

# První česká laboratoř urychlovačové hmotnostní spektrometrie před otevřením

**Miroslav Dočkal**

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

V září 2020 dorazily do Řeže dva kamiony s dvaceti bednami dílů prvního urychlovačového hmotnostního spektrometru v ČR. Epidemie nemoci covid-19 zpozdila příjezd švýcarských techniků, ale už dnes je jisté, že v první polovině roku 2021 bude zařízení MILEA nainstalováno a v průběhu roku by pracoviště mělo dosáhnout prvních výsledků.

Vybudování a provozování prvního českého pracoviště urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS – z anglického *Accelerator Mass Spectrometry*) je hlavním výstupem projektu *Výzkum ultrastopových izotopů a jejich využití v sociálních a environmentálních vědách urychlovačovou hmotnostní spektrometrií*. Projekt zahájený v roce 2018 dostal akronym RAMSES a je veden Ústavem jaderné fyziky AV ČR (ÚJF), v jehož areálu v Řeži u Prahy AMS laboratoř vzniká. Partnery projektu jsou Archeologický ústav AV ČR Praha (ARÚP) a Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze (FJFI) [1].

V současnosti ve světě pracuje již kolem sto padesáti různých AMS zařízení, přičemž v jejich počtu dominuje Evropa před USA, Japonskem a Čínou. Jejich předními světovými výrobci jsou společnosti High Voltage Engineering Europe (HVE), National Electrostatic Corporation (NEC) a na ně se dotahující švýcarská společnost Ionplus, která je „spin-off“ firmou univerzity ETH v Curychu (Švýcarského federálního technologického institutu) [2]. Právě odtud pochází první „české“ AMS zařízení MILEA (*Multi-Isotope Low-Energy AMS*), jehož výrobu na objednávku projektu RAMSES zahájila společnost Ionplus v březnu 2019. V duchu světového trendu k využívání menších AMS urychlovačů jde o zařízení střední velikosti s pracovním napětím do 0,3 MV. Mezi výhody zařízení MILEA patří kompaktní rozměry, víceúčelovost i vysoká stabilita provozu spolu s přiměřenými provozními náklady [3].

## Představení AMS spektrometru

AMS je zařízení, které využívá sériového zapojení iontového zdroje generujícího záporně nabitě ionty, dvou hmotnostních spektrometrů a mezi ně umístěného elektrostatického tandemového urychlovače. Koncepte tohoto zapojení se vyvíjela po několik desetiletí. Současné technické řešení bylo představeno v roce 1977, který se tak obecně považuje za rok zrodu novodobé



Takto bude zařízení MILEA vypadat po instalaci. Foto: Ionplus

AMS jako vysoce citlivé relativní analytické metody pro měření izotopických poměrů.

Popíšme nyní v principu funkci a zapojení AMS zařízení [2]. Měřený pevný vzorek je nalisován do katody a vložen do iontového zdroje. Tam je (v nejčastějším uspořádání) bombardován urychlenými ionty cesia, které způsobí postupné odprášení vzorku a ionizaci takto vzniklých částic. V tomto procesu díky přítomnosti par kovového cesia vznikají záporně nabitě atomární i molekulární ionty, které jsou sadou elektrod extrahovány do dalších částí systému jako iontový svazek urychlený napětím až několika desítek kV.

V následující části – nízkoenergetickém (LE) hmotnostním spektrometru neboli injektoru – je pro další analýzu a vstup do urychlovače z tohoto svazku vybrána frakce iontů o zvoleném poměru hmotnosti  $m$  a náboje  $z$ . Tato část svazku po průchodu vychylova-



Vizualizace budoucí AMS laboratoře (uprostřed) v Řeži před zahájením stavebních prací. Zdroj: ÚJF AV ČR

čem dopadá do Faradayova detektoru, kde je změřen její celkový iontový proud. Ten je poté využit pro výpočty účinnosti zdroje a transmitance trasy. Zmíněný vybraný svazek záporných iontů vstupuje do urychlovače nejčastěji se záporným jednotkovým nábojem a energií obvykle několik desítek keV.

