovali členové oddělení o výsledky na standardní mezinárodní úrovni. Předpoklady k tomu se pochopitelně zlepšily poté, co se v 90. letech dříve otevřely, rozvinuly a posílily se již existující mezinárodní spolupráce a vznikla řada nových. Již na přelomu 80. a 90. let oddělení hostilo na dlouhodobých pobytech několik zahraničních studentů. Řada našich pracovníků s čerstvě obhájeným doktorátem se naopak vydala na postdoktorální pobyty ve špičkových zahraničních ústavech, tato kariérní etapa se postupně stala striktně dodržovaným pravidlem. Zhruba polovina těchto „cestovatelů“ se na OTF vrátila a přinesla nové

„Těžištěm výzkumu v Oddělení teoretické fyziky je studium jaderných a subjaderných systémů a procesů, ale spektrum aktivit je podstatně širší. Zahrnuje hadronovou, leptonovou a kvarkovou fyziku, jakož i fyziku matematickou.“

podněty našim výzkumům. Od roku 2005 na OTF působilo přes 25 mladých vědců, většinou zahraničních, na postdoktorandských pozicích. Několik z nich u nás zůstalo, což oddělení bezesporu omladilo a posílilo.

Také většina dalších Ph.D. studentů a diplomantů vychovaných na oddělení dnes pracuje v akademické sféře, někteří zastávají místa profesorů (T. Brauner – Stavanger University, H. Kovařík – Università degli Studi di Brescia, D. Krejčířík – ČVUT, P. Navrátil – TRIUMF, S. Moroz – Karlstad University a Nordita) a docentů (M. Fraas – UC Davis, J. Lipovský – UHK, P. Siegl – TU Graz a O. Turek – Ostravská univerzita). J. Kříž je v současnosti rektorem Univerzity v Hradci Králové, J. Hošek se stal emeritním vědeckým pracovníkem Akademie věd ČR.

V posledních 25 letech nás bohužel opustili dlouhodobí kolegové M. Sotona, L. Mailing, M. Vymazal, R. Mach a O. Richter.

Výchova mladé generace je samozřejmě nezbytnou součástí činnosti OTF: vedeme bakalářské, magisterské i doktorandské projekty a zapojujeme studenty do našeho aktuálního výzkumu. Soustavný kontakt se studenty je možný jen zapojením do pedagogické činnosti: na vysokých školách jsme přednášeli nebo přednášíme řadu předmětů, včetně povinných kmenových kurzů (kvantová mechanika, teorie pole, Standardní model, ...). Založili jsme a udržovali tradici pořádání letní školy Indian Summer School, konalo se jich 31 a mezi přednášejícími byla řada věhlasných fyziků (G. Baym, H. Leutwyler, U. Meissner, L. Okuň, R. Kolb, L. di Lella, B. Kayser, R. Jackiw, a další).

Členové OTF zorganizovali desítky mezinárodních workshopů, a to nejen u nás, ale i v zahraničí (ECT* Trento, INFN Trieste, Orsay). Prostřednictvím členství v mezinárodních poradních výborech se již mnoho let podílíme na přípravě mezinárodních konferencí Hypernuclear and Strange Particle Physics, které se konají každé tři roky na různých místech světa. 14. konference HYP2022 se konala v Praze v roce 2022 a na práci jejího organizačního výboru se velkou měrou podílelo OTF. HYP2022 tak byla další konferencí organizovanou členy po dřívější sérii konferencí Mesons and Light Nuclei.

V oblasti matematické fyziky je důležitou organizační strukturou Dopplerův ústav založený v roce 1993, od roku 2006 je to společné pracoviště ÚJF, FJFI a Univerzity v Hradci Králové (vědecký ředitel P. Exner). Sdružuje více než 30 pracovníků v matematické fyzice, pořádá konference a semináře. Za posledních 20 let členové Dopplerova ústavu vychovali 46 Ph.D. studentů a vedli 51 postdoktorandů, z toho pětina, resp. třetina připadá na skupinu matematické fyziky v OTF.

Dopplerův ústav také udílí Cenu Václava Votruby za nejlepší disertaci v teoretické fyzice, letos již po třiadvacáté. Mezi jejími laureáty jsou jak domácí studenti, tak i odchovanci nejlepších světových univerzit.

Dopplerův ústav má patronát nad konferenční sérií QMath – Mathematical Results in Quantum Physics, již v roce 1987 založili P. Exner a P. Šeba. Konference se konají každé tři roky v různých zemích a na různých kontinentech. Dalšími konferenčními sériemi Dopplerova ústavu jsou každoroční Analytic and Algebraic Methods in Physics a International Workshop on Pseudo-Hermitian Hamiltonians in Quantum Physics, posledně jmenovaný se také konal v řadě zemí.

V roce 2009 Dopplerův ústav pořádal v Praze 16. Mezinárodní kongres matematické fyziky, největší světovou konferenci v oboru, za účasti cca 700 lidí včetně vedoucích osobností v této oblasti fyziky, mezi nimiž najdeme jména nositelů Nobelovy ceny (Steven Weinberg) a Fieldsovy medaile (Cédric Villani).



• Obr. 1: V roce 2009 byl Pavel Exner z ÚJF (vlevo) hlavním pořadatelem zmíněného kongresu matematické fyziky ICMP v Praze. Pozvání na něj přijala řada předních světových vědců. Na fotografii Joel Lebowitz (zcela vpravo) a nositel Nobelovy ceny Steven Weinberg (uprostřed). Foto: Archiv P. Exnera

| Hadronová a jaderná fyzika

Činnost skupiny se zaměřuje na teoretický popis silných interakcí mezi hadrony při nízkých a středních energiích, kde tyto částice mohou nést i nenulové hodnoty kvantových čísel, jako je podivnost. Studium hadronů a jejich systémů s nenulovou podivností – tj. obsahujících podivný/é s- kvark/y nebo antikvark/y – např. kaonů, hyperonů a hyperjader, se na Oddělení teoretické fyziky věnuje pozornost již dlouhou řadu let (J. Žofka, M. Sotona, L. Majling, O. Richter).

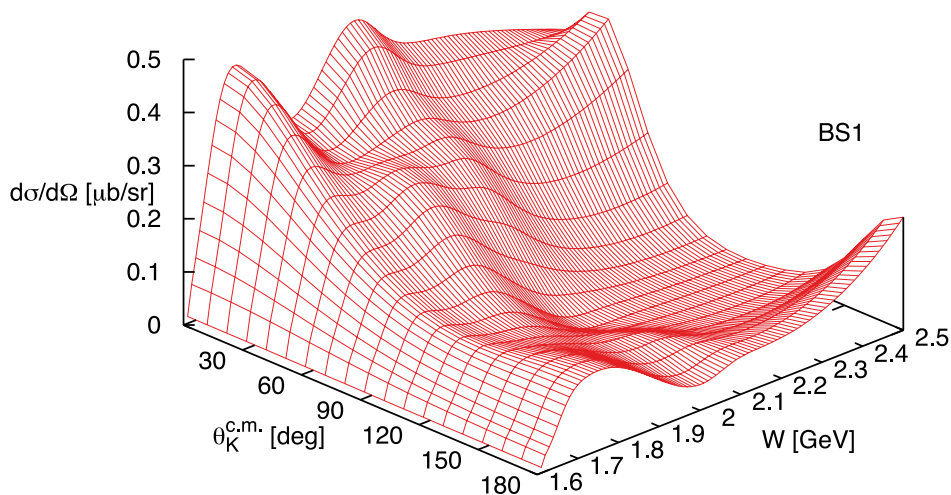
Produkce hyperonů a hyperjader

Studovali jsme vlastnosti hyperjader a reakcí, při nichž společně s kaony vznikají hyperony nebo hyperjádra. Při výpočtech jaderné a hyperjaderné struktury využíváme přístupů středního pole, např. formalismus Tamm–Dancoff. Při konstrukci modelů a analýze dat z měření fotoprodukce (Obr. 2) a elektroprodukce hyperonů na nukleonech vycházíme z formalismu isobar modelu založeného na fenomenologickém lagrangiánu a při určování volných parametrů modelu používáme sofistikované statistické metody. Tyto modely jsou také aplikovány při složitějších výpočtech pro elektroprodukci hyperjader (Obr. 3). Analýza dat přispívá k lepšímu pochopení dynamiky daných reakcí, vlastností hyperon–nukleonové interakce a k doplnění informací o spektru baryonových stavů předpovídaných v rámci kvantové teorie silných interakcí. Těsné napojení na různé experimentální skupiny v předních světových laboratořích, Jefferson Lab (USA), MAMI (Německo) a LNS Tohoku University (Japonsko), nám umožňuje využívat nejnovější data a podílet se na navrhování nových experimentů, např. pro produkci hyperjader na elektronovém svazku v Jefferson Lab poskytováním teoretických předpovědí pro účinné průřez reakce.

„Za posledních 20 let členové Dopplerova ústavu vychovali 46 Ph.D. studentů a vedli 51 postdoktorandů, z toho pětina, resp. třetina připadá na skupinu matematické fyziky v OTF.“

Ab initio výpočty hyperjader

Jako první jsme zformulovali a vyvinuli ab initio metodu „no-core shell model“ (NCSM) pro jaderné systémy s nenulovou podivností. To umožnilo provést průkopnické hyperjaderné výpočty z prvních principů a následně studovat několik aktuálních nebo dlouhodobě nezodpovězených otázek. Byly provedeny spolehlivé systematické výpočty Λ hyperjader až do p-slupky s využitím realistických (hyper)jaderných interakcí, např. interakcí odvozených z chirální efektivní teorie. Ukázali jsme, že ab initio přístupy poskytují mocný nástroj ke studiu struktury hyperjader a k odhalení nedostatků v dostupných hyperjaderných interakcích. Hyperjaderný NCSM jsme později aplikovali v objasnění narušení nábojové symetrie v lehkých zrcadlových Λ hyperjádrech, které bylo nedávno potvrzeno přesnými experimenty, ale nebylo ho možné teoreticky vysvětlit. Ab initio metodami jsme zkoumali i velmi aktuální otázku doby života hypertritonu. Ukazuje se, že teoretické předpovědi vlastností hypertritonu jsou zatíženy

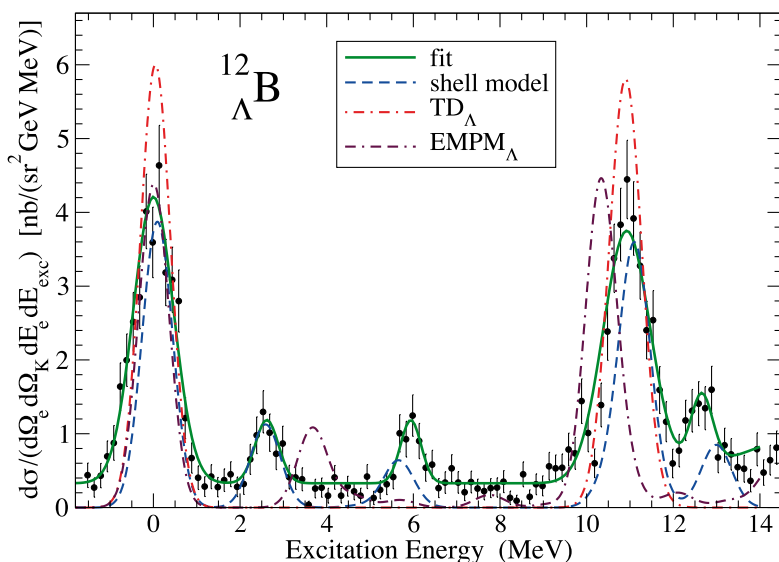


• Obr. 2: Diferenciální účinný průřez pro reakci $p(\gamma, K^+)\Lambda$ počítaný pomocí jednoho z isobar modelů pro energie W od prahu reakce do 4 GeV a všechny kaonové úhly $\theta_K^{c.m.}$. Zdroj: Phys. Rev. C97, 025202 (2018)

neočekávaně velkou neurčitostí, která je schopná vysvětlit nesoulad některých měření na relativistických urychlovačích těžkých iontů.

Bezpionová efektivní polní teorie

V rámci tzv. bezpionové efektivní polní teorie s použitím stochastické variační metody a technik CSM a IACC pro popis rezonančních stavů byly studovány nejlehčí hyperjaderné systémy. Vytvořili jsme tak zcela ojedinělý model, který umožňuje jednotný popis všech dostupných experimentálních dat z nejlehčích jaderných systémů s jedním a dvěma hyperony Λ , a navíc dává důležité předpovědi pro dosud nepozorované systémy a dobu života nejlehčích hyperjader. Tyto předpovědi nyní jsou či brzy budou experimentálně studovány v několika světových laboratořích (JPARC, MAMI, BNL, CERN, HYPHI).



■ Obr. 3: Srovnání teoretických předpovědí s daty pro excitační spektrum v elektroprodukci hyperjádru $^{12}_{\Lambda}\text{B}$. Plná zelená čára je fit na experimentální data. Další křivky jsou teoretické předpovědi počítané v impulsní aproximaci v rámci různých mnohočásticových přístupů a s použitím různých hyperon-nukleonových interakcí. Zdroj: Phys.Rev.C108, 024615 (2023)

Exotické systémy

Zkonstruované modely antikaon-nukleonové interakce a ostatních interakcí potřebných pro máločásticové výpočty byly použity pro studium vlastností antikaonového deuteria a antikaonových jader. Vazbová energie a šířka stavů těchto exotických máločásticových systémů byly vypočteny s použitím dynamicky přesných Faddějevových rovnic. Ukázali jsme, že tento formalismus, který korektně zahrnuje vázané částicové kanály, je důležitý pro popis antikaon-nukleonových systémů. Předpověděli jsme existenci kvazi-vázaných stavů v některých studovaných máločásticových strukturách.

Mezon-baryonová interakce

Chirálně motivovaný model mezon-baryonových interakcí, po řadu let rozvíjený na OTF, byl využit při popisu komplexnějších hadronových reakcí, např. fotoprodukce $\pi\Sigma$, a jaderných systémů. Významné jsou v tomto směru práce zaměřené na konstrukci mezon-jaderného optického

„Členové OTF zorganizovali desítky mezinárodních workshopů, a to nejen u nás, ale i v zahraničí (ECT* Trento, INFN Terst, Orsay).“

potenciálu, který byl ve spolupráci s kolegy z Hebrejské univerzity v Jeruzalémě použit při popisu antikaonových atomů, analýze možností tvorby antikaon-jaderných a eta-jaderných kvazi-vázaných stavů nebo produkce hyperjader v reakcích (K^- , π^-). Při analýze ener-

gií a šířek atomových stavů ve fitech dat z antikaonových atomů jsme studovali závislost antikaon-jaderného optického potenciálu na jaderné hustotě a zabývali se jeho extrapolací do oblasti vyšších hustot, charakteristických pro nitra jader. Při self-konsistentních výpočtech jsme rovněž brali v úvahu závislost absorpce antikaonu na hustotě jaderného prostředí. Námi spočítané šířky antikaonových jaderných stavů jsou výrazně větší než šířky ohlášených kandidátů na tyto stavy získané v KEK (Japonsko) a ve Frascati (Itálie), které však pozdější experimenty nepotvrdily. Následně jsme počítali kvazivázané stavy antikaonu v jádrech pro různé modely mezon-baryonové interakce. Vedle interakce antikaonu

s jedním nukleonem byla poprvé zahrnuta též absorpce antikaonu na více nukleonech. Ta byla klíčová pro předpovědi rozpadových šířek. Výpočty ukázaly, že kvazivázané stavy antikaonu v mnohočásticových jaderných systémech, pokud vůbec existují, mají značné šířky výrazně převyšující jejich vazbové energie. Identifikace takových stavů v experimentech se tudíž zdá být nemožná.

V dalších našich výsledcích týkajících se hloubky antikaon-jaderného optického potenciálu se ukazují souvislosti s rolí podivných částic v kompaktních astrofyzikálních objektech, jakými jsou např. neutronové hvězdy. Při studiu vázaných stavů eta mezonu v atomových jádrech jsme ukázali, jak je důležité korektně zahrnout energetickou závislost amplitud rozptylu. Předpovězené vazbové energie vázaných stavů eta mezonu a jejich šířky jsou výrazně nižší, než uváděly předchozí výpočty.

Struktura jader

Jaderné ab initio výpočetní přístupy byly aplikovány při studiu elektroslabých interakcí a interakcí hypotetických částic temné hmoty s jádry. Vytvořili jsme nový rámec pro výpočty jaderné struktury a kvantifikaci teoretických neurčitostí v kontextu přímých a (určitých) nepřímých způsobů detekce částic temné hmoty, která je nezbytná při analýze experimentálních výsledků. Ab initio metody byly využity k výpočtu korekcí pocházejících z jaderné struktury pro pozorovatelné veličiny v nízkoenergetických beta-rozpadech jader, které jsou ústředním předmětem zájmu několika vysoce citlivých experimentálních snah o hledání fyziky za Standardním modelem.

Zaměřili jsme se rovněž na studium vlivu mnohočásticových korelací ve struktuře jader. Byly rozvinuty sofistikované výpočetní modely, které zahrnují příspěvky tzv. komplexních konfigurací – vícenásobných částicově-děrových excitací. Díky tomu popis jaderných vlnových funkcí překonává rámec aproximace středního pole. Ukazuje se, že zahrnutí komplexních konfigurací je nutné, pokud chceme uspokojivě vysvětlit řadu pozorovaných jevů v jaderných energetických spektrech, např. pygmy dipólové re-

zonance, multifragmentace gigantických rezonancí, rozložení hladin v jádrech s lichým počtem nukleonů a další.

Členové skupiny se zapojili do EU projektů SPHERE, LEANNIS a HORIZON2020. Jsou členy kolaborací/experimentů v Jefferson Lab, MAMI, LNS Tohoku a JPARC. Skupina se stala důležitou a uznávanou součástí mezinárodní komunity zabývající se fyzikou hadronů a hyperjader.

| Matematická fyzika

Většina úsilí členů skupiny matematické fyziky se zaměřuje na vyšetřování dynamiky kvantových systémů rigorózními matematickými metodami. Tato činnost slouží nejen řádnému zdůvodnění užívaných modelů z prvních principů, důležitější je ale skutečnost, že tímto způsobem dosahujeme lepšího chápání mechanismů, jež řídí chování takových systémů. To nám umožnilo najít řadu nových zajímavých jevů.

Kvantové vlnovody

Některé tyto objevy vzešly z plodného postřehu, že netriviální geometrické vlastnosti systémů mohou samy o sobě dát vzniknout efektivní interakci. Příkladem je chování kvantových vlnovodů s tvrdými stěnami: ohyb takového vlnovodu vede ke vzniku vázaných stavů a rezonancí v blízkosti prahů, v nichž spojité spektrum mění násobnost. Obdobné chování se podařilo prokázat i u „měkkých“ systémů umožňujících navíc kvantové tunelování mezi jednotlivými částmi struktury, zmíněné modely mají i praktický význam sloužící k popisu mikroskopických objektů vytvořených z velice čistých polovodičových a jiných materiálů. Podrobnou diskuzi vlastností takových „vedených“ kvantových částic popisuje monografie *Quantum Waveguides* P. Exnera a H. Kovaříka (Springer 2015).

Kvantové grafy

Příbuznou třídou modelů nanostruktur jsou kvantové grafy. Také zde patří členové skupiny k průkopníkům a v posledních dvou dekadách výrazně přispěli k rozvoji této oblasti některými důležitými výsledky. Jako příkla-

dy lze uvést aproximací obecné samosdružené vazby ve vrcholech grafu pomocí větvičích se vlnovodů, jejichž příčný průřez se stahuje do bodu, vysvětlení existence neweylovských grafů, v nichž počet resonancí je nižší, než napovídá standardní kvaziklasická asymptotika či důkaz existence Bethe–Sommerfeldových grafů, v nichž počet spektrálních lakun (zakázaných pásů) je nenulový a konečný. Motivováni nedávnými pokusy modelovat anomální Hallův jev pomocí kvantových grafů, členové skupiny v poslední době intenzivně studují grafy, jejichž vrcholová vazba narušuje invarianci vůči časové inverzi. Už v nejjednodušším takovém případě vede zmíněná neinvariance k pozoruhodným výsledkům, jako je například závislost transportních vlastností při vysokých energiích na paritě vrcholu či existenci netriviální PT-symetrie (o té se zmíníme dále) při současném zachování toku pravděpodobnosti na celém grafu.

„Také většina dalších Ph.D. studentů a diplomantů vychovaných v oddělení dnes pracuje v akademické sféře, někteří zastávají místa profesorů a docentů. Jan Kříž je v současnosti rektorem Univerzity v Hradci Králové.“

Diracovské systémy s kontaktními interakcemi

Objev grafenu, oceněný Nobelovou cenou v roce 2010, přinesl novou motivaci pro studium systémů popisovaných Diracovou rovnicí, krom jiného se pozornost obrátila k řešitelným modelům v této oblasti založeným na kontaktních interakcích, jejichž zkoumání bylo koncem 80. let minulého století iniciováno staršími členy skupiny. Ve spolupráci se skupinou z Technické univerzity ve Štýrském Hradci (a v konkurenci s dalšími evropskými skupinami) byly vyšetřeny obecné vlastnosti modelů tohoto typu. V této souvislosti se také znovu (a v obecnější podobě) objevil jev pozorovaný již ve zmíněné starší studii, kdy určité kombinace elektromagnetické a lorentzovsky skalární interakce vedou ke vzniku neproniknutelné bariéry, zde se nabízí přirozená souvislost s klasickým modelem uvěznění kvarků v MIT „pytli“, jenž se tím jeví v nové perspektivě.

Diracovské materiály

Diracova rovnice ve dvou dimenzích byla využita ke studiu energetického spektra a transportu Diracovských fermionů v grafenu nebo jeho alotropu (uhlíkových nanotubicích, nanoprůčcích nebo konečných vzorcích) v přítomnosti vnějších polí nebo mechanických deformací užitím nových postupů, jako jsou tzv. supersymetrické transformace. Tímto způsobem byly nalezeny postačující podmínky pro tvorbu vlnovodů v grafenu pomocí mechanických deformací, záchyt kvazičástic pomocí elektrického pole v grafenových nanoprůčcích nebo všeúhlové Kleinovo tunelování skrz elektrickou bariéru.

Získané výsledky přispívají k lepšímu chápání transportu částic v těchto nových materiálech a mohou tak přispět k jejich budoucímu technologickému využití.

Spektrální optimalizace

V náplni práce skupiny se mísí metody fyzikální a matematické, je tudíž přirozené, že se pozornost upírá i k matematickým vlastnostem diferenciálních operátorů, jenž jsou „stavebními kameny“ zkoumaných fyzikálních teorií a modelů. Mezi významné výsledky patří optimalizace vlastních hodnot pro Robinův laplacián v doplňku omezené oblasti, nový variační princip pro Diracův operátor umožňující geometrické odhady jeho vlastních hodnot a rozvoj metody zkušebních funkcí, jež jsou konstantní na křivkách úrovně torzní funkce a slouží optimalizaci vlastních hodnot magnetického laplaciánu.

PT-symetrické systémy

Jiným tématem, k němuž skupina významně přispěla, především zásluhou M. Znojila, jsou vlastnosti systémů vykazujících výše zmíněnou PT-symetrii, tedy invarianci vůči kombinaci zrcadlení a obrácení směru toku času. Taková dynamika sice není v souladu s obvyklými předpoklady o kvantové mechanice izolovaných soustav a pokusy zobecnit ji nevedly k uspokojivým výsledkům, ale zmíněná symetrie nachází široké uplatnění i jinde, krom jiného v elektromagnetismu, kde popisuje sys-

témy s průtokem energie, jakož i v dalších oblastech fyziky. Obsáhlý přehled PT-symetrických jevů lze najít například v knize *Non-Selfadjoint Operators in Quantum Physics* (Wiley 2015). Zájem komunity o tuto oblast je zřejmý z každoročních workshopů na dané téma zmíněných výše.

| Subjaderná fyzika

Alternativa k Higgsovu mechanismu

V problematice elektroslabých interakcí skupina po roce 2005 rozpracovala abelovský model dynamického narušení chirální kalibrační symetrie silnou yukawovskou interakcí, který aplikovala na kvazi-realistický model elektroslabých interakcí. Slabě interagující Higgsův sektor Standardního modelu má totiž všechny znaky fenomenologického popisu a bylo lákavé nahradit takový popis nově rozvinutou mikroskopickou dynamikou silně interagujících skalárních polí. Genericky jinou alternativou je obejít se bez elementárních skalárních polí úplně.

Po roce 2012, kdy byl v CERNu skalární Higgsův boson objeven, musí však každá alternativa Higgsova bosonu obsahovat těžkou skalární částici složenou z fermionů a antifermionů. Idea se odkazuje na těsnou analogii mezi Ginzburgovu-Landauovu teorií supravodivosti a Higgsovým mechanismem, společným jmenovatelem je obecný princip spontánního narušení symetrie. Závažnou komplikací je však potřeba nové silně interagující kalibrační dynamiky. Rozpracovávání této problematiky, zahrnující fyziku za Standardním modelem (BSM), trvá do současnosti. Poslední publikovaný model rozšiřuje fermionový sektor Standardního modelu o sterilní neutrino. Dynamické (spontánní) generování jejich hmot má za následek existenci pseudo-Nambuova-Goldstoneova (NG) bosonu, majoronu, který je v literatuře populárním modelem inflatonu. Sterilní neutrino samotná jsou důležitou ingrediencí do dvou jevů BSM modelu: mechanismu seesaw vysvětlující přirozeně nesnesitelnou lehkost pozorovaných neutrin, a do modelů pozorované temné hmoty vesmíru.

