

Cesta k jádru věci



Akademie věd
České republiky



věda 71

kolem
nás
výzvy
a otázky

Ústav jaderné fyziky AV ČR v Řeži byl založen v roce 1955 v rámci tehdejší ČSAV jako základní československé pracoviště jaderných oborů. Název byl později změněn na Ústav jaderného výzkumu ČSAV. V roce 1972 byla jeho větší část, zabývající se převážně aplikovaným výzkumem, pod názvem Ústav jaderného výzkumu (www.ujv.cz) přiřazena pod tehdejší Československou komisi pro atomovou energii a později v roce 1992 privatizována. Menší část, zabývající se převážně základním výzkumem, zůstala součástí tehdejší Československé akademie věd pod názvem Ústav jaderné fyziky ČSAV. V roce 1993 se stal ÚJF jedním z ústavů Akademie věd České republiky (www.avcr.cz). V roce 1994 byl k ÚJF připojen bývalý Ústav dozimetrie záření AV ČR v Praze jako detašované pracoviště. V téže roce do ústavu přešla Laboratoř neutronové aktivizační analýzy z Českého ekologického ústavu. Od roku 2007 je ústav veřejnou výzkumnou institucí pod názvem Ústav jaderné fyziky AV ČR, v. v. i.

ÚJF provádí výzkum v široké oblasti experimentální a teoretické jaderné fyziky, včetně fyziky středních energií a fyziky těžkých iontů ležící na rozhraní mezi jadernou a subjadernou fyzikou.

Experimentálně jsou studovány zejména vlastnosti jaderné hmoty ve srážkách těžkých iontů při relativistických a ultrarelativistických energiích, jaderné reakce významné pro astrofyziku nebo jadernou energetiku, rozpady beta atomových jader včetně problému hmotnosti neutrin. Teorie jader je zaměřena na jadernou strukturu, hyperjádra, interakce elementárních částic s jádrem, mezonové stupně volnosti v jádrech. Jsou studovány vybrané problémy teoretické subjaderné fyziky a matematické fyziky. V ústavu je rozvíjen i aplikovaný výzkum, zejména v oblasti jaderných analytických metod, tedy provádění prvkové analýzy pomocí ozařování vzorků nabitými částicemi nebo neutrony. Rozptyl neutronů je převážně užíván ve fyzice pevných látek a materiálovém výzkumu. Široký komplex jaderných analytických metod užívajících svazky nabitých částic i neutronů je využíván v interdisciplinárním výzkumu, prováděném ve spolupráci s externími odborníky v chemii, ekologii, lékařství, archeologii a dalších oborech. Dozimetrie ionizujícího záření je orientována na měření ekologických a profesionálních expozic, metrologii a biofyzikální aspekty, jako je poškození DNK zářením. Studuje se fyzika perspektivních metod jaderné energetiky, například urychlovačem řízené transmutace jaderného odpadu. V ústavu probíhá výzkum a vývoj radiofarmak, zejména krátce žijících pozitronových zářičů pro emisní pozitronovou tomografii (PET). Samotná výroba radiofarmak byla od roku 2009 přesunuta do dceřiné společnosti RadioMedic s. r. o. (www.radiomedic.cz), jejímž jediným vlastníkem je ÚJF.



ÚJF AV ČR se nachází v řežském areálu
(zdroj: ÚJF AV ČR)

„Pronikání do světa atomů je možno srovnat s velkými plavbami kolem světa, plnými objevů, či směšnými výzkumy astronomů, pronikajících do hlubin světového prostoru.“
Niels Bohr

Úvodem

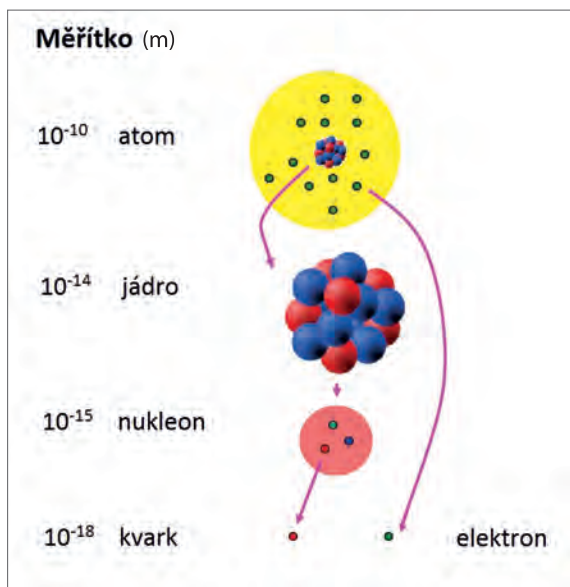
Člověk se již odpradáвна ptá, jak vznikl svět, z čeho se skládá, proč svítí Slunce a hvězdy. Na tyto a podobné otázky se snaží nalézt odpověď také jaderná a částicová fyzika. Zkoumá přitom vlastnosti hmoty nejen za běžných, pozemských podmínek, ale i za podmínek zcela odlišných. Takových, jaké jsou v nitru hvězd nebo nastanou při výbuchu supernovy, a dokonce i takových, jaké panovaly před miliardami let při vzniku samotného vesmíru. A právě těmito problémy se zabývá i Ústav jaderné fyziky (ÚJF) Akademie věd ČR, který se nachází v Řeži, v malebném údolí Vltavy nedaleko Prahy.

V této publikaci vás stručně seznámíme se současným pohledem na fyziku mikrosvěta a s některými konkrétními směry výzkumu v ÚJF. Popíšeme zajímavá experimentální zařízení a ukážeme, že vědecký výzkum v jaderné a částicové fyzice přináší také praktický užitek. Někdy i tam, kde bychom to vůbec nečekali: například v lékařství při stanovení diagnózy a léčení zhoubných nádorů, cévních a srdečních chorob, či při studiu činnosti lidského mozku. Jaderné metody jsou rovněž úspěšně využívány v archeologii, při studiu životního prostředí nebo při zkoumání vlastností nejrůznějších materiálů používaných v průmyslu.

Cesta do hlubin hmoty

Dávno předtím, než lidé vstoupili do první vědecké laboratoře a vydali se na dobrodružnou cestu do nitra hmoty, existovala domněnka, že všechno kolem nás se skládá z atomů. Dnes už to víme jistě. A co víc, atom je dále dělitelný. Skládá se z obalu tvořeného velmi lehkými elektrony a z kladně nabitého *jádra* ukrytého hluboko uvnitř obalu. Atomy drží pohromadě *elektromagnetická síla*. Elektronový obal zcela určuje chemické a fyzikální vlastnosti látek, atomová jádra se běžných proměn látek neúčastní. Co na nich tedy může být tak zajímavého?

Jádro zaujímá jen velmi malou část objemu atomu, a přesto je v něm obsažena téměř veškerá jeho hmota. Objekt s tak obrovskou hustotou dokáže vytvořit



Struktura hmoty: veškerá rozmanitost světa vyplývá z nespočetného počtu kombinací, ve kterých se spolu vážou atomy a molekuly. Atomy se skládají z elektronového obalu a atomového jádra obsahujícího dva druhy nukleonů, protony a neutrony. Nukleony jsou tvořeny kvarky a gluony (zdroj: ÚJF AV ČR)

a udržet pohromadě jinde neznámý a velmi intenzivní druh síly – *silná jaderná interakce*. V atomovém jádře se díky ní ukrývá obrovské množství energie. Proměny této energie psaly historii vesmíru: vedly k samotnému vzniku prvků a zdrojů energie, bez nichž bychom prostě nebyli. Slunce a ostatní hvězdy svítí právě proto, že v nich probíhají proměny jader. Naše Země i naše těla jsou vytvořeny z popela dávno mrtvých hvězd. Je velmi důležité, že všechny hvězdy nejsou stejné a že v nich probíhají různé jaderné reakce různou rychlostí. Těžké prvky vznikají ve hvězdách daleko hmotnějších než Slunce, které žije relativně krátce – miliony let. V lehčích hvězdách probíhají jaderné reakce mnohem pomaleji. Proto Slunce svítí už miliardy let – dost dlouho na to, aby na Zemi vznikl život a rozvinul se do dnešní podoby.

Některá atomová jádra jsou nestabilní, samovolně se přeměňují na jádra jiných prvků a emitují přitom neviditelné záření. Tomuto jevu se říká *radioaktivita*. Za některé jaderné rozpady (například *beta rozpad*) je zodpovědná další síla – *slabá jaderná interakce*. Při studiu slabých přeměn jader byly objeveny pozoruhodné, nesmírně lehké elektricky neutrální částice – *neutrino*. Ta interagují s hmotou tak slabě, že mohou volně, bez jediné srážky, proletět celou zeměkoulí.

V běžném povědomí je radioaktivita něco velice škodlivého, co by se mělo pokud možno úplně vyloučit a odstranit. Řada lidí si přitom neuvědomuje, že radioaktivitu odstranit nelze, že je přirozenou součástí životního prostředí, a že je dokonce pro život na Zemi nezbytná. Radioaktivní procesy například zahřívají zemské jádro a tím pomáhají udržovat sopečnou činnost a jiné geologické procesy, spoluvytvářející podmínky vhodné pro vznik a vývoj života.

Cesta dále do nitra atomového jádra odhalila, že je složeno z kladně nabitých protonů a neutrálních neutronů. Jádro každého chemického prvku má přesně daný počet protonů, který je v neutrálním atomu shodný s počtem elektronů. Jádra stejného prvku se však mohou lišit počtem neutronů. Mluvíme pak o různých *izotopech* a v případech, že jsou taková jádra nestabilní, o *radioizotopech*. Pokud o nich nehovoříme v souvislosti s konkrétním prvkem, mluvíme o *radionuklidech*. Studium těchto radionuklidů nám přináší nové poznatky o procesech v atomových jádrech a umožňuje nám poznávat minulé i současné dění v přírodě, získávat důležité informace o naší minulosti nebo sledovat současný vliv člověka na přírodu.