Konstrukce tandemového elektrostatického urychlovače využívá změny náboje urychlovaných iontů mezi jeho první a druhou částí. Záporné ionty jsou urychlovány až na hodnotu odpovídající terminálovému kladnému napětí, přivedenému na elektrodu uprostřed zařízení – terminálu. Zde ionty prolétají komůrkou se zředěným plynem nebo skrze tenkou fólii (*stripper*). Srážkami urychlených iontů s částicemi prostředí (zředěného plynu či fólie) zde jednotlivé ionty ztratí jeden či několik elektronů, čímž získají kladný náboj a jsou dále urychlovány od terminálové kladné elektrody k výstupu z urychlovače.

Náboj kladných iontů vzniklých ve stripperu souvisí s vlastnostmi daného prvku a energií, na kterou byly jeho ionty urychleny. Obvykle dojde k ionizaci do několika různých nábojových stavů a je třeba zvolit takové terminálové napětí a konfiguraci stripperu (tlak a druh plynu, tloušťku fólie), aby měl výstupní svazek vhodné parametry pro následnou druhou hmotnostní analýzu. Iontový svazek z urychlovače vstoupí do vysokoenergetické (HE) části AMS, tvořené hmotnostním spektrometrem pro vysoké energie (analyzátozem). Podle dosahovaných energií a vlastností analyzovaných izotopů se skládá z jednoho nebo více magnetů (filtrujících podle poměru  $m/z$ ), degradační fólie, elektrostatického analyzátozem (filtruje podle energie), nezbytné iontové optiky a detektorů jednotlivých izotopů. V každé jednotlivé LE a HE části AMS dojde k mnohařádkovému potlačení interferujících částic, jako jsou například izobarické nebo rozptýlené ionty.

Pro koncovou detekci svazku, a tedy v optimálním případě počtu urychlených iontů měřeného (radio) nuklidu, se nejčastěji používají různě upravené typy plynových detektorů. Základní podmínkou je měření celkové energie detekovaného iontu a měrné ztráty jeho energie při průletu plynem  $dE/dx$ , díky kterým je možné dále rozlišit mezi izotopem analyzovaného prvku a jeho izobarem. Tato poslední filtrace izobarických interferencí je velmi důležitá, protože ani sada hmotnostně spektrometrických a iontově-optických filtrů v předchozích částech AMS nemusí být dostatečná pro potlačení interference izobaru, jehož zastou-

pení v původním vzorku je často o 10 až 16 řádů vyšší. Jako doplňkový detekční systém se v některých případech u AMS s vyšším terminálovým napětím používá ještě detektorů typu ToF (z anglického „time of flight“, tedy detektorů doby letu), které umožňují další odlišení měřených iontů od případného pozadí.

### Výhody a hlavní aplikace AMS

Díky velmi vysokému hmotnostnímu rozlišení a separaci interferujících iontů je AMS nejcitlivější metodou pro stanovení ultrastopových množství některých radionuklidů, zejména s dlouhým poločasem rozpadu. V těchto případech jsou detekční limity až o šest řádů nižší než u radiometrických (konvenčních) metod detekce ionizujícího záření, jako jsou spektrometrie záření alfa, beta a gama. U měkkých zářičů beta, například při radiouhlíkovém datování pomocí  $^{14}\text{C}$ , pak metoda AMS snižuje minimální potřebné množství vzorku o tři až pět řádů oproti konvenčním radiometrickým metodám GPC (*Gas Proportional Counting*) nebo kapalinné scintilační spektrometrii LSC (*Liquid Scintillation Counting*). U AMS totiž nemusíme čekat na radioaktivní přeměny atomů vzorku a s nimi související emise ionizujícího záření, ale jsou počítány přímo atomy stanovovaného radionuklidu přítomné ve vzorku [4].

Dosud nejrozšířenější a nejvýznamnější aplikace AMS je právě zmíněné stanovení  $^{14}\text{C}$  (radioaktivního izotopu uhlíku) pro radiouhlíkové datování, které bude co do počtu vzorků dominantní i v nové AMS laboratoři. Proto se do ní po jejím dokončení částečně přesunou pracovníci i vybavení jediné české radiouhlíkové laboratoře s mezinárodním kódem CRL. Provozuje ji ÚJF společně s již zmíněným Archeologickým ústavem a sídlí na okraji areálu pražské Nemocnice na Bulovce [5].