Nerelativistické Goldstoneovy bosony

Není náhodou, že obecný princip spontánního narušení symetrie, jehož důsledkem jsou měkké (nehmotné) Nambuovy-Goldstoneovy (NG) módy, a o němž už byla řeč, je všudypřítomný nejen v kvantově polním popisu elementárních částic, ale ve fyzice (nekonečně) mnoha částic obecně. Zatímco v relativisticky invariantních teoriích elementárních částic závisí energie na impulsu lineárně, v Lorentz-neinvariantních systémech je situace složitější. V OTF jsme na problém narazili při studiu chladné husté kvarkové plazmy, tvořící barevný supravodič. Takový systém je sice relativistický, ale jeho Lorentzova invariance je explicitně narušena chemickým potenciálem (baryonovou hustotou).

Fázové přechody v QCD při nenulových teplotách

Kvantová chromodynamika (QCD) představuje elegantní matematickou strukturu, která je všeobecně pokládána za přijatelnou teorii silných interakcí, mimo jiné proto, že přesvědčivě aspiruje na popis jejích neobvyklých aspektů, především uvěznění elementárních konstituentů: kvarku a gluonu. Bohatost struktury QCD se projevuje i v tom, že tradiční poruchové rozvoje ztrácí v infračervené oblasti smysl a z extrakce fyzikálních předpovědí se stává komplexní problém velmi specifického druhu. Formulace QCD s regularizací realizovanou zavedením prostoročasové mříže (mřížková QCD) hraje speciální roli, protože dovoluje studovat teorii novými prostředky: rozvoji v okolí nekonečně silné vazbové konstanty a zejména čistě neporuchovými numerickými simulacemi. Mřížkové výpočty hadronových spekter přesvědčivě ukazují, že QCD skutečně je fundamentální teorií silných interakcí. Mřížková QCD hraje také centrální roli při studii termálních fází silně interagující hmoty. Mřížkové simulace ukázaly, že chirální proměnné nevykazují skutečný fázový přechod, ale pouze analytickou změnu při teplotě blízko $T=155$ MeV (chirální crossover). Naše studie ale poukázaly na to, že skutečný fázový přechod pravděpodobně existuje při vyšší teplotě (o cca 50 až 80 MeV). Tento fázový přechod odpovídá znovunastolení škálové invariance gluonových polí v infračervené oblasti. Tím se dramaticky mění obraz fázového diagramu QCD. Příslušný scénář a jeho detailní důsledky jsou dále intenzivně zkoumány. Výsledky těchto studií

mohou významně ovlivnit naše chápání role silných interakcí v evoluci raného Vesmíru a interpretace neobvyklých vlastností silně interagující hmoty v experimentech s těžkými ionty (RHIC, ALICE).

Hadrony z polních rovnic QCD

Zcela jiný neporuchový přístup popisu struktury a interakcí hadronů, systematicky rozvíjený na OTF, je založený na numerických řešeních Dyson-Schwingerových (DS) a Bethe-Salpeterových rovnic v Minkowského prostoru. Tento přístup používá propagátory konfinovaných kvarků a gluonů (inspirované nebo převzaté z mřížkové QCD) a neporuchové interakční vrcholky, modelované a reprezentované pomocí spektrálních funkcí. Umožňuje výpočty exkluzivních formfaktorů pro časupodobné impulsy. Jako jedni z prvních jsme zkonstruovali z korelačních funkcí kvarků a gluonů pionový formfaktor, potřebný k popisu produkce nabitého pionového páru a velmi přesně změřený například v anihilacích elektron-pozitronových párů. Výsledek výpočtu je použitelný i v okolí ρ -mezonové rezonance, dříve popisované výhradně fenomenologicky. Podobně byl spočten dvoufotonový přechodový formfaktor představující takzvanou off-shell axiální anomálii (jeden z fotonů je virtuální). Funkcionální formalismus DS rovnic plynule přesahuje od neporuchové QCD nízkých energií do hadronové fyziky vyšších energií. Je tedy vhodný také k výpočtu vlastností těžkých kvarkonií, jejich hmotových spekter a přechodů. Z vlastností propagátorů a vertexů těžkých kvarků s gluony lze pak odhadovat vlastnosti a charakter uvězněných kvarků: např. mechanismus uvěznění těžkých kvarků se dnes jeví velmi podobně jako pro lehké kvarky. Všechny uvedené výpočty mají širší význam v tom, že přispívají k vysvětlení vlastností pozorovaných částic bezprostředněji z fundamentální teorie (QCD).

Exotické elektroslabé procesy

Na hadronové úrovni jsou elektroslabé interakce popsány efektivními lagrangiány, vycházejícími ze symetrií interakce, zejména z chirální symetrie. V posledních dvou dekádách jsme provedli detailní konzistentní výpočty rozptylu neutrin a μ -záchytu na lehkých jádrech, které vedly k omezení důležitých nízkenergetických konstant chirální poruchové teorie, která

je dnes základním nástrojem popisu nízkoenergetických vlastností hadronů. Studium těchto reakcí ovlivňuje také chápání dalších důležitých astrofyzikálních a reaktorových slabých procesů, například slabé protonové fúze nebo detekce solárních neutrin. Zajímavou aplikací je analýza slabého bezneutrinového zachytu elektronů v silně magnetických bílých trpaslících – vyhaslých kompaktních hvězdných tělesech. Tento proces je jiným uspořádáním dvojitého beta-rozpadu, citlivého na povahu a hodnoty neutrinových hmotností. Ukázalo se, že reakce v bílých trpaslících může sloužit jako analog gigantického detektoru dvojitého beta-rozpadu: astronomie se zde setkává se (sub)jadernou fyzikou. Je ale nutné lépe prozkoumat těžké silně magnetické bílé trpaslíky a spolehlivě popsat jejich strukturu.

≡ | Jaderná astrofyzika na Oddělení jaderných reakcí ÚJF



Jaromír Mrázek

Oddělení jaderných reakcí ÚJF

Předmětem výzkumu v oblasti jaderné astrofyziky na Oddělení jaderných reakcí Ústavu jaderné fyziky AV ČR (OJR) je měření účinných průřezů – nebo přeneseně rychlostí reakcí, které probíhají ve hvězdách – např. radiačního zachytu protonu nebo reakcí protonu s výletem alfa částice na lehkých izotopech beryllia, uhlíku, dusíku, kyslíku či neonu. Tyto reakce probíhají ve hvězdách sice při vysokých teplotách (deset milionů stupňů), ale z hlediska specialistů pracujících na urychlovači probíhají tyto reakce při příliš nízkých energiích. Zatímco náš cyklotron U-120M urychluje protony od jednotek MeV do 34 MeV, energie protonů v centru Slunce jsou na úrovni pouhého 1 keV. Problémem je, že Coulombická bariéra, energie odpuzování mezi jádrem a protonem, je na úrovni 0,5 MeV, a tak procesy nukleosyntézy ve Slunci probíhají velmi pomalu a jen díky kvantovým jevům.

Provádět tato měření v laboratoři přímo je extrémně komplikované, možnosti těchto měření se otevřely teprve nedávno a analýza dat se neobejde bez extrapolací.

V našich měřeních používáme techniku nepřímých metod. Coulombická bariéra, která brání dostatečnému přiblížení projektilu a jádra, se obchází tím, že využije těžší jádro, které v sobě zmíněný projektil obsahuje – pro proton to je ^3He , pro neutron to je deuteron. Využívali jsme dvě metody – metodu ANC (Asymptotic Normalization Coefficients) a metodu trojského koně (Trojan Horse Method – THM).

Nepřímá měření

Metody samy o sobě nenahradí zcela přímá měření, ale každá metoda dovoluje získat nějaké podstatné informace.

Metoda ANC umí, na základě znalosti rezonancí (velmi krátkožijících vzbuzených stavů v jádře) odvodit tzv. S-faktor reakce – účinný průřez reakce v případě, kdy energie projektilu se blíží nule. Tato metoda funguje pro reakce radiačního zachytu, jako je (p, gama), což je velmi častý případ v reakcích CNO cyklů (reakcí spalujících vodík na helium za pomoci uhlíku jako katalyzátoru).

Metoda THM naopak dokáže získat průběh účinného průřezu v celé oblasti energií (pro astrofyzikální účely v oblasti energií v blízkosti nuly), ovšem pro reakce, kde vylétá nabitá částice, jako je reakce (p, alfa). V CNO cyklech tyto reakce často najdeme jako komplementární k reakcím (p, gama).

Nevýhodami metod je, že jsou závislé na určitých předpokladech – jsou to měření nepřímá – a pro THM je nutná normalizace na přímé měření.

Přístrojová základna a mezinárodní spolupráce

Oddělení je spojeno s vývojem metody ANC v 90. letech, kdy za vedení V. Krohy zde působil A. M. Mukhamedzhanov z Uzbekistánu, který později přešel na Texas A&M University. Z této spolupráce později vznikla širší

spolupráce založená na využití metod v experimentech. Metodu THM pro-
sadil a uvedl do praxe zejména C. Spitaleri z INFN-LNS ze Sicílie a týmy
časem spojily své síly. Na metodách teoreticky spolupracovala řada dal-
ších kolegů, mezi nejvýznamnější patří teoretici L. D. Blokhintsev a S. Typel.
Ve spolupráci s INFN-LNS Catania a Texas A&M University byly provedeny
experimenty, které se zapsaly do historie.

Experimenty probíhaly za pomoci křemíkových teleskopů (metoda ANC),
kde dva sdružené detektory jsou schopny nejen určit energii částice, ale
i rozeznat její typ. Pro metodu THM je třeba několika pozičně citlivých de-
tektorů, na kterých se zaznamenávají koincidence – souběh událostí – kdy
z reakce vyletí současně dvě nabitě částice.

Zpočátku týmy používaly elektro-
nický systém sběru multidimenzi-
onálních dat založený na sběrnici
CAMAC, později přešly na moderní
systém VME a poté, až do součas-
nosti, ke zpracování pomocí signál-
ních procesorů FPGA.

**„Společně s INFN-LNS
a GANIL jsme například
připravili a provedli
experiment, který míří
na hledání nosiče páté síly
(temného bosonu).“**

Experimenty probíhaly na cyklotronu U-120M (kde jsou k dispozici
deuterony a izotop helia ^3He), v Katánii na tamním tandemu (kde jsou
k dispozici izotopy fluoru a kyslíku) a na urychlovači v TA&MU, kde jsou
k dispozici další těžší prvky a magnetický spektrometr pro rozlišení vyle-
tujících částic.

Příklady experimentů s metodami ANC a THM

Příkladem úspěšného měření je reakce $^{15}\text{N}(p,\text{gamma})^{16}\text{O}$ – zachytu proto-
nu na izotopu dusíku ^{15}N – která je důležitou odbočkou v reakčním cyk-
lu CNO-I. Ten je součástí systému reakcí, kterým hvězdy jako naše Slun-
ce generují energii. Naše měření, kdy jsme proton „propašovali“ do jádra
schovaný v deuteronu, ukázala (za pomoci výpočtů), že tehdejší odhady
přeceňovaly tento únik z CNO cyklu faktorem 2. Práce získala cenu Ame-

rické fyzikální společnosti a později byly naše hodnoty potvrzeny v přímém měření v podzemní laboratoři LUNA.¹

„Naše měření nicméně potvrdilo, že vysvětlení nedostatku neutrin neleží v neznalosti jaderných reakcí a procesů ve Slunci.“

Měření reakce ${}^7\text{Be}(p, \text{gama}) {}^8\text{B}$ probíhalo na urychlovači v Texas A&M University, kde byl k dispozici svazek ${}^7\text{Be}$. Týkalo se tehdy žhavého problému solárních neutrin, kdy detektor Super-Kamiokande potvrdil nedostatek pozorovaných

neutrin proti předpovědím ze solárních modelů. Naše měření zpřesnilo dosavadní extrapolované údaje a posunulo tyto hodnoty účinného průřezu reakce o 2 sigma (což odpovídá tomu, že tato hodnota byla 2x dále, než bylo očekávané rozpětí u původního měření). Naše měření nicméně potvrdilo, že vysvětlení nedostatku neutrin neleží v neznalosti jaderných reakcí a procesů ve Slunci.²

Na cyklotronu U-120M v ÚJF byly studovány reakce ${}^2\text{H}(d, p){}^3\text{H}$ a ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$. Metoda THM umožnila v tomto systému deuteron+deuteron získat data pro široký interval energií od 2 keV do 1,5 MeV, takže výsledky přinesly nové údaje – o 15% až 25% vyšší oproti dosavadním znalostem – jak pro fúzní reaktory, vývoj hvězd, tak i pro nukleosyntézu, která proběhla vzápětí po Velkém třesku.³

Současnost

Počet vědeckých pracovníků oddělení v roce 2025 klesl, takže plány jsou v současnosti nejisté. Oddělení nicméně stále udržuje spolupráci s INFN–LNS a těžiště činností v oblasti jaderné astrofyziky se postupně přesunulo směrem ke spolupráci s laboratoří GANIL ve Francii.

1 A. M. Mukhamedzhanov et al., *Physical Review C* 78 (2008) 015804

2 G. Tabacaru et al., *Physical Review C* 73 (2006) 025808

3 A. Tumino et al., *Physics Letters B* 700 (2011) 111

Společně s INFN-LNS a GANIL jsme například připravili a provedli experiment, který míří na hledání nosiče páte síly (temného bosonu) – experiment probíhal v ÚJF a v Orsay, Francie. Naše studentka analyzuje data získaná na nejnovějším detektoru ACTAR TPC, který dokáže doslova dělat snímky jaderných reakcí.

Jako příklad velmi úspěšného astrofyzikálního experimentu z nedávné doby lze uvést výsledek z roku 2022, kdy se podařilo získat odhad a limity na množství izotopu sodíku ^{22}Na , který musí vznikat při výbuchu Nov, avšak doposud nebyl kosmickými sondami detekován. Práce zároveň přinesla novou techniku, která dovoluje změřit jaderné doby života v řádu femtosekund.⁴

4 C. Fougères et al., *Nature Communications* 14 (2023) 4536



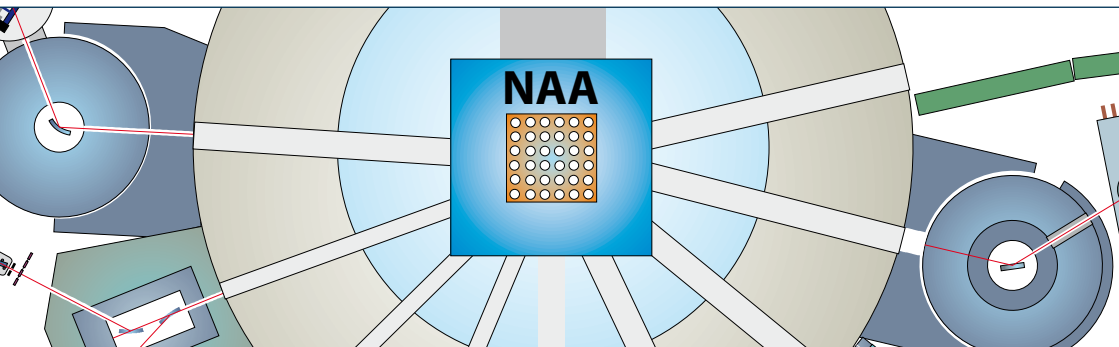
• Obr. 1: Průkopníci nepřímých metod: zleva V. K. Goldberg, L. D. Blokhincev, V. Kroha (ÚJF), A. M. Mukhamedzhanov, C. Spitaleri.

Foto: Archiv Claudia Spitaleriho

2 | Výzkum ostatků Tycha Braha

 Jan Kučera, Jan Kameník

Oddělení neutronových a iontových metod ÚJF



V r. 2010 se podařilo po téměř ročním vyjednávání skupině dánských vědců pod vedením dánského archeologa J. Vellea z Aarhuské univerzity získat povolení k znovuotevření hrobky Tycha Braha k průzkumu jeho ostatků. Hlavním cílem projektu bylo objasnit příčinu náhlé smrti věhlasného renesančního astronoma, jenž zemřel v Praze 24. října 1601 po krátké 11 dnů trvající nemoci a byl pohřben v kostele Matky Boží před Týnem (Týnský chrám). Přesněji řečeno, hlavně se jednalo o zjištění, jestli byl otráven rtutí, jak se po staletí spekuovalo. K projektu jsme byli přizváni spolu s dalšími českými archeology, antropology, patology a specialisty na alchymii, abychom jadernými analytickými metodami pomohli vnést světlo do této historické záhady.

Osobnost Tycha Braha a jak zemřel

Osobnost šlechtice Tycha Braha není třeba sáhodlouze představovat. Prováděl svého času nejpresnější pozorování zejména komet a planet, tehdy ještě bez dalekohledu. V listopadu 1572 byl jedním z řady astronomů, kteří zaznamenali přítomnost nové hvězdy v souhvězdí Kasiopaea (v té době jasnější než Venuše, v současné době nazývané supernova SN 1572). V následujícím roce Brahe publikoval výsledky svých pozorování ve spise *O nové hvězdě*. Záznamy pozorování poloh nebeských těles provedené Brahem a jeho spolupracovníky pomohly později J. Keplerovi odvodit zákony o pohybu planet kolem Slunce. Brahe se zabýval také astrologií a alchymií (byl stoupencem Paracelsa). Byl tvůrcem známého preparátu *Elixier Tychonis* (*Medicamenta tria*), jehož jedna součást (Preparát III) obsahovala značné, ale neznámé množství rtuti, pravděpodobně ve formě $\text{HgSO}_4 \cdot 2 \text{HgO}$. Brzy

„Získané vlasy, vousy a kosti, spolu se vzorkem vlasů z muzea, jsme analyzovali v rámci dánsko-českého projektu.“

po odchodu z Dánska do Německa přijal Brahe v r. 1599 pozvání císaře Rudolfa II. do Prahy, kde ho císař jmenoval svým tajným radou a dvorním astronomem. Dne 13. října 1601 byl Tycho Brahe pozván na banket Petra Voka z Rožmberka, kde podle historických pramenů „mnohou číši vína vypil“. Z důvodu šlechtické

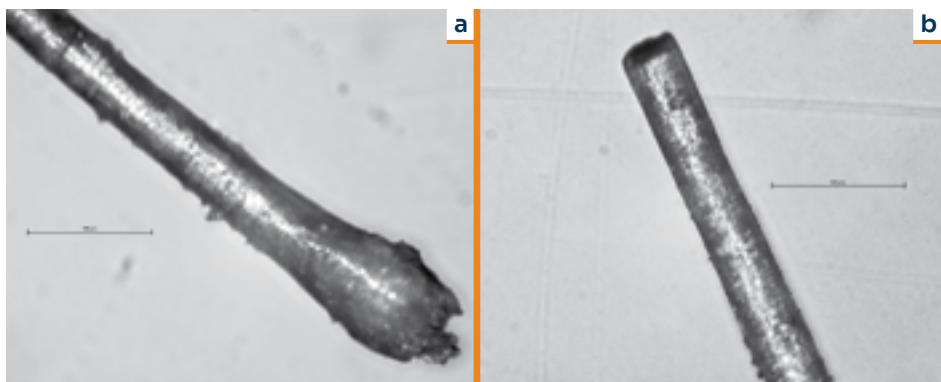
etikety nešel v průběhu banketu na toaletu a po návratu domů již nemohl močit, došlo k zástavě. Po 11 dnech krutých bolestí a stavů bezvědomí zemřel 24. října 1601 a byl pohřben v Týnském chrámu se všemi šlechtickými poctami. Krátce po jeho smrti se vyrojily spekulace o příčině úmrtí. Kromě popularizovaného tvrzení o prasknutí močového měchýře, které je z medicínského hlediska neudržitelné, se nejčastěji hovořilo o otravě rtutí. Mezi „podezřelými“ traviči byl i Johannes Kepler, Brahův asistent na dvoře císaře Rudolfa II.

Podezření na otravu rtutí zesílilo po mylné interpretaci výsledků analýz vlasů a vousů Tycha Braha získaných při rekonstrukci jeho hrobky v r. 1901 a následně uložených v Muzeu hlavního města Prahy. Tyto analýzy byly provedeny metodami atomové absorpční spektrometrie a PIXE (měření rent-

genfluorescenčního záření buzeného nabitými ionty) v letech 1993–2004 v Dánsku a ve Švédsku. Nedávné pokroky analytických metod vyvolaly zájem o studium nově odebraných vzorků ostatků Tycha Braha, a proto byla hrobka v r. 2010 znovu otevřena. Získané vlasy, vousy a kosti, spolu se vzorkem vlasů z muzea, jsme analyzovali v rámci dánsko-českého projektu.

Vzorky a jejich analýza

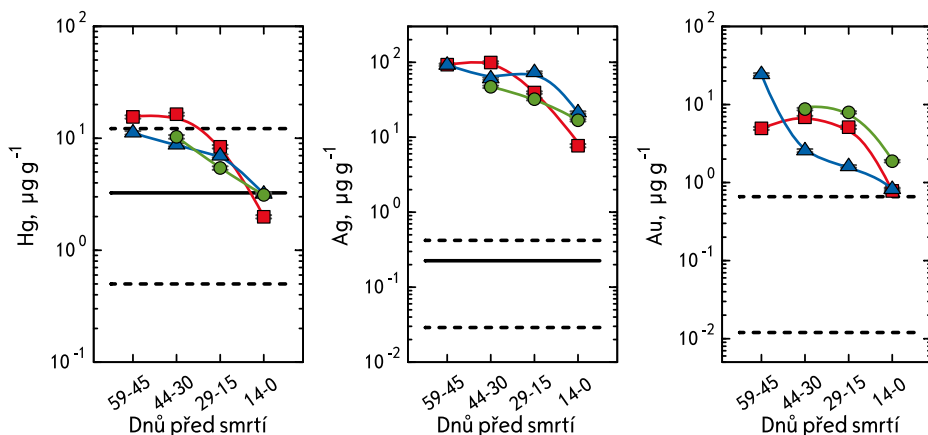
Vlasy a vousy mají schopnost akumulovat některé toxické a další prvky a pevně je vázat po dlouhou dobu – jsou známými indikátory expozice prvkům a dalším látkám z vnitřního i vnějšího prostředí. V dalším textu nebudeme rozlišovat mezi vlasy a vousy, protože obě tkáně mají podobnou schopnost akumulovat a vázat stopové prvky – budeme je kolektivně označovat jako vlasy. Při průměrné rychlosti růstu vlasů (cca 10 mm za měsíc) tato tkáň poskytuje časově rozlišený záznam o průběhu expozice. Proto jsme u vzorků vlasů nejprve hledali pod mikroskopem jejich kořínky, abychom je mohli správně orientovat. Pro analýzu neutronovou aktivační analýzou (NAA) jsme posléze cca 2 cm dlouhé vlasy rozdělili na 5 mm segmenty, abychom stanovili časový průběh obsahu Hg a dalších prvků za cca poslední dva měsíce života Tycha Braha (delší vlasy se nedochovaly). Ukázka dobře identifikovaného kořínku vlasu je uvedena na Obr. 1.



▪ Obr. 1: Kořínek (a) a konec (b) vlasu Tycha Braha. Vložená úsečka má délku 100 μm . Foto: J. Kučera, J. Kameník

Nejprve jsme provedli nedestrukční stanovení celé řady prvků v jednotlivých segmentech instrumentální variantou NAA (INAA) a posléze jsme z ozářených vzorků selektivně vyseparovali Hg metodou radiochemické neutronové aktivační analýzy (RNAA), abychom tento prvek stanovili s co největší přesností. Několik vlasů jsme analyzovali i metodou μ -PIXE (měření rentgenfluorescenčního záření buzeného nabitými částicemi), které umožňuje změřit změny koncentrace prvků podél osy vlasu s podrobnějším rozlišením, ale s horší nejistotou. Metoda také umožňuje stanovit obsah olova, na rozdíl od INAA a RNAA.

Kosti mohou sloužit jako indikátor dlouhodobé expozice vzhledem k dlouhé době remodelace této tkáně, která probíhá v řádu mnoha let. Proto jsme analyzovali vzorky kyčelních a stehenních kostí metodou INAA a dánští kolegové doplnili naše výsledky hodnotami získanými metodou atomové absorpční spektrometrie (CV-AAS) a hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS). Je samozřejmé, že před prove-



■ Obr. 2: Časový průběh koncentrace rtuti (Hg), stříbra (Ag) a zlata (Au) ve vlasech a vousích Tycha Braha; vlasy (TB38, čtverce) a vousy (TB39, kolečka) odebrané v roce 2010 a vlasy odebrané v roce 1901 a uchované v muzeu (TB77, trojúhelníky). Plná vodorovná čára – střední hodnota „normální“ koncentrace, přerušovaná vodorovná čára rozpětí „normálních“ koncentrací. Zdroj: Archiv ONIM

dením analýz jsme vzorky vlasů i kostí zbavili povrchové kontaminace speciálními postupy.

Byl Tycho Brahe otráven rtutí?

Výsledky časového průběhu koncentrace Hg stanovené metodou RNAA ve třech vzorcích segmentovaných vlasů či vousů jsou uvedeny na Obr. 2. Stanovené hodnoty jsou porovnány s mediánem (plná čára) a rozpětím hodnot (čerchovaná čára) pro současnou neexponovanou populaci (tzv. normální koncentrace).

