

# Aplikovaná jaderná fyzika na hybridní konferenci v Praze

**Miroslav Dočkal**

Ústav jaderné fyziky AV ČR, Husinec – Řež 130, 250 68 Řež; dockal@ujf.cas.cz

Za poslední dva roky jsme tradičním konferencím téměř odvykli: naplánované akce se odkládaly nebo přesouvaly do online prostoru (jako světová konference o vysokoenergetické fyzice ICHEP, která měla loni obsadit celé pražské Kongresové centrum). Situace se mění jen pozvolna, ale první vlaštovky jsou již tady: v Praze se od 12. do 16. září 2021 v prostorách Fakulty architektury ČVUT uskutečnila *Applied Nuclear Physics Conference (ANPC)*, a to ve dříve neobvyklém formátu hybridní konference. Dodejme, že pražský ročník byl přítom o více než rok odložen kvůli koronavirové pandemii.

Pojem „hybridní“ naplnila pražská akce téměř dokonale: fyzicky bylo přítomno 66 účastníků, 58 dalších pak bylo připojeno online. Podobný poměr se dá vztáhnout i na přednášky, které na konferenci zazněly. Z online prostoru dokonce řídili jednotlivé sekce – včetně fyzicky přítomných přednášejících – i někteří předsedající. Zatímco z pěti plenárních přednášejících byli čtyři přítomni fyzicky, polovina z 26 vyžádaných (zvaných) i 54 ostatních přednášek zazněla z virtuálního prostoru. Část foyer byla vyhrazena plakátovým sdělením, kde ve dvou blocích bylo fyzicky či elektronicky představeno 35 posterů.

ANPC byla organizována pod záštitou Divize jaderné fyziky (NPD) Evropské fyzikální společnosti (EPS): šlo o první z nové řady konferencí, navržené NPD na jejím posledním zasedání v Bologni v roce 2018. Hlavním organizátorem pražského ročníku byl Ústav jaderné fyziky AV ČR se svou infrastrukturou CANAM (Centrum urychlovačů a jaderných analytických metod). Z dalších českých institucí se na akci podílely MFF UK a FJFI ČVUT. Vědeckým organizátorem a koordinátorem konference byla Anna Macková spolu s Janem Kučerou (oba ÚJF AV ČR). Některé přednášky byly výsledkem práce celých týmů, v tom případě byl obvykle prezentující jejich prvním autorem. Vzhledem k počtu příspěvků se soustředíme pouze na plenární a vybrané zvané přednášky, které probíhaly většinou v Janákové síni.

Tématem konference byly zejména aplikace jaderné fyziky a jaderných analytických metod používajících svazky nabitých částic a neutronů při vývoji nových materiálů, v energetice, lékařství, výzkumu vesmíru, ochraně životního prostředí, v uchování a studiu kulturního dědictví. Upřesněme jen, že samotný princip činnosti jaderných elektráren a jejich fungování pod takto určené aplikace nespádá, ovšem testování radiační odolnosti komponent nových fúzních reaktorů a štěpných reaktorů nové generace, výzkum a vývoj materiálů pro produkci energie i pro úložiště radioaktivních odpadů již ano.

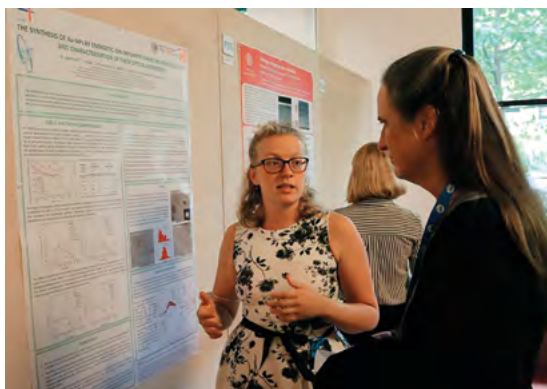


Iva Bogdanović Radović, tajemnice NPD EPS

## O lékařských aplikacích mluvili i nositelé Cen IBA

Přítomni byli a přednášeli zde i dva nositelé Ceny IBA-Europhysics Prize, kterou NPD uděluje jednou za tři roky za vynikající výsledky v oboru aplikované jaderné fyziky: Marco Durante (vítěz za rok 2013) a Thomas Haberer, který cenu obdržel za rok 2020, ale převzít ji z rukou tajemnice NPD EPS Ivy Bogdanović Radović mohl až nyní.