Vzhledem k poločasům přeměny  $^{14}\text{C}$ , který činí zhruba 5 730 let, a některým dalším vlivům daným samotným vzorkem, podmínkami v místě jeho nálezů a možnostmi použitých analytických metod lze datovat vzorky o stáří do přibližně 55 000 let. Možnosti datování ale nekončí ani zde: pro starší vzorky lze použít datování pomocí jiných metod, založených i na jiných radionuklidech než  $^{14}\text{C}$ . Některé datovací metody mají dosah pokrývající celou geologickou historii čtvrtohor,



Budova AMS laboratoře v Řeži po kolaudaci. Foto: ÚJF AV ČR

pro použití například v archeologii by však byly obvykle nepřesné. Uran-thoriová datovací metoda je například používána zejména pro určování stáří korálů, karbonátů či zkamenělých kostí a má dosah až do 600 000 let.

V AMS laboratoři budou analyzovány také kosmogenní radionuklidy beryllia  $^{10}\text{Be}$  a hliníku  $^{26}\text{Al}$ , čímž se naše možnosti datování geologických procesů rozšíří do minulosti vzdálené až několik milionů let, tedy nejstaršího období čtvrtohor. Pomocí  $^{10}\text{Be}$  lze také sledovat změny v intenzitě kosmického záření v minulosti a sledovat tak například výkyvy sluneční aktivity. Tyto údaje jsou klíčové pro rekonstrukci místních i celkových přírodních podmínek v různých obdobích – zejména v posledních dobách ledových a meziledových – a pro stanovení rozsahu i typu procesů, jako jsou eroze, ukládání sedimentů, utváření půd a vývoj krajiny. To může pomoci i při nalezení příčin, rozsahu i případných následků současných klimatických změn. Měření kosmogenních radionuklidů je také často využíváno ke stanovení stáří a původu meteoritů [6].

Další oblastí činnosti laboratoře AMS bude měření některých aktinoidů a štěpných produktů, v první řadě ve vybraných typech vzorků životního prostředí. Z aktinoidů půjde především o izotopy uranu (zejména  $^{236}\text{U}$ ), plutonia (Pu), americia ( $^{241,243}\text{Am}$ ) a neptunia ( $^{237}\text{Np}$ ), u štěpných produktů především o izotopy jodu ( $^{129}\text{I}$ ). Stanovení většiny uvedených radionuklidů je navázáno převážně na lidské jaderné činnosti, které je uvolňují do životního prostředí – ať už jde o testování jaderných zbraní v nepříliš vzdálené minulosti, výrobu a přepracování jaderného paliva či nehody jaderných zařízení. Každá z těchto činností vede k odlišným vzá-



Hala pro zařízení MILEA krátce před kolaudací.  
Foto: ÚJF AV ČR

jemným poměrům izotopů plutonia, uranu a dalších nuklidů, které tak můžeme považovat za jakési jejich „otisky prstů“. S těmito informacemi je také úzce spojena kontrola a sledování jaderných materiálů v rámci Smlouvy o nešíření jaderných zbraní, zabraňující zejména jejich nedovolenému a nekontrolovanému pohybu a zpracování.

Zmíněné lidské činnosti od objevu jaderného štěpení už „označily“ stopami uvedených radionuklidů téměř celý povrch planety. Proto je také možné s jejich pomocí lépe popsat některé přírodní procesy, zejména spojené s migrací a distribucí (radio)nuklidů v životním prostředí, a to jak z pohledu množství přenesené hmoty, tak v čase. Konkrétním příkladem, který bude v laboratoři AMS z uvedených nuklidů zřejmě měřen nejčastěji, je již zmíněný izotop uranu  $^{236}\text{U}$ . Stanovení jeho podílu se používá ke studiu oceánských proudění, výzkumu procesů míchání povrchové a podzemní



Stěhování beden se zařízením MILEA do 3. patra budovy  
musel obstat jeřáb. Foto: ÚJF AV ČR

i oceánské vody a perspektivně také při hledání nových ložisek uranu či při datování pomocí tzv. bombového píku, k němuž se ještě podrobněji vrátíme.