Nejvyšší koncentraci $16,4 \pm 0,5 \mu\text{g g}^{-1}$ jsme našli v segmentech vlasů nejvíce vzdálených od kořínku, která indikuje expozici Hg cca dva měsíce před smrtí. Stanovená koncentrace mírně překračuje horní hranici rozpětí „normální“ koncentrace

„Z našich výsledků tedy vyplývá, že příčinou smrti Tycha Braha nemohla být ani akutní, ani chronická otrava rtutí.“

Hg a v dalších segmentech směrem ke kořínku postupně klesá. I nejvyšší nalezená koncentrace Hg je toxikologicky nevýznamná (nemá fatální vliv na zdravotní stav jedince). V případech mírné intoxikace se ve vlasech nalézají mnohem vyšší koncentrace Hg v rozpětí $200\text{--}800 \mu\text{g g}^{-1}$. Z našich výsledků tudíž vyplývá, že Tycho Brahe nezemřel na akutní otravu Hg. Na chronickou otravu, např. v důsledku jeho alchymistických aktivit (výroba a případné požívání svého elixíru nebo jiných paracelsovských preparátů), by se dalo usoudit z výsledků stanovení Hg v kostech, protože tato tkáň zabudovává Hg do svých struktur s delší časovou odezvou danou rychlostí remodelace kostí. Ta činí přibližně 7% za rok u trabekulární kosti a přibližně 2% za rok u kortikální, kompaktní kosti. V obou typech kostní tkáně jsme našli koncentrace Hg v rozmezí $0,015\text{--}0,036 \mu\text{g g}^{-1}$. Z porovnání s rozpětím koncentrací Hg v kostech v moderní, neexponované populaci $0,018\text{--}0,62 \mu\text{g g}^{-1}$ je zřejmé, že Tycho Brahe nebyl ani chronicky exponován větším dávkám Hg v posledních letech svého života. Z našich výsledků tedy vyplývá, že příčinou smrti Tycha Braha nemohla být ani akutní, ani chronická otrava rtutí.

Další zajímavé výsledky

Metodou INAA jsme stanovili ve vlasech a kostech Tycha Braha koncentrace celé řady dalších stopových prvků, metodou μ -PIXE jsme stanovili ve vlasech Pb.¹ Časový průběh koncentrace prvků Ag, As, Au a Fe v segmentovaných vzorcích vlasů byl podobný jako u Hg – nejvyšší hodnoty v cca dvou měsících před smrtí a pokles v posledních dnech života Tycha Braha. Podstatný rozdíl byl v tom, že nejvyšší koncentrace Ag a Au převý-

„V těchto kůstkách jsme zjistili vysoké koncentrace Cu ($7780 \pm 310 \mu\text{g g}^{-1}$) a Zn ($8070 \pm 310 \mu\text{g g}^{-1}$), jejichž poměr ukazuje na mosaz jako nejpravděpodobnější materiál [nosní] protézy.“

šily až o dva řády horní hranici rozptýlení pro současnou, neexponovanou populaci (Obr. 2), řádově nižší převýšení jsme zjistili pro As a Fe. Koncentrace prvků Cr, Co, Zn, Br, Sb a Pb nevykazovaly žádný systematický časový trend a byly v rozmezí normálních hodnot, s výjimkou poněkud nižších koncentrací Zn. Pro vyhodnocení toxikologických účin-

ků vysokých koncentrací Ag a Au jsme nenalezli v literatuře žádné údaje a ani se nám nepodařilo vysvětlit původ vysokých koncentrací uvedených prvků důkladným rozbořem možných alchymistických aktivit Tycha Braha.²

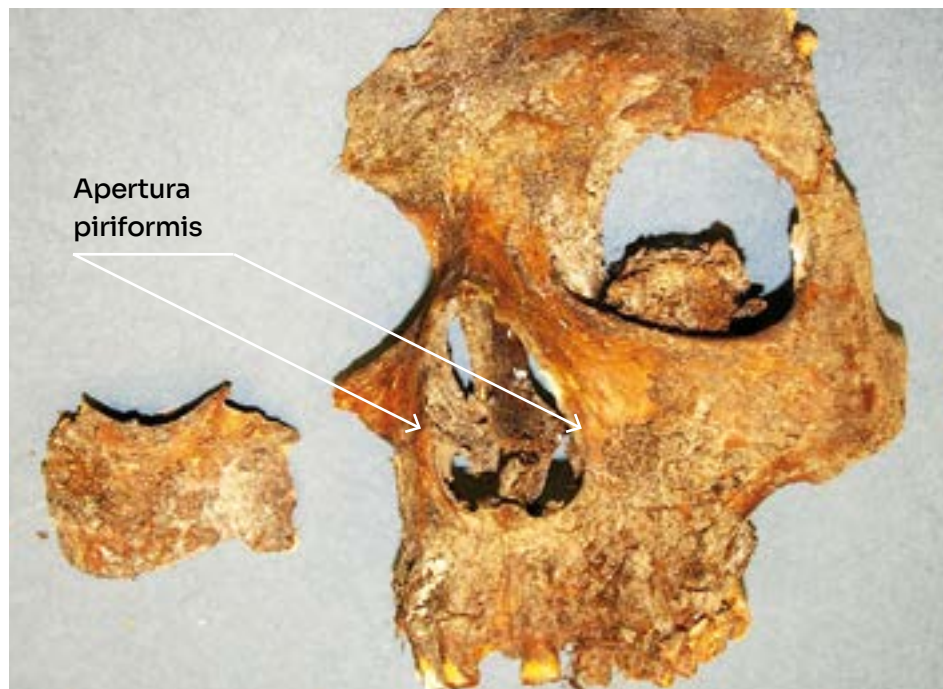
Také v kostech dánského astronoma jsme metodami INAA a ICP-MS stanovili řadu stopových prvků. Zmíníme jen mírně zvýšené koncentrace Fe, Mn, Co a Au oproti normálním hodnotám pro současnou populaci. Zatímco prvky Fe a Mn mohly proniknout do kostí Tycha Braha v prostoru hrobky prosakováním podzemní vody před rekonstrukcí v r. 1901 (takovou kontaminaci nelze odstranit), zvýšené koncentrace Co a Au mohou svědčit o chronické expozici z alchymistické činnosti. V žádném případě však zvýšené koncentrace těchto prvků nemohou být příčinou náhlé smrti Tycha Braha. Metodou INAA jsme také analyzovali drobné kůstky z nosního otvoru (*Apertura piriformis*) v Brahově lebce (Obr. 3). Domnívali jsme se, že

1 J. Kučera a spol. *Archaeometry* 59 (2017) 918–933

2 V. Karpenko, J. Kučera, *Early Sci. Med.*, 27 (2022) 307–332

jejich nazelenalý nádech mohl být způsoben korozními produkty z nosní protézy, kterou Brahe trvale nosil po ztrátě části nosu při souboji v mladých letech (Obr. 4). Nosní protéza nebyla nalezena ani při jednom z otevření Brahovy hrobky, vědělo se o ní jen to, že byla ze žlutého lesklého kovu. V těchto kůstkách jsme zjistili vysoké koncentrace Cu ($7780 \pm 310 \mu\text{g g}^{-1}$) a Zn ($8070 \pm 310 \mu\text{g g}^{-1}$), jejichž poměr ukazuje na mosaz jako nejpravděpodobnější materiál protézy.

Závěrem je vhodné zdůraznit, že v této studii jsme měli k dispozici jen omezené množství vzorků, zejména v případě segmentovaných vzorků vlasů. Hmotnost 5mm segmentů připravených z 25–30 vzorků vlasů činila jen 0,253–0,306 mg. Jejich analýzou metodami INAA, RNAA a PIXE jsme byli schopni stanovit koncentrace 11 stopových prvků. Tím jsme opět



▪ Obr. 3: Pozůstatky obličejové části lebky Tycha Braha. Foto: J. Kučera

prokázali nezastupitelnou úlohu těchto citlivých analytických metod při analýze vzácných miniaturních vzorků, což je častý případ při studiích zaměřených na výzkum kulturního dědictví a rozplétání historických záhad, které často

„Zatímco prvky Fe a Mn mohly proniknout do kostí Tycha Braha v prostoru hrobky, zvýšené koncentrace Co a Au mohou svědčit o chronické expozici z alchymistické činnosti.“

můžeme označit jako historickou forenzní analýzu. Z tohoto hlediska naše studie splnila svůj hlavní úkol – prokázali jsme, že náhlá smrt Tycha Braha nebyla způsobena ani akutní, ani chronickou otravou rtutí. Přikláníme se k názoru, že příčinou jeho smrti byla urémie v důsledku zástavy močení.



■ Obr. 4: Portrét Tycha Braha s viditelnou nosní protézou. Autor portréту: Eduard Ender

13 | Kosmické paprsky pomohly odhalit, kdy přišli první lidé do Evropy



Roman Garba, Jan Kameník, Jan Kučera

Oddělení neutronových a iontových metod ÚJF



▪ Obr. 1: Celkový pohled na kamenolom v Korolevu od místa Gostry Verkh směrem na jih na lokalitu Korolevo II. Foto: R. Garba

Autoři příspěvku spolu s kolegy z dalších institucí z ČR a zahraničí publikovali výsledky svého výzkumu v prestižním vědeckém časopise NATURE a podělili se o detaily jednoho z největších úspěchů české vědy v roce 2024.

| Jak celý projekt vůbec vznikl?

Roman Garba: Celý projekt vznikl již koncem roku 2019, kdy jsme začali hledat vhodná výzkumná témata pro novou Laboratoř urychlovačové hmotnostní spektrometrie (Accelerator Mass Spectrometry – AMS) v Ústavu jaderné fyziky AV ČR (ÚJF) v Řeži budovanou v rámci projektu RAMSES financovaného z MŠMT z příspěvku Evropských strukturálních fondů. V té době jsem dokončoval svůj doktorát z archeologie, který se týkal radiouhlíkového datování a přidal se do týmu projektu RAMSES. Metoda AMS se intenzivně používá pro měření radioizotopu uhlíku-14 v radiouhlíkové datovací metodě. Náš spektrometr však umožňuje měřit i další radionuklidy, jako beryllium-10, hliník-26, jód-129, uran-236 a další. A právě kombi-

„Objev upozorňuje na důležitost spojení znalostí z různých vědních oborů pro poznávání minulosti.“

nace kosmogenních nuklidů beryllia a hliníku mne zaujala, jelikož se používá k datování geologických procesů do stáří až 5 milionů let. Radiouhlíková metoda má limit určení stáří 50 tisíc let a pro starší období je potřeba použít jiné datovací metody, jako např. zmíněné kosmogenní nuklidy beryllium-10

a hliník-26. Začal jsem hledat možné aplikace v oblasti archeologie mě blízké a paleolitická lokalita Korolevo na zakarpatské Ukrajině se zdála být úplně ideální pro aplikaci této u nás zcela nové metody. Nakonec se ukázalo, že ukrajinský archeolog Vitalii Usyk (v současné době v Archeologickém ústavu AV ČR Brno), se kterým pracujeme na výzkumu v Ománu, se věnoval lokalitě Korolevo posledních 40 let včetně katalogizace nálezů v Archeologickém Muzeu v Kyjevě. Slovo dalo slovo a po podepsání smlouvy o spolupráci mezi ÚJF a Archeologickým ústavem Ukrajinské akademie věd jsme vybrali vhodné valouny pro datování z nejhlubší vrstvy výkopu z r. 1985, které byly uloženy ve vrstvě sedimentů spolu s kamennými nástroji.

| Co jsou vůbec ty kosmogenní nuklidy?

Jan Kučera: Naše Země je neustále bombardována vysoce energetickým kosmickým zářením. Značná část nabitých částic je odkloněna

magnetickým polem Země, avšak ta část, která projde atmosférou a dopadne na zemský povrch způsobuje vznik kosmogenních nuklidů tak, že se uvolňují nukleony (protony a neutrony) z jader některých prvků tzv. tříštivými reakcemi a vznikají jádra jiných, lehčích prvků, která mohou být buď radioaktivní, nebo stabilní. Zmíněné kosmogenní nuklidy beryllium-10 a hliník-26 jsou radioaktivní a mají velmi dlouhé poločasy přeměny, konkrétně 1,39 milionu let a 708 tisíc let. Beryllium-10 vzniká tříštivými reakcemi na jádrech dusíku-14 a kyslíku-16 v atmosféře a hydrosféře a na jádrech kyslíku-16 a křemíku-28 na zemském povrchu (v litosféře, tj. v horninách, půdách atd.). Hliník-26 vzniká tříštivými reakcemi na jádrech argonu-40 v atmosféře a na jádrech křemíku-28 v litosféře. Výhoda dlouhých poločasů přeměn spočívá v možnosti datovat vysoké stáří předmětů výzkumu, protože množství vzniklých radioaktivních jader „ubývá“ jen velmi pomalu. Měření jejich radioaktivity je však limitováno tím, že vyzařují tak málo radioaktivního záření, že je velmi obtížné odlišit ho od pozadí způsobeného všudypřítomností jiných, přirozených radioaktivních radionuklidů. Proto je nejvýhodnější stanovit množství kosmogenních radionuklidů ne měřením jejich radioaktivity, ale „počítáním“ v dané době přítomných atomů. A to je právě podstatou metody AMS, která tak poskytuje možnost stanovit množství kosmogenních radionuklidů v množstvích až milionkrát menších než měřením jejich radioaktivity.

| Vzorky tedy máte, co následovalo dál?

Jan Kameník: Z valounů bylo potřeba vybrat zrna křemene, který se pro stanovení stáří touto metodou často používá. Valouny z pískovce, křemence a křemene byly drceny v laboratoři České geologické služby. Z nardrcených vzorků byly od křemene odstraněny pomocí silného magnetu magnetické minerály. Po základní charakterizaci v laboratoři ÚJF jsem pro chemické zpracování odcestoval do laboratoře výzkumného institutu HZDR nedaleko Drážďan v Německu. Za asistence Konstanze Stübner jsem se vzorky strávil více jak dva měsíce intenzivní práce. Zpracování části vzorků probíhalo hladce, některé byly opravdu obtížné. Dokonce jsem se

začal bát, že v některých vzorcích nebudeme moci kosmogenní nuklidy změřit. Nevzdali jsme to. Při měření na zařízení AMS o několik měsíců později, u kterých jsme s Romanem asistovali, byla ve všech vzorcích množství obou kosmogenních nuklidů ^{10}Be a ^{26}Al určena s vysokou spolehlivostí. Postup zpracování a část měření jsme podrobně popsali v samostatném článku, který byl publikován v roce 2023. Osobně jsem se při AMS měření soustředil na zjištění důvodů, proč nás některé vzorky v laboratoři trápily. Po získání všech potřebných údajů ze spolupracující laboratoře jsem vypočítal koncentrace obou nuklidů. K obrovskému překvapení byly výsledky dobré pro všechny vzorky, i ty náročné. Hned ten den jsem zkusil předběžný odhad stáří a hluboce se nadechl. Ukázalo se, že lokalita je ještě starší, než jsme odhadovali. Všechno jsem několikrát kontroloval a teprve druhý den jsem to řekl Romanovi. Je nutno dodat, že proces zpracování a měření vzorků v Drážďanech byl podpořen projektem evropské unie RADIANTE, jehož jméno nese nyní i stejnojmenná síť nejvýznamnějších evropských center urychlených iontů v Evropě, a přes tento projekt jsme žádali o přístup k měřicí infrastruktuře a podporu pro naše stáže v laboratořích



▪ Obr. 2: Kamenné artefakty z vrstvy č. VII staré 1,42 milionu let. Foto a kresby vlevo: V. Usyk, foto vpravo: R. Garba

kosmogenních nuklidů. Tento program jsme využili i pro další tři projekty týkající se kosmogenních nuklidů.

| Tak už tedy hotovo?

Jan Kameník: Zdaleka ne. Provedený odhad byl velmi hrubý. Bylo potřeba provést pečlivé vyhodnocení, aby bylo dosaženo co nejpresnějších výsledků. Tento krok může být někdy časově náročnější než vlastní příprava vzorků. Metoda stanovení stáří uložení valounů ve vrstvě sedimentů (tzv. burial age dating) použitá v našem případě je velice komplexní a vyžaduje mnoho obecných vstupních parametrů a také parametrů závislých na samotné lokalitě. Tato vyhodnocení prováděli John Jansen a Lotta Ylä-Mella z Geofyzikálního ústavu AV ČR a Mads Knudsen z univerzity v dánském Aarhusu, kteří se specializují na datování geologických procesů pomocí kosmogenních nuklidů. V roce 2020 přišli s novou metodou výpočtu stáří nazvanou P-PINI (Particle-Pathway Inversion of Nuclide Inventories), v níž simulují různé míry eroze a původy vzorků. Tento postup bývá u některých případů přesnější než starší a zažitá isochronní metoda s jednodušším výpočtem. V naší studii jsme použili obě metody. V případě metody P-PINI se jednalo o její vůbec první použití v archeologickém kontextu. Na to, jaké výzvy jsme měli v laboratoři, byla získaná data přímo knižní ukázkou pro stanovení stáří pomocí kosmogenních nuklidů.

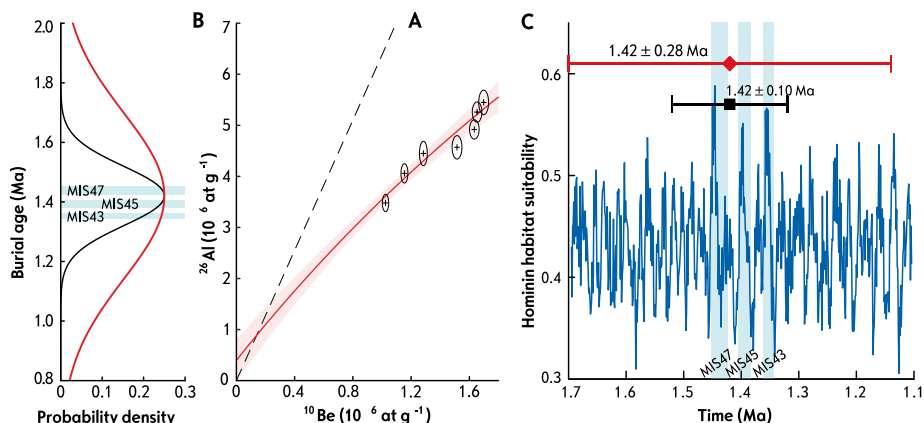
„V případě metody P-PINI se jednalo o její vůbec první použití v archeologickém kontextu.“

Roman Garba: A ani toto není vše. Ještě je velmi důležité zasadit výsledky do celkového kontextu, provést interpretaci, jaké hypotézy potvrzujeme a jaké hypotézy vytváříme. Tady se již pohybujeme v oblasti paleoantropologie a archeologie období starého paleolitu (starší doby kamenné) na úrovni migračních tras prvních předchůdců moderního člověka z Afriky do Evropy. K tomu je potřeba přidat znalosti z pedologie (věda o půdách), sedimentologie, paleomagnetismu a palynologie (výzkum pylů rostlin) daného zkoumaného profilu s archeologickými vrstvami. To vše vstupuje

je do syntézy a celkové interpretace výsledků datování vzorků. Vypočtené stáří by mělo zapadat do stratigrafického profilu a být ideálně ve shodě s ostatními výsledky, např. datování pomocí paleomagnetismu. Jestliže není shoda, pak je nutno patřičně zdůvodnit, proč jsou ostatní výsledky jiné. Všechny tyto záležitosti jsou nesmírně důležité pro recenzenty podaného odborného článku.

! Tím se dostáváme k výsledku. O čem studie pojednává?

Roman Garba: První lidé přišli do Evropy před 1,4 milionem let. Studie prokázala, že nejstarší doposud známé lidské osídlení v Evropě leží nedaleko města Korolevo na západě Ukrajiny. Dosud se za nejdříve obydlené místo považovalo naleziště ve Španělsku. Osídlení v Korolevu v dnešní zakarpatské Ukrajině, nedaleko hranic Ukrajiny s Rumunskem a Maďarskem, je také zajímavé tím, že se jedná patrně o nejsevernější zatím známý výskyt druhu člověka vzpřímeného (*Homo erectus*) na světě. Náš nejstarší předchůdce, člověk vzpřímený, jako první opustil Afriku před přibližně dvěma miliony



▪ Obr. 3: a) Pravděpodobnostní graf datování lokality pomocí metod P-PIN (černá křivka) a isochron (červená křivka). b) isochronní graf pro naměřené hodnoty ^{26}Al - ^{10}Be . c) vhodnost lokality Korolevo pro lidské osídlení (modrá čára) s vybranými interglaciály (bleděmodré pruhy) a výsledky datování pomocí kosmogenních nuklidů (nahore). Grafy: Nature



▪ Obr. 4: Mapa, kudy mohli přijít první lidé do Evropy s radiometricky datovanými lokalitami ve Španělsku, Francii, Turecku, Gruzii a na Blízkém východě včetně lokality Korolevo na zakarpatské Ukrajině. Ilustrace: Archiv ONIM

let a vydal se na Blízký východ, do Asie a Evropy. Radiometrické datování prvního osídlení v lokalitě Korolevo zaplňuje nejenom velkou prostorovou mezeru mezi Gruzii a Španělskem s doposud nejstaršími nálezy, ale také potvrzuje hypotézu, že lidé z první vlny osídlení Evropy pronikli z východu nebo jihovýchodu na západ. Na základě vypočteného stáří, klimatického modelu a pylových dat z terénu jsme zjistili, že první lidé využili teplých meziledových cyklů a kolonizovali Evropu z východu nebo jihovýchodu na západ. Studie mění pohled na migrační trasy „prvních Evropanů“ a doplňuje chybějící kamínek v mozaice poznání historie osídlování Evropy. Objev je spojen též s nedávnou historií České republiky. V letech 1920 až 1938 byla oblast součástí bývalého Československa a místo neslo název Královo nad Tisou. První objevy osídlení z doby kamenné na zakarpatské Ukrajině uskutečnil československý archeolog Jozef Skutíl.

„Přesné datování vzorků z Koroleva umožnily nedávné pokroky v matematickém modelování v kombinaci s aplikovanou jadernou fyzikou.“

Přesné datování vzorků z Koroleva umožnily nedávné pokroky v matematickém modelování v kombinaci s aplikovanou jadernou fyzikou. Objev upozorňuje na důležitost spojení znalostí z různých vědních oborů pro poznávání minulosti. Kromě metod archeologie a aplikované jaderné fyziky ke zjištění přispěly též znalosti geofyzikálních věd. Ty do výzkumu kromě jiných poskytl John D. Jansen z Geofyzikálního ústavu AV ČR. Odbornou znalost naleziště Korolevo do výzkumu vložil ukrajinský archeolog Vitalii

„Metoda stanovení stáří uložení valounů ve vrstvě sedimentů (tzv. burial age dating) použitá v našem případě je velice komplexní a vyžaduje mnoho obecných vstupních parametrů a také parametrů závislých na samotné lokalitě.“

Usyk nyní působící v Archeologickém ústavu AV ČR, Brno. Z dalších českých institucí se na řešení projektu podílely Katedra fyzické geografie a geoekologie Přírodovědecké fakulty UK a Česká geologická služba. Ze zahraničních institucí je nutné uvést Institute of Archaeology, National Academy of Sciences of Ukraine (Kyjev, Ukrajina),

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (Německo), Aarhus University (Dánsko), Department of Archaeology and History, La Trobe University (Melbourne, Austrálie), Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyjev, Ukrajina). Projekt podpořily Evropská komise (Horizon 2020, RADIA-TE, 824096), Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR (MŠMT) (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_019/0000728 a LM2018120), Grantová agentura České republiky (22-13190S) a Grantová agentura Univerzity Karlovy (310222).

Publikace (bibliografický údaj): Garba, R., Usyk, V. I., Ylä-Mella, L., Kameník, J., Stübner, K., Lachner, J., Rugel, G., Veselovský, F., Gerasimenko, N., Herries, A. I. R., Kučera, J., Knudsen, M. F., Jansen, J. D. East-to-west human dispersal into Europe 1.4-million-years-ago. *Nature* 627 (2024), p. 805–810.

≇ | Radiace v bouřkových oblacích: zrod atmosférické fyziky vysokých energií v ČR

 **Ondřej Ploc**

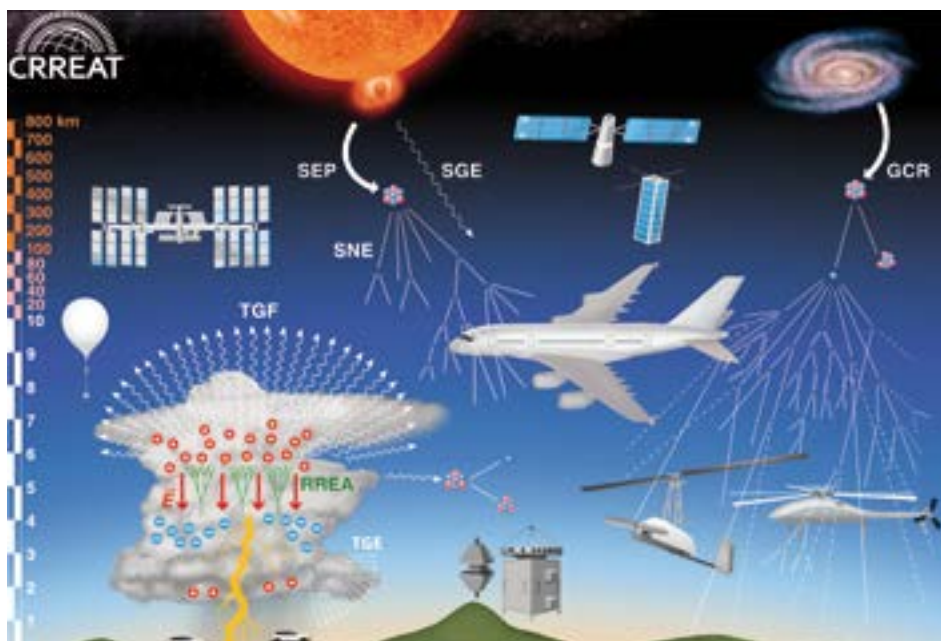
Oddělení dozimetrie záření ÚJF



Ilustrační foto AI

Představte si bouřkový oblak, v němž se kromě blesků odehrávají i neviditelné „záblesky“ ionizujícího záření. Ještě ke konci 20. století zněla myšlenka, že bouřky mohou urychlovat částice na vysoké energie, jako odvážné sci-fi. Dnes už víme, že silné elektrické pole v oblacích dokáže z jednotlivých elektronů vytvořit spršku vysokoenergetických (relativistických) elektronů (RREA) doprovázenou brzdným gama zářením.