Protony a neutrony drží v jádře pohromadě již zmíněná silná jaderná síla, zprostředkovaná dalším druhem částic – *mezony*. Protonům, neutronům, mezonům a všem dalším částicím, na které působí silná jaderná síla, se souhrnně říká *hadrony*. Zkoumání vlastností hadronů a jiných částic se věnuje *částicová fyzika*, obor příbuzný a blízký jaderné fyzice. Chování mikroskopických částic se řídí obecnějšími zákony, než jsou známé zákony klasické fyziky. Pro popis mikrosvěta používáme *kvantovou teorii*.

Kvantové vlastnosti mikrosvěta jsou velmi nezvyklé. Objekt se v některých situacích chová jako klasická částice, jindy jako vlna. Není možné zároveň určit jeho přesnou polohu i rychlost. V kvantovém světě proto nemůžeme sledovat pohyb částice tak, jak jsme zvyklí z klasické fyziky. Smysl má pouze určit pravděpodobnost, s jakou se částice (nebo složitější systém, ve kterém se částice rodí a zanikají) dostane do některého ze všech možných stavů.

Částice dělíme na ty, ze kterých se skládá hmota ve všech svých rozmanitých podobách – elektrony, protony, neutrony, neutrino – a na ty, které přenášejí různé síly: fotony (přenášejí elektromagnetickou sílu), mezony (přenášejí silnou jadernou sílu mezi hadrony) a velmi těžké částice W^+ , W^- a Z^0 , přenášející slabou jadernou interakci. Částice hmoty a interakcí se liší i z hlediska statistických vlastností, tj. chováním souborů částic stejného typu. Částice hmoty jsou *fermiony*, jsou „nesnášenlivé“: v jednom stavu se nemohou vyskytovat dva totožné fermiony. Částice interakcí jsou *bosony*, těch se může v jednom stavu vyskytovat neomezený počet.

Kvantová a relativistická fyzika předpověděla také další typickou vlastnost kvantových systémů: kdykoli může systém odevzdat část své volné energie, přeměňuje se tato energie v další částice. Energie E potřebná k vytvoření nové částice o dané hmotnosti m je dána známým Einsteinovým vztahem $E = mc^2$. Pokud je takové množství energie k dispozici – například při srážce dvou částic s dostatečně velkou kinetickou energií – a vznik částice nenaruší některý ze zákonů zachování (například zákon zachování elektrického náboje), nová částice se s nenulovou pravděpodobností narodí.

Žádnou z částic mikrosvěta nemůžeme pozorovat přímo, neboť jsou nesmírně malé. Pokud ale připravíme speciální podmínky (např. prostředí, které je blízko narušení rovnováhy), můžeme jejich pohyb zaznamenat (*detekovat*) a změřit jejich energii, hybnost, hmotnost, náboj a další veličiny. To, že dokážeme zviditelnit tak nepatrné objekty, se dá považovat téměř za zázrak.

Mnoho částic bylo objeveno při studiu radioaktivních přeměn a kosmického záření. Daleko více jich však bylo připraveno uměle ve srážkách částic urychlených na velmi vysoké rychlosti. Zvyšováním energie srážek tak vědci objevili celou řadu nových částic, často s nečekanými vlastnostmi. Některé z nich proto nazvali *podiv-*



Nad matematickými problémy se nejlépe přemýšlí s křídou u tabule
(foto: Aleš Cieplý)

nými či *půvabnými*. Jiné mají všechny vlastnosti elektronů, ale jsou mnohem těžší. A ve výčtu bychom mohli pokračovat.

Z kvantové fyziky vyplývá, že zvyšováním energie srážek můžeme zkoumat mikrosvět se stále větším rozlišením. A tak už delší dobu víme, že ani hadrony nejsou základními stavebními bloky – nejsou, na rozdíl od elektronů, pravými „elementárními“ částicemi. Hadrony, tedy i protony a neutrony, se skládají z částic, které se našim dnešním experimentům jeví jako elementární – z *kvarků* a antikvarků. Silnou interakci mezi kvarky přenášejí gluony (z anglického *glue* = lepidlo). Silnou i slabou interakci mezi kvarky popisuje elegantní jednoduchá soustava rovnic. Slabou sílu se dokonce podařilo sjednotit (t.j. popsat společnou sadou rovnic) s elektromagnetickou silou. Avšak řešení rovnic pro silnou interakci umíme nalézt jen za velmi speciálních podmínek. Přes značný pokrok tzv. výpočtů na mříži v posledních letech zatím neumíme zcela uspokojivě odvodit jaderné síly pro hadrony ze silného působení mezi kvarky. Kvarky a gluony navíc nelze izolovat a urychlovat, jsou v hadronech uvězněny. V reakcích částic s velmi vysokými energiemi – například v rozptylu elektronů nebo neutrin na protonech – nicméně dokážeme strukturu hadronů a vlastnosti kvarků a gluonů studovat, částicové fyzice se proto často říká *fyzika vysokých energií*.

Současnou teorii struktury hmoty shrnuje *standardní model*. Podle něj jsou základními částicemi hmoty zmíněné kvarky a *leptony*, jež na rozdíl od kvarků

neinteragují silnou interakcí. Patří k nim nabitý elektron i jeho těžší kolegové a jen slabě interagující neutrino. Tři základní síly, které se projevují v mikrosvětě – silná, elektromagnetická a slabá interakce – jsou zprostředkovány výměnou bosonů – gluonů, fotonů a tří velmi těžkých bosonů slabé interakce W^+ , W^- a Z^0 . Pro společný popis elektromagnetické a slabé interakce je potřeba vysvětlit obrovský rozdíl mezi hmotnostmi fotonu a slabých bosonů W^+ , W^- a Z^0 . Standardní model ho vysvětluje pomocí takzvaného Higgsova mechanismu, který předpověděl existenci *Higgsova bosonu*. Nedávným obrovským úspěchem fyziky vysokých energií, který završil prověřování předpovědi standardního modelu, je experimentální objev této částice.

Jaderná fyzika dnes zkoumá chování a proměny hadronů v jaderném prostředí a pokouší se je vztáhnout ke známým zákonům pro kvarky a gluony. Zpřesňuje složitý popis hadronových interakcí. Zatím je ale neznáme natolik, abychom dokázali beze zbytku popsat i ta nejjednodušší jádra. Neznáme ani přesně všechna jádra, která mohou existovat, a neznáme vlastnosti mnoha jaderných přeměn. Na výsledky tohoto bádání přitom netrpělivě čekají také astrofyzici a kosmologové.

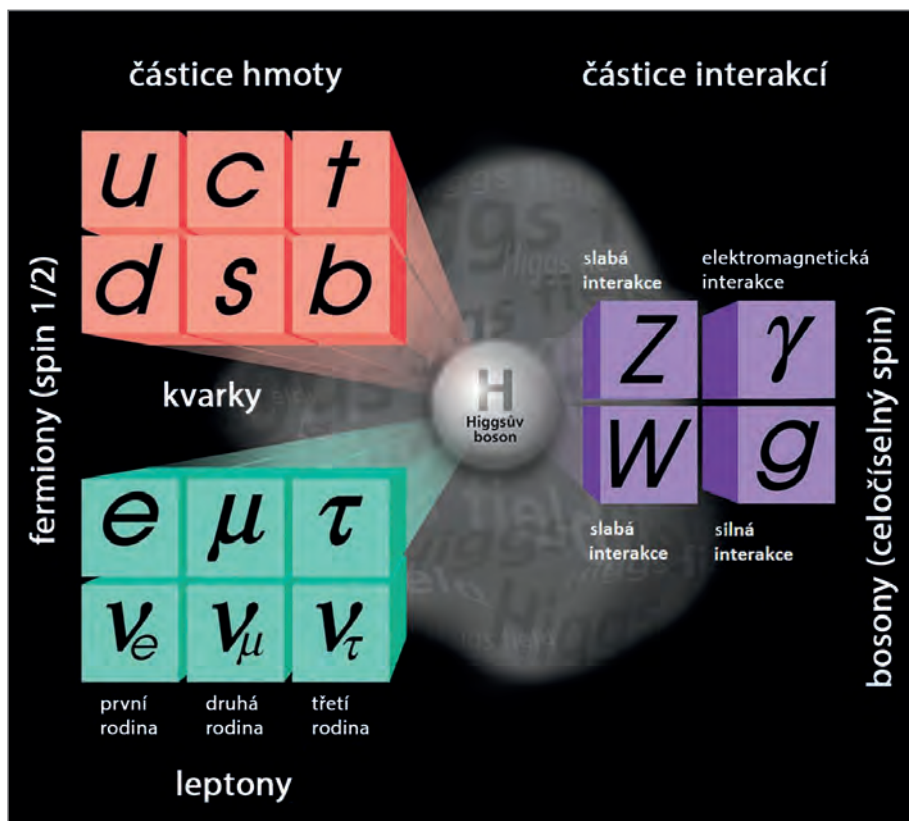
Rozmanitost jader a jejich přeměn umožňuje zkoumat některé vlastnosti částic, které by jinak byly pro částicovou fyziku jen obtížně přístupné. Z rozpadu některých jader se určují například vlastnosti neutrin, některé proměny podivných částic probíhají jen v jaderném prostředí. Jaderná fyzika dále zkoumá jadernou hmotu v extrémních podmínkách: za velmi vysokých hustot a energií, dosažených při srážkách velmi rychlých těžkých jader. Za těchto podmínek kvarky a gluony opouští své hadronové klece a existují v „exotickém“ stavu hmoty, kterému se říká *kvark-gluonové plazma*. Jeho existence byla předpovězena teoreticky. Experimentální potvrzení kvark-gluonového plazmatu je jedním z důležitých úspěchů současné jaderné fyziky, zkoumání jeho vlastností je pak jejím významným úkolem.