Thomas Haberer působí v Heidelberg Ion-Beam Therapy Center (HIT), v oddělení radiační onkologie Heidelberské univerzitní nemocnice, a v Ústavu aplikované fyziky Goetheho univerzity ve Frankfurtu nad Mohanem. Ve své zvané přednášce se soustředil na terapii iontovými svazky a výzkum možností multiiontové léčby v HIT. Přestože jde dosud především o léčbu protony a uhlíkovými ionty, pokračuje hledání, jaké druhy částic jsou pro kterou léčebnou indikaci nejvhodnější, aby byla energie iontů přenesena z léčebného hlediska co nejefektivněji a s přesnou lokalizací s minimalizací poškození zdravé tkáně: od protonových a heliových svazků s nízkým LET (lineárním přenosem energie v látce) až po uhlíkové a kyslíkové svaz-



Zájem přitáhla i posterová sekce.

ky s vysokým LET. Thomas Haberer zvláště zdůraznil perspektivy terapie svazkem heliových iontů, které přitom paradoxně zůstaly po ukončení klinických studií v Lawrence Berkeley Laboratory bez klinického využití kdekoli na světě, a to navzdory jejich příznivým fyzikálním a biofyzikálním vlastnostem.  $^4\text{He}$  ionty se vyznačují mj. výrazně zvýšenými hodnotami relativní biologické účinnosti (RBE) v rozmezí 1,3 až ~3.

Marco Durante působí v Darmstadtu: je vedoucím oddělení biofyziky v GSI Helmholtzcentrum für Schwerionenforschung a profesorem na zdejší Technické univerzitě. V plenární přednášce se nesoustředil pouze na svoji „domovskou“ urychlovačovou laboratoř FAIR, budovanou v rámci GSI, ale představil i další velké urychlovače budované v Evropě i USA, jako jsou evropské SPIRAL2 či ELI, ruská NICA, americký FRIB, korejský RAON a další. Tato zařízení nabízejí nové výzkumné příležitosti, včetně vysokých intenzit a energií iontů, využívání jejich širšího spektra, svazků radioaktivních iontů nebo pulzních svazků. Jejich hlavním cílem je základní výzkum v jaderné fyzice, ovšem většina z nich zahrnuje rovněž programy v aplikovaných jaderných vědách, zejména v biolékařském výzkumu, což podle Duranteho přináší sociální ospravedlnění vysokých investičních nákladů na tato zařízení.

Marco Durante vyvinul novou metodu v biodozimetrii nabitých částic pro odhad pozdních rizik pro pacienty podstupující radioterapii a rovněž pro predikci důsledků dlouhodobé expozice v prostředí se zvýšenou intenzitou ionizujícího záření pro zdraví kosmonautů. Pokud jde o vesmírný výzkum, vyvinul také metodu hodnocení účinnosti stínění vysokoenergetických iontů různými typy materiálů, což je zásadní pro budoucí vesmírné mise a případné vybudování habitatů na Měsíci a Marsu.

V případě FAIRu jsou biomedicínské aplikace součástí pilíře APPA – dodejme, že se na nich podílí i česká strana v rámci projektu FAIR-CZ, což ostatně obdobně platí i pro SPIRAL2. Nové urychlovače jsou podle Duranteho šancí k průlomům v mnoha oblastech, včetně výzkumu kosmického záření (pro který jsou vysoké energie nezbytné), minisvazkové radioterapie v léčbě nádorových onemocnění či při výrobě nových radionuklidů pro lékařství.

Chiara La Tessa, působící na italských univerzitách Trentu a Veroně i v Ústavu pro základní fyzikální výzkum a aplikace v Trentu (TIFPA-INFN), se v plenární přednášce zaměřila na posun paradigmatu mikrodozimetrie v částicové terapii. Použití iontů v radioterapii je sice dobře odůvodněno jejich fyzikálními i radiobiologickými výhodami a klinické výsledky jsou povzbu-

divé, četné nejistoty léčby jsou však překážkou jejich plného využití. Jedním z kritických aspektů vyplývajících z lékařských zkušeností je podle La Tessa nepochopení vztahu mezi podanou dávkou a odpovídajícími biologickými účinky. Všechny stávající systémy plánování léčby kombinují fyzikální (např. absorbovaná dávka nebo LET) a biologické (RBE pro usmrcování buněk) parametry pro výpočet biologických dávek dodaných při léčbě. Nepřesné stanovení dávek nebo RBE může vést k podzáření nádoru, omezení úspěchu léčby nebo předávkování zdravým tkáním, což zvyšuje pravděpodobnost komplikací terapie. Mikrodozimetrie bere v úvahu stochastickou povahu interakce záření s materiálem a poskytuje proto lepší popis energie předané buňkám než standardní dozimetrie – zejména ve vysoce smíšených radiačních polích, která se vyskytují na okrajích svazku a v distální oblasti.