Tyto jevy, označované jako terestriální gama záblesky a přízemní gama navýšení při bouřích (v angličtině TGF a TGE), byly poprvé zachyceny družicemi a přístroji na horách teprve nedávno. Vědci proto začali hovořit o zrodu nového oboru atmosférické fyziky vysokých energií. V ČR sehrál klíčovou roli projekt CRREAT (2016–2023), který tuto průkopnickou oblast výzkumu u nás i v Evropě etabloval a přinesl řadu unikátních výsledků. Navázali jsme tak na dobrou tradici měření kosmického záření a atmosférické elektřiny založenou akademikem Františkem Běhounkem, ve které úspěšně pokračoval prof. František Spurný.



▪ Obr. 1: Ilustrace různých přírodních zdrojů záření (GCR – Galactic Cosmic Rays, RREA – Relativistic Runaway Electron Avalanches, SEP – Solar Energetic Particles, SGE – Solar Gamma-ray Events, SNE – Solar Neutron Events, TGE – Thunderstorm Ground Enhancement, TGF – Terrestrial Gamma-ray Flashes) ovlivňující radiační pole v atmosféře a platformy (družice, balony, letadla, drony, měřicí vozy a observatoře), na kterých jsme je v rámci projektu CRREAT měřili. Ilustrace: Radana Přenosilová a Petra Lavříková

CRREAT – když bouře odhalují svá tajemství

CRREAT (Research Centre of Cosmic Rays and Radiation Events in the Atmosphere) vznikl jako společný projekt Ústavu jaderné fyziky AV ČR, Ústavu fyziky atmosféry AV ČR a ČVUT v Praze. Cílem bylo sestavit interdisciplinární tým propojující odborníky na ionizující záření a bouřkovou aktivitu, a vybudovat potřebné přístrojové vybavení. Během projektu vznikla v ČR vůbec poprvé specializovaná skupina zaměřená na radiační jevy v atmosféře – od detekce gama paprsků po měření elektromagnetických signálů blesků. Díky CRREAT jsme vybudovali infrastrukturu, která nemá ve světě obdoby: kombinujeme měření kosmického záření a bouřkových jevů z různých úhlů pohledu současně. Výsledky na sebe nenechaly dlouho čekat – během trvání projektu bylo publikováno přes 70 vědeckých článků a získány dva patenty.

Od Milešovky po ISS: od pozemních bouří k orbitálním misím

Abychom „uložili“ spršky ionizujícího záření z bouřek a splnili další cíle projektu spojených s kosmickým zářením, museli jsme se vydat na různá místa – od vrcholů hor přes bouřková mračna až do kosmu. Vysokohorské observatoře byly ideální pro detekci bouřkového gama záření. Na Milešovce (837 m n. m.) jsme během bouřky v dubnu 2018 pomocí scintilačního detektoru SEVAN poprvé zaznamenali dvě dlouhotrvající epizody zvýšeného toku gama záření. Tyto jevy (TGE) trvaly až 70 minut a dosáhly intenzity o desítky procent vyšší, než je běžné pozadí. Pozorování v takto nízké nadmořské výšce potvrdilo, že i bouře ve střední Evropě mohou generovat vysokoenergetické záření. Podobnou bouřkovou radiaci jsme následně detekovali na Milešovce i během unikátní zimní bouřky a díky spolupráci s partnery i na Lomnickém štítu v Tatrách a na dalších observatořích Zugspitze, Musala a Jungfrauoch. Zrodila se tak mezinárodní síť GASTRON (Gamma Spectrometry of Thunderstorm Radiation Observatory Network), která nyní monitoruje radiační jevy v bouřích napříč Evropou.

Měřicí automobily se staly naší mobilní laboratoří pro výzkum bouřkových jevů. Vybavili jsme je všesměrovými vysokorychlostními kamerami, širo-

kopásmovými anténami pro záznam radiových signálů blesků, mlýnkem pro měření elektrického pole a detektory záření. Tato jedinečná kombinace přístrojů nám umožnila detailně zkoumat průběh blesků a hledat možné gama záblesky přímo v terénu. Největším objevem, který jsme díky těmto měřením učinili, je, že blesky trvají mnohem déle, než se dosud předpokládalo. Na základě našich dat jsme zjistili, že medián trvání blesků ve střední Evropě je přes půl vteřiny, což je výrazně delší doba, než se dosud myslelo. Ačkoli ionizující záření z bouří jsme přímo na zemi nezaznamenali, cenná data o elektrických výbojích v atmosféře nám poskytla nový pohled na procesy v oblacích. Zatímco měření vertikálního elektrického pole je třeba posunout blíže oblačnosti, radiové antény a rychlé kamery mohou významně přispět k pochopení mechanismu vzniku blesků.

„Projekt CREAT řešený v ÚJF pomohl nastartovat a etablovat obor, který propojuje zdánlivě vzdálené světy – jadernou fyziku, kosmické záření a meteorologii.“

Nasadili jsme i speciálně vyvinuté drony – vírníky, bezpilotní letouny vybavené detektorem záření a „mlýnkem“ na měření intenzity elektrického pole. S drony jsme měřili elektrické pole v oblačné výši v běžných podmínkách, průměra letu v bouřce na nás teprve

čeká. Tyto experimenty byly technicky náročné, ale otevřely cestu k novým metodám studia bouřkových jevů. Kromě toho jsme naše detektory posílali i výš: pomocí stratosférického balónu a také na palubě letadel. V rámci mezinárodního, námi organizovaného experimentu REFLECT jsme uskutečnili výzkumný let, během něhož různé detektory z Evropy současně měřily kosmické záření na palubě letadla ve výšce okolo 10 km. Šlo o unikátní test přesnosti dozimetrů pro leteckou dopravu, který pomůže lépe odhadovat ozáření posádek a pasažérů. Kromě toho dlouhodobě měříme na palubách komerčních letadel s Airdosem – dozimetrem vyvinutým v rámci CREATu pro tyto účely.

Nakonec jsme se vypravili až na oběžnou dráhu. Vyvinuli jsme vlastní dozimetr SPACEDOS, založený na křemíkových PIN diodách. Tento přístroj

jsme navrhli jako otevřenou platformu s nízkou spotřebou, aby mohl zkoumat kosmické záření v kabinách letadel, na stratosférických balónech i v malých družicích. V roce 2022 se SPACEDOS poprvé zapojil do měření na Mezinárodní kosmické stanici (ISS) – výsledky potvrdily shodu s tradičními detektory a ukázaly potenciál naší konstrukce. V květnu 2023 jsme navázali na tyto úspěchy v rámci mise AX-2: náš detektor SPACEDOS byl vynesena na ISS při privátní misi společnosti Axiom Space. Na ISS jsme tak ve spolupráci s americkou firmou Cosmic Shielding Corporation současně otestovali nový stínící materiál proti kosmickému záření.

Úspěchy, nezdary a nové výzvy

Během cesty za poznáním jsme zažili triumfy i zklamání. Přístroje vyvinuté v CRREATu měly letět na několika družicích – například francouzská mise TARANIS pro výzkum gama záblesků v bouřích bohužel kvůli havárii nosné rakety nikdy nezačala. Plánovaná účast našich detektorů na ruských projektech BION-M2 (biologická družice) a MTR-III (antropomorfní fantom na ISS) se zase zhatila v roce 2022 kvůli přerušení kontaktů s Ruskem v důsledku jeho agresivního útoku na Ukrajinu. Ani ambiciózní česká studie měsíční družice LVICE² financovaná Evropskou kosmickou agenturou nakonec nepokračovala do realizační fáze.

Naopak jiné projekty iniciované CRREATem úspěšně běží dál. Síť GAS-TRON jsme rozšířili na mezinárodní úroveň a dlouhodobě sledujeme bouřkovou radiaci na evropských observatořích. Projekt BIOSPHERE, financovaný v rámci evropského partnerství pro metrologii pod záštitou EURAMET, využívá infrastrukturu projektu CRREAT k měření kosmického záření, zejména SEVAN a Sommerův neutronový detektor, které umožňují kontinuální monitorování radiačního pole. V projektu MOSAIC jsme vyvinuli vícevrstvý mozaikový pixelový detektor pro měření mionů kosmického záření a RREA, který již dlouhodobě měří na vrcholu Milešovky. Projekt BICZEPS se zaměřil na pokročilou dozimetrickou techniku pro biologické experimenty v blízkosti Země. V projektu RAMAT zase zkoumáme nové organické materiály odolné vůči záření pro využití v medicíně i kosmonautice.

Z bouřkových oblaků tak doslova prší nové poznatky. Projekt CRREAT pomohl nastartovat a etablovat obor, který propojuje zdánlivě vzdálené světy – jadernou fyziku, kosmické záření a meteorologii. Naše práce pokračuje i po roce 2023 obdobím udržitelnosti CRREATu díky navazujícím projektům a rostoucí mezinárodní spolupráci. Věříme, že porozumění vysokoenergetickým jevům v atmosféře přinese nejen hlubší poznání našeho nejbližšího vesmíru, ale také praktické využití – od lepší ochrany leteckého personálu před zářením až po vývoj technologií pro bezpečné lety do vesmíru. Více o projektu naleznete na webu www.crreat.eu.

19 | Po stopách stop detektorů stop



Iva Ambrožová, Kateřina Pachnerová Brabcová,
Marie Davidková

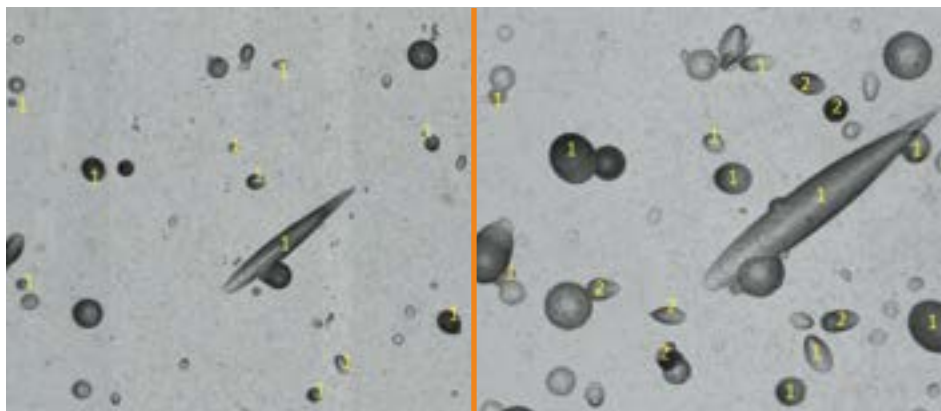
Oddělení dozimetrie záření ÚJF



Detektory stop jsou významným nástrojem v dozimetrii, radioterapii a radiobiologii, umožňující sledování jednotlivých stop nabitých částic. Při průchodu látkou způsobují těžké nabitě částice intenzivní ionizaci, přičemž v materiálu detektorů vznikají mikroskopické defekty označované jako latentní stopy. Pokud je pak materiál vystaven leptacímu činidlu, dochází k zesílené chemické reakci v místě těchto poškození a vytvoření stop pozorovatelných optickým mikroskopem.

Většina aplikací detektorů stop je zaměřena na prostém počítání celkového množství stop. Na Oddělení dozimetrie záření Ústavu jaderné fyziky AV ČR (ODZ) ale využíváme, jako jedno z několika málo pracovišť ve světě, unikátní přístup – analýzu jednotlivých stop, což umožňuje stanovení spekter lineárního přenosu energie (LET z anglického linear energy transfer) a kvality záření.

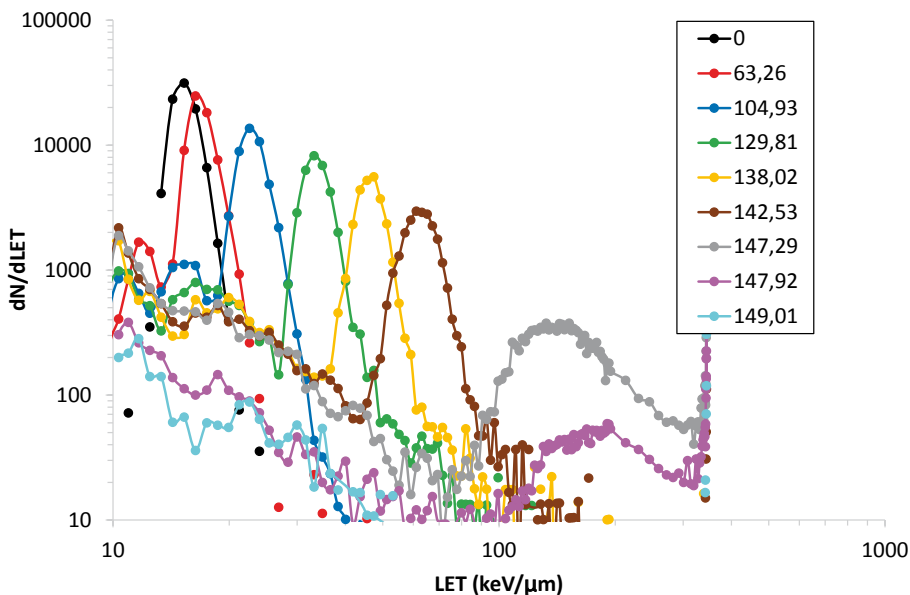
Naše pracoviště má v používání detektorů stop více než padesátiletou tradici. Významný rozvoj této metodiky u nás nastal zejména počátkem milénia, kdy byly systematicky zkoumány vlastnosti různých materiálů používaných jako detektory stop. K jejich kalibraci a charakterizaci jsme využívali především urychlovač těžkých iontů HIMAC v japonské Chibě a díky tomuto zařízení jsme získali kalibrační křivky potřebné pro přesné stanovení LET spekter v různých radiačních polích.



▪ Obr. 1: Povrch detektoru ozářeného na palubě Mezinárodní vesmírné stanice v roce 2009, mikrodefekty jsou zviditelněné leptáním 18 hodin (vlevo) a 36 hodin (vpravo). Stopy označené jako (1) odpovídají částicím s dlouhým dosahem, v tomto případě primárním iontům a jejich fragmentům, stopy (2) odpovídají částicím vzniklým uvnitř detektoru, zbývající stopy částicím s krátkým dosahem (jedná se převážně o sekundární částice vzniklé interakcemi primárního záření s okolním materiálem či samotným materiálem detektoru). Foto: Archiv ODZ

Pro vyhodnocování detektorů naše pracoviště disponuje unikátním mikroskopickým systémem HSP-1000, který umožňuje rychle a efektivně skenovat velké plochy povrchů detektorů s vyleptanými stopami částic, a to až 25 cm^2 . Postupným sledováním povrchu jednoho detektoru leptaného různou dobu je možné stopovat dráhy jednotlivých částic a tak odlišit primární a sekundární částice (Obr. 1).

V průběhu let byly detektory stop využívány v široké škále projektů. Mezi nejvýznamnější aplikace patří stanovení dozimetrických parametrů na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS) a návratových satelitech, studie fragmentace vybraných těžkých iontů od vodíku po železo v různých materiálech a charakterizace radiačních polí v radioterapeutických svazcích (Obr. 2). Jeden z nejzajímavějších projektů bylo také hodnocení vlivu kovových implantátů na dávkové rozložení nebo měření dávek mimo cílový objem při pokročilých technikách radioterapie, s důrazem na pediatrické pacienty.



■ Obr. 2: Spektra LET ve svazku uhlíku s nominální energií 290 MeV/u za rostoucí tloušťkou vybraných binárních filtrů v mm (legenda). Zdroj: Archiv ODZ

Dávky mimo cílový objem a orgánové dávky pediatrických pacientů ozařovaných pokročilými technikami iontové terapie, zejména aktivními skenovacími technikami protonové radioterapie, jsou studovány v mezinárodní spolupráci platformy EURADOS (European Radiation Dosimetry Group) v rámci pracovní skupiny WG9 Radiation dosimetry in radiotherapy (Obr. 3).

Protonová terapie je moderní metoda radioterapie využívající protonové svazky s energií typicky 250 MeV. Její výhodou je příznivé dávkové rozložení s maximální energií předanou v přesně určené hloubce. Tato vlastnost umožňuje dosáhnout lepší přesnosti ozařování nádorů a současně snížit



▪ Obr. 3: Pediatrický fantom (10 let) s detektory stop. Tyto detektory je možné umístit uvnitř antropomorfního dětského fantomu do pozic představujících různé orgány. Foto: Archiv ODZ

riziko poškození kritických orgánů a zdravé tkáně v okolí. Dávky mimo cílový objem způsobené rozptýleným zářením absorbovaným normálními tkáněmi zvyšují pravděpodobnost pozdních účinků terapie včetně vzniku

„Na Oddělení dozimetrie záření využíváme, jako jedno z několika málo pracovišť ve světě, unikátní přístup – analýzu jednotlivých stop, což umožňuje stanovení spekter lineárního přenosu energie (LET z anglického linear energy transfer) a kvality záření.“

sekundárních rakovin. U dětí jsou tyto účinky obzvláště nežádoucí s ohledem na dlouhou dobu života po terapii.

Podílíme se také na evropském projektu Pianoforte SONORA (Towards Safe, Optimized and personalized radiOlogy and RA-diotherapy procedures for pregnant patients), který se zaměřuje na zlepšení přesnosti odhadů dávek na plod v diagnostické a in-

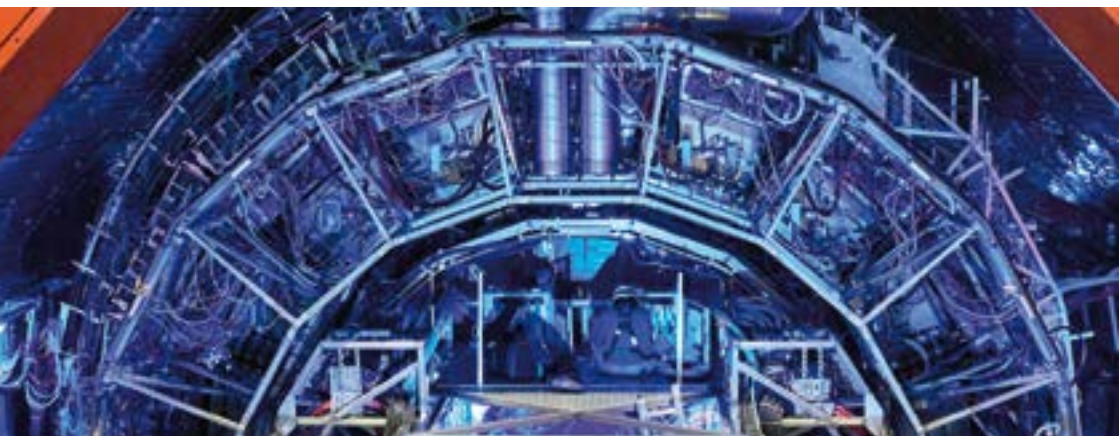
tervenční radiologii a radioterapii, přičemž klade důraz na harmonizaci metod a vývoj nových nástrojů pro personalizaci a optimalizaci léčebných procedur těhotných pacientek.

19 | Výzkum srážek ultrarelativistických těžkých iontů



Filip Křížek, Michal Šumbera, Jana Bielčíková

Oddělení fyziky těžkých iontů ÚJF



Mezi základní směry výzkumu, kterým se věnuje současná jaderná a částicová fyzika, patří studium vlastností hmoty při extrémních teplotách a hustotách. Cílem je v experimentu napodobit podmínky, které v raném vesmíru panovaly první mikrosekundy po velkém třesku, kdy se hmota nacházela ve stavu kvarkového-gluonového plazmatu (QGP) – fázi hmoty, jejímiž základními stavebními kameny jsou místo protonů a neutronů jejich konstituenty, kvarky a gluony.

| Skupina ultrarelativistických těžkých iontů ÚJF

Studiu srážek jader urychlených na ultrarelativistické energie se v ÚJF věnujeme od první poloviny 90. let 20. století. Tehdy M. Šumbera inicioval vznik skupiny a zapojil ji do experimentu WA98 na urychlovači SPS v CERN. Ve srážkách jader olova s energií 158 GeV na nukleon s pevným terčem byla v tomto experimentu poprvé pozorována produkce přímých fotonů – tepelného záření hmoty v zóně srážky. Poté, co WA98 experiment ukončil nabírání dat v r. 1995, přešla skupina na další experiment na urychlovači SPS – CERES/NA45. Roku 1993 se ÚJF spolu s dalšími pracovišti rovněž zapojil do přípravy experimentu ALICE zaměřeného na studium srážek těžkých iontů na připravovaném urychlovači LHC v CERN. Společným jmenovatelem všech tří aktivit byly v té době křemíkové driftové detektory (SDD), na jejichž provozu a přípravě jsme se podíleli.

„Studiu srážek jader urychlených na ultrarelativistické energie se v ÚJF věnujeme od první poloviny 90. let 20. století.“

Když v r. 2000 experiment CERES/NA45 ukončil nabírání dat, rozhodl se M. Šumbera zapojit skupinu do experimentu STAR na nově spuštěném urychlovači RHIC v BNL v USA. Ten je stejně jako urychlovač LHC založen na použití vstříčných hadronových svazků. Důvodem pro tento krok byla jed-

nak podobnost mezi experimenty ALICE a STAR založená na stejných dráhových detektorech a také snaha překlenout období do spuštění LHC výzkumem při těžišťových energiích o řád větších, než bylo možné dosáhnout na SPS. Již první srážky jader zlata při těžišťové energii 130 GeV na nukleon–nukleonový pár v roce 2000, navýšené v pozdějších letech na energii 200 GeV, přinesly zásadní objevy prokazující existenci QGP. Vznik nové formy hmoty byl nejprve prokázán pozorováním silné anizotropie v azimutálním rozdělení vylétávajících částic, jež byla interpretována jako otisk odezvy nové fáze hmoty na gradienty tlaku v počáteční fázi srážky. Z hydrodynamických modelů bylo dovozeno, že produkované barevné plazma má nejmenší známý poměr viskozity k hustotě entropie ze zná-

mých kapalin. Neméně zásadním bylo i další pozorování ukazující, že vznik QGP vede k potlačení produkce částic s velkou příčnou hybností. Z toho bylo dovozeno, že kvarky a gluony vznikající při tvrdém rozptylu v počátečních fázích srážky ztrácejí při průchodu plazmatem energii. Tento jev byl pojmenován jako zhášení jetů.

V experimentu STAR jsme se zpočátku zabývali femtoskopií hadronů. Důležitým mezníkem pro další rozvoj skupiny bylo založení Centra fyziky relativistických jaderných srážek v roce 2007, které zastřešovalo aktivity skupin z FJFI ČVUT a ÚJF. Existence centra a získání navazujícího projektu OPVK v letech 2012–2015 umožnily zaměstnat v ÚJF řadu velmi kvalitních vědců. A tak se vedle femtoskopie začala skupina věnovat i jiným tématům: fenomenologii popisu rozptylu hadronů v přiblížení barevného dipólu či testům radiační odolnosti prototypů křemíkových detektorů pro připravovaný nový vnitřní dráhový detektor experimentu ALICE, k čemuž byl využit cyklotron U-120M našeho ústavu. Financování z výše uvedených projektů také umožnilo návrat J. Bielčikové a J. Bielčíka ze zahraničních postdoktorandských stáží, čímž byl položen základ zcela nového plnohodnotného programu studia jetů a produkce těžkých kvarků v experimentu STAR. Ten později určil i směr fyzikálního směřování skupiny v experimentu ALICE. Podobně jako jety, i těžké kvarky vznikají v rané fázi srážky těžkých iontů a interagují s QGP, což vede ke změnám jejich výsledného spektra příčné hybnosti ve srovnání s jejich produkcí v systému srážek dvou protonů, kde se vznik QGP neočekává – další téma, kterému se skupina věnuje.

Produkce částice Λ_c^+ ve srážkách těžkých iontů

Výsledky tohoto programu můžeme ilustrovat publikací J. Adam et al. (STAR Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* 124 (2020) 172301, na které se členové našeho týmu podíleli. Předmětem článku bylo vůbec první měření produkce částice Λ_c^+ ve srážkách těžkých iontů. Studium produkce různých typů hadronů, částic tvořených kvarky, umožňuje získat informace o jedné z fundamentálních otázek částicové fyziky: Jakým způsobem z energetických barevných kvarků vznikají pozorovatelné „bezbarvé“ hadrony? Proces

hadronizace probíhá na škále dané typickým rozměrem hadronu (1 femto-metr), nedá se proto přímo spočítat v rámci poruchové teorie silné interakce a je nutné ho modelovat. Hadrony se dále dělí na baryony, částice složené ze tří dynamicky vázaných kvarků, a mesony, částice tvořené párem kvarku a anti-kvarku.

Díky velké hustotě volných kvarků a gluonů může být v QGP hadronizace odlišná od té, kterou pozorujeme ve srážkách protonů. Experiment STAR na urychlovači RHIC již před více než 20 lety změřil, že v centrálních srážkách jader zlata dochází v oblasti středně velkých příčných hybností 2 až 6 GeV/c k výraznému navýšení počtu produkováných baryonů vůči mesonům pro hadrony tvořené z lehkých kvarků u, d nebo s. Tato tzv. baryonová anomálie byla následně také pozorována při vyšších energiích na urychlovači LHC v CERN a dá se vysvětlit v rámci modelu založeného na koales-



▪ Obr. 1: Experiment ALICE v CERN. Foto: CERN

cenci kvarků v QGP. Pro kvarky nacházející se „blízko sebe“ je totiž pravděpodobnější vytvořit baryon než meson s danou hodnotou příčné hybnosti. Díky velmi přesnému dráhovému detektoru HFT v experimentu STAR jsme provedli první a dlouho očekávané měření produkce baryonu Λ_c^+ složeného ze dvou lehkých kvarků u, d a jednoho půvabného kvarku c ve srážkách jader zlata při energii 200 GeV. Data ukazují, že i pro půvabný kvark dochází ke zvýšené produkci tohoto baryonu vůči mesonu D^0 , jenž obsahuje také c kvark. Získané výsledky, které jsou ve shodě s daty pro lehké kvarky i s předpověďmi modelů založených na koalescenci kvarků v QGP, tak výrazně přispěly k pochopení hadronizace půvabných kvarků a jejich transportu v QGP.