Hlavním cílem výzkumů je odhalit základní fyzikální zákony a stavební kameny našeho vesmíru. Řada pozorování a úvah naznačuje existenci ještě obecnějšího popisu hmoty, než je popis na úrovni standardního modelu. Některé teoretické studie předpovídají sjednocení popisu *všech* známých sil, tedy i gravitace. Dosud známé částice jsou možná projevem zatím hypotetických objektů – *strun*. Rozměry těchto objektů jsou o mnoho řádů menší, než je rozlišení dnešních experimentů, a proto zřejmě nebudou v dohledné době dostupné obvyklými metodami. Dokonalé porozumění částicové fyzice při dnešních energiích však může poskytnout nepřímý důkaz existence strun a odhalit alespoň některé z jejich vlastností.

Stabilita hmoty a matematická fyzika

Proč je náš svět stabilní? Tato otázka vede k mnohem hlubším úvahám a dalekosáhlejším důsledkům, než by se na první pohled mohlo zdát.

V úvodu jsme se dočetli, že se hmota skládá z atomů a jednotlivý atom vypadá jako malý planetární systém. Roli Slunce v něm hraje těžké jádro, složené z neutronů a kladně nabitých protonů, kolem něhož obíhají lehké, záporně nabitě elektrony, roli gravitace potom obstarává elektromagnetická interakce. Podle klasické fyziky by však měl takový systém během zlomku vteřiny zkolabovat. Nabitá částice pohy-



Standardní model obsahuje částice hmoty (fermiony) a částice interakcí (bosony)
(zdroj: CERN, Fermilab, úprava ÚJF AV ČR)

bující se po zakřivené dráze totiž vyzařuje energii a v důsledku toho se elektron po spirální trajektorii zřítí na jádro.

Tento zásadní nesouhlas mezi teorií a pozorováním vedl společně s dalšími paradoxy na počátku minulého století ke krizi klasické fyziky a nástupu kvantové mechaniky, jež planetární model atomu obhájila konceptem vlnové povahy elektronů. Funguje zde takzvaný princip neurčitosti, podle něhož se vlno-částice elektron může přiblížit do větší blízkosti jádra jen za cenu navýšení kinetické energie. Protože tato energie není běžně k dispozici, udržuje se atomový systém v rovnováze.

Matematicky lze princip neurčitosti zapsat jako jistou funkcionální nerovnost mezi kinetickou a potenciální energií. Poněvadž tato nerovnost neplatí na přímce a v rovině, dostáváme vysvětlení pro nutnost alespoň třírozměrnosti stabilního světa. Stejnou nerovnost však lze použít pro vysvětlení mnoha dalších fyzikálních procesů naprosto odlišných od kvantové mechaniky, např. rozdílného chová-

ní náhodně se pohybujících pylových zrněk při Brownově pohybu v závislosti na dimenzi prostoru.

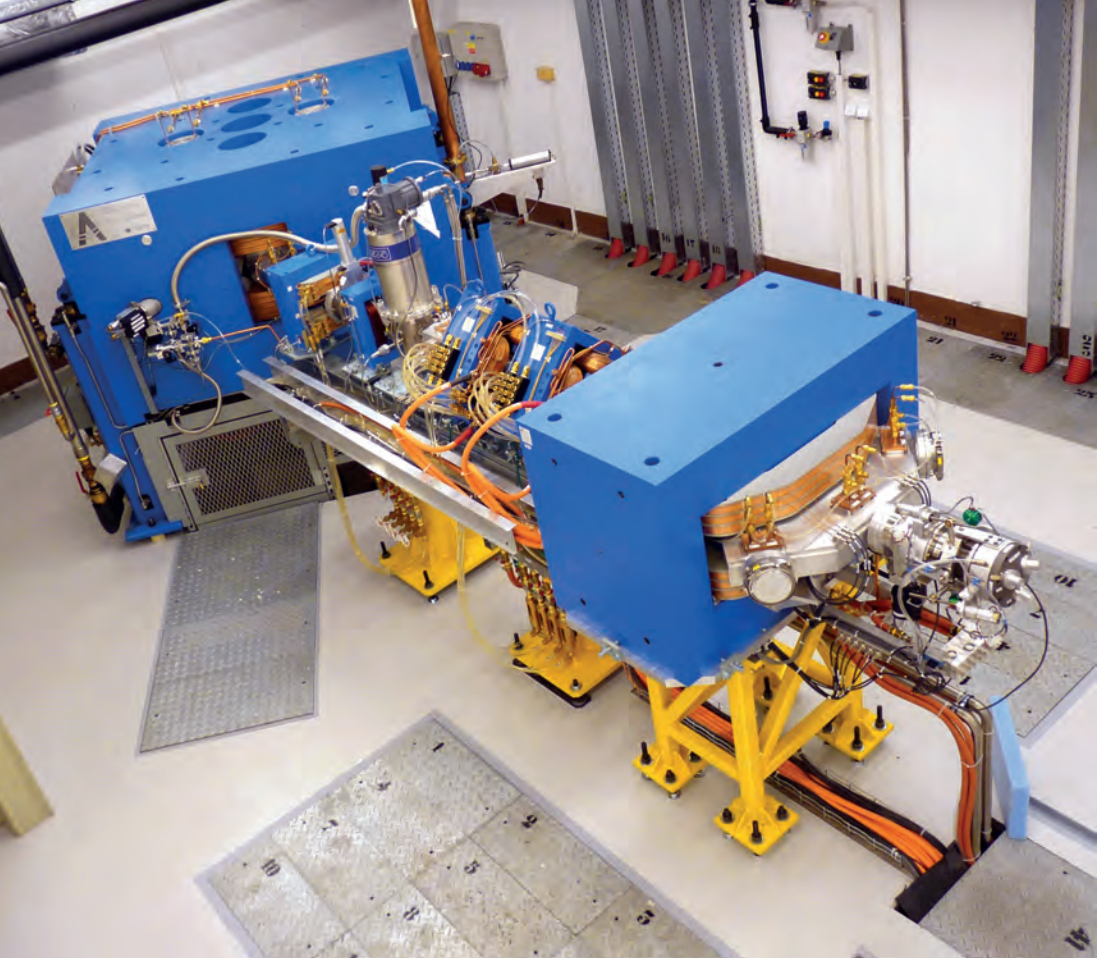
Popis rozličných fyzikálních jevů pomocí jednotného matematického aparátu je předmětem zkoumání matematické fyziky. V našem ústavu tímto způsobem studujeme například chování kvantových částic v nanostrukturách, náhodný pohyb na tzv. zakřivených varietách (zakřivených topologických prostorech) a efekt neviditelnosti v metamateriálech, což jsou kompozitní materiály s velmi exotickými elektromagnetickými vlastnostmi.

Jak se urychlují nabitě částice

Při zkoumání mikrosvěta se nejčastěji využívají srážky částic nebo atomových jader urychlených na urychlovačích. Svazek částic se namíří na pevný terčik nebo se srazí s jiným svazkem. V nejjednodušším případě se částice svazku pouze odchýlí. Při vyšších energiích je však mnohem pravděpodobnější, že při srážce vzniknou další částice. Jejich počet velmi rychle roste s energií srážky. Fyzikové se snaží co nejvíce vzniklých částic detekovat. To ale není jednoduché, zejména pokud se jedná o částice elektricky neutrální. Pečlivou analýzou mnoha srážek zjišťujeme, jaké jsou vlastnosti srážejících se částic nebo jader a jakými zákonitostmi se řídí jejich chování. Místa srážek částic jsou proto obklopena složitými detektory, spojenými s rychlými počítačovými systémy, které ukládají a zpracovávají naměřená data. Navržení a stavba těchto detektorových a výpočetních systémů jsou dnes stejně náročné jako stavba samotného urychlovače.

Jak takový urychlovač pracuje? K urychlování se využívá elektrické či elektromagnetické pole. Proto mohou být urychlovány pouze nabitě částice: například záporně nabitě elektrony, kladně protony nebo nabitě ionty. Součástí urychlovače iontů je iontový zdroj, který z neutrálních atomů uvolní část elektronů a udělá z nich kladně nabitě ionty. V nejjednodušším, lineárním urychlovači jsou částice urychlovány v potenciálovém rozdílu až několika milionů voltů po rovné dráze ve vakuové urychlovací trubici. V našem ústavu jsme měli jeden takový menší urychlovač tzv. Van de Graaffova typu. Urychlovaly se v něm lehké ionty a využíval se hlavně pro zkoumání vlastností materiálů. Nedávno dosloužil a byl instalován v expozici Národního technického muzea. Jeho štafetu převzal nový lineární urychlovač tandemtron, který dokáže urychlovat širokou škálu iontů od těch lehkých až po nejtěžší. Využívá se při studiu vlastností různých materiálů i pro jejich modifikace, v ekologii, archeologii i dalších oborech.

V kruhovém urychlovači, jakým je cyklotron, jsou částice udržovány magnetickým polem na kruhové dráze. Při svém pohybu opakovaně procházejí mezi urychlovacími elektrodami, kde jsou vždy trochu popohnány, čímž se zvýší jejich energie. V ÚJF pracují nyní tři kruhové urychlovače: malý mikrotron (urychlovač elektronů) a dva cyklotrony. První z nich U-120M urychluje lehká jádra (izotopy vodíku a helia). Ten se využívá pro základní výzkum v astrofyzice, k vývoji a produkci radioizotopů pro medicínu a provoz neutronových zdrojů. Druhý cyklotron TR-24, který má velmi intenzivní svazek protonů, byl instalován v roce 2015. Slouží hlavně při vývoji nových radiofarmak a jako součást neutronových zdrojů pro studium interakcí důležitých pro pokročilé jaderné technologie.



