

fizikai szemle

HUN
REN



70

HUN-REN ATOMMAGKUTATÓ INTÉZET

A gyorsítóalapú
tudományok európai
laboratóriuma

Alapítva: 1954

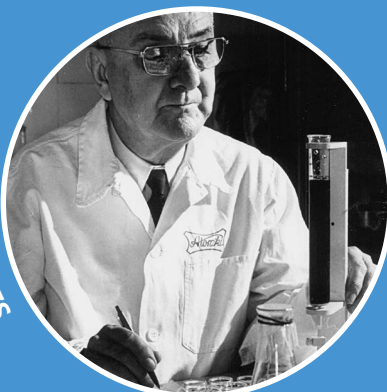


EUROPAI SZERVEZETEK TÁRSULAT - EPS TÖRTÉNELMI EMLÉKHely

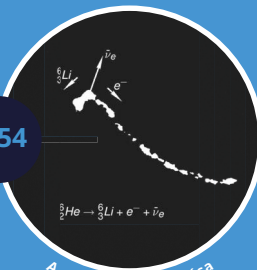


MTA
Kiváló
Kutatóhely

Szalay Sándor

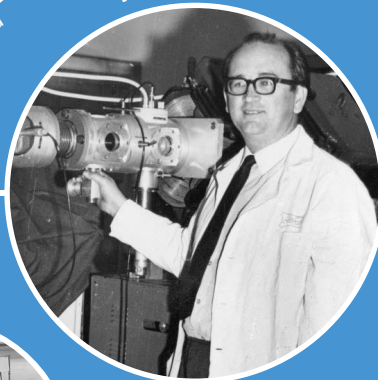


1954



A neutrínó kimutatása

Koltay Ede



1971

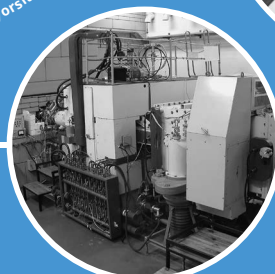


(5MV) Van de Graaff-gyorsító

Berényi Dénes



1984

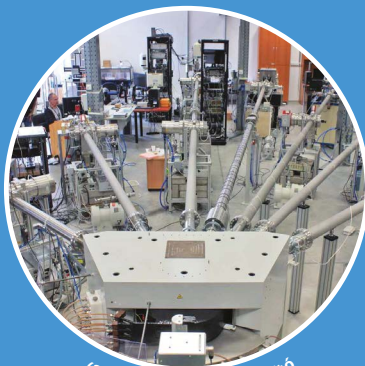


(MGC-20) ciklotron



<https://atomki.hu>

2024



(2MV) Tandetron gyorsító



(LEA) radiokarbon spektrométer



(SNMS) felületelemző komplexum

2024/6

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, a Kulturális és Innovációs Minisztérium, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:
Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:
Asbóth János, Biró László Péter, Czitrovsky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczi Bence, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Olvasószerkesztő:
Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő:
Hock Gábor

A folyóirat e-mail címe:
fsz_szerkesztok@elft.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:
<http://fizikaiszemle.elft.hu>



A címlapon:
70 éves az ATOMKI

TARTALOM

ATOMKI 70 – TEMATIKUS BLOKK

Vendégszerkesztő: Gyürky György

<i>Dombrádi Zsolt</i> : 70 éves a HUN-REN Atommagkutató Intézet – Bevezetés	181
<i>Lévai Géza</i> : ATOMKI: A születéstől a kamaszkorig (~1970) – Interjú	182
<i>Kunné Sohler Dorottya</i> : Az ATOMKI jelene és jövője a modern kísérleti magszerkezeti kutatásokban	187
<i>Gyürky György, Kiss Gábor Gyula</i> : A csillagok magfizikája (nem csak) az ATOMKI gyorsítói mellől	190
<i>Krasznahorkay Attila</i> : Új részecske kísérleti kimutatása az ATOMKI-ban	193
<i>Angeli István, Csige István, Fenyvesi András, Kereszturi Ákos, Kiss Árpád Zoltán, Molnár József, Rácz Richárd, Szarka Máté, Zilizi Gyula</i> : Úrkutatással kapcsolatos tevékenységek az ATOMKI-ban	196
<i>Palcsu László, Lisztes-Szabó Zsuzsa, Benkó Zsolt, László Elemér</i> : Kronológia különböző időléptékekben	199
<i>Szikszai Zita, Major István, Horváth Anikó</i> : Örökségtudomány	202
<i>Kertész Zsófia, Haszpra László, Molnár Mihály</i> : Fókuszban a levegőtisztaság	205
<i>Csik Attila, Hunyadi Mátyás, Vad Kálmán</i> : A mikro- és nanovilág megismerése anyagvizsgálati módszerekkel	208
<i>Sulik Béla, Juhász Zoltán, Herczku Péter, Biri Sándor, Rácz Richárd</i> : Gyorsítókkal az atomfizikától az űrkémiaiáig	211