„Členové Skupiny ultrarelativistických těžkých iontů byli školiteli 17 obhájených disertačních, 28 diplomových a 11 bakalářských prací. Dva ze studentů získali za své disertační práce významná mezinárodní ocenění.“

Skupina v kontextu ÚJF a české a mezinárodní fyziky

Členové týmu zastávali v rámci kolaborací důležité role (např. předseda kolaborační rady experimentu STAR) či koordinovali pracovní skupiny v experimentech STAR nebo ALICE. Dále jsme se podíleli na organizaci významných mezinárodních konferencí ICHEP, WPCF, ISMD, Hot Quarks, ACAT, zasedali v důležitých výborech, např. CERN: RECFA, a působili v redakční radě mezinárodního časopisu Universe. Členové skupiny byli školiteli 17 obhájených disertačních, 28 diplomových a 11 bakalářských prací. Dva z našich studentů získali za své disertační práce významná mezinárodní ocenění.

Od roku 2005 skupina úzce spolupracuje s FJFI ČVUT. Vědecká spolupráce je zaměřena na experimenty ALICE, ePIC a STAR. Pedagogická činnost zahrnuje čtyři pravidelné přednášky, členství v oborových radách a vědecké radě FJFI.

M. Šumbera stál v čele Skupiny ultrarelativistických těžkých iontů do roku 2012, kdy vedení převzala J. Bielčíková. Od ní ho pak v roce 2017 přebíral F. Křížek. V září roku 2024 bylo rozdělením původního Oddělení jaderné spektroskopie zřízeno Oddělení fyziky těžkých iontů (OFTI). Nový název oddělení tak lépe reprezentuje hlavní směry výzkumu, které se na tomto

pracovišti pěstují. S účinností od 1. října 2024 byl vedoucím OFTI jmenován F. Křížek. Vedením skupiny byla pak pověřena J. Bielčíková.

„Tato tzv. baryonová anomálie byla následně také pozorována při vyšších energiích na urychlovači LHC v CERN a dá se vysvětlit v rámci modelu založeného na koalescenci kvarků v QGP.“

Experimenty ve fyzice vysokých energií se neobejdou bez značné výpočetní a úložné kapacity. Tyto zdroje jsou v případě experimentů v CERN propojeny do celosvětové sítě World Large Computing Grid. Její součástí v rámci experimentu ALICE je od roku 2002 Tier-2

centrum FZÚ AV ČR. Kromě monitorování tam zpracovávaných výpočetních úloh se skupina věnuje i provozu datového úložiště s kapacitou 5,3 PB v budově Fyziky 1 v Řeži (OFTI).

Budoucnost skupiny

Po velmi úspěšných 25 letech provozu urychlovače RHIC nabere experiment STAR poslední data v roce 2025. I když jejich zpracování potrvá ještě nejméně další dekádu, iniciovali jsme vznik nové spolupráce v rámci mezinárodního experimentu ePIC na připravovaném urychlovači Electron Ion Collider (EIC) v laboratoři BNL. Zde bychom se mj. chtěli podílet na vývoji detektoru pro měření luminozity. Podobně se v současné době jedná o budoucnosti programu fyziky těžkých iontů na urychlovači LHC. Skupina vyjádřila zájem podílet se na budování nového experimentu ALICE 3 na LHC v CERN, který by nahradil stávající detektor ALICE po roce 2033.

Skupina relativistických srážek těžkých iontů



Andrej Kugler

Oddělení fyziky těžkých iontů ÚJF



V 90. letech byla v ÚJF založena A. Kuglerem experimentální skupina RHIC s cílem zapojit se do experimentálního studia relativistických srážek těžkých iontů (Relativistic Heavy Ion Collisions – RHIC), ve kterých se v kolizní zóně na krátký čas napodobí podmínky uvnitř velmi hmotných a hustých objektů, jakými jsou například neutronové hvězdy.

TAPS – Two Arm Photon Spectrometer

Skupina se již od svého vzniku účastnila měření mezinárodního experimentu na unikátním evropském putovním detektoru fotonů TAPS. Ten sestával z až 384 BaF₂ scintilačních modulů uspořádaných v šesti blocích po 64 modulech. TAPS byl postupně instalován na urychlovačích těžkých iontů v laboratořích GSI Darmstadt, GANIL Caen a KVI Groningen, vždy doplněn

„V roce 1995 se skupina RHIC zapojila do výstavby spektrometru HADES. Tým vědců ze 17 ústavů z 9 evropských zemí byl vybudován dedikovaný spektrometr pro studium párů elektronu a pozitronu.“

o další specifické lokální detektory. Měření byla zaměřena na studium produkce neutrálních mezonů π^0 a η ve srážkách relativistických jader. Na tehdy novém urychlovači SIS18 v GSI byl TAPS doplněn stěnou ze scintilačních plastových detektorů FW umožňující určení roviny srážky. Uspořádaný pohyb hadronů do určitých směrů – označovaný jako „flow“ – je projevem kolektivního chování

hmoty v prostoru rychlostí. Takový efekt se nevyskytuje v nukleon-nukleonových srážkách.

TAPS kolaborace prokázala, že magnituda „flow“ je proporcionální hmotností emitovaného baryonu, a tudíž „flow“ při relativistických energiích jadro-jaderných srážek souvisí s rychlostí expanze „fireballu“ – horké oblasti hmoty vytvořené v kolizní zóně – srovnatelné s rychlostmi srážejících se jader. Podstatnou roli také hraje zastínění fireballu zbytky jader – tzv. pozorovateli – vedoucí k potlačení emise silně interagujících částic, například pionů v srážkové rovině. Dochází k tzv. „squeeze-out“ jevu.

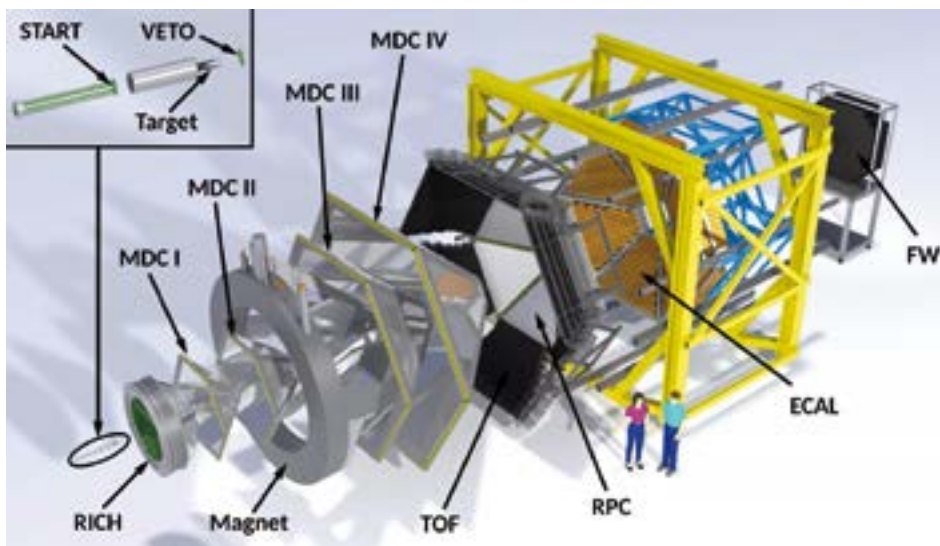
HADES (High Acceptance Di-Electron Spectrometer)

V roce 1995 se skupina RHIC zapojila do výstavby spektrometru HADES. Tým vědců ze 17 ústavů z 9 evropských zemí byl vybudován dedikovaný spektrometr pro studium párů elektronu a pozitronu, které neinteragují s výše zmíněnými pozorovateli, a tedy dokážou nést nezkreslenou informaci z nitra kolizní zóny srážky. Klíčovým subdetektorem je RICH – prahový

detektor pro detekci elektronů a pozitronů na pozadí o několik řádů vyšší produkce nabitých hadronů.

První experiment s novým spektrometrem proběhl v roce 2001. Členové skupiny patří dlouhodobě mezi klíčové články kolaborace HADES. P. Tlustý zastává pozici zástupce mluvčího kolaborace, další jsou koordinátory TOF a ECAL částí projektu.

Skupina je zapojena do konstrukce a provozu tří částí spektrometru HADES. První částí je velká, přibližně 5 metrů vysoká stěna ze 384 scintilačních detektorů ve tvaru až 2,5 metru dlouhých tyčí z plastu. TOF (Time-of-Flight) detektor určuje s vysokým rozlišením okolo 100 ps dobu letu nabitě částice a přispívá k její identifikaci a určení její energie. Druhou částí je FW (Forward Wall), menší stěna z velkého počtu (380) malých čtvercových scintilačních detektorů zachycujících nabitě částice letící jen s relativně malou odchylkou od původního směru svazku nalétávajících částic. FW slouží k určení roviny srážky a centrality studovaných reakcí jádro-jádro. A konečně třetí



▪ Obr. 1: Schéma spektrometru HADES. Ilustrace: GSI/FAIR

částí je český in-kind příspěvek do FAIRu (viz dále) elektromagnetický kalorimetr ECAL. Jedná se o velkou stěnu z 978 modulů z olovnatého skla detekujících fotony. Tento umožňuje identifikaci a určení energie neutrálních částic, například pí a éta mezonů, které se rozpadají za letu na dva fotony. Ty jsou následně registrovány v ECAL a z jejich energie a směru letu se vypočte hmotnost a energie primární částice.

Primárním účelem experimentu HADES je studium stlačené baryonové hmoty pomocí slabě interagující sondy, jako jsou elektron-pozitronové páry. Ty nejsou ovlivněny později produkovánými hadrony, a tedy mohou poskytnout informaci o nejhustší fázi vytvořené v průběhu kolize jader a umožnit tak například studium případných změn vlastností hadronů vy-

„Členové skupiny [z ÚJF] patří dlouhodobě mezi klíčové články kolaborace HADES. P. Tlustý zastává pozici zástupce mluvčího kolaborace, další členové jsou koordinátory TOF a ECAL částí projektu.“

volaných hustotou media. Elektron-pozitronové páry jsou produkovány po celou dobu srážky – v počátečních nukleon-nukleonových srážkách, z kompresní zóny (fireballu) i na konci expanze fireballu z rozpadu neutrálních mezonů. Proto byla na spektrometru HADES provedena celá řada experimentů pro různé energie a pro různé ionty dostupné

na urychlovači SIS18 – od srážek jednoduchých systémů ($p+p$, $p+d$), umožňujících určit produkci elektron-pozitronových párů z nukleon-nukleonových srážek probíhajících na začátku jadro-jaderné srážky, přes středně těžké systémy ($C+C$, $Ar+KCl$) až po těžké systémy ($Ag+Ag$, $Au+Au$), tedy pro různé velikosti fireballu a různé stupně komprese v kolizní zóně.

Jedny z hlavních výsledků HADESu byly publikované v článku *Testování husté baryonové hmoty pomocí virtuálních fotonů* v prestižním časopise Nature Physics 15 (2019) 1040. Studium produkce virtuálních fotonů (elektron-pozitronových párů) ve srážkách jader zlata urychlených na energii 1,23 GeV na jeden nukleon s jádry zlata v terči ukazuje na existenci kompresní zóny s průměrnou teplotou cca 70 MeV a cca třikrát větší hustotou,

než jsou obvyklé hustoty v atomovém jádře. Produkce virtuálních fotonů je závislá na velikosti a době života kompresní zóny, jak potvrdily i další experimenty studující srážky jader stříbra. Pro správné odečtení vkladu produkce virtuálních fotonů z nukleon-nukleonových srážek byly zásadní výsledky předchozího studia reakcí $p+p$ a $p+d$. Ve zmíněných experimentech jsme studovali i podprahovou produkci hyperonů Λ , Σ^0 , K mezonů a jejich flow, a taktéž produkci neutrálních mezonů π a jejich flow. V těchto studiích bylo zásadní využití TOF, FW a ECAL detektorů, za jejichž funkci odpovídá naše skupina. Výsledky potvrdily interpretaci flow mezonů jako důsledku jejich interakce s „pozorovateli“, čili výsledky experimentů s využitím TAPSu. Další detailní studium flow baryonů umožnilo upřesnit modelové představy popisující stlačenou baryonovou hmotu s důsledky pro popis neutronových hvězd a jejich fúze. Pro budoucí experimenty zaměřené na hledání kritického bodu ve fázovém diagramu jaderné hmoty jsou důležité studie fluktuací v počtu protonů v jednotlivých srážkách iontů zlata, které potvrzují tendence tzv. kumulačních koeficientů pozorované v oblasti podstatně menších baryonových hustot v experimentech STAR a ALICE na RHIC a LHC.

FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research GmbH)

Pro větší hustoty baryonů a nižší teploty se očekává, že fázový diagram jaderné hmoty bude vykazovat bohatou strukturu, zahrnující kritický bod – fázový přechod prvního řádu mezi hadronovou a partonovou hmotou, nebo nové fáze hmoty, jakou je např. předpokládaná pevná fáze kvarkové hmoty označovaná termínem quarkyonic matter. Objev těchto struktur by byl průlomem v našem porozumění silné interakci a souvisí například s ověřením jaderně-fyzikálního modelu fúze neutronových hvězd, generujícího tzv. gravitační vlny nebo s popisy výbuchů supernov.

Při národní laboratoři v GSI vzniká mezinárodní velká výzkumná infrastruktura FAIR. ÚJF AV ČR zastupuje z pověření MŠMT Českou republiku ve FAIR z pozice aspirantského člena. A. Kugler je členem rady FAIR a koordinátorem navázané české VVI FAIR-CZ, která zajišťuje přístup jednotlivých českých pracovišť k výzkumným zařízením FAIRu.

CBM (Compressed Baryonic Matter)

Jedním ze čtyř pilířů výzkumu ve FAIR bude experiment CBM (Compressed Baryonic Matter). Experiment CBM je navržen pro měření při extrémně vysokých četnostech srážek. Velká intenzita svazku je klíčová pro vysoce přesná měření multi-diferenciálních pozorovatelných a některých exotických částic, jako jsou například podivné hyperony a částice obsahující půvabné kvarky, které jsou citlivé k husté fázi jaderné „ohnivé koule“.

„Členy skupiny relativistických těžkých iontů byla v uplynulých dvou desetiletích i celá řada studentů, z nichž někteří nyní působí na významných zahraničních vědeckých pracovištích a jiní získali excelentní místa v komerční sféře.“

Skupina RHIC je zapojena do návrhu, konstrukce a testování prototypů scintilační stěny FSD (Forward Spectator Detector) experimentu CBM. FSD bude měřit základní charakteristiky jádro-jaderných srážek, jako např. centralitu, rovinu srážky či přímý tok částic. Vzhledem k tomu, že je FSD umístěn velmi blízko intenzivního svazku, očekává se jeho značné radiační zatížení. Z tohoto důvodu skupina RHIC s využitím neutronového zdroje na cyklotronu ÚJF provádí příslušné testy radiační odolnosti jednotlivých komponent a ověření jejich

funkčnosti až do dávek 3×10^{12} n/cm². S kolegy z ČVUT spolupracujeme i na dalších aspektech FSD, jako např. na simulaci detekce přímého kolektivního toku částic, testech prototypů a na stavbě podpůrné konstrukce pro detektor.

Skupina RHIC dále přispívá k vybavení infrastruktury FAIR, která se váže k experimentu CBM. Navrhli jsme a dodali speciální plošinu pro experimenty HADES a CBM, která zabírá plochu 14×15 m a váží 40 tun. Plošina poskytne potřebnou nosnost v řádu stovek tun pro detektory a zařízení, které na ní budou instalovány. Dále jsme pro experiment CBM navrhli a dodali uhlíkový iontovod pro vedení svazku od centrální části CBM detektoru k detektoru FSD. V budoucnu plánujeme dodat i vakuové komponenty pro

iontovod HEBT (High Energy Beam Transport), který bude přivádět svazek z budoucího urychlovače SIS100 do haly experimentu CBM.

Členy skupiny relativistických těžkých iontů byla v uplynulých dvou desetiletích i celá řada studentů od bakalářských přes magisterské až po doktorské, z nichž někteří nyní působí na významných zahraničních vědeckých pracovištích a jiní získali excelentní místa v komerční sféře. Skupina je také velmi aktivní v popularizaci vědy, V. Wagner je neúnavným popularizátorem nejen jaderné fyziky. Vědecké aktivity skupiny tak nejen přispívají k posouvání hranic poznání o základních stavebních kamenech hmoty, ale přispívají i k technologickému, vzdělávacímu a společenskému rozvoji.



▪ Obr. 2: Tým OFTI při stavbě detektoru ECAL. Foto: Archiv ÚJF

∞ | Elektronová spektroskopie ÚJF v KATRIN (KARlsruhe TRItium Neutrino experiment)



Drahořlav Vénos, Otokar Dragoun

Oddělení fyziky těžkých iontů ÚJF



Díky vysoké úrovni elektronové spektroskopie v tehdejší Oddělení jaderné spektroskopie Ústavu jaderné fyziky AV ČR a na základě naší aktivní účasti na mezinárodním workshopu v Bad Liebenzellu v lednu 2001 (O. Dragoun, A. Kovalík) jsme se v červnu téhož roku stali pod hlavičkou ÚJF spoluzakladateli prestižního mezinárodního experimentu KATRIN společně s fyziky z Fuldy, Karlsruhe, Mohuče, Seattlu a Troicku. Záměr experimentu byl uveřejněn v září 2001.

Cílem experimentu je stanovení hmotnosti nejpočetnější elementární částice – neutrina. Všechny dosavadní pokusy změřit klidovou hmotnost neutrina končily stanovením pouze její horní hranice. Přitom experimenty s tzv. oscilacemi neutrin prokázaly v posledních letech minulého století, že klidová hmotnost neutrina není nulová. Nejnižší horní limit předchůdců s užitím měření spektra beta elektronů tritia byl $2 \text{ eV}/c^2$ (4 miliontiny hmotnosti druhé nejlehčí elementární částice elektronu). Hodnota představuje spojený výsledek fyziků z Mainzu a Troicku z měření z let 1994–2002. I když je hmotnost neutrina nesmírně malá, pro teorie elementárních částic či pro kosmologické a astrofyzikální úvahy je i tak velmi důležité neutrino „zvážit“.

Experiment KATRIN si klade za úkol snížit uvedený limit desetkrát nebo v příznivém případě klidovou hmotnost neutrina i stanovit. Příslušná zpráva o konceptu experimentu (KATRIN Design Report) s naším příspěvkem (O. Dragoun, J. Kašpar, A. Kovalík, M. Ryšavý, A. Špalek, D. Vénos, M. Zbořil)



■ Obr. 1: Poslední fáze transportu vakuové nádoby hlavního spektrometru KATRIN do KIT. Foto: KIT

byla uveřejněna v roce 2005. Pro naplnění cíle bylo nutno experiment vybavit špičkovými zařízeními z oblastí, jako jsou technologie tritia, ultravysokého vakua, silných elektrických a magnetických polí a polovodičových detektorů. Hlavní součásti experimentu představují tritiový zdroj o délce 16 m a elektrostatický elektronový spektrometr o délce 23 m a průměru 10 m. Beta elektrony z tritiového zdroje přivádí do spektrometru 25 supravodivých magnetů. Po letech vývoje a výroby řady nekomerčních prvků a výstavby vlastního experimentálního komplexu bylo měření beta spektra tritia zahájeno v Karlsruhe v roce 2019.

Náš vklad

Nároky na vysokou přesnost měření beta elektronů a jejich energeticky spojitě rozložené v měřeném spektru vyžaduje provádění řady systematických testů před zahájením měření i v přestávkách mezi nimi. Jedním z přístupů je vyhodnocení odezvy systému KATRIN na monoenergetické elektrony s velmi stabilní a co nej-

přesněji známou energií blízkou energii konce spektra beta rozpadu tritia. Pomocí této metodiky lze především ověřit vedení beta elektronů v systému KATRIN. Aplikace známých elektronů dovoluje řešit další tři podstatné aspekty: 1) stabilitu měření vysokého napětí (18,6 kV se stabilitou 50 mV), 2) energetickou kalibraci beta spektra s přesností stovek meV i lepší a 3) stanovení elektrického potenciálu tritiového zdroje (jde o směs tritia s nabitými rozpadovými produkty) s přesností desítek mV.

Jedním z našich návrhů bylo použití fotoelektronů buzených ve fólii z kobaltu zářením o energii 26 keV z rozpadu ^{241}Am . Záměr měl velkou podporu ze strany KATRIN, protože tyto monoenergetické elektrony mají velmi přesně známou energii, která je takřka ideální pro daný účel. V testech na spektrometru ESA12 v ÚJF a později i na spektrometru v Mainzu se ale ukázala nepoužitelnost takového postupu z důvodu slabé intenzity buzení fotoelektronů na relativně intenzivním pozadí.

„Výsledek nám umožnil vypracovat kvalifikovaný přehled vlastností elektronů vnitřní konverze v rozpadu $^{83\text{m}}\text{Kr}$ dodnes využívaný při analýze dat v KATRIN.“

Začali jsme tedy studovat možnosti použití monoenergetických konverzních elektronů vznikající při radioaktivním rozpadu plynného izotopu $^{83\text{m}}\text{Kr}$ ($T_{1/2}=1,83$ h) dostupného z rozpadu pevného izotopu ^{83}Rb ($T_{1/2}=86,2$ d). Tyto elektrony a jim příslušná gama záření jsou navázány na jaderné přechody v rozpadu $^{83\text{m}}\text{Kr}$ s energiemi 9,4 a 32,2 keV. Změřili jsme energie obou přechodů s dosud nejlepší přesností, příslušné nejistoty jsou 0,5 a 0,3 eV. Výsledek nám umožnil vypracovat kvalifikovaný přehled vlastností elektronů vnitřní konverze v rozpadu $^{83\text{m}}\text{Kr}$ dodnes využívaný při analýze dat v KATRIN.

„Oddělení radiofarmak postupně vyvinulo celkem tři typy ozařovacích terčů, umožňujících vyrábět ^{83}Rb ozařováním přírodního kryptonu v komoře terče pod tlakem 10 bar.

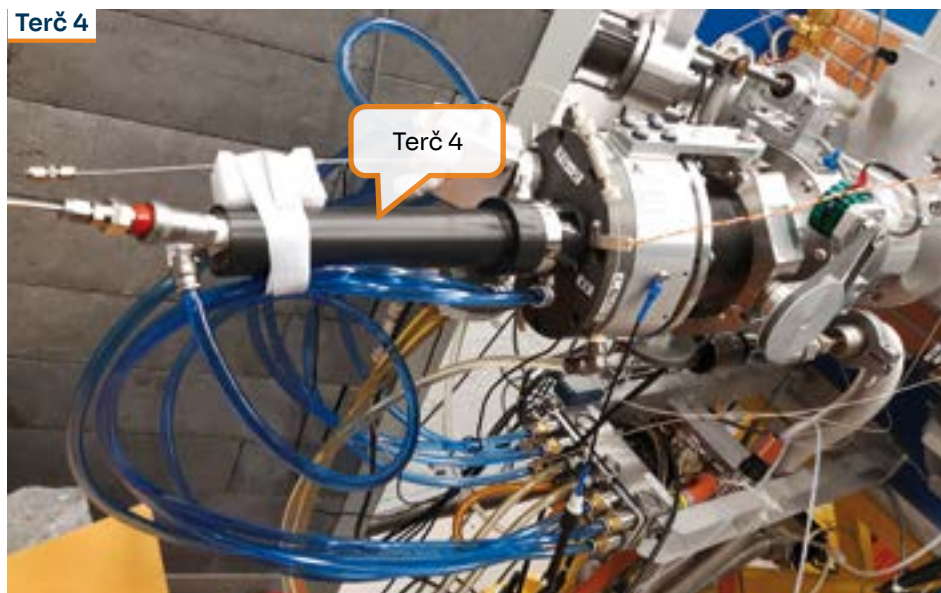
Z pohledu stability napětí se předpokládalo použít stejné vysoké napětí spektrometru KATRIN i pro provoz paralelního malého monitorovacího spektrometru vybaveného zdrojem elektronů se stabilní energií. Navrhli jsme dva typy pevných zdrojů $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$, ve kterých je mateřské ^{83}Rb navázáno na vhodný substrát

bud' vakuovým napařením, nebo implantací. Oba způsoby byly testovány na spektrometrech v ÚJF a na univerzitě v Mainzu a po instalaci KATRIN se podařilo monitorovací metodiku úspěšně vyzkoušet. Její využití však nebylo třeba, protože ve spolupráci s PTB Braunschweig došlo k zásadnímu zpřesnění stability děliče napětí, dosud slabého článku při měření vysokého napětí. Nicméně pro testovací měření v souvislosti s KATRIN se pevné zdroje $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$ podle našeho receptu vyráběly na hmotovém separátoru na univerzitě v Bonnu až do jeho uzavření v roce 2024.