Nejnovějším urychlovačem našeho ústavu je cyklotron TR-24
(foto: Ondřej Lukáš)

Jak získává Slunce energii a jak vznikají chemické prvky

Než se ve vesmíru rozzářily první hvězdy, existovaly pouze ty nejjednodušší prvky, hlavně vodík a helium. Ve hvězdách se jádra lehkých prvků slučují na jádra těžší a přitom se uvolňuje energie. Tyto jaderné reakce jsou tak nejen zdrojem energie, ale díky nim vznikly a stále vznikají chemické prvky, ze kterých se skládají planety i živé organismy. Čím je hvězda těžší, tím je její nitro žhavější a tím těžší prvky postupně vznikají. Nejtěžší prvky, které mohou vzniknout slučováním lehčích jader v nitru hvězd, jsou ze skupiny železa. Hlavním zdrojem téměř všech chemických prvků těžších než železo jsou výbuchy supernov.

Jaderné reakce, při kterých vznikají prvky, jsou velice rozmanité. Probíhají přes řadu stabilních i nestabilních jader, často s velmi malou pravděpodobností. Typické energie jader ve hvězdách jsou přitom velmi malé. Proto jsou některé jaderné procesy v nitru hvězd tak pomalé, že je nelze v laboratorii zkoumat přímo. Pokud ale srážíme jádra s trochu vyšší energií, reakce probíhají podstatně rychleji a jsme schopni je měřit. Z naměřeného průběhu reakcí pak dokážeme odhadnout jejich průběh v nitru hvězd.

Další možností je metoda „trojského koně“. Využívá toho, že celý děj lze rozdělit na dva nezávislé procesy: proniknutí projektilu bariérou, vytvářenou elektrickým polem jádra terče, a samotnou reakci částice s jádrem, vyvolanou silnou jadernou interakcí. Právě pronikání elektrickou bariérou extrémně snižuje pravděpodobnost reakce při nízkých energiích projektilu. Tento problém se dá vyřešit využitím projektilu těžšího, než je hmotnost iontu, jehož reakci chceme zkoumat. V první fázi projektil pronikne s relativně vysokou energií, a tedy i pravděpodobností přes elektrickou bariéru jádra a přitom se rozdělí na dva fragmenty. Jeden s malou energií reaguje silnou interakcí s jádrem, druhý odletí pryč a odnese většinu původní energie urychleného projektilu. Jeho detekci a pomocí zákonů zachování energie a hybnosti zjistíme, kolik energie zůstalo prvnímu fragmentu. „Trojský kůň“ projektilu s vysokou energií se tak dostane za hradby tvořené elektrickým odpuzováním jádra terče a přenesení tam zkoumaný fragment. Fragment s nízkou energií, oddělený po průniku projektilu elektrickou bariérou, pak má velkou pravděpodobnost reakce s jádrem terče. Elektrické síly a průnik elektrickou bariérou jádra dokážeme velice dobře popsat. Experiment tak umožňuje získat informaci o silné interakci částice s jádrem při nízké energii. Po započtení pravděpodobnosti průchodu elektrickou bariérou tak získáme popis reakcí, které probíhají s relativně nízkou energií v nitru hvězd. Právě takové výzkumy reakcí ve hvězdách se provádí na našem cyklotronu U-120M.

„Malý třesk“, zkoumání jaderné hmoty i vzniku exotických antijader

Krátce po vzniku vesmíru panovaly velmi vysoké teploty a hustoty. Tehdy se určovaly základní vlastnosti našeho světa, a proto se snažíme co nejlépe pochopit vlastnosti hmoty i za podobně extrémních podmínek. Bez těchto znalostí neumíme uspokojivě popsat ani průběh výbuchu supernovy.

Srazíme-li jádra těžkých prvků urychlená na rychlosti blízké rychlosti světla, jejich hmota se silně stlačí a ohřeje. Na velice krátký okamžik (10^{-22} sekundy) tak získáme alespoň malé množství velmi horké jaderné hmoty (10^{12} stupňů Celsia, tedy sto tisíckrát teplejší než v nitru Slunce), která je navíc velmi hustá (zrnko o objemu 1 mm^3 by vážilo miliony tun!). Přestože se jaderná hmota nachází v takovém stavu jen nepatrnou chvíli, fyzikové dokáží studovat její vlastnosti. Pomáhají jim v tom částice, které v místě srážky vznikají. Jejich druh, počet a energie závisí na teplotě, hustotě a dalších vlastnostech prostředí, odkud přilétají.

Jaderná hmota se podobně jako voda může nacházet v různých skupenstvích. Normální jádro se podobá kapce a jeho hmota má vlastnosti kapaliny. Jestliže se



Nová vakuová komora pro studium reakcí na neutronových generátorech oddělení jaderných reakcí
(foto: Ondřej Lukáš)

při srážce dostatečně zahřeje, přejde do stavu s vlastnostmi blízkými plynu. Tento stav hmoty, nazývaný *hadronový plyn*, se zkoumá v několika světových laboratořích. V horkém a hustém prostředí hadronového plynu se mohou výrazně měnit základní vlastnosti částic, například jejich hmotnosti či doby života. Fyzikové z našeho ústavu studují tyto jevy na zařízení HADES v GSI Darmstadt v Německu.

Pokud urychlíme těžká jádra na co nejvyšší energie, získáme úplně nové skupenství jaderné hmoty. V něm jsou kvarky uvolněny z hadronů a navíc se rodí velké množství gluonů, vzniká kvark-gluonové plazma. Z experimentů se podařilo vyvodit, že kvark-gluonové plazma se chová jako kapalina, která má schopnost velmi efektivně brzdit vysoce energetické kvarky a gluony, které jí pronikají. Tyto procesy zkoumají vědci z našeho ústavu v rámci spolupráce na experimentech STAR na urychlovači RHIC v laboratoři BNL (USA) a ALICE na urychlovači LHC v laboratoři CERN ve Švýcarsku.

Kvarky a gluony z kvark-gluonového plazmatu se při poklesu teploty pod určitou hodnotu pospojují zpět do obrovského množství hadronů, ty pak mezi sebou spočátku silně interagují, a to až do okamžiku tzv. vymrznutí, kdy už jsou částice tvořící hmotu téměř volné. Nerušeně letí k detektorům obklopujícím místo srážky, kde jsou registrovány.

Díky veliké hustotě nejružnějších hadronů v okamžiku těsně před vymrznutím se v koncovém stavu reakce můžeme setkat i s lehkými antijádry. Antiprotony a antineutrony, které vznikají s velmi vysokou pravděpodobností, se mohou spojit a vytvořit antideuteron ${}^2\overline{\text{H}}$, vázaný stav antiprotonu a antineutronu. Vzácně pak dochází i ke vzniku těžšího antitritonu ${}^3\overline{\text{H}}$ a antihelia ${}^3\overline{\text{He}}$. Velkým úspěchem experimentů STAR a ALICE pak bylo pozorování vzniku několika případů antihelia ${}^4\overline{\text{He}}$. Podotkneme, že tak těžké antijádro nebylo předtím nikdy pozorováno, a to ani v kosmickém záření. Neznáme žádné jádro s pěti nukleony, které by existovalo tak dlouho, aby doletělo až k detektorům. Lze tak očekávat, že by jako další v řadě mělo vznikat až antilithium ${}^6\overline{\text{Li}}$. Jeho objev je ovšem v současné době zřejmě mimo naše experimentální možnosti, protože pravděpodobnost vytvoření těžšího antijádra klesá zhruba třitisíckrát s každým dalším antinukleonem. Pokud máme k dnešnímu dni dokumentováno pouze několik případů syntézy antihelia ${}^4\overline{\text{He}}$, pak vznik a úspěšná detekce antilithia ${}^6\overline{\text{Li}}$ jsou ještě 9 000 000× méně pravděpodobné, nikoliv však vyloučené.

Návrh, stavba a testování nových detektorů

Při studiu mikrosvěta hrají nezastupitelnou roli detektory částic: poskytují nám jedinečné informace o tom, co se ve sledovaných reakcích vlastně děje. Pro registraci částic se využívá řada metod detekce založených na různých fyzikálních principech. Ve fyzice vysokých energií potřebujeme zachytit co nejvíce částic a změřit jejich vlastnosti, proto se většinou kombinuje několik způsobů detekce částic.

Naši pracovníci se v rámci řady mezinárodních spoluprací podílejí na vývoji a testování různých detektorů. Jedním z nich je nový vnitřní dráhový detektor experimentu ALICE v laboratoři CERN. Detektor musí proměřit dráhy až několika tisíc částic produkovaných v jedné srážce, a to s přesností až 5 μm (5 tisícín milimetru).

Pro zajímavost uvedme několik čísel, která poukazují na náročnost projektu a pokročilý stav moderních technologií. Vnitřní dráhový detektor je sestaven ze sedmi soustředných vrstev křemíkových čipů, ne nepodobných čipům, které se používají v běžném digitálním fotoaparátu. Oproti nim však mají řádově menší tloušťku, cca 50 μm , což už je srovnatelné s průměrem lidského vlasu. Jsou tak tenké proto, aby vlastní registrace polohy částice v každé vrstvě ovlivnila měřenou trajektorii co nejméně. Celková plocha pokrytá čipy je 10 m^2 a celkem je na ní rozmístěno okolo $12 \cdot 10^9$ pixelů (buněk). Každý pixel má rozměry 30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ a kromě citlivé části určené pro vlastní detekci částic obsahuje také veškerou elektroniku potřebnou ke čtení signálu a jeho dalšímu zpracování. Dodejme ještě, že nejvnitřnější vrstva detektoru se bude nacházet pouhých 2,3 cm od intenzivních svazků částic v urychlovači LHC.