ATOMKI 70 – A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Király Beáta</i> : Hercegnőtorta ismeretterjesztő módra	213
<i>Borbélyné Bacsó Viktória</i> : Innovatív tehetséggondozás és pályaaorientáció	215

A Fizikai Szemle jelen száma a debreceni Atommagkutató Intézet alapításának 70. évfordulójára született. Az intézet tevékenységét bemutató cikkek – esetenként bővített formában –, valamint egyéb kapcsolódó anyagok elérhetők a <https://atomki.hu/atomki-70> weboldalon is.

ATOMKI 70

<i>Zs. Dombrádi</i> : The HUN-REN Nuclear Research Institute is 70 years old – Foreword
<i>G. Lévai</i> : ATOMKI: from birth to adolescence (~1970) – Interview
<i>D. Kunné Sohler</i> : Present and future of ATOMKI in modern experimental nuclear structure research
<i>Gy. Gyürky, G. Gy. Kiss</i> : Nuclear physics of stars studied (not only) at the ATOMKI accelerators
<i>A. Krasznahorkay</i> : Detection of a new particle in ATOMKI
<i>I. Angeli, I. Csige, A. Fenyvesi, Á. Z. Kiss, J. Molnár, R. Rácz, M. Szarka, Gy. Zilizi</i> : An overview of space research related activities of ATOMKI
<i>L. Palcsu, Zs. Lisztes-Szabó, Zs. Benkó, E. László</i> : Chronology on different time scales
<i>Z. Szikszai, I. Major, A. Horváth</i> : Heritage science
<i>Zs. Kertész, L. Haszpra, M. Molnár</i> : Air quality in focus
<i>A. Csik, M. Hunyadi, K. Vad</i> : Application of materials science methods to understand the micro- and nano-structures
<i>B. Sulik, Z. Juhász, P. Herczku, S. Biri, R. Rácz</i> : With particle accelerators from atomic physics to space chemistry
<i>B. Király</i> : Princess cake – a model for outreach activity
<i>V. Borbélyné Bacsó</i> : Innovative talent management and career guidance

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM



70 ÉVES A HUN-REN ATOMMAGKUTATÓ INTÉZET

Az ATOMKI 70 éve nem véletlenül jött létre. A magyar kormány is felismerte, hogy az atomkorban szüksége van az országnak nukleáris kompetenciákra. Ez azóta sem változott. Az ATOMKI küldetése magfizikai kutatás és a nukleáris technológiai módszerek alkalmazása a tudomány különböző területein, elsősorban az űrkutatásban, az anyag-, a környezet-, és az örökségtudományban, valamint a fenntartható fejlődési célok megvalósításában, a globális társadalmi kihívások megválaszolásában különös tekintettel a klímaváltozásra, a környezetszennyezésre és – a nukleáris technológia szektorokon átívelő alkalmazásával – a műszaki kihívásokra.

