

zó és Tároló telephelyen, és a tavaly ősszel Bábaapáti-ban átadott Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló telephelyén. Most a legsúlyosabb problémát a szűkös mérési kapacitás jelenti. Az állomásokon begyűjtött minták aktivitása – szerencsére! – annyira kicsi, hogy az országban a miénken kívül egyetlen laboratóriumban sem mérhető a kívánt pontossággal. A ^{14}C aktivitásának béta-számlálásos mérése időigényes. Egyetlen lehetséges megoldás, ha nem aktivitást, hanem a minták $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ izotóparányát mérjük. A két izotóp gyakorisága között 12 nagyságrend a különbség, ezt a hagyományos tömegspektrométerek nem tudják mérni. Ehhez speciális, negatívion-forrást használó és több tömegspektrométert magfizikai gyorsítóval kombináló (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) berendezés szükséges. A módszer nagy előnye, hogy a mérés néhány perc alatt elvégezhető olyan pontossággal és érzékenységgel, mint a béta-számlálásos technikákkal néhány nap alatt, ráadásul ezerszer kisebb mintamennyiség szükséges. Egy ilyen készülék, az EnvironMICADAS (MIni CARbon DATING System) kifejlesztésére kötött kutatási szerződést az Isotopech és ATOMKI közösen a svájci Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ) intézettel. Az új mérés-technikához szükséges mintaelőkészítő rendszerek fejlesztése évekkal ezelőtt elkezdődött, a laboratóriumban készített grafit céltárgyakat több nemzetközileg elismert AMS laboratóriumban tesztelték [9]. Az EnvironMICADAS nemcsak a monitoring tevékenységhez szükséges nagyszámú mérés elvégzését teszi lehetővé, hanem kis mintaigénye miatt a radiokarbon módszer alkalmazási területeit hihetetlen mértékben kibővíti, új kutatási távlatokat nyit.

Befejezésül Ormai Péternek, az RHK főmérnökének szeptember 4-én tartott előadásából idézek, aki a debreceni tudásbázis szerepét a hazai radioaktív hulladék elhelyezési programokban így foglalta össze:

„Egyedi mintavételi és mérési módszerek kifejlesztése; nemzetközi összehasonlításban is kiváló mérőrendszerek; érzékeny mérések; újonnan jelentkező feladatok kreatív megközelítése és megoldások; szak-

mai felkészültség, pontosság, igényesség, rugalmasság, kiváló emberi kapcsolatok a munkák során.

Köszönet a Hertelendi Ede által megkezdett munkák céltudatos folytatásáért, valamint az általa képviselt gondolkodási mód és szemlélet továbbviteléért.”

Ormai Péter soha nem találkozott Szalay Sándorral, nem tudhatja, hogy Edén, és Ede tanítványain keresztül megismert gondolkodásmód és szemlélet tőle származik. A *debreceni tudásbázisról* beszélt, külön hangsúlyozva a *Kísérleti Fizikai Tanszéken* végzett munkák jelentőségét is. A debreceni tudásbázist Szalay Sándor hozta létre, így Őt illeti a köszönet.

Irodalom

1. Molnár M.: A szén és az idő: radiokarbon kormeghatározás. *Fizikai Szemle* 56/6 (2006) 181, <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0606/tart0606.html>
2. Kertész R., Sümegi P.: Az Északi-középhegység negyedidőszak végi őstörténete (Ember és környezet kapcsolata 30.000 és 5.000 BP évek között) http://www.vfmk.hu/07_00000146
3. Mindentudás Egyeteme Szegeden. Sümegi Pál előadása http://www.webradio.hu/index.php?option=com_zoom&Itemid=100&catid=240&PageNo=4
4. Molnár M., Bujtás T., Svingor É., Futó I., Svetlik I.: Monitoring of atmospheric excess ^{14}C around Paks Nuclear Power Plant, Hungary. *Radiocarbon* 49 (2007) 1031–1043.
5. *Éghajlatváltozás 2007*. IPCC jelentés. http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=climate&pid=climate_ipcc&mpx=0&pri=0
6. Haszpra L.: *Légköri szén-dioxid mérés és szén-mérleg kutatás*. http://www.met.hu/omsz.php?almenu_id=homepages&pid=anaten&pri=3&mpx=0
7. Molnár M., Major I., Haszpra L.: Módszerfejlesztés a légköri széndioxid emberi eredetű hányadának meghatározására. 5. *Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia*. Kolozsvár, Románia, 2009. március 26–29. Szerk.: Mócsy I., Szacsvai K., Urák I. etc., Kolozsvár, Ábel Kiadó, 2009, 439–444.
8. Molnár M., Haszpra L., Major I., Svingor É., Veres M.: Development of a mobile and high-precision atmospheric CO_2 monitoring station. *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2009*. Vienna, Austria, 19–24 April, 2009. http://www.atomki.hu/hekal/posters/posztterekpdf-ben/EGU2009poster_MM_final.pdf
9. Molnár M., Rinyu L., Nagy T., Svingor É., Futó I., Veres M., Jull A.J.T., Burr G.S., Cruz R., Biddulph D.: Developments and results from the new Hungarian graphite target line. Presented on the *11th International Conference on Accelerators Mass Spectrometry*, September 14–19, 2008 Rome (Italy) http://www.atomki.hu/hekal/posters/posztterekpdf-ben/Molnar_AMS11poster_final.pdf