Dříve, než se takový detektor sestaví a instaluje na konečné místo v srdci experimentu ALICE, je potřeba otestovat, zda zvolené technologie a materiály vydrží předpokládanou radiační zátěž po plánovanou dobu jeho fungování. Nabitě částice, které bude dráhový detektor zaznamenávat, jej totiž zároveň postupně poškozuji.



Naši Ph.D. studenti ukazují jemnou strukturu dráhových detektorů i středoškolákům, kteří k nám přicházejí na exkurze (zdroj: ÚJF AV ČR)

Jejich vlivem dochází např. ke změně vlastností použitého materiálu či k přepisu informace v pamětech. Jakákoliv výměna části detektoru vyžaduje obvykle několikaměsíční odstávku, což není možné během běžného provozu urychlovače LHC připustit. Použité komponenty tak musí být spolehlivé i v podmínkách působení intenzivního toku ionizujícího záření.

V ÚJF testujeme citlivost jednotlivých součástí budoucího detektoru na radiaci poškození. Používáme k tomu protonový svazek o maximální kinetické energii 34 MeV, dodávaný cyklotronem U-120M. Na rozdíl od záření gama či elektronů vyvolávají protony v materiálu kromě primární či sekundární ionizace také jaderné reakce. Dalším využívaným zařízením jsou neutronové zdroje, ve kterých se v reakcích svazku protonů s jádry terče produkují intenzivní toky neutronů. K ozařování neutrony se stále častěji využívá i náš nový cyklotron TR-24. Umožňuje nám tak studovat průběh poškození detektoru během jeho provozu a zjistit, zda neovlivní jeho detekční schopnosti.

Nakonec zmiňme, že radiační odolnost je třeba testovat i u přístrojů odesílaných do vesmírného prostoru a vystavených účinkům kosmického záření.

Váha pro nejlehčí částici hmoty

Ve třicátých letech minulého století předpověděl Wolfgang Pauli existenci neutrina ze zákona zachování energie při beta rozpadu radioaktivních jader. Trvalo pak čtvrt století, než se neutrina podařilo poprvé zachytit, i když vznikají ve velkém množství v celé řadě procesů. Neutrina totiž se svým okolím téměř vůbec neinteragují. Každou sekundu prolétá čtverečním centimetrem zemského povrchu téměř 10^{11} neutrin pocházejících ze Slunce, za lidský život se jich však v těle zachytí stěží několik. Přes nepatrnou pravděpodobnost jejich zachycení se podařilo komplikovanými metodami prokázat, že existují dokonce tři druhy neutrin. Ještě dnes však neutrina obklopuje řada záhad.

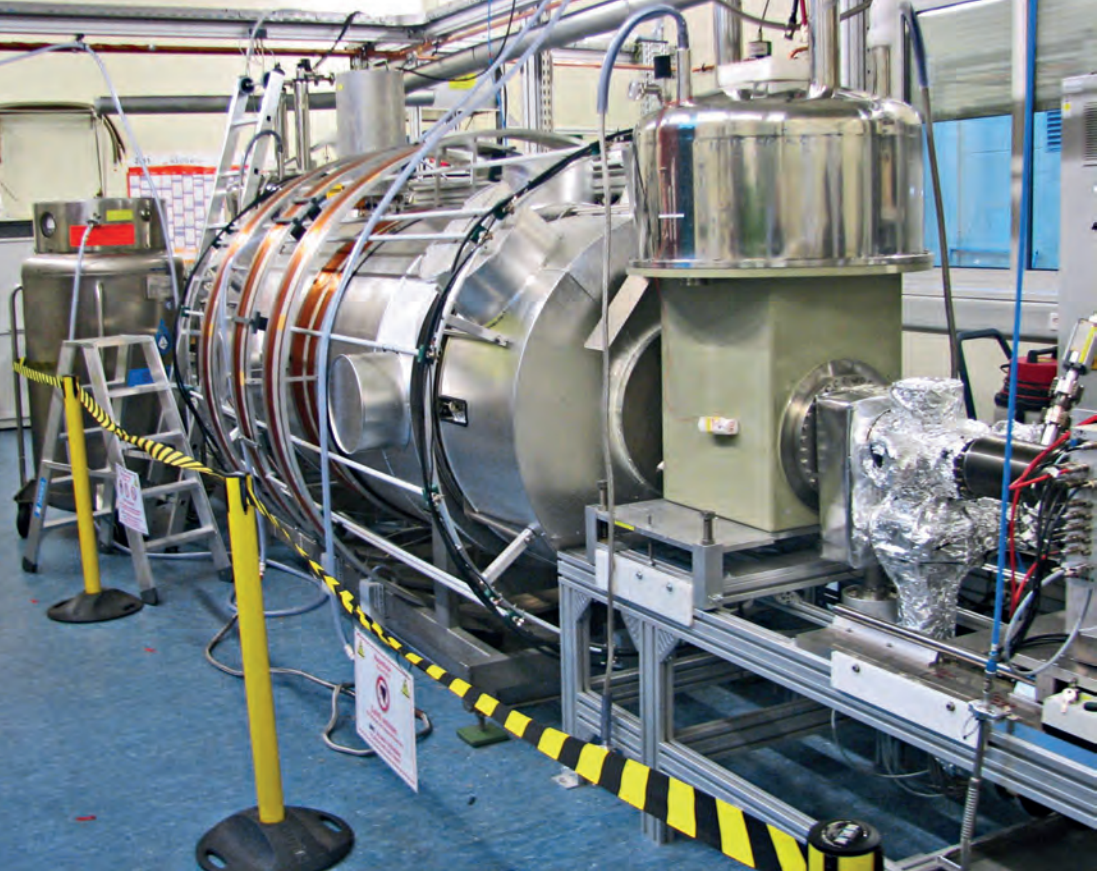
V nedávné době byly pozorovány přeměny jednoho druhu neutrin na jiný, tzv. *neutrinové oscilace*. Z kvantové fyziky plyne, že k těmto oscilacím může docházet jedině tehdy, když mají alespoň dva ze tří zmíněných druhů neutrin nenulovou a rozdílnou hmotnost. Hmotnost neutrina je nesmírně malá: nejvýše čtyři miliontiny hmotnosti druhého nejlehčího fermionu – elektronu. Pro teorie elementárních částic či pro kosmologické a astrofyzikální úvahy je i tak nesmírně důležité neutrina „zvážit“.

Hmotnost neutrina lze určit z energie elektronů vznikajících při beta rozpadu radioaktivních jader, kdy se neutron přemění na proton a z jádra vyletí elektron a neutrino (přesněji antineutrino). Energie, která se při rozpadu uvolní, se rozdělí mezi jádro, elektron a neutrino. Nejvyšší možná energie elektronu je pak menší o energii neutrina v klidu, která podle vztahu $E = mc^2$ souvisí s hmotností neutrina. Stejně jako W. Pauli na počátku historie neutrin tak využijeme „ztrácející se“ energii. On z ní předpověděl existenci neutrina, zatímco my se pokoušíme určit jeho hmotnost.

K určení hmotnosti neutrina lze využít elektronový spektrometr, který velmi přesně měří energii elektronů. Pro určení nepatrné hmotnosti neutrina musí být tento spektrometr obrovský. Navíc musíme znát všechny, i ty nejmenší efekty, které ovlivňují přesnost měření. Takový spektrometr o průměru 10 m a délce 23 m byl pod názvem KATRIN dokončen v mezinárodní spolupráci v Karlsruhe (Německo). Fyzikové z ÚJF, kteří se projektu účastní, uplatňují bohaté zkušenosti z práce na daleko menším, ale velice přesném spektrometru ESA. Na spektrometru ESA se prováděla řada metodických měření, kterými se dláždila cesta pro jeho mohutnějšího bratra. Nyní už spektrometr KATRIN měří a česká skupina se stará o jeden z nejdůležitějších úkolů při jeho provozu: kontrolu stability vysokého napětí s přesností několika miliontin jeho hodnoty. Bez jejího co nejkvalitnějšího zajištění by se tak jemné efekty, jako je vliv hmotnosti neutrina na koncovou část spektra elektronů v rozpadu beta, měřit nedaly.

Aktivační analýza v roli detektiva

V detektivním příběhu hraje často hlavní roli jediná nepatrná stopa, která nakonec vede k rozluštění případu. Při aktivační analýze se také hledají ty nejnepatrnější



Monitorovací spektrometr, který je součástí experimentu KATRIN, umožňuje průběžnou kontrolu stability vysokého analyzujícího napětí pomocí našich zdrojů elektronů (zdroj: KATRIN)

stopy – droboučké příměsi jednotlivých chemických prvků. Stejně jako jsou pro každého člověka charakteristické otisky prstů, vyzařuje každý radioaktivní prvek pro prvek charakteristické rentgenové nebo gama záření. Jak se toho dá využít?