70 év nehézségei és sikerei után elmondhatjuk, hogy ma az ATOMKI az MTA kiváló kutatóintézete, Magyarország gyorsítóközpontja, a gyorsítókra alapozott tudományok európai laboratóriuma, nemzetközileg ismert és elismert multidiszciplináris kutatóintézet. Az ATOMKI Európa vezető magfizikai intézeteivel egy konzorciumban dolgozva biztosít világszínvonalú infrastruktúrájára és nemzetközi szinten elismert kompetenciáira támaszkodva olyan kutatási lehetőségeket hazai és főleg európai kutatócsoportoknak, amelyek lehetővé teszik számukra, hogy élvonalbeli kutatásokat folytassanak. Olyan intézet, amellyel Közép- és Távol-Kelet kutatóintézetei keresik az együttműködést, és amelyet rendszeresen hívnak meg az Európai Horizont programokba és más nemzetközi kutatási konzorciumokba. Az ATOMKI kutatóit és kutatási javaslatait szívesen fogadják a világ nagyenergiás magfizikai laboratóriumaiban.

Az ATOMKI az eredményességét magas szintű nemzetközi folyóiratokban megjelent közleményeivel méri. Az intézet tíz év alatt – folyamatosan növelve teljesítményét – megduplázta a közleményeinek számát. Minden munkanap megjelenik egy ATOMKI-s hozzájárulással készült nemzetközi közlemény. A cikkek 85%-a nemzetközi együttműködésekben születik.

Az ATOMKI infrastruktúraorientált intézet. Sikereit az elmúlt tíz év infrastrukturális beruházásainak köszönheti. Alapvető kutatási infrastruktúrájának 21. századi szintre való felhozása nagyrészt megtörtént. 2016-tól

GINOP-projektek keretében sikerült létrehozni a tandem-, az örökségtudományi és a környezettudományi laboratóriumot, a radiokarbon-kompetenciaközpontot, valamint sikerült támogatni a geokronológiát, a felületfizikát és a nemzetközi magfizikai együttműködések.

A beruházások eredményeként TOP50 kutatási infrastruktúra közül négy az ATOMKI-ban található. Az ATOMKI tagja az ICOS klímakutatási és az E-RIHS örökségtudományi osztott bázisú európai kutatási infrastruktúra-konzorciumoknak, valamint a EUROLabs magfizikai, a EUROPlanet űrkutatási és a Chetec asztrofizikai kutatási projekteknek.

Az új beruházásokra alapozva az ATOMKI 10 év alatt megújította kutatási portfólióját, és egy multidiszciplináris kutatóintézet lett. A hagyományos magfizikai, nukleáris asztrofizikai, nukleáris technológiai diszciplínák mellett megnőtt a környezet- és az örökségtudomány szerepe, kiépülőben van egy űrkémiai központ, megerősödött és átalakulóban van az anyagtudomány. Olyan területeken jelent meg az intézet, ahol mások évtizedek óta jelen vannak. Megtalálta azokat a szűk piaci réseket, ahova korlátozott költségvetéssel is érdemben be tudott szállni. Öt év alatt ledolgozta esetleges lemaradását, és nagy lendülettel, lelkesedéssel és hittel felzárkózott az élvonalba.

Az ATOMKI egy nevében patinás, tematikájában mégis új és magyar intézet. Úgy van felépítve, hogy kutatási tevékenysége egyaránt hasznosuljon a tudományban, a társadalomban és a technológiai fejlődésben, és hogy legyenek olyan ATOMKI-specifikus területek, amelyeken az intézet a világ élvonalába tartozó infrastrukturális és technológiai szolgáltatásokat tud nyújtani, hogy képes legyen nemzetközi kutatócsoportokat és ipari partnereket közös munkákba bevonni, s ezáltal képes legyen az európai kutatási térség határát a Hortobágy keleti széléig elnyújtani. Ez felel meg az ATOMKI globális tudományos értékrendjének: verseny helyett együttműködés, jelentős erőforrásokat igénylő kihívások felvállalása és a rendelkezésre álló források optimális kihasználása.