GYORSÍTOTT IONNYALÁBOKKAL VÉGZETT KUTATÁSOK AZ ATOMKI-BAN

Kiss Árpád Zoltán
ATOMKI, Debrecen

Történeti bevezető

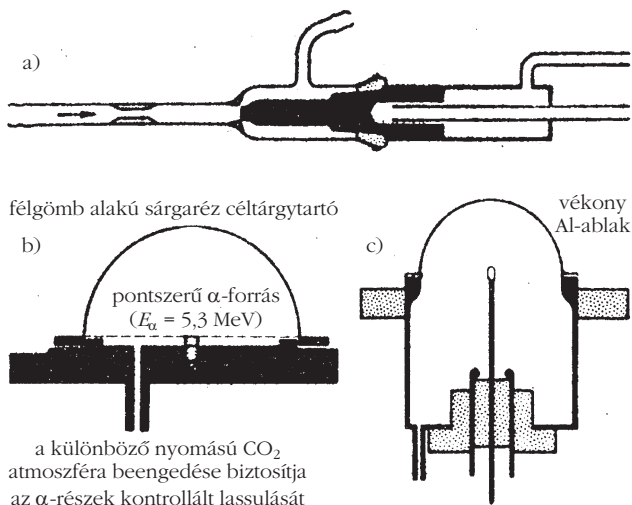
Gyorsított ionnyalábokról nem beszélhetünk az ATOMKI-ban vagy Debrecenben anélkül, hogy ne idéznénk fel Szalay Sándor munkásságát. Kezdjük az 1936-os angliai útjával, amikor Cambridge-ben, a kísérleti magfizikai kutatások központjának számító Cavendish-laboratóriumban, Rutherford ösztöndíjasként megismerkedett ezzel az új tudományterülettel, az atommagfizikával. Fél éves tanulmányútja után

Debrecenben az egyetem Orvosfizikai Intézetében kapott tanársegédi állást. A rendkívül szerény kutatási lehetőségeket figyelembe véve nehéz elképzelni, hogy miként gondolhatott a külföldön elkezdett magfizikai kutatásainak hazai folytatására. Idézzük fel egyik mondását: „Cambridge-ből optimizmussal tértem haza, mert megtanultam, hogy saját kezűleg készített szerény fölszereléssel is lehet értékes tudományos munkát végezni...”. Hazatérése után kísérleti vizsgálatait a $^{27}\text{Al}(\alpha, n)$ reakció tanulmányozásával

kezdte, amely a ^{31}P közbenső magon keresztül elvezet a ^{30}P végmaghoz. Ez a mag radioaktív, és pozitronbomláson keresztül körülbelül 3 perc felezési idővel a ^{30}Si stabil atommagba bomlik.

A magreakció gerjesztési függvénye meghatározható a végmag radioaktivitásának mérésén keresztül. Ezzel a kísérleti módszerrel Szalay Sándor Cambridgeben ismerkedett meg, azonban felismerte, hogy az így meghatározott gerjesztési függvényekben megjelenő elmosódott, széles rezonanciákat nem az atommagnak, hanem a mérőberendezés hatásának kell tulajdonítani. Ebből kiindulva megalkotta az 1. ábrán látható besugárzó kamrát és számlálóberendezést. A megvalósított kísérleti elrendezés lényeges része a pontszerű α -forrás – amelyet polóniumból megfelelő eljárással készített – és a félgömb alakú céltárgytartó. Ezzel a céltárgyat bombázó α -nyaláb energiájának homogenitását minden korábbinál jobban tudta biztosítani. A hurokszálás számlálóberendezés félgömb alakú, vékony alumínium ablaka a jobb számlálási hatások elérését biztosította. A Po-forrásból származó 5,3 MeV-es α -nyaláb energiájának változtatása – gyorsítóberendezés nem lévén – fordított művelettel, lassítással történt, amit a besugárzó kamrába engedett CO_2 gáz nyomásának változtatásával lehetett elérni. Az eredmények a *Zeitschrift für Physik*ben jelentek meg 1939-ben [1]. Ez volt az első magyarországi kísérleti magfizikai közlemény. (A témáról a *Fizikai Szemlé*ben ld. bővebben [2]).