Další skupinou radionuklidů jsou izotopy protaktinia ( $^{231}\text{Pa}$ ), uranu ( $^{234}\text{U}$ ) a thoria ( $^{229}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ), které jsou součástí přirozených přeměnových řad a jsou rovněž měřitelné pomocí AMS. Jejich poměry k mateřským radionuklidům se využívají k datování v geologických vědách, s dosahem přes půl milionu let.

Vzorky připravené k AMS měření jsou zatím z ČR sílány do zahraničních AMS laboratoří, zejména do maďarského ústavu ATOMKI-HAS v Debrecíně. Intenzivní spolupráce zaměřená na analýzy  $^{14}\text{C}$  a dalších radionuklidů probíhá v rámci projektu RAMSES i s centry AMS na Univerzitě Komenského v Bratislavě (CENTA), s ETH v Curychu, s vídeňskou laboratoří VERA, pracovištěm v arizonském Tucsonu či s dalšími světovými laboratořemi, včetně Číny. Ostatně přední vědci z těchto špičkových AMS laboratoří jsou i ve vědeckém poradním výboru (AMSAB) projektu RAMSES.

### AMS v radiouhlíkovém datování

Laboratoř CRL, která se v ČR radiouhlíkovým datováním zabývá, jsme již zmínili. V případě měření  $^{14}\text{C}$  jsou nejistoty výsledku analýzy u AMS oproti konvenční metodě pouze poloviční až čtvrtinové. AMS měření během několika desítek minut zaregistruje několik procent atomů  $^{14}\text{C}$  ve vzorku, zatímco radiometrická metoda během tří až čtyř dnů měření, vzhledem ke dlouhému poločasu přeměny  $^{14}\text{C}$  (5730 let), umožňuje pozorovat radioaktivní přeměnu pouhé miliontiny atomů  $^{14}\text{C}$  přítomných v měřeném vzorku. Radiometrické metody proto potřebují poměrně velké, obvykle několikagramové vzorky k dosažení přijatelně nízké nejistoty analýzy  $^{14}\text{C}$ . AMS metoda umí datovat vzorky o hmotnosti pouhých několika miligramů, někdy i jen desítek mikrogramů – analýzy takto malých vzorků ale kladou velké požadavky na zpracování vzorku [7].

U cenných předmětů není často ani možné zvolit jinou metodu než AMS: odebráním několika miligramů obvykle nejsou vzorky výrazněji narušeny. Naopak, pokud by byla použita radiometrická analýza, bylo by potřeba zpracovat k analýze alespoň několik gramů uhlíku z daného vzorku a odběr části předmětu pro analýzu  $^{14}\text{C}$  by byl proto značně destruktivní.



Předsedkyni AV ČR prof. RNDr. Evu Zažímalovou, CSc. (druhá zprava) provedli halou AMS laboratoře na pozadí beden se zařízením MILEA (zprava) excelentní vědecký pracovník projektu RAMSES Prof. Ing. Jan Kučera, CSc., a ředitel ÚJF AV ČR RNDr. Petr Lukáš, CSc. Foto: Jana Plavec, SŠ AV ČR

Například: historické oceli obsahují asi 0,5% až 2% podíl uhlíku, pocházejícího z dřevěného uhlí, které bylo použito k tavení železa při výrobě. Je proto možné jejich radiouhlíkové datování, které přibližně určí dobu výroby oceli. Pokud by však pro analýzu byla použita konvenční metoda, pak by kromě značných pyrotechnických efektů při spalování železa mohlo být výsledkem datování (například historického meče) konstatování: „Ano, ten meč BYL pravý.“ [8]. Bronz, cín a další historicky používané kovy (stejně jako například silikáty) neobsahují uhlíkatý podíl a jejich radiouhlíkové datování proto není možné.