Dombrádi Zsolt
magfizikus, az MTA doktora
2016-tól az ATOMKI igazgatója

ATOMKI: A SZÜLETÉSTŐL A KAMASZKORIG (~1970)

Lévai Géza

HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

Ebben a cikkben visszatekintünk az ATOMKI alapítása körüli időszakra és az intézet első másfél évtizedére abban a formában, hogy megszólaltatunk olyan kutatókat, akik maguk is tanúi voltak ezeknek az időknek, vagy első kézből vannak információik azokról „ős-ATOMKI-sektől”. A résztvevők: Angeli István (AI) nyugalmazott egyetemi tanár (ELTE, fizikus szak 1955; ATOMKI: 1954–67; KLTE/DE Kísérleti Fizikai Tanszék: 1967–95), Kiss Árpád (KÁ) az ATOMKI professzor emeritusa (KLTE, fizikus szak 1963; KLTE Kísérleti Fizikai Tanszék: 1963–67; ATOMKI: 1967–2009) és Lovas Rezső (LR), az MTA tagja, az ATOMKI igazgatója 1997-től 2008-ig (KLTE, fizikus szak 1970). A beszélgetést Lévai Géza (LG), az ATOMKI igazgatóhelyettese (KLTE, fizikus szak 1987) vezette és jegyezte le, helyenként pontosítva és kiegészítve az adatokat és információkat. Az olvasók a korszakról és az alapító igazgató, Szalay Sándor munkásságáról további forrásokból tájékozódhatnak az interjú végén található irodalomjegyzékből.

LG: A beszélgetésünknek az ATOMKI 70 évvel ezelőtti alapítása adja az apropóját, de a történet igazából nem akkor kezdődött. Érdeemes kitérni az alapítás megelőző időszakra is, és ezen belül az alapító Szalay Sándor pályájára. A Pázmány Péter Tudományegyetem matematika-fizika szakán végzett, majd 1932-ben ott is doktorált. Néhány hónapot dolgozott Szegeden Szent-Györgyi Albert csoportjában (a C-vitamin-kutatás során ő is részt vett például a rengeteg zöldpaprika kicsutkázásában), majd egy-egy ösztöndíjas évet töltött Lipcsében Peter Debye mellett, illetve Münchenben. Ezek után hívta Debrecenbe tanársegédnek Gyulai Zoltán professzor az Orvostudományi Fizikai Intézetbe. A későbbi pályáját meghatározó cambridge-i ösztöndíjra már innen indult el.

LR: Ez egy állami ösztöndíj volt, amivel az Ernest Rutherford által vezetett Cavendish Laboratóriumban tett látogatást. Itt ismerkedett meg az akkoriban még gyerekcipőben járó atommagfizikával.

LG: Rutherford 1908-ban nyerte el a kémiai Nobel-díjat az elemek radioaktív bomlásának kutatásáért. Megjegyzendő, hogy Szalay Sándor cambridge-i látogatásával majdnem egyidőben kapta meg két korábbi „mestere” a Nobel-díjat: Peter Debye 1936-ban a kémiai, Szent-Györgyi Albert pedig 1937-ben az orvosi. A három Nobel-díjas egyike sem a fizikai díjat kapta meg: ez talán előrevetíti Szalay Sándor későbbi szerteágazó kutatási tevékenységét, aminek a lenyomata máig érzékelhető az ATOMKI interdiszciplináris kutatási irányjaiban.

AI: A cambridge-i ösztöndíjas hónapok megerősítették Szalay Sándorban azt a gondolatot, ami aztán a „Szalay-iskola” alapvetése lett, vagyis, hogy a kísérleti kutatásokhoz a kutató lehetőleg készítse saját maga a

berendezéseit. Tehát a kutatások feltételeinek a megteremtése nemcsak, vagy nem elsősorban az anyagi forrásokon múlik, hanem a kutatói közösség tehetségén és szellemi értékein.

LG: Az angliai hónapok nyomát felfedezhetjük az intézet máig élő hagyományaiban is. Például a szemináriumok előtti tea „intézményében”, vagy a laborépületek között megbújó tenispályában is.

KÁ: És a fűben növvő százszorszépekben. Emlékszem, hogy az intézet parkjában sétálgatva Szalay Sándor néha emlegette, hogy mennyivel szebb, ha virágok nőnek a fű között.

LG: Hogy indult el végül is a debreceni és egyben a magyarországi atommagfizika?