A Po α -forrás és általában a természetes radioaktív források felhasználásával történő magkutató lehetőségei korlátozottak, ezért szükség volt gyorsítóberendezésekben előállított ionnyalábokra. Ezzel Szalay Sándor is tisztában volt, ezért kezdeményezésére a háború után megindult egy Van de Graaff típusú gyorsító építése, amelyet még az egyetem Kísérleti Fizikai Intézetében, igen szerény körülmények között valósítottak meg. Az elkészült Van de Graaff gyorsítón az építésben résztvevő *Koltay Ede* végezte az első magfizikai kísérleteket, és tette közzé azok eredményeit [3]. Ma már érdekességszámba megy a közlemény címe, amelyben „mesterségesen gyorsított” részecskék szerepelnek, hangsúlyozva, hogy nem radioaktív sugárforrás szolgáltatja a céltárgyat bombázó MeV energiájú részecskenyalábot.



1. ábra. Szalay Sándor első hazai magfizikai kísérleti berendezései: a) pontszerű polónium α -forrást készítő eszköz, b) besugárzó kamra, c) számlálóberendezés a pozitronsugárzás mérésére.

Szalay Sándor professzor kutatói tevékenysége az 1954-ben alapított Atommagkutató Intézetben folytatódott, amelynek első igazgatója lett. Az Intézet létrejöttét követően a 100, 300 és 800 keV energiájú protonok és deuteronok előállítására alkalmas kaszkádgyorsítók építése kezdődött el, majd valósult meg [4], amelyeknek fő szerepe a neutronfizikai kutatásokban volt. Az ATOMKI tankrendszerű, a korábbiaknál nagyobb (5 MeV) energiájú protonnyaláb előállítására alkalmas Van de Graaff gyorsítójának (VdG-5) főbb tervezési elképzelései is Szalay Sándor fejében fogalmazódtak meg [5]. Ez a gyorsító vált kezdetben a magreakció- és az ionnyalábokkal végzett magspektroszkópiai kutatások fő berendezésévé.

Iongyorsítók az ATOMKI-ban és alkalmazásaik

Napjainkra az intézet gyorsítóparkja kibővült, mind a nagyobb energiák irányába az MGC-20E izokrón ciklotronnal, amelyik Magyarország legnagyobb részecskegyorsítója, mind a kisebbek felé az Elektron Ciklotron Rezonancia forrással (ECR). Amint az 1. táblázatból látható, ma már az ionok meglehetősen nagy választéka áll rendelkezésünkre – a nehezebbek akár

| Az ATOMKI jelenlegi részecskegyorsítói és azok nyalábparaméterei | | | | | |
|--|--|---------------|--|--|-----------------------|
| gyorsító neve | ionválaszték | lefosztás (Q) | nyalábenergia (MeV) | nyalábtintenzitás ($\leq \mu\text{A}$) | nyalábcsatornák száma |
| MGC-20E izokrón ciklotron | H, D, ^3He , ^4He | 1 – 2 | 2,5 – 18 1 – 10 4 – 26 2 – 20 | 40 40 10 20 | 9 |
| 5 MV-os VdG | H, D, He, C, N, O, Ne | 1 | 0,8 – 5 | 10 | 4 |
| 1 MV-os VdG | H, He, C, N | 1 | 0,05 – 1,5 | 12 | 2 |
| ECR ionforrás | H, He, C, F, N, O, Ne, Fe, Ni, Zn, Kr, Xe, C60 | 1 – 27 | (0,1–30) · Q (keV) | 1 nA – 1mA | 1 |

többféle töltésállapotban is – az ionenergia pedig öt nagyságrendet fog át (a protonok esetében 0,1 keV-től 18 MeV energiáig).

Milyen tudományos munkák végezhetők ezzel az ionválasztékkal? A sok eredmény között válogatva, számos példát lehetne felhozni az intézetben klasszikus kutatási területnek számító *magfizikából*, mint a ^{236}U hiperdeformált állapotainak felfedezése, vagy legújabban a kollineáris hármás hasadás kimutatása. Az új eredmények eléréséhez detektorfejlesztésekre is szükség volt (pl. helyzetérzékeny lavinadetektorok). A gyorsított ionnyalábok az intézetben a magfizikán kívül is alkalmazásra találtak, és általuk új eredmények születtek az *atomfizikában* (pl. a kételektronos „cusp” vagy a többszörös elektronszóródás kimutatása egyetlen ütközésben) és a *nukleáris asztrofizikában* (pl. az asztrofizikai p-folyamat vizsgálata). A részletek tekintetében utalok a *Fizikai Szemlében* megjelent korábbi közleményekre [6–8]. A továbbiakban bővebben a szakterületemhez tartozó, ionnyalábokkal végezhető *elemanalitikával* és *mikromegmunkálással* foglalkozom.