Metodou AMS lze proto radiouhlíkové datovat prakticky i ty materiály s obsahem uhlíku v datovatelné chemické formě, které zpravidla není reálné shromáždit v dostatečném množství pro radiometrickou analýzu. Jde například o pylové koncentráty, organické složky sedimentů, zbytky tuků a dalších organických látek v keramických nádobách či jejich střepích, jednotlivá vlákna rostlinného nebo živočišného původu (tedy i papír, tkaninu, hedvábí, kůži či plst), rohovinu, chitin, vosky, pryskyřice či již zmíněný uhlík z historických ocelí. I nejčastější archeologické vzorky, kterými jsou kosti, dřevo či uhlíky ze spálených předmětů, jsou mnohem častěji nalézány v malých množstvích, nezpracovatelných konvenčními metodami radiouhlíkového datování.

Dodejme, že radiouhlíkové datování určuje dobu vzniku datovaného materiálu, nikoliv předmětu z něj vyrobeného. Výsledkem radiouhlíkového datování vzorku dřeva odebraného z historické sošky tedy není doba jejího vyřezání, nýbrž doba nárůstu dřevní hmoty, ze které byla kdykoliv později soška vyřezána.

### Využití radiouhlíkového bombového píku

Posledních 65 let umožňuje poměrně přesně radiouhlíkovým datováním vymežit dobu původu vzorku pomocí tzv. bombového píku. Aktivita  $^{14}\text{C}$  se oproti přírodnímu pozadí výrazně zvýšila především následkem atmosférických zkoušek jaderných zbraní v průběhu 50. a 60. let 20. století. Maximum aktivity bylo na severní polokouli pozorováno v roce 1963 a od té doby až dosud se aktivita  $^{14}\text{C}$  snižuje. Průběh aktivity tohoto i dalších radionuklidů, které byly testy jaderných zbra-

ní uvedeny do životního prostředí, nese název „bombový pík“. Rychlá změna aktivity  $^{14}\text{C}$  v průběhu tohoto období proto umožňuje zpravidla datovat „mladé“ vzorky s časovým rozlišením pouhých jednotek let [9].

Nepominutelný význam má datování pomocí bombového píku v ochraně ohrožených druhů živočichů a rostlin: například při určování stáří slonoviny. Obchod se slonovinou získanou po roce 1946 je totiž zakázán podle Úmluvy o mezinárodním obchodu s ohroženými druhy volně žijících živočichů a planě rostoucích rostlin (CITES), zatímco výrobky ze slonoviny získané před tímto datem jsou považovány za starožitnosti a obchodovat s nimi lze. Proto se za ně pašeráci snaží vydávat i novější slonovinové výrobky a usvědčit je může především radiouhlíkové datování, založené na bombovém píku.

V datování pomocí bombového píku lze u některých vzorků izotop uhlíku  $^{14}\text{C}$  nahradit jinými radionuklidy, které vykazují maximum aktivity v době testování jaderných zbraní – jde zejména o již zmíněný izotop uranu  $^{236}\text{U}$  a blízké aktinoidy (Pu, Np, Am) i některé štěpné radionuklidy.

### Analýzy $^{14}\text{C}$ jsou aplikovány i mimo datování

Některé z aplikací analýz  $^{14}\text{C}$  můžeme označit za „nedatovací“. Fosilní paliva (uhlí, ropa) například neobsahují  $^{14}\text{C}$ . Pokud je však do motorových paliv přidávána složka pocházející z obnovitelných zdrojů (typicky ze zemědělsky produkovaných surovin), obsahují taková paliva i  $^{14}\text{C}$ . V posledních letech se pro tuto složku začínají používat hydrogenované rostlinné a upotřebené kuchyňské oleje (HVO – *Hydrogen Treated Vegetable Oil*), které se, na rozdíl od obnovitelných složek dřívě přidávaných do paliv, svými chemickými a fyzikálními vlastnostmi od fosilní motorové nafty neliší. Protože jsou však stále výrobne dražší než nafta ropného původu, je zde prostor ke švindlování: zjistit, zda deklarovaný podíl obnovitelné složky odpovídá skutečnému,



Aparatura k předúpravě vzorků pro radiouhlíkové datování v laboratoři CRL, jejíž pracovníci a vybavení se zčásti přesunou do laboratoře AMS po jejím dokončení. Foto: ÚJF AV ČR

a zabránit tak čerpání daňových úlev podvodníky, lze pouze pomocí analýzy  $^{14}\text{C}$ .