Mikrodozimetrie již je v částicové terapii aplikována, a to pro popis kvality pole záření. La Tessa ve své přednášce představila možnosti využití základních principů mikrodozimetrie ve dvou aspektech: při vývoji nového dvoustupňového hybridního detektoru pro mikrodozimetrii (HDM) a nového stochastického mikrodozimetrického modelu (GSM2), který poskytuje obecný pravděpodobnostní rámec pro popis vzniku radiačního poškození. Společně mohou být tyto nástroje použity pro pokročilé plánování radioterapie.

### Přehled historie i současného stavu

Historii, nedávné úspěchy a současné výzvy využití iontových svazků pro pokročilou analýzu materiálů shrnul v plenární přednášce prof. André Vantomme, vedoucí skupiny iontových analytických metod na Katoické univerzitě v belgické Lovani. Tyto metody začaly podle Vantomma vzkvétat na přelomu 50. a 60. let minulého století, klíčovými se staly například ve studiu jaderných materiálů či iontově implantovaných polovodičů. Během následujícího více než půlstoletí byly vyvinuty pokročilé metody a technologie umožňující snížit detekční limity prvků na velmi malé koncentrace a zlepšit hloubkové i prostorové rozlišení s možností studia mikro- a nanostruktur. Zvýšila se však i náročnost zadavatelů analýz, například u zmíněných nanostruktur či při měření v extrémních prostředích – vzrostly proto nároky na citlivost, rozlišení a přesnost iontového svazku. Vantomme popsal jak šance, tak



Jedna z vítězek Best Poster Award ANPC, doktorandka Eleni Ntemou z Uppsalské univerzity





Prezenční účastníci ANPC před budovou Fakulty architektury ČVUT, kde konference probíhala.

omezení současných metod: závěrem konstatoval, že v mnoha případech mohou být klasické metody s úspěchem využity i v nanoměřítku.

Obdobné tematické se ve zvaném příspěvku věnoval Daniel Primetzhofer ze švédské Uppsalské univerzity. Představil nejnovější možnosti metod analýzy iontovými svazky (IBA) pro zkoumání in situ s přímým sledováním procesů difuze, implantace, růstu nanostruktur a migrace prvků v reálném čase. Tyto metody pak umožňují přímý výzkum procesů probíhajících například v lithiových bateriích nebo v mikroelektronických součástkách během jejich provozu, a to v nanometrové škále.

Mariaelena Fedi z Národního ústavu jaderné fyziky v italské Florencii podala, v tomto případě v online podobě, historický přehled vývoje malých urychlovačů a jejich analytických možností pro výzkum kulturního dědictví. Důležitá role zmíněných urychlovačů zejména v materiálové analýze a radiokarbonovém datování artefaktů se podle M. Fedi datuje od 70. let minulého století, a to zejména v IBA metodách, používaných v elektrostatických tandemových urychlovačích, a rovněž v urychlovačové hmotnostní spektrometrii (AMS). Ačkoliv malé urychlovače nebyly příliš využitelné pro potřeby dalšího vývoje fyziky vysokých energií, vzrostl jejich význam pro nové potřeby aplikovaného výzkumu. Možnost vyvedení projektilového analyzačního svazku z vakuového prostředí pro měření IBA metodami – převážně metodami PIXE (emise rentgenova záření indukovaného částicemi) a PIGE (emise  $\gamma$  záření indukovaného částicemi) –, ale i dalšími, otevřelo možnost prozkoumat prvkové složení téměř všech uměleckých děl, které nelze umístit do vakua, nebo je dokonce prozkoumat na místě malým přenosným urychlovačem protonů, bez potřeby vzorkování nebo jiné přípravy. V současné době se ovšem prvkové analýzy založené na urychlovačích začaly potýkat s konkurencí nových, snadno fungujících a přenosných zařízení jiných metod, jako je rentgenová fluorescence (XRF). Jednou z odpovědí jsou podle M. Fedi nové přenosné urychlovače pro metodu PIXE.