Elemanalitika ionnyalábokkal

A néhány MeV energiára gyorsított ionnyalábokat felhasználó elemanalitikai módszerek a mag- és atomfizikából nőttek ki, és azok kísérleti apparátusát alkalmazzák. Ide soroljuk egyebek között a következő három módszert: az első a részecskeindukált röntgenemisszió alapul, angol nevéből (particle induced X-ray emission) PIXE módszernek nevezik. A második a rugalmas részecske-visszaszórás, amelyet először Rutherford alkalmazott, így neve Rutherford-féle visszaszórás, (Rutherford backscattering) RBS módszer. A harmadik módszer a vizsgálni kívánt célterületen (mintán) végbement magreakció termékeként megjelenő részecskék vagy gamma-sugarak detektálásán alapul, (nuclear reaction analysis) NRA módszer. Ez utóbbi gamma-sugárzást detektáló változata a (particle induced gamma-ray emission) PIGE módszer. E módszerek előnye, hogy kis analizálandó mintamennyiséget (nanogram) igényelnek, és nincs szükség különösebb mintaelőkészítésre. Egyetlen, nem több mint 20–30 perc idejű besugárzásból egyidejűleg a minta sok eleme határozható meg, az egyes elemek kimutathatósági határa elérheti a $\mu\text{g/g}$ tartományt, és az ionnyaláb az esetek nagy többségében nem ronsolja a mintát. Mivel a módszerek a különböző rendszám/tömeg-tartományban különböző érzékenységek, így azok egymásnak kiegészítői, (egyidejű) alkalmazásukkal majdnem a teljes rendszám-tartomány (a lítiumtól az uránig) analizálható. Megjegyzendő, hogy a gerjesztő nyaláb és a minta atomjai közötti rugalmas kölcsönhatáson alapuló módszerrel (Elastic Recoil Detection) a hidrogén kimutatására is lehetőség van. Az ionnyaláb a gyorsító vákuumrendszeréből egy vékony, mikrométer vastagságú fólián keresztül az atmoszférára is kihozható, ami a külön-

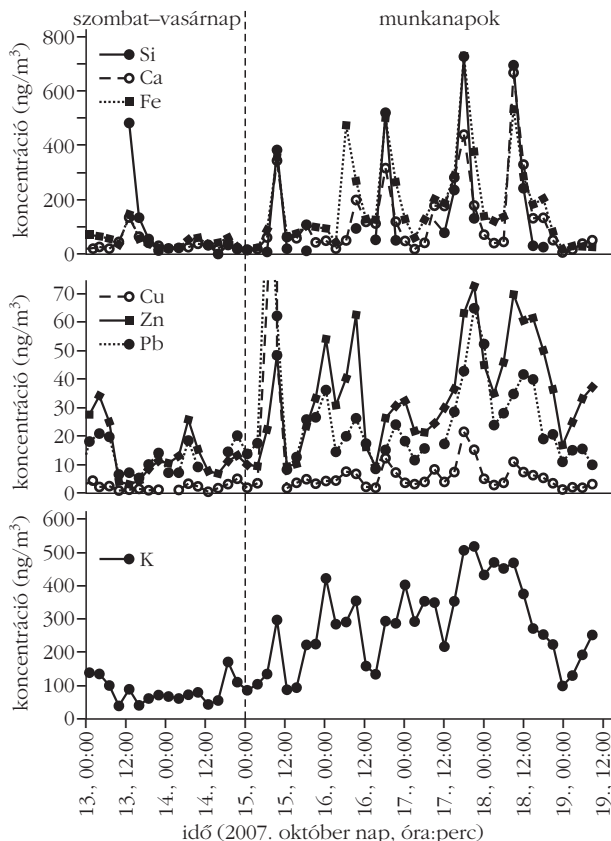
böző méretű és anyagú minták analizálásánál további előnyt jelenthet. Mivel a gyorsított ionok az anyagban rövid a hatótávolságúak (20–50 μm), az említett módszerek hátránya, hogy velük csak a minta felület közeli része analizálható. Ebben a mintamélységben viszont az RBS és az NRA igen jó, nanométeres mélységfeloldással rendelkezik.

A gyorsított ionnyalábok megfelelő mágneses lencsék alkalmazásával igen jól, egészen a tizedmikrométer alatti méretekig fókuszálhatók. A fókuszált nyalábbal, annak megfelelően irányított pásztázásával több mm^2 felület tapogatható le. Az elvi lehetőségek felhasználásával, az elmúlt évtizedekben kifejlesztették a magfizikai gyorsítóberendezésekre telepített pásztázó nukleáris mikroszondákat. A mikroszonda a fókuszált nyaláb helyzetének megfelelően pontról-pontra gyűjti az analitikai adatokat. Így nemcsak a teljes felületről, hanem a felület meghatározott részéről is lehet röntgen-, részecske- vagy gamma-spektrumokat begyűjteni. Ezekből a minta felületének elemtérképei megalkothatók, azaz meghatározható, hogy az egyes elemek a felület mely részein koncentrálnak, vagy éppen mely felületrészről hiányoznak.