Představme si, že potřebujeme zjistit, zda a v jakém množství se v nějakém předmětu, například uměleckém exponátu, nachází určitý prvek. Mohli bychom použít chemické metody, ale to bychom z něj museli odebrat poměrně velký vzorek. Jaderná fyzika nám umožňuje nalézt odpověď daleko šetrněji pomocí tzv. aktivací analýzy: nepatrné množství vzorku ozáříme neutrony. Velmi malá část stabilních atomových jader se reakcemi s neutrony přemění na jádra radioaktivní. Jimi vyzařené gama záření zachycené citlivým detektorem nám pak dá zprávu o tom, jaké izotopy chemických prvků a v jakém množství jsou ve vzorku obsaženy. Druhou ještě šetrnější možností je ozářit předmět rentgenovým zářením, které vyrazí z atomového obalu elektrony. Uvolněná místa se zaplní jinými elektrony z vyšších

atomových slupek a přitom se opět vyzáří charakteristické rentgenové záření daného prvku. V tomto případě nemusíme odebrat žádné vzorky a předmět můžeme zkoumat bez sebemenšího poškození. Až se obraz nebo socha znovu vystaví v muzeu, žádné záření už samozřejmě emitovat nebude.

Příkladem vskutku detektivního případu, který byl úspěšně vyřešen pomocí jaderných metod, je zkoumání obsahu rtuti ve vlasech a vousech Tychona Braha. Tento význačný astronom, astrolog a alchymista dánského původu pracoval na dvoře císaře Rudolfa II. v Praze a zde také roku 1601 po hostině u Petra Voka zemřel. Je pochován v Týnském chrámu. Hlavně mezi dánskými historiky se objevovaly pověsti, že mohl být otráven rtutí. V roce 2010 proto byla provedena exhumace a průzkum jeho ostatků. Bylo tak možné získat vzorky vlasů, vousů i kostí. Neutronová aktivační analýza prokázala, že obsahují minimální množství rtuti: Tycho Brahe tedy rtutí otráven nebyl.

Podarilo se také vyřešit, z jakého materiálu byla náhrada nosu, kterou Tycho Brahe využíval. O nos přišel v mládí při souboji a nosil „protézu“, která se však v jeho hrobě nenašla. Z průzkumu stopových obsahů prvků v kostech v okolí nosu se zjistilo, že kovová náhrada nebyla vyrobena z nějaké slitiny zlata, ale z obyčejné mosazi.

Neutron ve službách člověka

Neutrony štěpí některá těžká atomová jádra (např. uranu) na dvě lehčí. Přitom se uvolňuje energie a navíc několik neutronů, které mohou štěpit další jádra nacházející se v okolí a vyvolat tak řetězovou reakci. Obrovské množství energie ze štěpení se využívá v atomových elektrárnách, ale i v jaderných zbraních. Neutrony uvolněné při řetězové reakci a následně zpomalené (termalizované) se uplatňují i v základním a aplikovaném výzkumu. V ÚJF využíváme jako zdroj termálních neutronů výzkumný reaktor LVR-15 Centra výzkumu Řež s. r. o, partnerské organizace sídlící ve stejném areálu jako ÚJF.

Fyzikové v našem ústavu mají značné zkušenosti s využitím neutronů pro studium vlastností materiálů. Proto se úspěšně zapojili i do budování evropského neutronového zdroje ESS ve švédském Lundu. Ten je založen na urychlovači a tříštivých (spalačních) reakcích protonů s rychlostí blízkou rychlosti světla s těžkým jádrem. České firmy i díky zapojení našich vědců do projektu dodávají důležité komponenty pro chlazení terče neutronového zdroje a dodají do něj také jeden z prvních přístrojů, difraktometr BEER.

Proč jsou neutrony tak atraktivní nejen pro neutronovou aktivační analýzu nebo pro řešení některých otázek kvantové a jaderné fyziky, ale i pro zkoumání materiálů? Vlnová délka a energie termálních neutronů jsou totiž srovnatelné se vzdálenostmi mezi atomy v pevných látkách a s jejich pohybovou energií. Pomocí neutronů lze proto získávat informace o polohách, pohybu a vzájemných interakcích atomů. Rozptyl neutronů na jádrech atomů se navíc může značně lišit nejen pro sousední prvky Mendělejevovy soustavy, ale i pro jednotlivé izotopy daného prvku. Jelikož neutrony nesou magnetický moment, lze jimi snadno studovat i magnetické struktury. Neutrony jsou navíc elektricky neutrální, a proto je jejich absorpce v látkách většinou velmi malá. To umožňuje studovat objemné vzorky, ve kterých by byly nabitě částice a rentgenové záření pohlceny, případně studovat



Pouzdro se vzorky se potrubní poštou posílá do aktivní zóny reaktoru
(foto: Jacob C. Ravn)

materiály v prostředí, ve kterém jsou při provozu běžně používány, například za vysokých, či naopak velmi nízkých teplot. Pomocí neutronů lze tedy studovat jak vysokoteplotní superslitiny, tak i magnetokalorické slitiny, či vývoj struktur podle teploty ve slitinách s tvarovou pamětí.

Nedestruktivní analýza pomocí neutronů nabízí též uplatnění při studiu vzácných archeologických artefaktů. Díky unikátním vlastnostem neutronů lze získat informace o základním materiálu skrytém pod silnou vrstvou korozních produktů, a to bez nutnosti jejího odstranění. Kombinací výsledků rentgenové a neutronové difrakční analýzy byly například získány důležité informace o unikátním nálezu římské ozdobné vojenské přilbice z období druhého století našeho letopočtu. Přilbice byla nalezena při vykopávkách římského vojenského tábořiště Gerulata, situovaného na Slovensku poblíž vesnice Rusovce. Analýzy vyvrátily prvotní domněnku, že přilbice je vyrobena z bronzu. Vyrobena byla z mosazi s obsahem zinku okolo 18 %. Toto složení naznačuje, že přilba byla vyrobena cementací, výrobním

procesem běžně používaným Římany, a odpovídá podobným římským mosazným nálezcům z období prvního století našeho letopočtu.

Analýzou povrchové korozní vrstvy lze získat i další cenné informace o podněbí či půdním složení místa nálezů. Například difrakční analýza korozní vrstvy přilbice ukázala, že jejími hlavními složkami jsou kuprit (Cu_2O) a nantokit (CuCl). Tyto minerály jsou produkty koroze měděných slitin a byly identifikovány i v korozních produktech různých bronzových artefaktů – od byzantských mincí po švédské ozdoby.

Jak rozptyl protonů a neutronů pomáhá zlepšovat materiály pro průmysl

Pro řadu průmyslových aplikací je nesmírně důležitá znalost vlastností povrchových vrstev používaných materiálů. Potřebujeme například co nejpřesněji určit krystalické struktury a jejich vlastnosti, poruchy a nečistoty v polovodičových materiálech pro mikroelektroniku nebo strukturu a chování materiálů s tvarovou pamětí. K tomu se dají velice dobře využít svazky neutronů z jaderného reaktoru nebo iontů urychlených na urychlovači. Způsob, jakým se neutrony nebo nabitá jádra rozptylují, je ovlivněn právě vlastnostmi atomové struktury a složením zkoumaného materiálu. Tak lze určit i nepatrné změny struktury, deformace krystalové mřížky, příměsi různých prvků a jejich rozložení. Pomocí různých žíhacích pecí nebo speciálních zařízení, trhaček, lze navíc studovat vlastnosti materiálů v závislosti na teplotě a stupni namáhání. To má veliký význam pro zajištění bezpečného a bezporuchového provozu nově vyvíjených výrobků a zařízení.

Popíšme podrobněji jednu aplikaci jaderných metod – studium modifikovaných povrchů jako novou perspektivu implantační medicíny. Všechno, včetně částí lidského těla, se používáním opotřebuje a vyžaduje časem opravu, nebo dokonce náhradu. Běžně známé jsou zubní a kloubní náhrady. Jejich implantace je náročná jak pro lékaře, tak pro pacienta. Přitom není předem jisté, zda bude náhrada organismem přijata a jaká bude její životnost. U zubních náhrad implantovaných přímo do čelisti se pravděpodobnost přijetí organismem výrazně zvýší, když je potáhneme tenkou vrstvou vhodného keramického materiálu (hydroxyapatitu), jehož složení a struktura se blíží složení kosti. Životnost kloubních náhrad, např. endoprotéz, závisí na odolnosti kloubní hlavice proti otěru. Ta se dá podstatně zvýšit, pokryjeme-li kritické plochy velmi houževnatým materiálem, např. na bázi kovových nitridů nebo uhlíku se strukturou podobnou diamantu. U zubních i kloubních náhrad závisí výsledný efekt na složení a struktuře povrchového pokrytí, které se v ÚJF určují metodou RBS, založenou na pružném rozptylu nabitých částic. Zkoumaný materiál ozařujeme proudem částic z urychlovače a současně měříme spektra rozptýlených částic, která vypovídají o jeho vlastnostech. Tímto způsobem jsme schopni určit strukturu a složení povrchových vrstev objektu bez jeho porušení. Získané výsledky pak umožňují připravit materiál požadovaných vlastností.



Práce na experimentálních zařízeních využívajících neutronové kanály reaktoru LVR-15
(foto: Ondřej Lukáš)

Hledání cesty k využití vyhořelého jaderného paliva

Při výrobě elektřiny v jaderných elektrárnách vzniká odpad. I když je ho méně než jiných odpadů z lidské činnosti, je pro svou radioaktivitu nebezpečný. Část radionuklidů v něm obsažených se rozpadá velmi pomalu – trvá až stovky tisíc let, než se rozpadnou na stabilní prvky. Jednou z možností, jak tento radioaktivní odpad zneškodnit, je uložit ho do speciálně připravených podzemních prostorů – hlubinných úložišť. Vědci však dnes také zkoumají, jak část radioaktivního odpadu znovu použít k výrobě elektrické energie a přitom přeměnit – transmutovat – dlouhodobé radionuklidy na krátkodobější, nebo dokonce na stabilní prvky.