Plenární přednáška Kathariny Lorenz, působící v libabonských vědeckých institucích (IST, INESC-MN), se týkala implantačních a radiačních účinků u nitridových polovodičů III. skupiny. Nitridy skupiny III, jme-

novitě krystaly GaN, se proslavily zejména díky aplikacím ve světelných diodách a laserech pro polovodičové osvětlení i pro ukládání dat. Navíc jsou tyto širokopásmové polovodiče slibným materiálem pro elektroniku odolnou proti záření.

GaN krystaly jsou proto velmi perspektivní pro aplikace v nanooptoelektronice, užívané i v kosmickém prostoru ve formě nanovlákných senzorů ionizujícího záření, kde lze vytvářet a modifikovat optické vlastnosti GaN dalšími prvky. Pro tyto aplikace je často využívána iontová implantace, kterou však doprovází radiační poškození, což limituje aplikace GaN i ve formě nanostruktur. Akumulace defektů v GaN po implantaci iontů se střední energií byla zkoumána pomocí kombinace Rutherfordovy zpětné rozptylové spektrometrie/channelingu (RBS/C) a transmisní elektronové mikroskopie (TEM). Ve vesmíru budou materiály vystaveny intenzivním radiačním polím včetně významného toku těžkých energetických iontů s vysokým ionizačním potenciálem. Při experimentech se však ukázalo, že ani v tomto prostředí nejsou krystaly GaN zcela amortizovány, a jsou tak zachovány jejich detekční schopnosti. Kombinace experimentů se simulacemi prokázala, že důvodem této vysoké radiační odolnosti je silná rekrystalizace.

### České příspěvky

Z českých příspěvků konference je nutné zmínit zejména zvané přednášky, které byly dvě.

Marie Davidková z oddělení dozimetrie záření (ODZ) ÚJF nazvala svou zvanou přednášku *LET spektrometrie v radioterapii a ochraně proti záření*. Detektory stop v pevné fázi (TED) jsou použitelné nejen pro detekci částic, ale také jako spektrometry lineárního přenosu energie (LET). TED lze podle Davidkové s výhodou aplikovat ve výzkumu souvisejícím s pokročilými metodami radioterapie a/nebo s radiační ochranou. Pečlivé kalibrace TED na urychlovači těžkých iontů HIMAC v japonské Čibě umožnily využít tyto pasivní detektory pro mikrodozimetrická měření v terapeutických iontových svazcích k měření dávek absorbovaných v orgánech nacházejících se mimo cílový objem, ozařovaný aktivním skenovacím protonovým svazkem, nebo pro popis poruch radiačního pole v oko-



Marco Durante z darmstadtského GSI, vítěz Ceny IBA-Europhysics Prize za rok 2013

lí kyčelních či zubních kovových implantátů. Zmíňme, že aktivity ODZ v oblasti dozimetrie komplexních polí ionizujícího záření probíhají v mnoha směrech: zdůrazněme aktivity v již zmíněném pilíři APPA projektu FAIR-CZ a v projektu CRREAT. Těch se ve svých přednáškách dotklo vícero českých přednášejících konference, zejména Martin Kákona a Iva Ambrožová.

LET spektrometrii lze rovněž s výhodou použít k vyhodnocení dávkového ekvivalentu v komplexních expozičních podmínkách, například ve vesmíru. Kosmické záření se skládá z primárních vysokoenergetických galaktických a slunečních částic. Při průchodu stěnami kosmických lodí a těly astronautů se spektrum stává ještě komplexnějším v důsledku generování sekundárních částic fragmentací a jadernými interakcemi. K celkové radiační zátěži přispívají obě tyto složky. Měření pomocí TED byla součástí různých experimentálních kampaní na palubě Mezinárodní vesmírné stanice (ISS). Měření v ruském segmentu ISS v roce 2009 například ukázala, že zmíněné primární vysokoenergetické těžké ionty přispívají k absorbované dávce až 56 % a k dávkovému ekvivalentu až 50 %.