Az ATOMKI számára 1993-ban infrastrukturális OTKA pályázat keretében lehetővé vált egy pásztázó nukleáris mikroszonda fő részeinek megvásárlása az Oxford Microbeams Ltd-től, amelyet a VdG-5 gyorsító 0 fokos nyalábcsatornájára telepítettünk. A berendezést az intézet munkatársaira, mérnökeire és műhelyére támaszkodva, pályázati források segítségével sikerült teljesen kiépíteni. (Az ionnyaláb-analitikai módszerek és az ATOMKI ionnyaláb-analitikai laboratóriumának részletesebb leírása megtalálható a [9] közleményben.) A VdG-5 gyorsító mikroszondáján és egyéb nyalábcsatornáin kiépített ionnyaláb-analitikai berendezések és módszerek az alábbi tudományterületeken és témákban nyertek alkalmazást.

Légköri aeroszol

Az intézetben több mint két évtizedes múltra tekint vissza az atmoszférikus aeroszol szisztematikus vizsgálata, ezen belül elemösszetételének meghatározása. Ehhez integrálisan gyűjtött mintákon a PIXE módszerrel alkalmaztuk a következő elemek abszolút koncentráció adatainak meghatározására (ng/m^3 -ben): Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, (Cr), Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, (As), Br, Ba, Pb. Vizsgáltuk az aeroszol durva (PM10) és finom (PM2,5) komponenseiből, azaz a 10 μm , illetve a 2,5 μm aerodinamikai átmérőjűnél kisebb részecskékből gyűjtött minták elemösszetételét, városi (Debrecen) és háttér környezetben (Hortobágy-Nagyiván). 2007-ben elindítottuk az aeroszol gyors időbeli változásának vizsgálatát is, egy-egy hetes időtartamú mérősorozatokban, ahol az úgynevezett streaker mintagyűjtőt használtuk. Az elemi koncentrációkban bekövetkezett változásokat összevetettük meteorológiai adatokkal. Lehetővé vált az aeroszol forrásainak a megismerése, emissziós epizódok szétválasztása stb. A 2. *ábra* példaként a 2007. október



2. ábra. Néhány elem koncentrációjának időbeli változása a 2007. október 13–19-i héten Debrecenben.

13–19-i héten folytatott mérésorozat eredményeként a begyűjtött aeroszolban található különböző elemek koncentrációjának időbeli változását mutatja [10]. Az aeroszolforrások meghatározása statisztikai analízisből történt. Megfigyelhető volt, hogy a talajeredetű forrásokból származó csúcsok hétköznapokon egybeesnek a közlekedési csúcsidőkkel, míg szombat–vasárnap ezen források hozzájárulása minimális. Ez a periodicitás arra utal, hogy a talajeredetű por a közlekedés által kerül a levegőbe. Az is megállapítható volt, hogy a biomassa égetésére jellemző kálium október 15-e után vált jelentőssé, amikor a hőmérséklet csökkent. Ebben az esetben éjszakai és reggeli maximumok figyelhetők meg.

Vizsgálatunk tárgyát képezte még a szaharai aeroszol magyarországi légköri hatása, és a belső-ázsiai Takla-Makán sivatag aeroszoljainak terjedése Kína keleti tájai és Japán irányába. A Chilében található Lonquimay-vulkán kitörésének idején összegyűjtött egyedi aeroszolrészecskék elemeloszlását is részletesen elemeztük.

Biológia, orvosbiológia

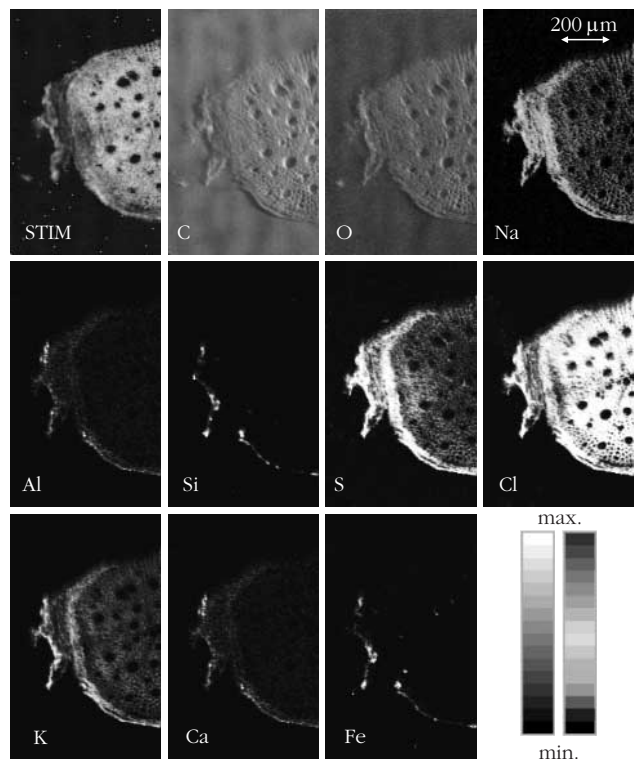
Laboratóriumunkban az ionnyaláb-analitikai módszerek orvosbiológiai alkalmazása a 80-as évek elején kezdődött az emberi vérmintákban lévő nyomelemek meghatározásával. Az orvosbiológiai kutatásoknak nagy lendületet adott az európai NANODERM projekt (2003–2007), amelynek fő célja az volt, hogy kvanti-