Jak jsme již uvedli, fosilní paliva a  $\text{CO}_2$  vznikající jejich spalováním neobsahují  $^{14}\text{C}$ . Pokud je v daném místě sledována aktivita  $^{14}\text{C}$  v ovzduší, lze určit vliv spalování fosilních paliv na lokální koncentraci atmosférického  $\text{CO}_2$ . Analýzy atmosférického  $^{14}\text{C}/^{14}\text{CO}_2$  spolu se sledováním dalších parametrů pomáhají také upřesňovat modely používané pro globální distribuce uhlíku a k predikci nárůstu koncentrace  $\text{CO}_2$  v ovzduší v příštích letech.

Při běžném provozu jaderných elektráren s lehkodvodními tlakovými reaktory (což jsou obě jaderné elektrárny v ČR) je z hlediska dávkové zátěže místní populace  $^{14}\text{C}$  nejvýznamnějším radionuklidem uvolňovaným do ovzduší. Ačkoliv je zvýšení aktivity tohoto radionuklidu kolem českých jaderných elektráren na hranici statistické prokazatelnosti, je sledování  $^{14}\text{C}$  důležité z hlediska kontroly jejich výpustí.

### AMS laboratoř rozšíří infrastrukturu CANAM

Pro AMS laboratoř byla rekonstruována a o několik pater nadstavěna střední část komplexu urychlovačů na konci řežského areálu. Zařízení AMS bude umístěno ve 3. nadzemním patře: bedny s jeho díly proto musel do budoucího sálu urychlovače přestěhovat jeřáb. K vybavení laboratoře bude kromě samotného urychlovačového spektrometru MILEA patřit i řada dalších zařízení pro zpracování vzorků a přípravu terčů pro AMS i pro doplňující analýzy – jde hlavně o rozhraní pro měření plyných vzorků  $^{14}\text{CO}_2/\text{CO}_2$  (které umožní měřit vzorky s podílem uhlíku v hmotnosti pouhých desítek mikrogramů), hmotnostní spektrometr pro analýzy stabilních izotopů, preparativní plynový chromatograf, prvkový analyzátor a tzv. čistou laboratoř, tedy místnost s velmi čistým režimem provozu a minimální prašností podle odpovídajících mezinárodních standardů [10].

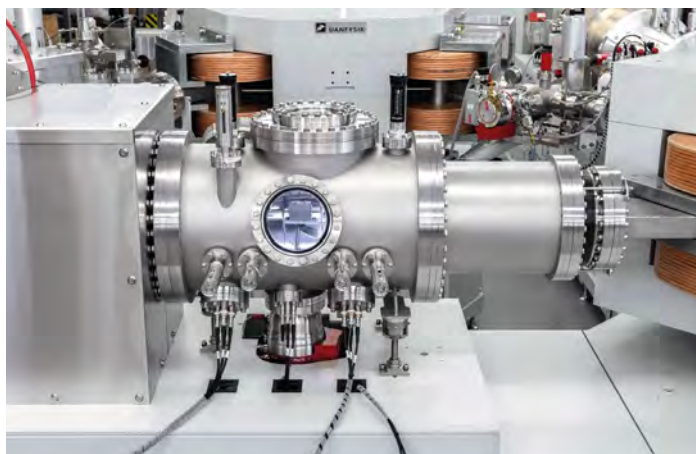
Zmíňme rovněž moderní ekologické řešení klimatizace a vytápění budovy, využívající rekuperace odpadního tepla ze zařízení MILEA.

Excelentním vědeckým pracovníkem projektu RAMSES je prof. Jan Kučera, CSc., který v ÚJF vede skupinu neutronové aktivační analýzy a v projektu má na starosti výzkum kosmogenních radionuklidů. Mezi klíčové vědecké pracovníky projektu RAMSES patří vedoucí laboratoře CRL Ing. Ivo Světlík, Ph.D., (ÚJF), který v projektu zastiňuje oblast zaměřenou na analýzy  $^{14}\text{C}$  a radiouhlíkové datování. Za FJFI se práce projektu účastní katedra jaderné chemie, vedená prof. Janem Johnem, CSc., a jeho zástupcem doc. Ing. Mojmírem Němcem, Ph.D., který se v projektu bude věnovat měření aktinoidů a štěpných produktů. ARÚP zastupuje PhDr. Dagmar Dreslerová, Ph.D., klíčová vědecká pracovnice, se svým týmem.