Jan Kučera se ve své přednášce věnoval nedávným úspěchům ÚJF v aplikacích jaderných analytických metod, konkrétněji neutronové a fotonové aktivační analýzy (NAA a PAA), analýzy iontovými svazky (IBA) a urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS) ve výzkumu kulturního dědictví v rámci infrastruktury CANAM. „Nedávné“ v tomto případě označuje horizont několika let, výzkum uvedených témat ovšem v různé formě pokračuje i nadále. Některé Kučerovy příklady podtrhly význam negativních výsledků: například zjištění, že slavný dánský astronom Tycho Brahe, žijící na sklonku života v rudolfinské Praze, nebyl – na základě rozboru vzorků jeho vlasů a kostí – otráven rtutí, jak se dříve spekulovalo. V tomto případě byly použity tři analytické metody: instrumentální NAA (INAA), radiochemická NAA (RNAA) a IBA. Negativní povahu mělo rovněž také zjištění pomocí INAA, že mezi chemickými a petrologickými vlastnostmi pískovcových kvádrů použitých ke stavbě khmerských chrámů v Angkoru v Kambodži a předpokládaným obdobím stavby jednotlivých chrámů neexistují přímé korelace. Mezi dalšími příklady Kučera zmínil rovněž radiokarbonové datování nejstarších pravěkých kreseb (epigrafů) na českém území, nalezených v Kateřinské jeskyni v Moravském krasu: jedna z nich pochází z eneolitu (zhruba 5000 let př. n. l.) a další tři z neolitu (zhruba 4300 let př. n. l.). Kučera rovněž očekává nárůst archeologických aplikací

AMS, využívajících zejména radiokarbonové datování, v souvislosti se zahájením provozu první české AMS laboratoře v Řeži v rámci projektu RAMSES.

Samá organizátorka konference Anna Macková se podílela na několika zde přednesených příspěvcích – šlo například o modifikaci struktury a optických vlastností ZnO nanopilířů dopovaných nanočásticemi zlata (Au) připravených iontovou implantací, přípravu mikrostruktur iontovou litografií v grafenoxidu pro senzorické aplikace a fotokatalýzu s možnou aplikací pro degradaci organických toxických látek.

## Závěrem

Mezi českými i zahraničními vystavovateli a sponzory konference byly jak významné firmy, spolupracující s výzkumnými ústavy na instrumentaci jaderných analytických metod, tak vědecké ústavy a infrastruktury. Šlo například o největší africké urychlovačové centrum NRF iThemba Labs z Jižní Afriky, společnost National Electrostatics Corp. z USA, zabývající se výstavbou urychlovačů a přidavných zařízení, společnosti Vakuum Servis, Specion, Pfeiffer Vacuum, Advacam a Vakuum Praha, či Přírodovědeckou fakultu Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, kde sídlí část národní infrastruktury NanoEnvi.

Mediální partner konference – basilejské nakladatelství MDPI – sponzoroval cenu o nejlepší plakátovou prezentaci Best Poster Award ANPC. Komise se nakonec rozhodla udělit ceny dvě: získaly ji doktorandky Diana Bachiller-Perea z pařížského CNRS a Eleni Ntemou z Uppsalské univerzity. MDPI stojí i za chystaným speciálním číslem časopisu Physics, který (v elektronické podobě) v open access režimu přinese vybrané přehledové články plenárních a zvaných řečníků. Vyjde rovněž konferenční sborník, a to v rámci European Physics Journal Web of Conferences počátkem příštího roku. O pořádání dalšího ročníku ANPC v roce 2024 se bude zřejmě ucházet Ruder Bosković Institute z chorvatského Záhřebu.

Konference byla úspěchem nejen ÚJF a dalších pořadatelských organizací, ale i AV ČR jako celku. K úspěchu pomohly také doprovodné aktivity, jako byla návštěva pražského historického centra, konferenční večere na Novotného lávce či profesionální catering, včetně výborné kávy. V neposlední řadě se opět ukázalo, že jedna z nejmodernějších pražských vysokoškolských budov je pro tento typ akcí mimořádně vhodná, a to dokonce i za částečného výukového provozu.

Podrobnější informace, včetně Knihy abstraktů a programu (v angličtině), mohou zájemci získat na stránkách konference [www.anpc2021.cz](http://www.anpc2021.cz).

(Foto v článku: autor a NPD EPS)



Z kuloárů: Chiara La Tessa v rozhovoru s Peterem Bauerem.