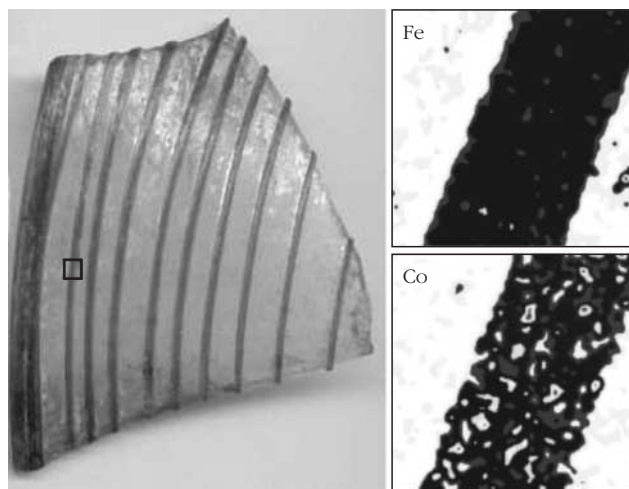
tatív információkat nyerjünk az ultrafinom részecskék behatolásáról a bőr különböző rétegeibe, megismerjük a behatolási útvonalakat, valamint a részecskéknek az emberi egészségre gyakorolt hatását. A cél elérése érdekében egy új mérési elrendezést és kiértékelő rendszert fejlesztettünk ki a debreceni pásztázó nukleáris mikroszondánál. Az új bio-PIXE elrendezést sikeresen alkalmaztuk több multidiszciplináris kutatásra. A fentebb említett NANODERM projekt keretében demonstráltuk, hogy a TiO_2 nanorészecskék nem hatolnak át az ép bőrön. Más típusú interdiszciplináris vizsgálatokban az élő szervezetek nehézfém-akkumulációját tanulmányoztuk vízinövények gyökereiben és a halpikkelyekben felhalmozódó toxikus elemek (Cu, Zn, Pb stb.) mérésével. A 3. ábrán a subás farkasfog (*bidens tripartita*) gyökeréből készült $20\ \mu\text{m}$ vastagságú metszet pásztázó transzmissziós ionmikroszkópiával (scanning transmission ion microscopy – STIM) készült energiavesztési térkép és néhány elem térképe látható. A pásztázott terület nagysága $1200 \times 600\ \mu\text{m}^2$ [11].

Geológia

Vizsgálataink fókuszában mikroszkopikus méretű, rendszerint gömbölyű, többnyire mágnesezhető geológiai objektumok, a szferulák állnak, amelyek egy része Földön kívüli (extraterresztriális) eredetű. Az extraterresztriális szferulák kapcsolatba hozhatók a Föld története során létrejött geológiai változásokkal,

3. ábra. Pásztázó transzmissziós ionmikroszkópiával (STIM) készült energiavesztési térkép és elem térképek, subás farkasfog (*bidens tripartita*) gyökerének $20\ \mu\text{m}$ vastagságú metszetén. A pásztázott terület nagysága $1200 \times 600\ \mu\text{m}^2$.





4. ábra. A 15. századból származó velencei üveg darabja és a négyzettel megjelölt területen végzett mikro-PIXE vizsgálat Fe és Co elem térképei.

valamint meteorit-becsapódások indikátorai lehetnek. Mágneses szferulákon végzett PIXE vizsgálataink hozzájárultak geológusok és csillagászok (MÁFI, ELTE, Konkoly Thege Observatórium munkatársai) azon hipotézisének kísérleti megerősítéséhez, hogy a perm-triász geológiai kor határán bekövetkezett katasztrófát egy, a Földünkhöz közeli szupernóva-robbanás okozta.

A Földön található becsapódási (impakt) kráterek, amelyeket aszteroidák, üstökösök vagy meteoritok hoztak létre, a tudomány számára jelentős forrásai a Földön kívüli anyagoknak. A leghíresebb és leginkább eredeti formájában megmaradt földi becsapódási kráter a Barringer-kráter (Arizona, USA). Feltételezések szerint vasmeteorit becsapódása által keletkezett. A kráter környékén gyűjtött impakt anyagokat PIXE módszerrel vizsgáltuk együttműködésben a Debreceni Egyetemmel. Ezekben a mintákban különösen fontos a meteoritnak tulajdonítható, vasban gazdag zárványoknak (S-Fe-Ni-Cu-rendszereknek) valamint a platina-csoport elemeinek (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt) a tanulmányozása.