Tyto transmutace lze například provádět v reakcích dlouhodobých radionuklidů s neutrony. Neutrony vznikají při provozu jaderného reaktoru, jejich množství a energie ale nestačí k požadovaným přeměnám. Proto reaktor využívaný k transmutacím potřebuje výkonný dodatečný zdroj neutronů. Nejvhodnější je spalační zdroj. Urychlovač, který je jeho součástí, urychlí protony až na rychlosti blízké rychlosti světla. Tyto protony roztříští při srážce jádro a přitom vznikne velký počet neutronů s požadovanými vlastnostmi. Celý transmutační systém se tedy skládá z urychlovače protonů a reaktoru, ve kterém je umístěn terč z materiálu, který po srážce s protony poskytne dostatečný počet neutronů. Ty při průchodu speciálním materiálem (moderátorem) získají vhodnou energii. Neutrony následně přeměňují vyhořelé jaderné palivo. Pro projekt transmutačního zařízení musíme detailně prozkoumat vlastnosti tříštivých reakcí protonů, při kterých neutrony vznikají, i reakce těchto neutronů s různými materiály. K tomu se v našem ústavu využívají neutronové zdroje u dvou vlastních cyklotronů. Kromě toho se účastníme mezinárodních projektů na zahraničních urychlovačích, které dokáží protony urychlit na daleko vyšší energie. Díky těmto výzkumům snad bude jednou možné zbavit radioaktivní odpad těch nejnebezpečnějších složek a zároveň využít část již použitého paliva k výrobě elektřiny.

Radionuklidy jako pomocníci lékařů

Mezi velmi účinné metody léčby zhoubných nádorů patří ozařování. Využívají se při něm různé typy záření z rozpadů radioaktivních jader nebo svazky nabitých částic urychlených na urychlovačích. Proto je velice důležité znát jeho vliv na biologické objekty – buňky, tkáně i celé organismy. Lékaři pak mohou vybrat takový způsob terapie, při kterém záření co nejúčinněji zasáhne a zničí zhoubný nádor a přitom minimálně poškodí okolní zdravou tkáň. V ÚJF se zabýváme vývojem a optimalizací přesných metod měření ionizujícího záření a studiem jeho účinků na DNA, buňky i celý lidský organismus.

Předpokladem účinné terapie je včasná diagnóza, zejména jde-li např. o nádorová onemocnění. V tomto úsilí lékařům stále častěji pomáhají jaderné metody. Významnou oblastí je diagnostika s využitím radioaktivních jader. Pomocí urychlovače lze vyrobit řadu radionuklidů a z nich připravit radioaktivní chemické sloučeniny vhodných vlastností – *radiofarmaka*. Lékařem určené radiofarmakum se pak na specializovaném klinickém pracovišti podá pacientovi. V jeho těle se radiofarmakum ukládá do orgánů a tkání, které je nutno vyšetřit. Tam se radionuklid rozpadne a emituje záření gama, které je zachyceno citlivými detektory umístěnými kolem těla pacienta. Přes určitou podobnost s rentgenovým vyšetřením nebo vyšetřením magnetickou rezonancí podává však vyšetření radiofarmaky jiný druh informace. Zatímco např. počítačová rentgenová tomografie (CT) s vysokým rozlišením zobrazuje anatomické struktury našeho těla, vyšetření radiofarmaky nám podává především informaci o osudu konkrétní látky v organismu, a tedy o funkci orgánů a tkání. Proto se poslední dobou tento druh zobrazení označuje jako *molekulární zobrazování*. Velmi účinná je pak právě kombinace zobrazení anatomického a funkčního. Nejrozšířenější použití radiofarmak najdeme v onkologii.

Vedle tradičního vyšetření pomocí záření gama se využívá i velmi efektivní diagnostická metoda – pozitronová emisní tomografie (PET). PET využívá toho, že při



Nová analytická laboratoř pro výzkum radiofarmak u cyklotronu TR-24
(foto: Ondřej Lukáš)

některých rozpadech jader z nich vylétává pozitron – partner elektronu ve světě antihmoty. Pozitron při kontaktu s normální hmotou zaniká (anihiluje) a přitom vzniknou dva fotony letící v opačných směrech. Prstencem detektorů jsou zachyceny během jedné sekundy statisíce těchto fotonů. Výkonný počítač poté zrekonstruuje přesný, trojrozměrný obraz vyšetřovaného orgánu.

V ÚJF se zaměřujeme především na přípravu a výzkum lékařských radionuklidů a jejich sloučenin. Některé z nich je třeba vyrábět v blízkosti zdravotnického zařízení, kde se používají, a nelze je tedy dovážet ze zahraničí. V roce 1999 začal ústav vyrábět radiofarmaka na bázi radioaktivního fluoru (zejména FDG, což je glukóza s radioaktivním fluorem) a kryptonu. Především se však věnuje výzku-

mu nových radionuklidů a jejich sloučenin pro specifickou a selektivní diagnostiku různých onemocnění. K tomu účelu slouží také nový cyklotron TR-24 v propojení s novými radiochemickými laboratořemi.

Od balonu přes vzducholoď ke kosmické stanici

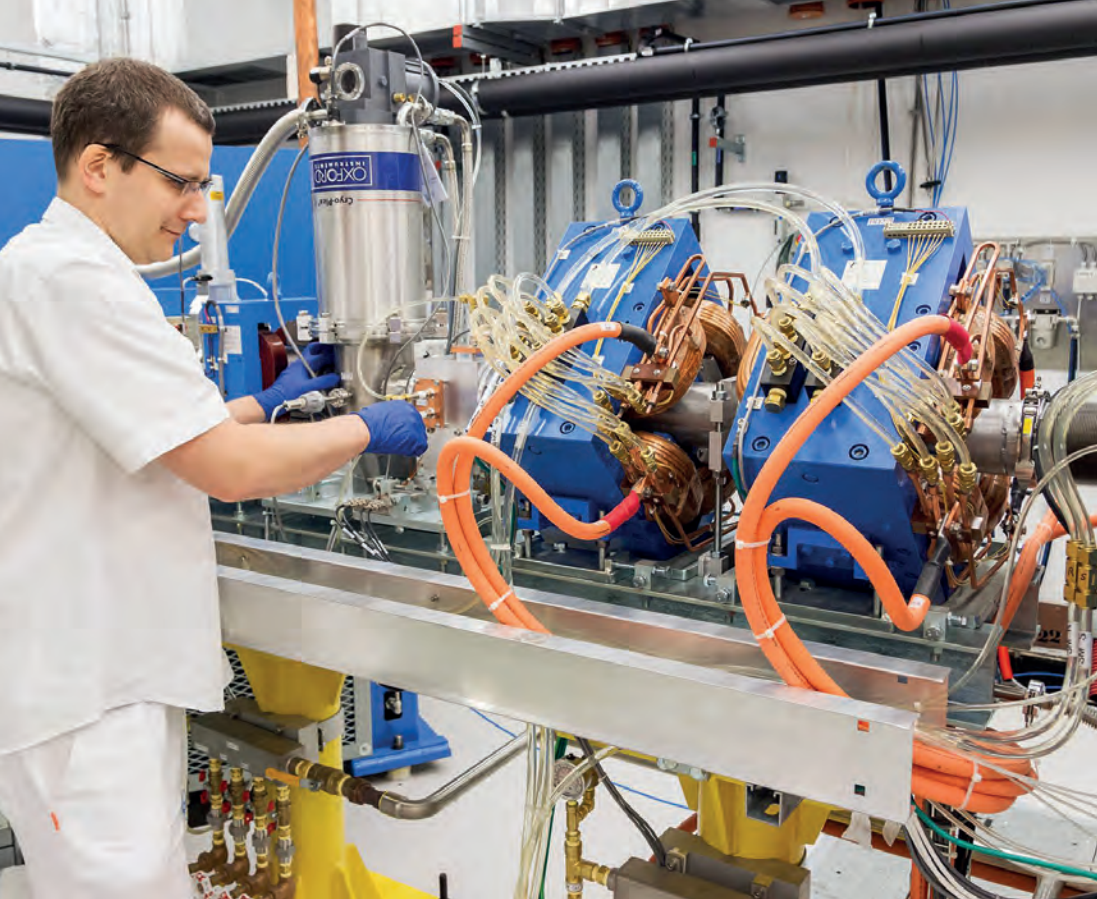
Naše Země je neustále bombardována vysokoenergetickými částicemi z vesmíru. Tento proud částic se nazývá kosmické záření. K jeho objevu vedlo na konci 19. století záhadné vybíjení elektroskopů, kterými se tehdy radioaktivita měřila, mimo dosah radioaktivních materiálů. Předpokládalo se, že tajemným zdrojem ionizujícího záření může být sama Země. Pro potvrzení této hypotézy podnikl Victor Franz Hess v roce 1912 let balónem z Ústí nad Labem do výšky přes 5000 metrů a došel k závěru, že existuje zdroj radioaktivního záření mimo naši atmosféru, protože intenzita záření s výškou podle předpokladu neklesala, ale rostla. Během letu Hess dokonce v důsledku snížené hustoty vzduchu ve velkých výškách na nějakou dobu ztratil vědomí, ale přesto měření dokončil a v roce 1936 dostal za objev kosmického záření Nobelovu cenu.

Před škodlivými účinky kosmického záření, skládajícího se hlavně z protonů a jader helia, nás chrání atmosféra a magnetické pole Země. Se zvyšující se nadmořskou výškou však klesá ochranný účinek atmosféry a radiace vzrůstá. Intenzita kosmického záření v atmosféře nezávisí jen na nadmořské výšce, ale i na zeměpisné poloze. Intenzita geomagnetického pole, které nás před kosmickým zářením stíní, klesá směrem od rovníku k pólům. Z tohoto důvodu lze spatřit polární záři nejčastěji v polárních oblastech jako výsledek reakce převážně jedné ze složek kosmického záření – tzv. slunečního větru – s horními vrstvami atmosféry.