AI: Gyulai Zoltán professzor hozzájárult ahhoz, hogy Szalay Sándor ne az ő témáján, a szilárdtestfizikai kutatásokon dolgozzon, hanem atommagfizikával foglalkozzon, de forrásokat ehhez nem tudott biztosítani. Ám Szalay Sándornak sikerült akadémiai támogatást kapnia, amivel elkezdhette a Cambridge-ben megfogalmazott tervei megvalósítását. A bécsi Rádium Intézetből szerzett rádium-D anyagot, amiből polóniumot vont ki. A pontszerűvé preparált polóniumforrás alfa-sugárzásával bombázott könnyű atommagokat a Cambridge-ben általa javasolt gömbszimmetrikus geometriát alkalmazva, és vizsgálta az előidézett magfolyamatokat. 1939-ben jelent meg az első Magyarországon végzett magfizikai kísérletből írt nemzetközi tudományos cikk a *Zeitschrift für Physik* folyóiratban.

LG: Szalay Sándor az idegen nyelvű cikkeit Alexander Szalay néven jegyezte. Mi lehet ennek az eredete?

AI: Valószínűleg a cambridge-i környezet hatására használta így a nevét. Volt, aki sznobizmusnak tartotta, de

mások elfogadták. Például Csikai Gyula is, aki Julius Csikai néven publikálta a cikkeit. Amikor egy korai idegen nyelvű kéziratomat bemutattam a profnak, István Angelit írtam. Behívott és megkérdezte, nem inkább a Stevent akarnám használni. Mondtam, hogy nem. Elfogadta, bár látszott rajta, hogy nem ért egyet velem.

LG: 1940-ben Szalay Sándort nevezték ki professzornak az Orvostudományi Fizikai Intézetben. Az atommagfizikai kutatások a háború alatt is folytatódtak. Az ATOMKI házi múzeumában korábban látható volt egy négyzetláncos labornapló, amelyen a kihajtott lap tetején akkurátusan fel volt tüntetve az aktuális dátum: 1944. június 2. Aznap érte Debrecen, közelebből a vasútállomást a szövetséges légierő bombázása, amivel bizonyára a német csapatok átcsoportosítását próbálták akadályozni a néhány nappal későbbre tervezett normandiai partraszállás előtt. Ez az egyik olyan dátum, amikor az ATOMKI története és a világtörténelmi események keresztezték egymást.

AI: A háború után folytatódtak a magfizikai kutatások, amelyek kibővültek orvosi alkalmazásokkal. Az Orvostudományi Fizikai Intézetben alkalmaztak először radioaktív izotópokat nyomjelzőnek orvosi és farmakológiai vizsgálatokhoz.

LG: 1950-ben az egy évvel korábban alakult Természettudományi Karhoz helyezték át az intézetet, Kísérleti Fizikai Intézet névvel.

AI: Szalay Sándort hívták, hogy szervezze meg az akkor alapított KFKI Magfizikai Osztályát, de ő inkább maradt Debrecenben. A háború után világossá vált az atomenergia fontossága, ezért Magyarországon is elindult az uránérc utáni kutatás. Már korábban, 1947-ben elkészítettek egy Geiger-Müller-számlálót a Földtani Intézet anyagi támogatásával. Szalay Sándor Földvári Aladár geológussal elkezdte a lehetséges uránlelőhelyek feltérképezését. 1949-ben a Mecsekben egy szénkibúvásban találtak jelentős, a szokásost 40-szeresen meghaladó aktivitást. Ezt követően a fizikus Szalay Sándor kirándulást tett a geokémia területére, mivel szeretne volna megérteni az urán bedúsulásának a mechanizmusát. Rájött, hogy a gránitos kőzetek lepusztulása során az urán érintkezésbe kerülhet a felszíni vizekben levő bomló növényi anyagokkal, ahol az kicsapódhat, és feldúsulva megmaradhat az elszénesező növényi maradványokban. Ezzel Szalay Sándor egy új geokémiai folyamatot fedezett fel, amiért 1952-ben megkapta a Kossuth Díjat.

LG: Az ötvenes években bizonyára minden ország stratégiai kérdésnek tekintette az uránkutatást...

AI: 1952-ben a Tervhivatal elnöke, Vas Zoltán látogatást tett a Kísérleti Fizikai Intézetben, és tájékozódott az uránkutatás eredményeiről. Felvetette, hogy létesüljön Debrecenben egy nagy kísérleti üzem, amely kinyerné az uránt az erőművi szénhamuból. Feltette az ominózus kérdést, hogy „Mikor tesz le az asztalra 1 kg uránt, Szalay elvtárs?” Utasította Sza-

lay Sándort, hogy készítsen tervek egy kutatóintézet és egy termelőüzem létesítésére.