Pro energetickou kalibraci a pro stanovení elektrického potenciálu tritiového zdroje jsme vyvinuli zdroj plynného $^{83\text{m}}\text{Kr}$ na bázi depozice ^{83}Rb do zeolitových kuliček. Zdroj má ve vakuu potřebné vlastnosti, pevně váže ^{83}Rb , a přitom emanuje až 80 % $^{83\text{m}}\text{Kr}$ vzniklého rozpadem rubidia. Navrhli a instalovali jsme také generátor pro injekci kryptonu emanovaného ze zeolitu do tritiového zdroje. Tento vývoj probíhal se zdroji s aktivitou ^{83}Rb nejvýše

kolem 1 GBq za přijatelných podmínek a bez zvláštních opatření z pohledu radiační bezpečnosti. Ukázalo se ale, že efektivní několikadenní společné provozování tritia a kryptonu v tritiovém zdroji vyžaduje zvýšené množství kryptonu. Proto jsme od roku 2021 začali dodávat zdroje s aktivitou ^{83}Rb kolem 10 GBq.

Aktivita ^{83}Rb je zajišťována v ozařováních protony na cyklotronech ÚJF U-120M a později TR-24. Podstatné je to, že ORF ÚJF už na začátku naší práce mělo odzkoušeno na cyklotronu metodiku výroby blízkého izotopu ^{81}Rb . S ORF byla navázána těsná spolupráce. Chemické práce spojené s přeměnou vyrobené aktivity na potřebné zdroje prováděli na vysoké úrovni O. Lebeda a J. Ráliš. ORF postupně vyvinulo celkem tři typy ozařo-



▪ Obr. 2: Terč T4 pro výrobu ^{83}Rb v reakci $^{nat}\text{Kr}(p, xn)^{83}\text{Rb}$ na svazku protonů (energie 24 MeV) urychlovače TR-24. Chlazení oken pro vstup protonů zajišťuje cirkulace plynného helia. Produkční komora terče je chlazena vodním oběhem. Za jednu hodinu ozařování se v terči vyrobí ^{83}Rb s aktivitou 120 MBq. Foto: Archiv ÚJF

vacích terčů, umožňujících vyrábět ^{83}Rb ozařováním přírodního kryptonu v komoře terče pod tlakem 10 bar. V roce 2019 byl vyvinut čtvrtý typ terče pro výrobu rubidia na cyklotronu TR-24. Zde, hlavně díky vyššímu proudu protonů, se intenzita produkce ^{83}Rb zvedla cca 3x (120 MBq ^{83}Rb /hod.), takže jsme byli schopni pro systematická měření KATRIN dodávat zdroje s aktivitou ^{83}Rb až potřebných 10 GBq. Pro přípravu těchto silných zdrojů ORF dovybavilo s finanční pomocí KATRIN svoji horkou komoru poloautomatickými manipulátory. V současnosti probíhá vývoj páteho terče s komorou z tantalu rovněž s finanční podporou KATRIN. Očekáváme řádově nižší aktivaci vlastního terče v průběhu ozařování a čistší výplach vyrobeného ^{83}Rb . Během naší účasti v KATRIN bylo provedeno 50 ozáření na cyklotronech U-120M a TR-24, z toho pětkrát s dobou ozařování 4,5 dne pro silné zdroje. Z vyrobené aktivity ^{83}Rb bylo připraveno metodami



▪ Obr. 3: Zařízení pro injekci $^{83\text{m}}\text{Kr}$ z našeho zdroje do tritiového okruhu KATRIN a žlutý kontejner pro transport zdroje. Z důvodu radiační bezpečnosti se zařízení nachází uvnitř vakuově uzavřeného boxu (na obrázku uprostřed). Vlevo je skříň s rozvodem elektrického napájení a kontroler pro ohřev pece zařízení. Foto: Archiv ÚJF

implantace, napařením ve vakuu nebo depozicí do zeolitu celkem více než 100 radioaktivních zdrojů. Mimo experiment KATRIN jsme plynný zdroj ^{83m}Kr dodali na univerzity v Heidelbergu, Freiburgu, Münsteru a Curychu. V souvislosti s tematikou KATRIN byly úspěšně obhájeny 4 diplomové práce a 3 doktorské práce.

Milníky na cestě k hmotě neutrina

První test systému KATRIN byl proveden s naším plynným zdrojem ^{83m}Kr monoenergetických konverzních elektronů aplikovaným ve zjednodušené verzi v červenci 2017. Koncem roku 2018 byl vyzkoušen provoz plynného ^{83m}Kr v tritiové smyčce. Na jaře roku 2019 byl ^{83m}Kr aplikován do tritiového zdroje KATRIN společně s tritiem, a tak proběhlo i první měření prostorového náboje tritiového zdroje. Potom byla zahájena, obvykle po třech několikaměsíčních kampaních ročně, opakovaná měření beta spektra tritia pro stanovení hmotnosti neutrina. Kampaně jsou prokládány měřeními s našimi zdroji elektronů.

„Pro energetickou kalibraci a pro stanovení elektrického potenciálu tritiového zdroje jsme vyvinuli zdroj plynného ^{83m}Kr na bázi depozice ^{83}Rb do zeolitových kuliček.“

Již výsledky z první kampaně za dobu měření 23,4 dne, které daly horní limit na klidovou hmotnost neutrina $1,1 \text{ eV}/c^2$, ukázaly na vysoký potenciál experimentu KATRIN. Limit je faktorem téměř 2x nižším v porovnání s předchůdci v Mainzu a Troicku, kteří však pro svůj výsledek provedli měření v součtu za dobu 700 dnů v průběhu 8 let. Vyhodnocení první a druhé kampaně snížilo uvedený limit na hodnotu $0,8 \text{ eV}/c^2$. Tyto dva výsledky byly publikovány v časopisech Physical Review Letters a Nature Physics. Analýza spojených měření z kampaní 1-5 z let 2019-2020 poskytla nový horní limit na klidovou hmotnost neutrina $0,45 \text{ eV}/c^2$, který byl zveřejněn v časopise Science. Vyhodnocování měření z kampaní 6-9 probíhá. Poslední kampaň, osmnáctá v pořadí, proběhne koncem roku 2025, kdy uplyne plánovaných 1 000 dnů měření.

Perspektiva po roce 2025

Komplex KATRIN bude využit v letech 2026–2028 v experimentu TRISTAN (TRitium Investigation on STerile to Active Neutrino mixing), jehož cílem je prokázání existence předpokládaného sterilního neutrina s klidovou hmotností několik keV. To by představovalo významnou možnost pro vy-

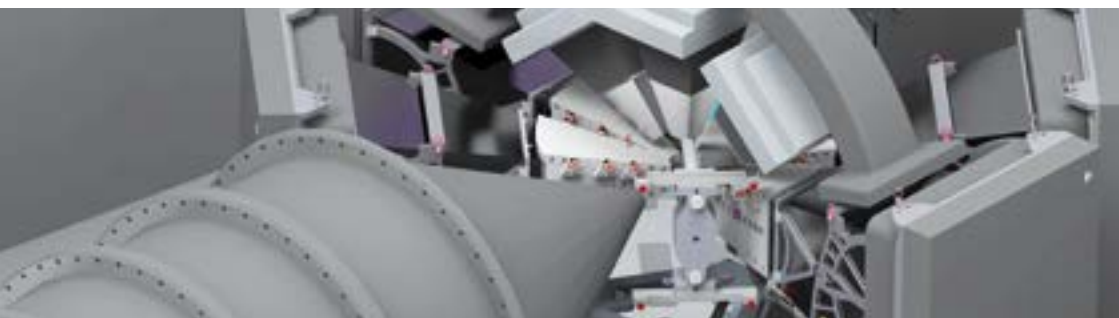
„Již výsledky z první kampaně za dobu měření 23,4 dne, které daly horní limit na klidovou hmotnost neutrina 1,1 eV/c², ukázaly na vysoký potenciál experimentu KATRIN.“

světlení temné hmoty ve vesmíru. Přislíbili jsme připravovat naše zdroje i pro tento experiment. Od roku 2029 je plánován, opět víceletý, experiment KATRIN++. S využitím tritia uváděného do atomárního stavu a metodiky diferenciálního měření beta spektra bude možné stanovit hmotnost neutrina s hodnotou až 0,04 eV/c².

9 | Příběh difraktometru BEER

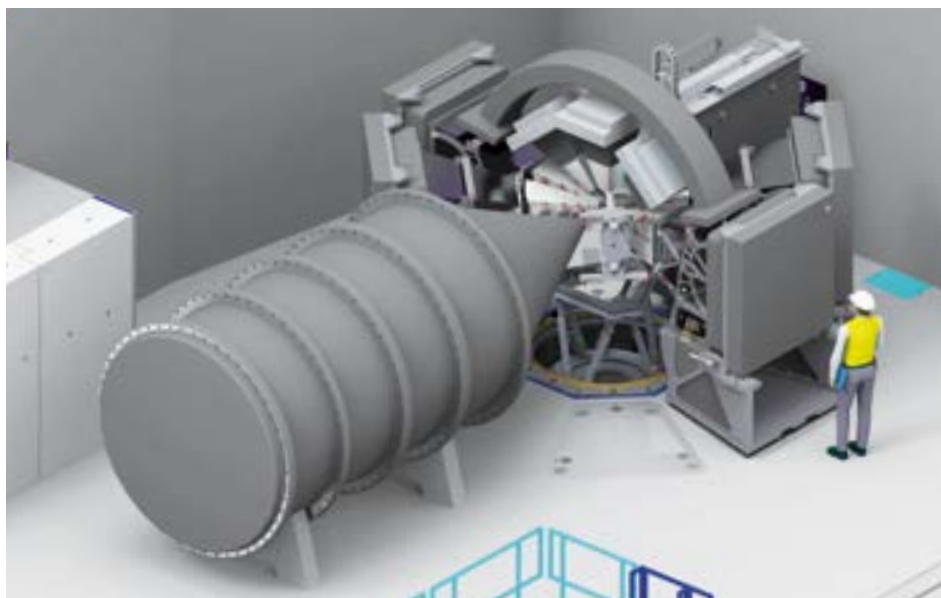
 **Petr Lukáš**

Oddělení neutronových a iontových metod ÚJF



V průběhu českého předsednictví v Radě Evropské unie v roce 2009 byl řešen z hlediska evropské vědy velmi významný počín, a to rozhodnutí, v které evropské zemi bude vybudován dlouho plánovaný Evropský spalační zdroj neutronů (ESS – European Spallation Source). S rozpočtem téměř dvě miliardy EUR a s ambicemi stát se nejvýkonnějším neutronovým zdrojem na světě se řadí tento společný evropský projekt k nejvýznamnějším budovaným vědeckým infrastrukturám v posledních desetiletích. Kandidátské země byly tři, Švédsko (Lund), Španělsko (Bilbao) a Maďarsko (Debrecen). K probíhajícím politickým jednáním byla přizvána i odborná veřejnost z našeho ústavu. Finální rozhodnutí bylo učiněno ve prospěch švédského Lundu.

Spalační zdroje neutronů jsou moderní náhradou klasických zdrojů, kterými jsou výzkumné jaderné reaktory, budované ve světě od 50. let minulého století. Nové typy zdrojů neutronů využívají tříštivou (spalační) jadernou reakci, při které je jádro těžkého prvku bohaté na neutrony zasaženo a roztrženo protonem urychleným na velmi vysokou energii. Přitom se z rozbitého jádra uvolní i více než deset neutronů. Spalační zdroj ESS se tedy skládá z výkonného lineárního urychlovače protonů (2 GeV) a wolframového terče, od kterého jsou paprskovitě vyvedeny svazky neutronů s experimentálními měřicími stanicemi. Neutronový zdroj a jeho přístroje umožňují vědcům vidět a pochopit základní atomové struktury a síly. Lze jej



▪ Obr. 1: Vizualizace budoucího difraktometru BEER. V horní části obrázku je vidět konec neutronovodu, který přivádí neutrony od zdroje ke vzorku, umístěnému ve středu difraktometru. Rozptýlené neutrony nesoucí mikrostrukturní informace o stavu vzorku jsou registrovány masivními detektory různých typů, rozmístěnými kolem studovaného vzorku. Největší detektor vlevo dole je určen pro detekci neutronů rozptýlených pod malými úhly vzhledem k dopadajícímu svazku. Foto: ESS Lund

přirovnat k obřímu mikroskopu pro studium různých materiálů – od plastů a léčiv až po motory, proteiny, molekuly a nanotechnologie.

V jednáních se švédskou stranou poprvé zazněla nabídka, aby Česká republika přispěla k výstavbě ESS stavbou jedné měřicí stanice u budoucího neutronového zdroje. Vzhledem k postupnému uzavírání evropských neutronových laboratoří jsme tuto možnost považovali za velmi atraktivní příležitost pro zachování a budoucí rozvoj vědeckých aktivit české neutronové komunity.

Pro návrh vědeckého zaměření tohoto přístroje jsme vytvořili širší tým expertů, který kromě našich pracovníků zahrnoval zejména kolegy z MFF

UK a FZÚ AV ČR. Z velmi širokého spektra neutronových metod využitelných v mnoha vědních oblastech bylo společně vybráno zaměření přístroje na výzkum materiálů. Po formulaci základního konceptu se ukázalo, že podobným směrem uvažují i naši němečtí kolegové z HZG v Geesthachtu. Vzhledem k tomu, že první odhady nákladů na pořízení tohoto přístroje přesáhly hodnotu 20 milionů EUR, domluvili jsme se s německými kolegy na budoucí spolupráci při vývoji tohoto zařízení a na rovném spolufinancování tohoto projektu.

„Ve finále jsme difraktometr nazvali BEER (Beamline for European materials Engineering Research) poté, co pivo bylo shledáno jako významný česko-německý jednotící prvek.“

Projekt materiálového difraktometru u zdroje ESS ovšem představoval jednoznačnou výzvu, a to jak vědeckou, tak i technickou. Podle základního zadání by měl přístroj fungovat do roku 2056, takže odhadnout směry vývoje ve velice rychle se rozvíjející materiálové vědě zaměřené na celou řadu pokročilých materiálů, je v takovém časovém horizontu velice obtížné. K technickým komplikacím patřilo zejména to, že plánovaný koncept spalačního zdroje neutronů s poměrně dlouhým pulsem neutronů o délce 286 ms, není úplně vhodný pro podobný typ experimentů. Od počátku tedy bylo jasné, že bude třeba navrhnout velmi sofistikovaný neutro-

no-optický systém, abychom dosáhli konkurenceschopných parametrů ve srovnání s nejlepšími obdobnými zařízeními ve světových laboratořích.

Vědecký koncept difraktometru jsme zaměřili zejména na popis chování stavu materiálů za různých, i extrémních podmínek, simulujících například produkční a postprodukční procesy materiálů (in situ experimenty), případně simulující provozní podmínky (in operando experimenty). Vzhledem k očekávanému vysokému toku neutronů pak bude možné studovat i dynamické jevy (například fázové transformace), což je u stávajících zařízení poměrně obtížné.



▪ Obr. 2: Fotografie ESS zachycuje stav výstavby na konci roku 2024. Oválná budova uprostřed v sobě skrývá terčovou stanici, v levé části je experimentální hala s vyvedenými neutronovými svazky a měřicími stanicemi. Lineární urychlovač protonů je uložen pod zemí a není v zadní části snímku příliš patrný. Foto: ESS Lund – Michael Gartner

Při návrhu neutrono-optického systému difraktometru jsme mohli vyjít z letitých zkušeností s modelováním neutronové optiky pomocí Monte Carlo simulací a jejich využitím při návrhu nových zařízení pro neutronový rozptyl. Projekt difraktometru jsme dokončili v roce 2013.

Poměrně bohatou diskuzi jsme s německými kolegy vedli nad vlastním názvem, respektive akronymem projektu. Ve finále jsme ho nazvali BEER (Beamline for European materials Engineering Research) poté, co pivo bylo shledáno jako významný česko-německý jednotící prvek. Je třeba zmínit, že tento akronym byl vřele přijat i našimi skandinávskými kolegy, české pivo se totiž těší v těchto zemích mimořádné oblibě. V roce 2014 byl projekt podán do vědeckého výběrového řízení na vybavení ESS měřicími stanicemi a jednoznačně v něm uspěl.

„Projekt materiálového difraktometru u zdroje ESS ovšem představoval pro český tým jednoznačnou výzvu, a to jak vědeckou, tak i technickou.“

Práce na projektu probíhají od roku 2015, hlavním předmětem naší dodávky je 160 m dlouhý neutronovod, výstavba stínící kobky celého zařízení a řídicí místnosti. Difraktometr bude dokončen v roce 2027 a pro vědecké uživatele bude v provozu o rok později. Projekt je financován z rozpočtu MŠMT.

2 | Popularizace vědy a ústavu

 **Vladimír Wagner**

Oddělení fyziky těžkých iontů ÚJF



Vedení i pracovníci ústavu vždy považovali za velmi důležitou popularizaci vědy, jaderné fyziky a vlastní vědecké práce mezi veřejností s akcentem na mládež. Proto se Ústav jaderné fyziky AV ČR (ÚJF) vždy zapojoval do řady popularizačních akcí.

Veletrh a festival – jaderná fyzika užitečná i zábavná

Každoročně jsou v Praze organizovány na přelomu jara a léta dvě velké akce zaměřené na popularizaci vědy a hojně navštěvované školními kolektivy i dospělými zájemci: Veletrh vědy – největší populárně naučná akce v ČR organizovaná AV ČR, a VědaFest – největší venkovní populárně naučná akce v Česku, kterou společně pořádají DDM hl. m. Prahy, ČVUT a VŠCHT. ÚJF na těchto akcích se svým stánkem nemůže chybět.

Předvádíme fungování detektorů radiace, demonstrujeme všudypřítomnou radioaktivitu a vysvětlujeme vytváření kosmického záření a ionizujícího záření v atmosféře. Informujeme o tom, jak zkoumáme vliv těchto jevů na naše prostředí, bezpečnost letecké dopravy, a dokonce i vesmírné počasí. Atraktivní je prezentace „bouřkového auta“ využívaného při cestě za bouřkami a analýze vzniku ionizace během blesků. Vysvětlujeme radiouhlíkovou datovací metodu a návštěvníky necháme tipovat, které vzorky lze datovat a které ne. Postery představují výběr z našich nejzajímavějších výsledků a videosmyčka ukazuje ústavní urychlovače. Pro zájemce je připravena populární brožura o ústavu, jeho zařízeních a problematice, která se na nich řeší.



▪ Obr. 1: Instalace Van de Graaffova urychlovače v Národním technickém muzeu – pohled do vrcholu urychlovače. Foto: Archiv ÚJF

A pak přichází „vakuový mág“ Vladimír Semián se svou soupravou od českého zastoupení firmy Pfeiffer Vacuum, která dodává vakuovou techniku pro naše urychlovače. Předvede vliv vakua na šíření zvuku, hoření a pád lehkých předmětů. Pomocí želatinových bonbónů ukáže, jak vakuum ovlivňuje lidské tělo. A magdeburské polokoule nedokáže od sebe oddělit ani parta silných chlapců (Obr. 2).

Dny otevřených dveří v ÚJF – okno do světa jaderné fyziky

Ústav jaderné fyziky AV ČR pravidelně otevírá své brány veřejnosti, aby zájemci mohli nahlédnout do nejmodernějších laboratoří a poznat fascinující svět urychlovačů a reaktorů. Dny otevřených dveří probíhají pravidelně v listopadu v rámci Týdne Akademie věd ČR a jsou společně s Ústavem anorganické chemie AV ČR, ÚJV Řež a.s. a Centrem výzkumu Řež s.r.o. organizovány v celém řežském areálu. Povoláním Státního úřadu pro jadernou bezpečnost je vstup na Dny umožněn i osobám mladším šestnácti let, přičemž ve čtvrtek a pátek se konají exkurze pro žáky a středoškolské studenty, zatímco sobotní program je určen široké veřejnosti.

„Ani pandemie COVID-19 nezastavila tradici Dnů otevřených dveří – v roce 2021 byla akce realizována formou přednášek a videoukázek v online prostoru.“

ÚJF nabízí každoročně prezentaci dvou vybraných pracovišť, a tak návštěvníci mají jedinečnou možnost zavítat na cyklotrony, tandemový urychlovač nebo pracoviště urychlovačové hmotnostní spektrometrie a navštívit i výzkumné reaktory v Centru výzkumu Řež. Zájem o akci je enormní – na přelomu prvního a druhého desetiletí byla návštěvnost rekordní, v roce 2013 přesáhla 433 osob, což je maximální kapacita pracovišť se složitou instrumentací a přísným zabezpečením. Vzhledem k vysoké poptávce bylo nutné zavést registrační systém, který od roku 2014 umožňuje přehlednější organizaci s přibližně dvěma sty návštěvníky ročně. Tento formát zajistil komfortní prostor pro prohlídky, diskuze a dotazy.

Ani pandemie COVID-19 nezastavila tradici Dnů otevřených dveří – v roce 2021 byla akce realizována formou přednášek a videoukázek v online prostoru, a tak popularizační a vzdělávací aktivity pokračovaly i v dobách omezení.

Po dohodě umožňuje ÚJF exkurze na svá pracoviště pro středoškolské studenty a zájemce o jadernou problematiku z řad veřejnosti i mimo termín Dnů otevřených dveří.

Díky těmto akcím se široká veřejnost může seznámit s největší koncentrací urychlovačů a výzkumných reaktorů v České republice, poznat nejnovější vědecké postupy a přiblížit si jadernou fyziku nejen teoreticky, ale i názorně.

Mediální aktivity – jaderná fyzika a ÚJF ve veřejném prostoru

Mediální zprávy a s nimi spojené popularizační aktivity jsou často věnovány české účasti v mezinárodní laboratoři CERN (viz příspěvek F. Křížka ve sborníku). Ve spolupráci s kolegy z MFF UK, FJFI ČVUT a Fyzikálního ústavu AV ČR jsme v roce 2008 realizovali řadu popularizačních akcí v souvislosti se spouštěním urychlovače LHC v laboratoři CERN. Mezi lety 2008 až 2012 jsme spoluorganizovali České učitelské týdny v této laboratoři. V roce 2014 jsme se podíleli na realizaci interaktivní výstavy k 60. výročí založení této organizace. Řada mediálních informací a popularizačních akcí proběhla rovněž v roce 2024 ve spojení s 70. výročím CERN.

V letošním roce se mediální pozornosti dostalo výsledku experimentu KATRIN, který ukázal nový horní limit hmotnosti neutrina a který byl získán s naším podílem (viz D. Vénos et al. v této publikaci).

Velký zájem médií i veřejnosti vyvolávají informace o našich multidisciplinárních výzkumech spojených s archeologií a historií. Ty propagují možnosti našich zařízení a jaderných metod u široké veřejnosti. Z těch zmíníme zejména akci spojenou s průzkumem hrobky a ostatků světoznámého dánského astronoma Tycha Braha, která proběhla v letech 2010 a 2011.

Skupina v čele s kolegou Janem Kučerou prokázala, že obsah rtuti v jeho ostatcích je malý a za jeho úmrtí nemůže otrava tímto prvkem, jak některé dřívější studie naznačovaly. V roce 2013 se ve foyer budovy AV ČR konala výstava věnovaná dopadům tohoto výzkumu na znalost naší historie (více v příspěvku J. Kučery a J. Kameníka v tomto sborníku).

V roce 2024 publikoval Roman Garba se svým týmem v časopise *Nature* studii o archeologické lokalitě Korolevo na západní Ukrajině, kde byly nalezeny kamenné nástroje datované na 1,4 milionu let. Analýzy poskytují důkaz o nejstarší známé přítomnosti *Homo erectus* v Evropě a mění dosavadní pohled na migraci hominidů (viz R. Garba et al. v této publikaci).

Celostátními médii prošly také zprávy o radiouhlíkovém datování nejstarší jeskynní kresby v Česku. Metody a výsledky datování tzv. Čáslavské kalvy, které prokázaly, že patřila jedinci z Žižkovy doby, byly prezentovány na výstavě k 600. výročí Žižkova úmrtí v Čáslavi. Na výstavě Záhada zlatých šperků v Muzeu T. G. M. Rakovník byly představeny výsledky získané metodou rentgenfluorescenční analýzy.

V přímém přenosu byl v České televizi přenášen start jednoho z letů stratosférického dozimetrického balónu Fík. Tyto lety, pro které mohli navrhnout studenti středních škol i svoje experimenty, byly velmi úspěšným příspěvkem k popularizaci jaderné fyziky a studia kosmického záření.

Mediální pozornosti se dostalo ústavu také při návštěvách premiérů České



■ Obr. 2: Marný zápas s vakuem.

Foto: Archiv ÚJF

republiky v roce 2019 a v roce 2024 u příležitosti otevření nové radiochemické laboratoře.

V roce 2012 uplynulo 100 let od objevu kosmického záření, který učinil rakouský fyzik Victor Franz Hess během svého slavného balónového letu nad Ústím nad Labem. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně (UJEP) se stala jedním z hlavních organizátorů oslav tohoto významného výročí a podílel se na nich i ÚJF. Součástí oslav byly odhalení pamětní desky, tematická výstava Ústí ve službách vědy, rekonstrukce historického Hessova letu s horokovzdušnými balóny a také přírodovědné přednášky.

V roce 2013 proběhla vernisáž instalace Van de Graaffova urychlovače v Národním technickém muzeu (Obr. 1), kam se přesunul po ukončení jeho využívání v našem ústavu. Splnilo se tak přání našeho prvního ředitele Čestmíra Šimáně, který se o realizaci tohoto urychlovače ve Škodových závodech v Plzni zasadil. Šlo o jediný urychlovač iontů, který postavil český podnik.

Na budově Oddělení dozimetrie záření ÚJF AV ČR na Bulovce byla v roce 2018 v rámci 120 let od narození odhalena pamětní deska Františka Běhounka. Tento významný český jaderný fyzik i polárník byl zakladatelem předchůdce této instituce.