V roce 1928 zlákal severní pól k výpravě vzducholoď Italia i Františka Běhounka, zakladatele Státního radiologického ústavu v Praze (dnes Oddělení dozimetrie záření Ústavu jaderné fyziky). František Běhounek se tak stal prvním Čechem, který dobyl severní pól, pokud ovšem nepočítáme Čecha Karla Němce z Cimrmanovy hry *Dobytí severního pólu*. Přestože vzducholoď při zpáteční cestě ztroskotala a část posádky zahynula, Běhounek během několikátýdenního čekání na záchranu na ledové kře stále prováděl svá měření.

Výzkum kosmického záření probíhá usilovně i po více než sto letech od svého objevu. Pokračujeme i v experimentech našich slavných předchůdců: za pomoci České polární stanice se účastníme experimentů na ostrově Jamese Rosse u pobřeží Antarktidy, realizovali jsme dozimetrická měření se stratosférickým balónem až do výšky 34 km a pravidelně měříme kosmické záření také na vysokohorské observatoři Lomnický štít v Tatrách. Výzkum kosmického záření provádíme navíc i na Mezinárodní kosmické stanici a dalších vesmírných plavidlech. Důležitost výzkumu kosmického záření, jeho vlivu na lidský organismus a možností ochrany před ním opět roste s obnovením snah o návrat na Měsíc a při úvahách o cestě lidí na Mars. Měříme také kosmické záření na palubách letadel ČSA, čímž se mimo jiné staráme i o radiační ochranu posádek letadel.

Kosmické záření nám umožňuje zprostředkovaně pozorovat nejenergetičtější procesy v našem vesmíru. Je to výzkum, který nelze přenést do laboratoří, protože



Radionuklidy pro vývoj nových radiofarmak
produkuje nový cyklotron TR-24
(foto: Ondřej Lukáš)

ani nejvýkonnější urychlovače na Zemi nedokáží dodat částicím hmoty kinetickou energii srovnatelnou s energiemi jader, která k nám přilétají z vesmíru.

Radioaktivita kolem nás

Jak již bylo zmíněno v úvodu, je radioaktivita přirozenou součástí životního prostředí. Vyskytuje se všude kolem nás, radionuklidy najdeme dokonce i ve svém těle. Řada radioaktivních izotopů prvků s dlouhou dobou života pochází z dob, kdy vznikala sluneční soustava. Mezi ně patří i izotop draslíku ^{40}K , který při svém rozpadu vyzařuje velmi energetické záření gama. Draslík je však také velmi důležitý biogenní prvek. I my sami jsme tak radioaktivními zářiči, i když velmi slabými.

Dalšími zářiči jsou izotopy uranu, které jsou základem současné jaderné energetiky. Radioaktivní přeměnou izotopů uranu a thorium vznikají další (tzv. dceřiné) radionuklidy. Mezi nejznámější z nich patří radium ^{226}Ra , které bylo objeveno Marií Curie-Sklodowskou a Pierrem Curie v jáchymovském smolinci. Radioaktivní přeměnou radia ^{226}Ra vzniká další velmi známý radionuklid: radon ^{222}Rn , který ze všech na Zemi přítomných radionuklidů zodpovídá za největší dávkovou zátěž lidské populace.

Jiné radionuklidy stále vznikají působením kosmického záření, které na Zemi dopadá z vesmírného prostoru. Známým příkladem je uhlík ^{14}C , který je využíván k datování, například historických předmětů, archeologických nálezů a geologických vzorků. Radiouhlíkové datování obecně umožňuje určit stáří uhlíkaté látky až do dob před 50 000 lety. Tato metoda se dále rychle rozvíjí a nachází stále nová uplatnění. Existuje i mnoho dalších datovacích metod založených na analýzách radionuklidů nebo na měření jejich působení na okolní prostředí. Mezi ně patří počítání štěpných stop vzniklých z uranu ^{235}U , které umožňuje datovat i nejstarší geologické materiály. Využit lze i měření energie uvolněné při radioaktivních přeměnách přírodních radionuklidů, která se dlouhodobě kumuluje v některých materiálech a za určitých podmínek může být opět uvolněna a použita k datování: tato metoda se nazývá stimulovaná luminiscence. Používá se například k datování různých keramik v archeologii nebo pro stanovení stáří některých sedimentů v geologii, třeba při výzkumu povodní.

Část radionuklidů, které se dnes nacházejí v přírodě, byla produkována člověkem při testech jaderných zbraní, zejména na začátku šedesátých let minulého století, nebo při provozu jaderně-energetických zařízení. Ačkoliv je množství radionuklidů v současnosti uvolňovaných provozem jaderných zařízení do životního prostředí velmi malé, okolí každé jaderné elektrárny je velmi přísně sledováno. Navýšení aktivity uhlíku ^{14}C následkem testů jaderných zbraní dosáhlo na začátku šedesátých let téměř dvojnásobku hodnoty dané přirozenou produkcí tohoto radionuklidu a poté docházelo k postupnému poklesu, který dosud trvá. Křivka poklesu aktivity nám umožňuje datovat vzorky nedávného původu s časovým rozlišením pouhých jednotek let. Tato speciální datovací metoda nachází rostoucí uplatnění v kriminalistice, soudním lékařství, při zamezování nelegálního obchodu se zákonem chráněnými druhy živočichů a rostlin nebo také při kontrole původu některých organických látek používaných ve farmacii, potravinářství a kosmetice.

Na závěr

Na uvedených příkladech jsme chtěli ukázat, že jaderná fyzika je nesmírně zajímavá a výsledky jaderného výzkumu jsou velmi užitečné.

Rádi bychom zdůraznili, že pro vědecký výzkum jsou kromě moderních přístrojů a zařízení nezbytní vysoce kvalifikovaní lidé. Vědci v našem ústavu musí ovládat složité fyzikální teorie a moderní matematický jazyk. Navrhují a staví unikátní přístroje. Vybíjejí a používají nejmodernější počítačové systémy. Pracují v mimořádně soutěživém prostředí, zcela otevřeném konkurenci a spolupráci s vědci z celého světa. Jsou motivováni touhou po poznání. Často se snaží dokázat něco,

co před nimi ještě nikdo nikdy nedokázal. Zároveň vychovávají studenty a mladé adepty pro budoucí vědeckou práci. Jejich úsilí má zásadní význam pro dlouhodobý vývoj celé naší společnosti.

Chcete-li se o jaderné a částicové fyzice dovědět více, přijďte na návštěvu do ÚJF. Rádi vás se svou prací seznámíme podrobněji.



Zařízení na měření
obsahu oxidu uhličitého
v atmosféře
(foto: Ondřej Lukáš)

Nejvýznamnějšími experimentálními zařízeními ústavu jsou izochronní cyklotron U-120M (využívaný jak pro jaderné fyzikální experimenty, tak pro produkci radioizotopů), k němu připojený generátor rychlých neutronů, dále nový cyklotron TR-24, produkující velmi intenzivní svazek protonů, instalovaný v roce 2015, tandemový elektrostatický urychlovač Tandetron TN 4130 MC, instalovaný v roce 2005 se zařízeními pro různé jaderné analytické metody a užívaný zejména pro interdisciplinární a aplikovaný výzkum, zařízení pro neutronovou difrakci a rozptyl, instalovaná u jaderného reaktoru LVR-15, provozovaného ÚJV Řež a. s., a užívaná především pro materiálový výzkum.

Domácí experimenty jsou v rovnováze s účastí ve velkých mezinárodních experimentech, jako je například ALICE v laboratoři CERN. Od roku 2016 získal ústav financování několika velkých projektů ze strukturálních fondů Evropské unie: jde o CANAM (Centrum urychlovačů a jaderných analytických metod), CREAT (výzkum atmosférických jevů a kosmického záření) nebo projekty české účasti na mezinárodních projektech FAIR, SPIRAL2 a ESS Scandinavia.

Publikace *Cesta k jádru věci* přibližuje široké veřejnosti srozumitelnou formou současnou práci Ústavu jaderné fyziky AV ČR, v. v. i., se sídlem v Řeži. Seznamuje se základy jaderné fyziky a věnuje se postupům a technologiím používaným při zkoumání struktury hmoty, včetně částicových urychlovačů a jaderného reaktoru, i aplikacím těchto výzkumů, jako je určování chemického složení materiálů, stavba nových detektorů záření a zkoumání chování materiálů v radiační zátěži, tvorba radionuklidů pro lékařské využití nebo hledání cest k využití vyhořelého jaderného paliva či predikce z výzkumu kosmického záření. K obsahu publikace přispěla všechna oddělení ÚJF.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

František Čajka: **Staroslověnské písemnictví na Velké Moravě a ve středověkých Čechách**

M. Melčák, K. Nováček, L. Starková: **Monuments of Mosul in Danger (English edition)**

Štefan Pilát: **Gorazd**

V EDICI MIMO JINÉ VYŠLO:

Tomáš Černušák: **Všední život papežských nunciů u rudolfinského dvora**

Jan Vít: **Jan Patočka**

M. Devátá, J. Kocian, J. Pernes: **Českoslovenští komunisté a jejich strana**

Edice Věda kolem nás | Výzvy a otázky
Cesta k jádru věci | Miroslav Dočkal

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba WOW, spol. s r. o. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2017. Ediční číslo 12285. Tisk WOW, spol. s r. o., Washingtonova 1567/25, 110 00 Praha 1.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

www.vedakolemnas.cz | www.academiaknihy.cz | www.eknihy.academia.cz