Régészet, muzeológia

Az ionnyaláb-analitikai vizsgálatok a régészeti és művészeti tárgyak eredetének, hitelességének, az előállítási technikának, valamint a környezeti hatásokra történő pusztulásuk mértékének meghatározására irányulnak. Hozzájárulnak a restaurálás módszereinek kidolgozásához is. Hazai és külföldi múzeumokkal, kutatóintézetekkel együttműködésben végzett vizsgálataink tárgyai voltak a berakásos díszítésű (inkrusztált) kerámiák, régészeti bronztárgyak, késő-római-kori ezüstpénzek, klasszikus gyűrűkövek és utánzataik, festmények ólomfehér pigmentjei stb. Az üvegszerű anyagok ionnyaláb-analitikai vizsgálata laboratóriumunk archeometria terén végzett egyik fontos tevékenysége. A Tokaji-hegységben található természetes üveg, az *obszidián* vizsgálatának az volt a célja, hogy a Nemzeti Múzeum Litotéka adatbázisa

számára adatokat szolgáltatassunk erről, a kőkorszakban eszközök készítésére használatos fontos alapanyagról. Az adatok elősegíthetik annak eldöntését, hogy egy régészeti lelet például a Tokaji-hegységből való obszidiánból, vagy máshonnan (pl. az olaszországi Lipari szigetéről) származó alapanyagból készült-e.

A múzeumi gyűjteményekben található klasszikus *gyűrűkövek* vizsgálata lehetővé tette az eredetiek és újkori utánzataik elemösszetétel alapján történő elkülönítését. Hazánk különböző helyein, így főleg a budai és a visegrádi királyi paloták területén végzett régészeti ásatásokból sok középkori *üvegtárgy* került napvilágra. Elemösszetételük meghatározása lehetővé tette annak kétségtelen megállapítását, hogy ezek magyarországi termékek voltak-e vagy velencei importból származtak. A kobaltkék üvegek nyomelemösszetételéből a színező anyag származási helyére lehetett következtetni, ennek ismeretében pedig közvetve az üveglelet korára. A 4. ábra egy, a 15. századból származó, a visegrádi palotánál végzett ásatásból előkerült velencei üveg darabját mutatja. A négyzettel megjelölt területen végzett mikro-PIXE vizsgálat Fe és Co elem térképei láthatók a mellékábrákon.

Anyagtudomány

Az anyagtudományban a Rutherford-féle rugalmas részecske-visszaszórási módszert kedvező tulajdonságai miatt elterjedten alkalmazzák. A pásztázó nukleáris mikroszkopozó fókuszált nyalábjával végzett RBS különösen hasznos anyagminták felületi topográfiájának, porozitásának, az elemek mélységi koncentráció-profiljának a meghatározására néhány mikrométeres mélységtartományban. Vékony filmek, multirétegek, felületi mintázatok analízisét, a porozitás mélységi eloszlásának meghatározását porózus szilíciumban és diffúziós profilok mérését végeztük el Si/Ge multirétegekben ezzel a módszerrel. Részben az anyagtudományhoz sorolható, bár a vizsgálati módszer a fentitől különbözik, amikor félvezető anyagból készült részecske- és foton-detektorok működését tanulmányoztuk.

Mikromegmunkálás

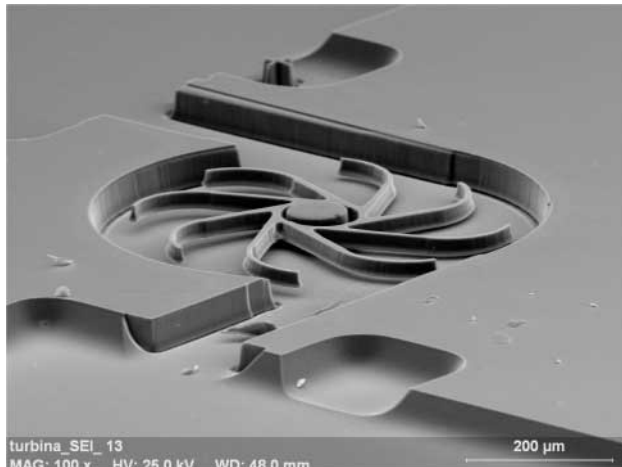
Mikromegmunkálásnak, vagy protonnyaláb-írásnak nevezzük azt a módszert, amikor a fókuszált protonnyaláb anyagmódosító hatását használjuk ki különböző mikronnyi méretű alakzatok, anyagszerkezetek előállítására. A protonnyalábot megfelelő alakzat mentén mozgatva a minta felületén, annak anyagában szelektív módosulás jön létre. A besugárzott terület bizonyos oldószerek hatására az anyagtól függően vagy kioldódik, vagy éppen megmarad. Ezzel a módszerrel sokféle eszköz hozható létre. A 2002-ben indult kutatásaink egy része a mikromegmunkálásra alkalmas úgynevezett rezisztanyagok tanulmányozására, más része a módszer alkalmazásaira irányul [12].

Rezisztanyagok

A mikromegmunkáláshoz eddig használt rezisztanyagoknál megvizsgáltuk, hogy azok miképpen változtatják fizikai tulajdonságaikat (pl. optikai törésmutatójukat) a részecskenyalábbal történő besugárzás hatására. Ennek döntő jelentősége van a polimerben kialakított optikai hullámvezetőknél. Fontos feladat a mikromegmunkálásra alkalmazható új anyagok keresése is. E célból vizsgáltuk és alkalmasnak találtuk a részecskék detektálására használt CR-39 anyagot és a fotoérzékeny üveget, a Foturant. Görög–magyar együttműködésben kifejlesztettünk egy új rezisztanyagot is, a TADEP nevű kevert polimert.