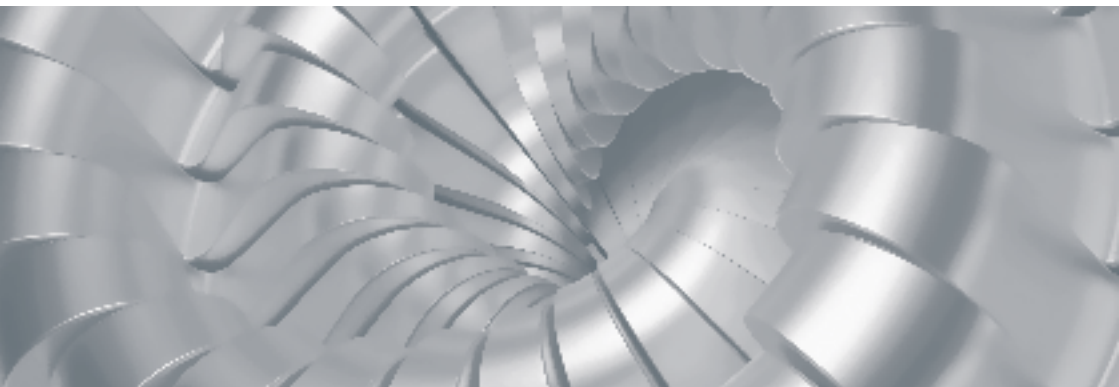
V roce 2019 se uskutečnil vzpomínkový seminář k stému výročí narození Čestmíra Šimáně. V rámci této akce byla v areálu pod památečným dubem instalována jeho pamětní deska. Společně s dalšími institucemi v řežském areálu a obcí Řež jsme nad ním realizovali turistickou vzdělávací Šimáněho stezku, která informuje o historii a významu jaderného výzkumu v areálu.

Vladimír Wagner se podílel na odborné stránce a scénáři třech animovaných videí realizovaných v rámci velice populárního cyklu AV ČR Nezkreslená věda. Šlo o témata Jaderná elektrárna, Radioaktivita a Urychlovače. Vladimír Wagner mívá také každoročně v internetovém časopise OSEL (Objective Source of E-Learning) zaměřeném na popularizaci vědy okolo dvaceti článků.

7 | Práce se středoškolskou mládeží

 **Vladimír Wagner**

Oddělení fyziky těžkých iontů ÚJF



V Ústavu jaderné fyziky AV ČR si uvědomujeme zásadní důležitost oslovení středoškolských studentů, povzbuzování jejich zájmu o přírodovědné obory obecně a fyziku obzvláště a vyhledávání a podporu talentů z jejich řad. Je to generace našich následovníků.

Středoškolstí studenti jsou častými návštěvníky našich prezentací na Veletru vědy a festivalu VědaFest. Během Dnů otevřených dveří jsou čtvrteční a páteční termíny rezervovány hlavně pro exkurze tříd ze středních škol, které si mohou domluvit výpravu do Řeže i během roku. Pracovníci ÚJF realizují přednášky na středních školách a účastní se dalších různých akcí pro zájemce o fyziku z řad středoškoláků. Významnou aktivitou jsou také práce SOČ (Středoškolská odborná činnost), které studenti realizují přímo v ústavních laboratořích.

Otevřená věda

Otevřená věda je projekt AV ČR s podporou MŠMT. Jeho předmětem jsou roční vědecké stáže pro středoškoláky a středoškolačky – stážisty, které se konají na ústavech AV ČR pod vedením vědkyň a vědců – lektorů. Lektor si může vybrat ze zájemců o jeho stáž maximálně tři stážisty. Stáž probíhá přímo na ústavech od ledna do listopadu, a to minimálně 8 hodin v měsíci.

ÚJF na Otevřené vědě participoval od roku 2005. Po roce 2010 byl dominantně zájem o stáže v oblasti spektroskopie gama přechodů, dozimetrie záření a kosmického záření. V současnosti je velký zájem o zapojení do teoretických studií. Níže uvádíme příklady z těchto období.

V roce 2014 se lektor Vladimír Wagner a stážista Tomáš Herman z Gymnázia Brno Řečkovice zabývali měřením pravděpodobností reakcí neutronů s materiály důležitými pro aktivační detektory neutronů. Stážista spolu s lektorem připravili fotokomiks o jednom jeho pracovním dnu.¹ Fotokomiks začíná větou „Tak jsem zase přijel do Řeže, abych pracoval na své maturitní práci ...“ a končí „A když takových dní absolvuji více a pak i kopu dalšího času při zpracování spekter, analýze výsledků a přemýšlení, tak mohu napsat práci, kterou si můžete přečíst zde. Po úspěšné maturitě začnu po prázdninách studovat na FJFI ČVUT v Praze.“

1 Ten je k dispozici na www.ujf.cas.cz/70

Tomáš Herman na FJFI studoval úspěšně. V roce 2024 obhájil svoji doktorskou práci jako člen kolaborace ALICE v CERN (o kolaboraci viz příspěvek F. Křížka v tomto sborníku). Byl i reprezentantem juniorních výzkumníků v Kolaboračním výboru ALICE. V současnosti pracuje jako specialista na umělou inteligenci v české softwarové firmě.

V roce 2024 podali dva mladí členové Oddělení teoretické fyziky ÚJF návrhy na stáže v oblasti teoretické jaderné fyziky, o které byl zájem značně převyšující pravidlo maximálního počtu tří členů v týmu stážistů.

Téma lektora Martina Schäfera *Kvantová mechanika ve studiu jader a exotických mezonů* bylo zaměřeno na kvantově-mechanický popis deuteronu a dalších dvoučásticových systémů. Další výzkumné téma *Svět podivných jader* s lektorem Daliborem Skoupilem se dotýkalo hadronů a jejich systémů s podivným kvarkem.

Na závěrečné konferenci představily týmy výsledky svých stáží. Tým stážistů Lukáše Hrdého, Sofie Klepkové a Jakuba Radima Zbončáka s lektorem Martinem Schäferem byl oceněn porotou v kategorii věd o neživé přírodě skvělým druhým místem (Obr. 1).

Stáž inspirovala členy týmu k dalšímu studiu kvantové mechaniky na vysoké škole, přičemž Sofie Klepková a Jakub Radim Zbončák již plánují pokračovat ve svých individuálních vědeckých projektech. Tyto projekty, které opět povede Martin Schäfer, mohou být tématy jejich budoucích bakalářských a diplomových prací.



▪ Obr. 1: Stříbrný tým prezentuje výsledky své stáže. Foto: AV ČR – Jana Plavec

Přestože druhý tým Dalibora Skoupila hodnocen nebyl, stáž svého účelu dosáhla: jedna ze studentek pod vedením lektora na základě stáže připravuje práci v rámci Středoškolské odborné činnosti (SOČ). I tato práce se později může stát základem bakalářské či diplomové práce.

Fyzikální olympiáda

Rok 2019, ve kterém uplynulo 150 let od první publikace Mendělejevovy periodické tabulky prvků, byl vyhlášen Mezinárodním rokem periodické tabulky prvků. Při této příležitosti se na náš popud organizátoři 60. ročníku Fyzikální olympiády rozhodli věnovat v kategorii A tématu produkce a výzkumu supertěžkých prvků, tedy tématu, které spojuje jadernou fyziku

„Tomáš Herman na FJFI studoval úspěšně. V roce 2024 obhájil svoji doktorskou práci jako člen kolaborace ALICE v CERN. V současnosti pracuje jako specialista na umělou inteligenci v české softwarové firmě.“

a chemii. Produkce je doménou jaderné fyziky, realizace metod umožňujících studium chemie prvků na jednotlivých atomech umožňuje analýzu změn chemických vlastností na současném známém konci periodické tabulky. Ten je u prvku oganesson (Og, $Z=118$), který ukončuje sedmou periodu Mendělejevovy tabulky.

Vladimír Wagner spolu se Zdeňkem Janoutem z ÚTEF ČVUT a středoškolským učitelem Vladimírem Víchou vytvořili studijní text *Hranice Mendělejevovy tabulky aneb jak produkovat a zkoumat stále těžší prvky*, sloužící jako odborný základ pro účastníky olympiády. Pro všechna kola Olympiády byla připravena jedna úloha zaměřená na proces syntézy supertěžkých prvků, jejich vlastnosti a metody detekce, kterou soutěžící na základě znalostí získaných ze studijního textu řešili. To umožnilo středoškolským studentům hlouběji proniknout do jaderné fyziky a chemie supertěžkých prvků.

22 | RadioMedic

 **Jan Dobeš**

Jednatel společnosti RadioMedic s.r.o. v letech 2012–2023



V první polovině 90. let inicioval tehdejší ředitel ÚJF Rostislav Mach záměr věnovat se výzkumu a vývoji radiofarmak. Tento záměr vycházel z několika skutečností. Cyklotron U-120M provozovaný ústavem byl tehdy jediným zařízením v České republice, na němž šlo připravovat urychlenými ionty radionuklidy včetně ^{18}F , který má zásadní význam v zobrazování pozitronovou emisní tomografií (PET). Přitom na odděleních ústavu pracovalo několik zkušených radiochemiků a další, včetně nadějných absolventů tohoto oboru, se podařilo pro tuto činnost získat. Nakonec se ve zdravotnických zařízeních začala prosazovat pozitronová emisní tomografie jako moderní zobrazovací metoda. Vzhledem k poločasu rozpadu ^{18}F , který je 110 minut, bylo pokrytí potřeb českého zdravotnictví dodávkami jím značených radiofarmak ze zahraničí nerealné. Řetězec výzkumu a vývoje vyústil logicky v zásobení domácích pracovišť nukleární medicíny právě těmito radiofarmaky v rámci jiné (hospodářské) činnosti ústavu.

Zpočátku byly činnosti v oblasti výzkumu a vývoje radiofarmak organizovány ve skupině PET a SPECT radiofarmak začleněných v útvaru ředitele. V roce 1998 bylo zřízeno samostatné Oddělení radiofarmak (ORF), o kterém píše O. Lebeda ve svém příspěvku v tomto sborníku. V součinnosti ORF s Oddělením urychlovačů byla realizována i jiná činnost ÚJF, tj. ozařovací služby a vývoj, výroba a distribuce radiofarmak a radiochemikálií. Byly provedeny potřebné vývojové práce, preklinické a klinické zkoušky, získán certifikát správné výrobní praxe a k registraci prvního léčivého přípravku – [^{18}F]fluodeoxyglukózy – došlo v roce 1999. První PET vyšetření v historii ČR pak proběhlo 25. srpna 1999 v Nemocnici Na Homolce. Jiná činnost se

„Byly provedeny potřebné vývojové práce, preklinické a klinické zkoušky, získán certifikát správné výrobní praxe a k registraci prvního léčivého přípravku – [^{18}F]fluodeoxyglukózy – došlo v roce 1999.“

úspěšně rozvíjela až do dubna roku 2010, kdy měl ÚJF již pět registrovaných léčivých přípravků a dodával radiofarmaka řadě zdravotnických zařízení.

Dnem 1. ledna 2007 se právní forma Ústavu jaderné fyziky AV ČR změnila na veřejnou výzkumnou instituci (VVI). Zákon o VVI č. 341/2005 Sb. přinesl pro VVI nové možnosti, mj. založit jinou právnickou osobu a vlo-

žit majetek do jiné právnické osoby. Nato vedení AV ČR vyzvalo ústav, aby využil tyto možnosti a vyčlenil jinou činnost do samostatného subjektu.

To znamenalo vstup do zcela nového území, se kterým nebyly na půdě AV ČR žádné zkušenosti, a vyžadovalo korektní zabezpečení nejrůznějších právních, administrativních a ekonomických aspektů vyčlenění a jeho realizaci v několika krocích se schvalováním relevantními orgány ústavu a AV ČR.

Dne 12. května 2008 byla založena společnost RadioMedic s.r.o. se 100% vlastníkem ÚJF AV ČR. Předmětem podnikání společnosti byl mj. výzkum, výroba a distribuce radiofarmak a výzkum a vývoj v oblasti přírod-

ních a technických věd. Dne 26. dubna 2010 pak bylo realizováno vložení jiné činnosti ÚJF formou vkladu části podniku do společnosti RadioMedic. Přitom byla vložena jen část jiné činnosti – vývoj, výroba a distribuce radiofarmak a radiochemikálií, ozařovací služby zůstaly nadále jinou činností ÚJF. Současně byly mezi ÚJF a firmou RadioMedic uzavřeny smlouvy o ozařovacích službách, nájmu přístrojů a zařízení a nájmu nebytových prostor.

Součástí vložení bylo i převedení registrace čtyř léčivých prostředků, v jejichž dodávkách zdravotnickým zařízením RadioMedic pokračoval, a to:

- 2- ^{18}F -FDG (fluodeoxyglukóza) – nejrozšířenější PET radiofarmakum pro zobrazení ložisek s intenzivním metabolismem glukózy, diagnostika nádorových onemocnění,
- Fluorid (^{18}F) sodný – diagnostikum maligních nádorů skeletu a kloubních onemocnění,
- Fludeoxythymidin (^{18}F) – pro diagnostiku rychle proliferujících nádorových tkání, zejména v mozku a plicích,
- Radionuklidový generátor $^{81}\text{Rb}/^{81\text{m}}\text{Kr}$ – radiofarmakum pro ventilační vyšetření plic metodou jednofotonové emisní výpočetní tomografie (SPECT).

Radiofarmaka byla dodávána do zdravotnických zařízení v České republice a na Slovensku. Ve společnosti byl zaveden plně funkční farmakovigilanční systém, který zajišťuje sběr a zpracování všech bezpečnostních informací, které se týkají registrovaných a hodnocených léčivých přípravků. Spolehlivost výroby léčivých přípravků byla vysoká a přesahovala obecně uznávanou hranici dobré spolehlivosti výroby 95%.

Souběžně s výrobní činností probíhaly ve společnosti RadioMedic vývojové práce na nových produktech. Dva z nich obdržely souhlas Ministerstva zdravotnictví ČR k začlenění do specifického léčebného programu (SpLP) s využitím neregistrovaného léčivého přípravku:

- ^{18}F FMISO (Fluoromisonidazolum ^{18}F) – radiofarmakum pro diagnostiku hypoxie tkání solidních tumorů se stalo předmětem dodávek,

- [^{18}F]-FES (Fluoroestradiolum ^{18}F) – diagnostikum karcinomu prsu, SpLP schválen v roce 2023, dodávky nebyly realizovány.

Dalšími vyvíjenými PET radiofarmaky byly:

- [^{18}F]-FTOCA (Gluc-Lys-([^{18}F]FP)-TOCA) – diagnostikum neuroendokrinních nádorů,
- [^{18}F]-FPSMA (Fluoro-Prostate-specific membrane antigen ^{18}F) – diagnostikum karcinomu prostaty.

„Spolehlivost výroby léčivých přípravků byla vysoká a přesahovala obecně uznávanou hranici dobré spolehlivosti výroby 95 %.“

V letech 2013–2016 byl RadioMedic spolu s Přírodovědeckou fakultou UK řešitelem projektu Technologické agentury ČR TA03010878 – Vývoj nových cílených radiofarmaceutických přípravků pro diagnostické i terapeutické použití v nukleární medicíně a jejich biologické testování. V projektu byly řešeny okruhy:

utické použití v nukleární medicíně a jejich biologické testování. V projektu byly řešeny okruhy:

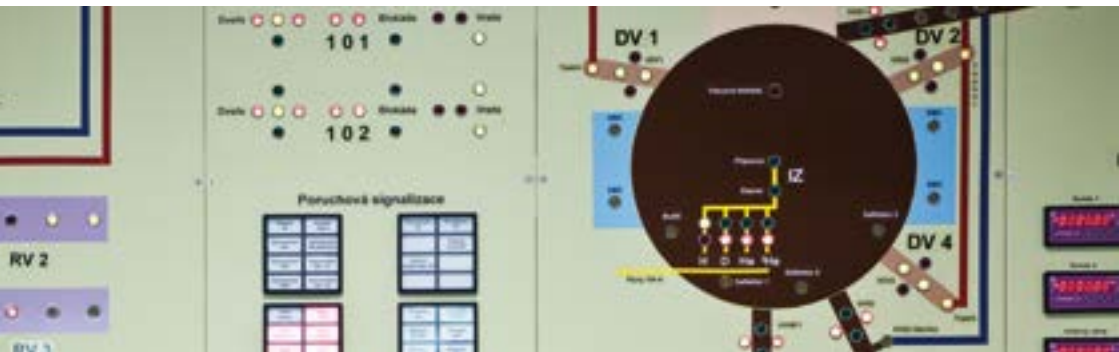
- [^{177}Lu]-Nimotuzumab – EGF receptory (karcinom hlavy a krku, gliomy),
- Deriváty bombesinů značené ^{68}Ga , ^{64}Cu , ^{177}Lu – karcinom prostaty,
- Vývoj 16-a-[^{18}F]fluoroestradiol – diagnostika karcinomu prsu,
- Deriváty [^{18}F]flumazenilu – diagnostika ložisek epilepsie.

Výsledkem projektu bylo ověření distribuce na zdravých a na nádorových zvířatech.

Dne 15. května 2023 byl 100% podíl Ústavu jaderné fyziky AV ČR ve společnosti RadioMedic s.r.o. prodán společnosti ÚJV Řež, a. s., čímž se firma stala členem Skupiny ÚJV.

Ⅸ Významné události ÚJF v letech 1990 až 2024

 **Jan Dobeš**
Útvar ředitele ÚJF



Ústav jaderné fyziky AV ČR prošel v letech 1990 až 2024 obdobím dynamického rozvoje svého odborného zaměření, výrazného posílení výzkumné infrastruktury i značného rozšíření mezinárodní spolupráce. To vše upevnilo na národní i mezinárodní úrovni jeho postavení jako významné vědeckovýzkumné instituce v oblasti jaderné fyziky a souvisejících aplikací. Následující přehled představuje důležité momenty tohoto období.¹

1

K této kapitole viz též odstavec v Redakční poznámce na str. 12

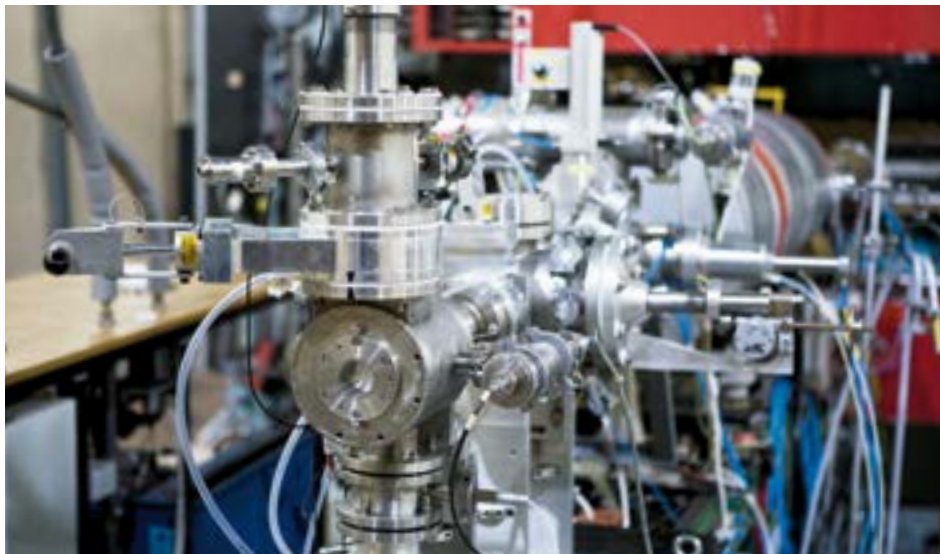


Ústav jaderné fyziky AV ČR
veřejná výzkumná instituce

▪ Obr. 1: Loga ÚJF užívaná do poloviny roku 2025. Zdroj: Archiv ÚJF

1990

- 1. června 1990 – Rostislav Mach nahradil ve funkci ředitele Josefa Tučka
- Konstituována Vědecká rada ústavu, předsedou zvolen Vlastislav Brabec
- Oddělení:
 - teoretické jaderné fyziky,
 - jaderné spektroskopie,
 - neutronové fyziky,
 - jaderných reakcí,
 - urychlovačů (U-120M),
 - speciálních zařízení (VdG urychlovač) – v roce 1991 přešlo do Oddělení neutronové fyziky,
 - elektroniky,
 - THS.
- Mezinárodní spolupráce:
 - Do roku 1990 pro většinu ústavních aktivit byla zásadní spolupráce s SÚJV Dubna, která pokračovala i nadále až do roku 2022
- Společenské změny přinesly nové možnosti, které byly rychle rozvinuty zejména tam, kde byly již předchozí kontakty a spolupráce, např.:
 - hyperjaderná fyzika – návrhy experimentů pro KEK, Japonsko,
 - intermediální jaderná fyzika – spolupráce teoretiků s experimenty v PSI Villigen,
 - matematická fyzika – Bochum University, CNRS Marseille–Luminy,
 - neutronová optika – ILL Grenoble, Vienna University, Braunschweig University.



▪ Obr. 2: Detail instrumentace cyklotronu U-120M na snímku z roku 2014.
Foto: Archiv ÚJF

1991-1993

- Vývoj axiální injekce na U-120M umožňuje využití externích iontových zdrojů – začátek aktivit v oblasti studia a vývoje diagnostických radiofarmak
- Nové mezinárodní spolupráce:
 - srážky těžkých iontů – GSI Darmstadt, experiment TAPS,
 - srážky těžkých iontů, CERN – experiment WA98,
 - exotická lehká jádra – GANIL,
 - rozpad orientovaných jader – CERN ISOLDE.
- 1. ledna 1992 – ČSFR se stává členskou zemí CERN
- Při rozdělení ČSFR se ÚJF stává s účinností k 31. 12. 1992 pracovištěm AV ČR
- 1. července 1993 – ČR samostatně vstupuje do CERN



▪ Obr. 3: Současné logo CERN. Zdroj: CERN



▪ Obr. 4: Pro neutronovou aktivační analýzu jsou užívány neutrony z vertikálních kanálů reaktoru LVR-15 (provozovatelem reaktoru je CVŘ s.r.o.).
Foto: Archiv ÚJF

1994

- Ke dni 30. 4. 1994 ÚJF sloučen s Ústavem dozimetrie záření AV ČR, který byl začleněn jako samostatné Oddělení dozimetrie záření
- Převzetí skupiny neutronové aktivační analýzy z Českého ekologického ústavu, začleněna do Oddělení jaderné spektroskopie

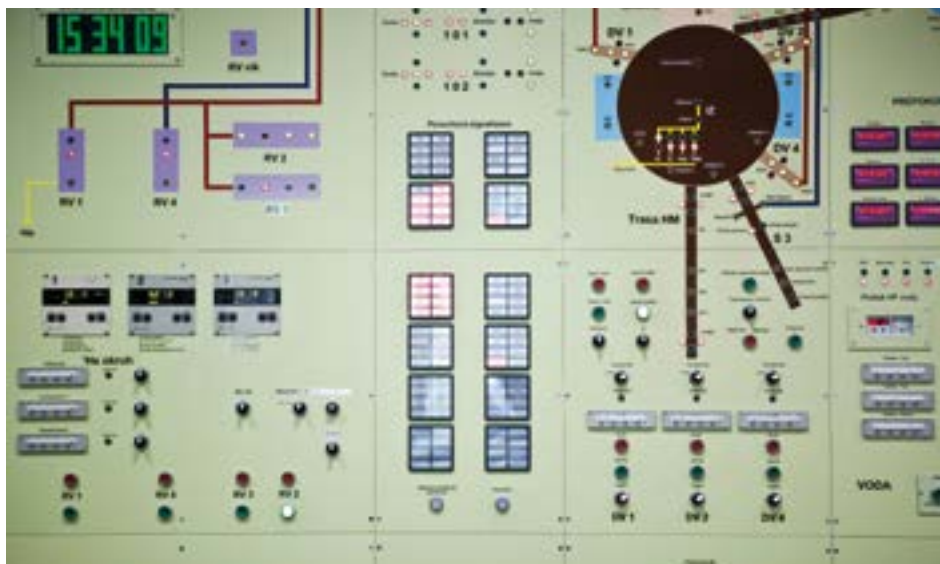
1995–96

- Zrušeno Oddělení elektroniky, pracovníci převedeni na jednotlivá oddělení
- Začalo budování nových laboratoří pro studium radiofarmak
- Upgrade elektrostatického elektronového spektrometru ESA 12
- Mezinárodní spolupráce:
 - srážky těžkých iontů, CERN – experiment CERES/NA45

- srážky těžkých iontů – zahájeny vývojové práce pro experimenty ALICE na LHC@CERN, HADES v GSI a STAR v BNL
- v této souvislosti začaly na neutronovém generátoru na U-120 M testy a studium radiačního poškození detektorů

1997

- Oddělení teoretické jaderné fyziky přejmenováno na Oddělení teoretické fyziky
- Byl demonstrován potenciál spektrometru ESA 12 pro měření jemných efektů, jako jsou možné příměsi hypotetického těžkého neutrina v beta rozpadu
- Upgrade a rozšíření generátorů rychlých neutronů na U-120M
- Mezinárodní spolupráce:
 - zahájení spolupráce s Texas A&M University při studiu astrofyzikálně důležitých reakcí, společné experimenty v TAMU a na U-120M



- Obr. 5: Řídicí stěna cyklotronu U-120M. Pohled z roku 2014. Foto: Archiv ÚJF

1998

- 1. června 1998 – po uplynutí funkčních období Rostislava Macha nastoupil do funkce ředitele Jan Dobeš
- Dokončena konverze U-120M na možnost urychlování v režimu záporných iontů; upgrade uzlů U-120M cyklotronu zvyšuje jeho spolehlivost a intenzitu vyvedených svazků
- Ze skupiny PET a radiofarmak zřízeno samostatné Oddělení radiofarmak
- Byl obdržen certifikát Správné výrobní praxe
- Realizovány dodávky PET radiodiagnostika FDG pro pilotní studii více než 100 pacientů

1999–2000

- Mezinárodní spolupráce:
 - zapojení generátorů rychlých neutronů do fúzního programu EURATOM – studium neutroniky pro projekt IFMIF, získávání dat důležitých pro budoucí systémy využívající termojadernou fúzi

2001

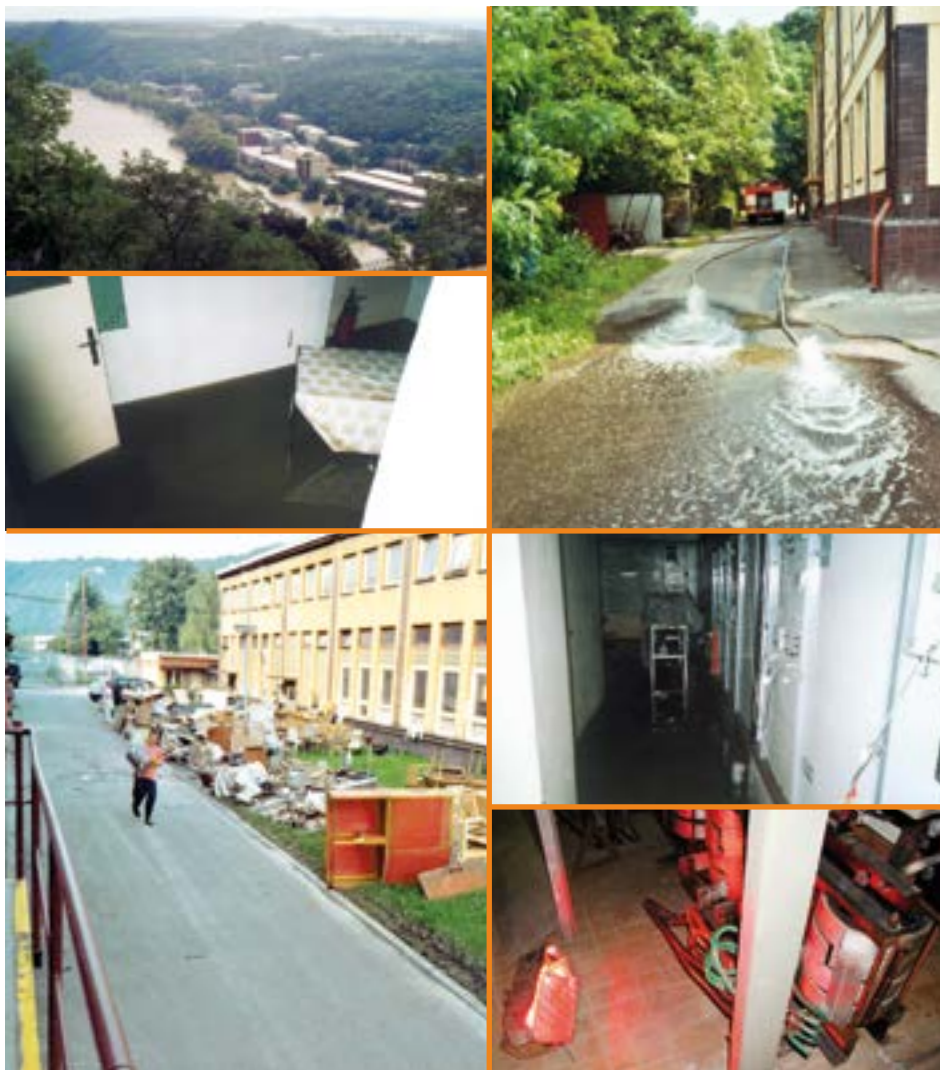
- Zahájení produkce SPECT radiodiagnostika Rb/Kr generátoru
- Mezinárodní spolupráce:
 - skupina spektroskopie elektronů nízkých energií se stává zakládajícím členem projektu KATRIN (The KARlsruhe TRItium Neutrino experiment).