RAMSES patří mezi dva největší současné projekty ÚJF, financované z prostředků Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci Evropských strukturálních a investičních fondů, operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání. Nový AMS urychlovač je zároveň volným rozšířením velké výzkumné infrastruktury ÚJF, nesoucí název Centrum urychlovačů a jaderných



Strojovna budovy AMS laboratoře využije i rekuperace odpadního tepla ze zařízení MILEA. Foto: ÚJF AV ČR



Segment vysokoenergetické části zařízení MILEA s Faradayovými detektory. Foto: Ionplus

analytických metod, zkráceně CANAM (z anglického *Center of Accelerators and Nuclear Analytical Methods*). Ta v Řeži zahrnuje dosud dva cyklické urychlovače (U-120M a před několika lety zprovozněný TR-24) a jeden lineární urychlovač (Tandetron 4130 MC) i neutronové kanály instalované u jaderného reaktoru LVR-15. [11]

Další informace o projektu RAMSES v českém i anglickém jazyce lze nalézt na webových stránkách projektu RAMSES: [ramses-project.cz](https://ramses-project.cz). Autor článku děkuje za konzultace členům výzkumného týmu projektu RAMSES, zejména Ing. Ivu Světlíkovi, Ph.D., a doc. Ing. Mojmíru Němcovi, Ph.D.

### Reference

- [1] <http://www.ujf.cas.cz/cs/ramses/>
- [2] M. Němec: *Stanovení vybraných radionuklidů metodou urychlovačové hmotnostní analýzy*. Habilitační přednáška na FJFI ČVUT. [online] [cit. 26.2.2021]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2015-24-Nemec.pdf>. Výrazně upraveno.
- [3] <http://www.ujf.cas.cz/cs/vyzkum-a-vyvoj/velke-vyzkumne-infrastruktury-a-centra/ramses/facility/>
- [4] M. Fejgl a kol.: *Stanovení  $^{14}\text{C}$  s využitím urychlovačové hmotnostní spektrometrie (AMS)*. [online] [cit. 26.2.2021]. Dostupné z: [http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/11\\_fejgl.pdf](http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/11_fejgl.pdf)
- [5] <http://www.ujf.cas.cz/cs/ramses/>
- [6] <http://crl.odz.ujf.cas.cz/>
- [7] <http://crl.odz.ujf.cas.cz/home/zpracovani-vzorkua>
- [8] M. Wernerová: *Téma pro... Radiouhlíkové datování. A/Věda a výzkum 4/2018, s. 67.*
- [9] <http://crl.odz.ujf.cas.cz/>
- [10] [ujf.cas.cz/cs/vyzkum-a-vyvoj/velke-vyzkumne-infrastruktury-a-centra/ramses/facility/](http://ujf.cas.cz/cs/vyzkum-a-vyvoj/velke-vyzkumne-infrastruktury-a-centra/ramses/facility/)
- [11] [ujf.cas.cz/cs/vyzkum-a-vyvoj/velke-vyzkumne-infrastruktury-a-centra/canam/](http://ujf.cas.cz/cs/vyzkum-a-vyvoj/velke-vyzkumne-infrastruktury-a-centra/canam/)

### Další literatura

- I. Světlík, D. Dreslerová, L. Tomášková: *Postupy zpracování vzorků a radiouhlíkové datování*. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/41/084/41084175.pdf?r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/084/41084175.pdf?r=1&r=1)
- I. Světlík a kol.: *Využití, rozvoj a kontrola metod stanovení  $^{14}\text{C}$* . Dostupné z: <https://www.osti.gov/etdweb/servlet/purl/21443896>
- I. Světlík a kol.: *Využití a porovnání metod stanovení  $^{14}\text{C}$  / Stanovení  $^{14}\text{C}$  s využitím urychlovačové hmotnostní spektrometrie*. Dostupné z: [http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/10\\_svetlik.pdf](http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/10_svetlik.pdf)