Példák a mikromegmunkálással laboratóriumunkban eddig létrehozott eszközökre: *polikapilláris film*, amelyet egy 50 mikrométer vastagságú fóliában egymástól egyenlő távolságra (19 μm) létrehozott 10 mikrométer átmérőjű kör alakú kapilláris csövek alkotnak (2600 kapilláris 1 mm^2 fóliafelületen). Az atomfizikában, mint nagy töltésű, kis energiájú ionok vezetője alkalmazható, az orvosi kutatásban pedig mint szűrőfólia. A szabályosan elhelyezkedő, kör keresztmetszetű kapillárisok sorozata sokkal jobb tulajdonságú szűrő, mint a jelenleg használatos, nehézionokkal nagyenergiájú gyorsítóknál létrehozott, véletlenszerűen elhelyezkedő, sokszor átfedő lyukakkal rendelkező szűrőfóliák. Talán a legérdekesebb eszköz az 5. ábrán látható 3 dimenziós szilícium *mikroturbina*. Előállításához két különböző energiájú protonnyalábbal végzett besugárzást alkalmaztunk, amelyek előhívása két különböző kimaratósi mélységet eredményezett a porózus szilícium anyagában. Ez a munka első demonstrációja annak, hogy szilíciumban a protonnyaláb-írás segítségével mozgó alkatrészekkel rendelkező, mikrométer méretű berendezést lehet készíteni.

Az ATOMKI Ionnyaláb-alkalmazások Laboratóriuma tevékenységének és eredményeinek részletesebb ismertetése megtalálható a [13] közleményben.



5. ábra. Szilícium lapkára integrált mikroturbina.

Összefoglalva: talán nem túlzó az a megállapítás hogy a Szalay Sándor professzor által megalapított tudományos iskola szellemisége a gyorsított ionnyalábokkal végzett kutatásokban tovább él és fejlődik, tehát az iskola második és harmadik generációja is jól sáfárkodott a „Prof” örökségével. Szerencsésnek érzem magam, hogy személyesen ismerhettem és tisztelhettem őt.

Irodalom

1. A. Szalay, *Zeitschrift für Physik* 112 (1939) 29.
2. Csongor É., *Fizikai Szemle* 14 (1964) 369.
3. Koltay E., *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.* 16 (1963) 93.
4. Koltay E., *Fizikai Szemle* 14 (1964) 373.
5. Szalay S., Koltay E., *Atomki Közlemények* 6 (1964) 3.
6. Krasznahorkay A., *Fizikai Szemle* 54 (2004) 161.
7. Krasznahorkay A., *Fizikai Szemle* 57 (2007) 357.
8. Sulik B., *Fizikai Szemle* 54 (2004) 151.
9. Uzonyi I., *Archeometriai Műhely* 2007/3. 11–18.
10. Kertész Zs., Dobos E., Szoboszlai Z., Borbélyné Kiss I.: *IV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, Debrecen, 2008.* (Szerk.: Orosz Z. és mtrstai) II. kötet, 335–341.
11. Szikszai Z., Kertész Zs., Kocsár I., *Acta Biologica Szegediensis* 52 (2008) 81–83.
12. Rajta I., *Fizikai Szemle* 57 (2007) 187.
13. Borbély-Kiss, I. és mtrstai, *Atomki Annual Report* 2008, 1–14.

AZ ATOMMAGKUTATÓ INTÉZET K-Ar LABORATÓRIUMA ÉS TEVÉKENYSÉGE

Balogh Kadosa, Pécskay Zoltán
MTA ATOMKI, Debrecen

A K-Ar módszer egyike a természetes radioaktivitáson alapuló földtani kormeghatározási módszereknek. Bevezetését az Atommagkutató Intézetben Szalay Sándor professzor úr javasolta a 70-es évek elején. Az ATOMKI-ban művelt sok kutatási témához hasonlóan erre a szükséges berendezések elkészítésével került sor. Esetünkben ez egy nemesgáz-tömegspektrométer, továbbá egy hozzá csatlakozó vákuumrendszer elkészítését jelentette, az utóbbi a kőzetek argontartalmának kinyerésére és megtisztítására szolgált. Be-

rendezéseink 1974 óta folyamatosan működnek, méréseink színvonalát nemzetközi hitelesítő programban való részvétellel igazoltuk.

Laboratóriumunkban több mint száz földtörténeti probléma vizsgálata történt meg, cikkünk terjedelmi korlátai ezek eredményeinek említését nem teszik lehetővé. Ehelyett áttekintjük a K-Ar módszer elvét és felhasználási lehetőségeit a különböző jellegű földtörténeti problémák tisztázására. Kitérünk emellett a műszerépítés során alkalmazott néhány új megoldá-