▪ Obr. 6: Logo projektu KATRIN.
Zdroj: KIT Karlsruhe

2002

- Srpen – ústav zasažen povodněmi



- Obr. 7: Záběry z povodní 2002. Foto: Archiv Oddělení urychlovačů



- Obr. 8: Čtyřcestná výhybka potrubní pošty pro zakládání a měření vzorků u Mikrotronu MT25. Snímek z roku 2014. Foto: Archiv ÚJF

2003

- Předsedou vědecké rady ÚJF zvolen Jan Kučera
- Září – převzetí mikrotronové laboratoře od FJFI ČVUT a její zařazení do Oddělení urychlovačů
- Produkce radiofarmak přešla do režimu jiné činnosti

2004

- Dokončení kompletních výměn povodněmi zasažených napájecích zdrojů cyklotronu
- Zahájení výstavby haly pro nový tandemový urychlovač
- Vznikla Česká radiouhlíková laboratoř s mezinárodním kódem CRL jako společné pracoviště ÚJF a Archeologického ústavu AV ČR, Praha

2005

- Připomenutí 50. výročí založení ústavu – slavnostní shromáždění, publikovány studie o historii a aktivitách ústavu



- Obr. 9: Záběr ze slavnostního setkání k 60. výročí založení ÚJF v Betlémské kapli, viz text dále. Foto: Archiv ÚJF
- Účast v projektu NMI3 v rámci programu Transnational Access to Large Facilities otevřel a podpořil možnosti využití zařízení ÚJF na reaktoru evropskou neutronovou komunitou
- Listopad – zahájení provozu Tandetronu



- Obr. 10: Montáž urychlovače Tandetron. Foto: Archiv ÚJF



- Obr. 11: Urychlovač Tandetron na snímku z roku 2014. Foto: Archiv ÚJF

2006

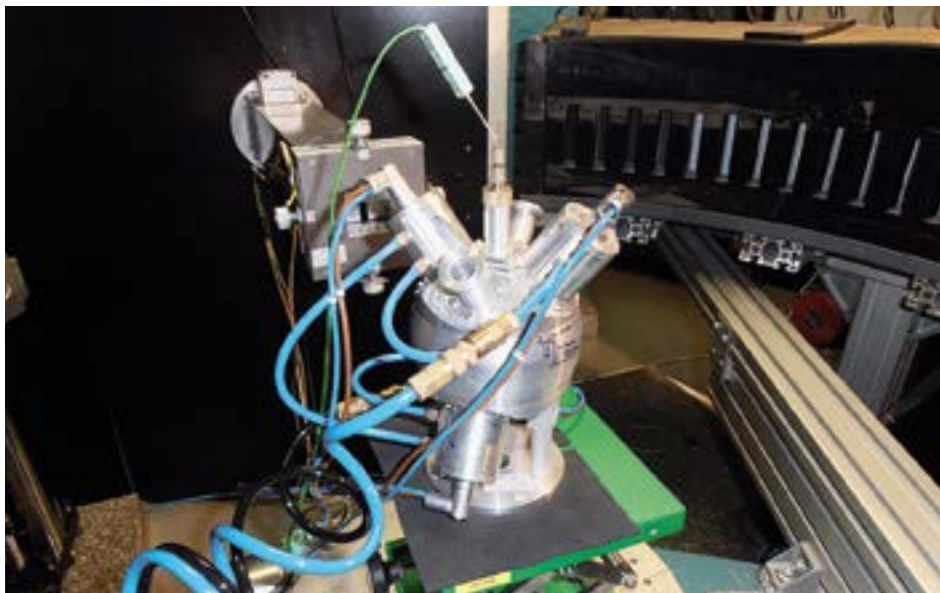
- Spolupráce s vysokými školami – v rámci podpory společných výzkumných center byla v programu MŠMT v letech 2006–2011 podpořena centra:
 - Dopplerův ústav pro matematickou fyziku a aplikovanou matematiku, spolupráce v rámci Dopplerova ústavu pokračuje i po roce 2011
 - Příprava, modifikace a charakterizace materiálů energetickým zářením
- Mezinárodní spolupráce:
 - ve spolupráci s LNS Catania zahájeno na svazku ^3He cyklotronu U-120M měření astrofyzikálně důležitých reakcí,
 - ve spolupráci s ITE Karlsruhe byly studovány na cyklotronu U-120M možnosti produkce radionuklidu ^{230}U perspektivního pro cílenou alfa terapii,
 - zapojení do experimentu CBM na budovaném mezinárodním urychlovačovém komplexu FAIR.
- 30. 5. 2006 skončilo funkční období ředitele Jana Dobeše, ten nadále pověřen vedením ústavu

2007

- 1. ledna 2007 – právní forma Ústavu jaderné fyziky AV ČR se změnila ze státní příspěvkové organizace na veřejnou výzkumnou instituci
- Konstituování orgánů nově vzniklé veřejné výzkumné instituce – předsedou rady ústavu zvolen Jan Kučera, ředitelem ústavu od 1. 6. 2007 jmenován Jan Dobeš
- Na cyklotronu U-120M proveden poprvé v rámci zemí EU experimentální test funkce a základních charakteristik násobící soustavy s externím zdrojem neutronů
- Spolupráce s vysokými školami – v rámci podpory společných výzkumných center byla v programu MŠMT v letech 2007–2011 podpořena centra:
 - Centrum ultrarelativistických jaderných srážek,
 - Centrum experimentální jaderné fyziky a astrofyziky.

2008

- Zahájen provoz práškového difraktometru se středním rozlišením MEREDIT vyvinutého v ÚJF
- Založena společnost RadioMedic s.r.o., ve které je ÚJF jediným společníkem, jako přípravný krok k vyčlenění jiné činnosti do samostatné dceřiné společnosti



- Obr. 12: Měření na práškovém difraktometru MEREDIT. Foto: Archiv ÚJF

2009

- Instalace a zahájení provozu iontové mikrosondy na Tandetronu
- Listopad – první měření srážek protonů na detektoru ALICE@LHC@CERN
- Mezinárodní spolupráce:
 - teoretická interpretace experimentu JLab – studium hyperjádra ${}^{16}\text{N}$ vzniklého elektroprodukcí

2010

- Ve spolupráci s ÚOCHB AV ČR započala příprava fluorescenčních nanodiamantů na urychlovačích ÚJF
- Mezinárodní spolupráce:
 - zapojení do pre-konstrukční a konstrukční fáze Evropského neutronového spalačního zdroje ESS, zahájení podpory účasti ČR v ESS v rámci programu MŠMT Projekty velkých výzkumných infrastruktur (LM)
- Dokončeno vyčlenění aktivit jiné činnosti ÚJF týkajících se vývoje, výroby a distribuce radiofarmak do dceřiné společnosti RadioMedic s.r.o.



EUROPEAN
SPALLATION
SOURCE

▪ Obr. 13: Logo projektu ESS. Zdroj: ESS Lund

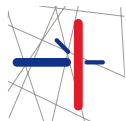
2011

- Mezinárodní spolupráce:
 - účast v projektu ERINDA v rámci programu Transnational Access to Large Facilities – zdroje rychlých neutronů na U-120M součástí evropského sdružení zařízení pro studium jaderných dat; navazující projekt CHANDA (od 2013)

2012

- Předsedou rady ÚJF zvolen Vladimír Wagner
- 1. června 2012 – po uplynutí funkčního období Jana Dobeše jmenován ředitelem ÚJF Petr Lukáš
- Zahájení činnosti Centra urychlovačů a jaderných analytických metod (CANAM), CANAM podpořen MŠMT v programu LM
- Začátek přestavby budovy Van de Graaffova urychlovače pro umístění nového cyklotronu

- Analýzou ostatků Tycha Braha jadernými analytickými metodami byly vyloučeny spekulace o jeho otravě rtuť, studie vyvolala velký zájem veřejnosti a využita pro popularizaci vědy, AV ČR a ÚJF



**Center of Accelerators
and Nuclear Analytical Methods
(CANAM)**

- Obr. 14: Logo výzkumné infrastruktury CANAM provozované v ÚJF.
Zdroj: Archiv ÚJF

2013

- Instalace demontovaného Van de Graaffova urychlovače v Národním technickém muzeu v Praze



- Obr. 15: Záběr z výstavy věnované výzkumu hrobky Tycha Braha ve foyer budovy Akademie věd ČR.
Foto: Archiv ÚJF



- Obr. 16: Pohled do Van de Graaffova urychlovače v expozici Národního technického muzea krátce po instalaci v roce 2013. Foto: Archiv ÚJF



▪ Obr. 17: Slavnostní zahájení provozu TR-24. Vlevo předseda AV ČR Jiří Drahoš, vpravo ředitel ÚJF Petr Lukáš. Foto: Archiv ÚJF

2014

- Mezinárodní spolupráce:
 - ESS – završeny práce na návrhu difraktometru pro materiálový výzkum Beamline for European Materials Engineering Research (BEER), návrh obhájen a vybrán k realizaci s nejvyšší prioritou

2015

- Mezioborové spolupráce mezi akademickými ústavy v rámci Strategie AV21, ÚJF se zapojil do čtyř programů:
 - Nové materiály na bázi kovů, keramik a kompozitů,
 - Systémy pro jadernou energetiku,
 - Kvalitní život ve zdraví i nemoci,
 - Vesmír pro lidstvo (2017),
- Říjen – uvedení nového cyklotronu TR-24 do provozu

- Listopad – připomenutí 60. výročí založení ÚJF společně s FJFI, slavnostní zasedání rad těchto institucí
- Prosinec – zahájení druhé etapy přestavby budovy VdG urychlovače – nástavba nad původní dvoupatrovou budovou, spojující novou budovu cyklotronu TR-24 a halu Tandetronu
- Mezinárodní spolupráce:
 - v rámci programu Horizon 2020 zahájen projekt World Class Science and Innovation with Neutrons in Europe 2020 (SINE2020), který souvisí a navazuje na projekt NMI3 v oblasti využití neutronů pro materiálový výzkum

2016

- Červen – plný provoz cyklotronu TR-24

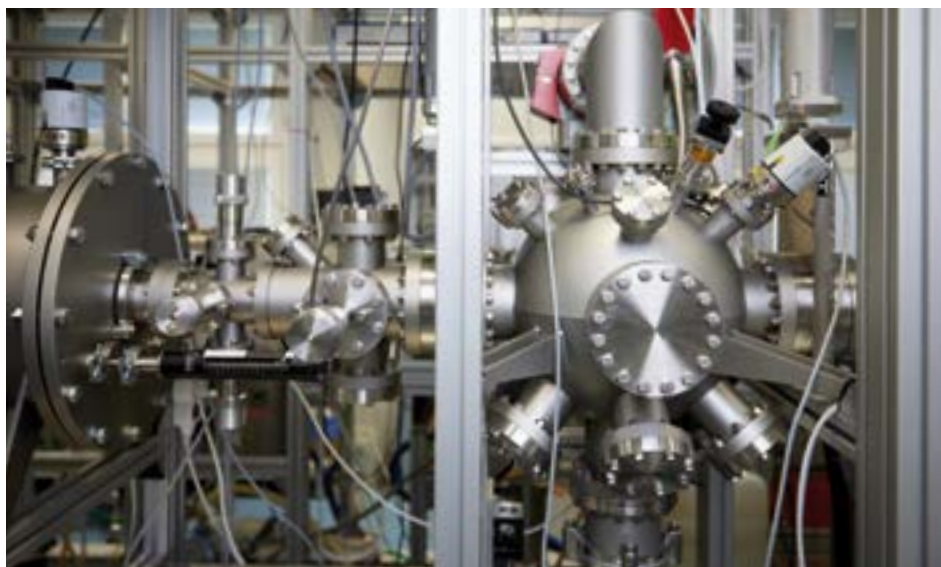


- Obr. 18: Cyklotron TR-24. Snímek z roku 2017. Foto: Archiv ÚJF

- 2016–2017 - výstavba nových radiochemických laboratoří u cyklotronu TR-24
- Zahájení řešení projektu Centrum výzkumu kosmického záření a radiačních jevů v atmosféře (CRREAT) v rámci Operačního programu VaVal
- Mezinárodní spolupráce - zahájení podpory účasti skupin ÚJF ve velkých výzkumných infrastrukturách v rámci programu LM:
 - FAIR.CZ
 - SPIRAL2.CZ
 - CERN.CZ
 - BNL.CZ
 - EATRIS.CZ

2017

- Dokončení budovy nové Laboratoře nanomateriálů přestavbou ze staršího objektu



▪ Obr. 19: Laboratoř nanomateriálů, detail. Snímek z roku 2021. Foto: Archiv ÚJF



▪ Obr. 20: Návštěva předsedkyně AV ČR Evy Zažímalové během období opatření spojených s pandemií COVID-19. Foto: Archiv ÚJF

2018

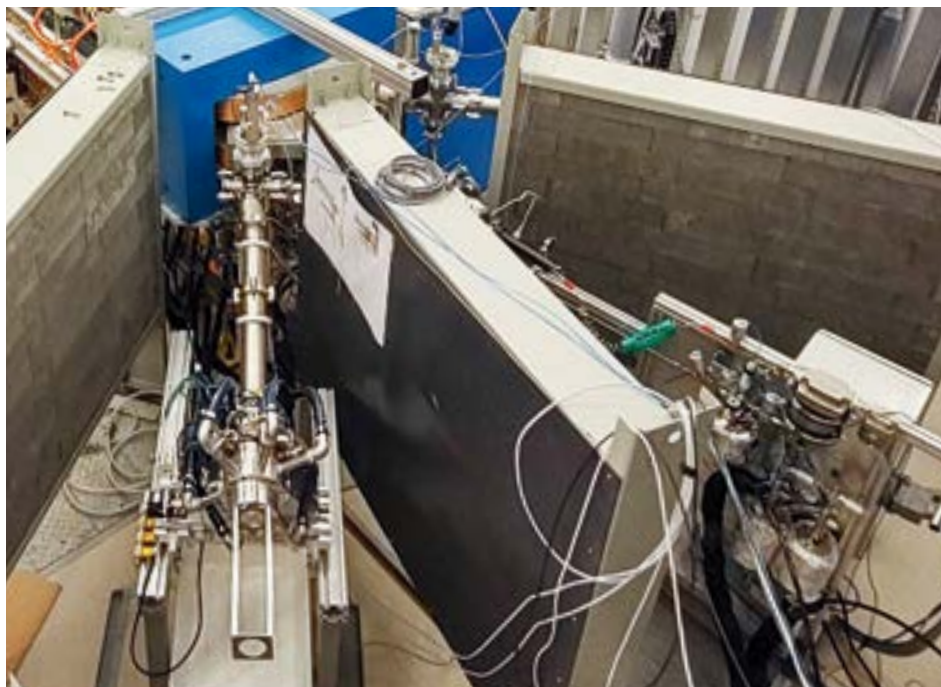
- Zahájení realizace projektu Výzkum ultrastopových izotopů a jejich využití v sociálních a environmentálních vědách urychlovačovou hmotnostní spektrometrií (RAMSES)
- KATRIN:
 - květen – zahájení experimentu,
 - ověření nové metody kalibrace s využitím $^{83}\text{Rb}/^{83\text{m}}\text{Kr}$ generátoru vyvinutého a dodaného ÚJF.

2018–2019

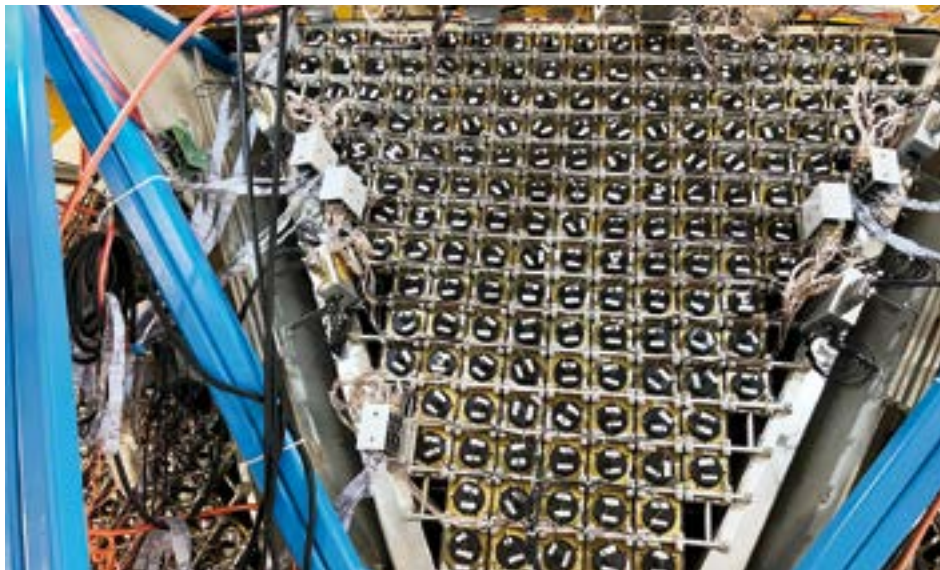
- Mezinárodní spolupráce:
 - zahájení účasti v evropských konsorciích v projektech souvisejících s pokročilými metodami částicové radioterapie INfraStructure in Proton International Research (INSPIRE) a Metrology for advanced radiotherapy using particle beams with ultra-high pulse dose rates (UHDpulse)

2020

- Omezení činností ÚJF z důvodů protipandemických opatření, přetrvávalo až do roku 2021
- Ustavení mezinárodního poradního sboru ÚJF
- CANAM – ukončení podpory z programu MŠMT, provoz CANAMu hrazen z ústavních institucionálních prostředků a z účasti v evropských infrastrukturních konsorciích (RADNEXT, ARIEL, SANDA, EUROFUSION, ReMade@ARI) s omezením pro uživatele
- Na cyklotronu TR-24 začala série pilotních experimentů na výkonovém neutronovém generátoru HPNG vyvinutém v ÚJF
- V rámci Strategie AV21 se ÚJF zapojil do nového programu Město jako laboratoř změny, bezpečné stavby



▪ Obr. 21: Neutronový generátor HPNG na cyklotronu TR-24. Foto: Archiv ÚJF



■ Obr. 22: Detail kalorimetru ECAL vyvinutého v ÚJF v rámci projektu FAIR-CZ.
Foto: Archiv ÚJF

2021

- Mezinárodní spolupráce:
 - zahájen provoz zařízení Neutron for Science (NFS) na velké infrastruktuře SPIRAL2/GANIL experimentem navrženým v ÚJF

2022

- 1. června 2022 – po uplynutí dvou funkčních období Petra Lukáše jmenován ředitelem ÚJF Ondřej Svoboda
- Po 24. únoru 2022 – vystoupení ČR z SÚJV Dubna, přerušení spolupráce ÚJF s SÚJV a institucemi v Ruské federaci
- Uvedení Laboratoře AMS vybavené systémem Multi-Isotope Low Energy AMS (MILEA) do provozu



▪ Obr. 23: Slavnostní zahájení provozu urychlovačového hmotnostního spektrometru MILEA za účasti předsedkyně AV ČR. Foto: Archiv ÚJF

- Uzavřena smlouva s firmou Eckert & Ziegler Radiopharma o součinnosti na projektu přípravy radioterapeutického alfa zářiče ^{225}Ac
- Mezinárodní spolupráce:
 - zprovoznění elektromagnetického kalorimetru ECAL@HADES@FAiR vyvinutého skupinou ÚJF,
 - ÚJF se stává členem konsorcia League of Advanced European Neutron Sources (LENS).

2023

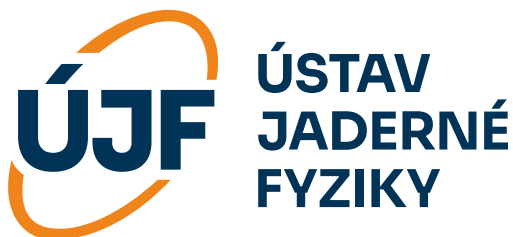
- Květen – prodej dceřiné společnosti RadioMedic s.r.o. – nový 100% vlastník ÚJV Řež, a.s.
- V prestižní výzvě Špičkový výzkum OP JAK uspěly skupiny ÚJF jako partner ve čtyřech projektech:
 - AMULET
 - ResHum
 - FERMION
 - FORTE

2024

- Změny v organizační struktuře:
 - skupina Neutronové aktivační analýzy (NAA) se z Oddělení jaderné spektroskopie přesouvá na Oddělení neutronové fyziky,
 - zbývající část OJS (tj. zejména skupiny ultrarelativistických a relativistických těžkých iontů) se přejmenovává na Oddělení fyziky těžkých iontů (OFTI),
 - Oddělení neutronové fyziky se přejmenovává na Oddělení neutronových a iontových metod (ONIM).
- Publikována studie První lidé přišli do Evropy před 1,4 milionem let v časopise NATURE
- Otevřena nová radiochemická laboratoř



▪ Obr. 24: Prof. Ondřej Lebeda hovoří při otevření radiochemické laboratoře s médii. Foto: ÚJF – D. Šebek



**Jan Dobeš a kolektiv autorů:
70. výročí Ústavu jaderné fyziky AV ČR**

Redakční rada:

Ing. Ondřej Svoboda, Ph.D., ředitel ÚJF,
prof. RNDr. Anna Macková, Ph.D., zástupkyně ředitele ÚJF,
Ing. Jan Kameník, Ph.D., vědecký tajemník ÚJF,
Ing. Jan Dobeš, CSc., Útvar ředitele ÚJF.

Redakce: Ing. Jan Dobeš, CSc.

Foto na titulní straně: ÚJF – Jaroslav Frána

Foto na straně 211: GSI/FAIR – M. Konradt

Loga a vizuální identita ÚJF: Simon Anfilov

Grafická a typografická úprava: Martin Chrenko

Vytiskl: Carter Reproplus s.r.o.

Obrazová redakce a produkce: David Šebek

Vydal:
Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.
Husinec-Řež čp. 130
250 68 Řež
Řež 2025

1. vydání
ISBN: 978-80-11-07022-9



**Akademie věd
České republiky**





ÚSTAV JADERNÉ FYZIKY AV ČR, v. v. i.
Husinec - Řež, čp. 130, 250 68 Řež
www.ujf.cas.cz