LG: A krónikák szerint végül a tervekől egy, az MTA felügyelete alá kerülő kutatóintézet megalapítása valósult meg. A döntés 1953-ban született meg, de a minisztertanácsi határozat 1954 januárjára tolódtott. A határozatban 24 fős létszámot rendeltek a megalakuló intézethez. De honnan lehetett ennyi kutatót találni egy korábban néhány fővel működő intézményhez?

AI: A debreceni létszám ehhez nem volt elegendő, ezért Budapestre is küldtek pályakezdő fizikusokat az új intézetbe. Így kerültem én is Debrecenbe negyedéves fizikushallgatóként az ELTE-ről, másokkal, például Lovas Istvánnal együtt. Mi jártunk aztán bányákba és erőművekbe, hogy mintákat vegyünk a szénből, illetve az erőművi hamuból annak érdekében, hogy meghatározzuk ezek urántartalmát.

LG: Hogy történt ez a kinevezés?

AI: 1954. július 1-jén alakult meg hivatalosan a Debreceni Fizikai Kutató Intézet, a későbbi ATOMKI. Az ELTE Fizikai Intézetének könyvtárában, a Puskin utcában vártuk a kinevezést, de szóltak, hogy csúszik az adminisztráció, ezért kapunk egy fél hónapi ösztöndíjat, és várjunk két hetet. A könyvtárban vártuk a fejleményeket. E néhány nap alatt, július 4-én került sorra a futball-világbajnokság döntője Bernben, amit Magyarország elveszített Németország ellen. Egyszer csak jött valaki, hogy tüntetés van a Blaha Lujza téren. Ez 1954-ben elképzelhetetlen volt. Oda mentünk, és láttuk, hogy tömegek vonulnak. A Blaha Lujza téren volt a nagy lottó iroda. A sok ember pedig arra fogadott, hogy az Aranycsapat megnyeri a döntőt. Mire odaértünk, már be volt törve a lottózó ablaka. Végül július 10-én indultunk Debrecenbe.

LG: Ez egy újabb példa arra, hogy az ATOMKI története összefonódik a világ eseményeivel. No, de az új intézetnek helyet is kellett biztosítani. Mit tudunk az ATOMKI mai székházaként szolgáló épületről? Van egy 1917-ben készült fénykép az igazgatói irodában, amelyen a Bem téren álló három téglalapú épület látható, lényegében a mai formájában. A felirat szerint az Országos Tanító Árvaházat látjuk rajta.

AI: Az egyetem Orvostudományi Fizikai Intézete és később a Kísérleti Fizikai Intézet a Bem tér 18/a épületben működött. A megalakuló intézet is ott indult el, de aztán megkapta a Bem tér 18/c alatti épületet, amiben előtte már nem árvaház, hanem 1954-ig a Szakérlettségi Kollégium működött. Ez lett az ATOMKI I. épülete. A két épület között a Bem tér 18/b megmaradt a Debreceni Orvostudományi Egyetemenél (DOTE), és egészen a közelmúltig ott volt elhelyezve az Orvosi Vegytani Intézet. Ma ott már a két másik fizikai tanszék, az elméleti fizikai és a szilárdtestfizikai működik.

LG: Ezzel kialakult a fizika campus, ahol egy helyen van minden fizikával kapcsolatos debreceni intézmény.

- Egyetemistaként a nyolcvanas évek közepén az óráink között még sokat kellett villamosozni, mert az Elméleti Fizikai Tanszék az egyetem kémiai épületében, a Szilárdtestfizikai Tanszék pedig a főépületben volt. Az árvaházi múltra csak az ATOMKI-tól egy sarokra, a Bem téri villamosmegállónál akkor még meglévő épületben működő intézmény, az állami gondozottak otthona emlékeztetett. Bizonyára ez volt az árvaház jogutódja.
- LR:** Volt a szomszédban egy működő is.
- AI:** A hátsó részen az úgynevezett „cementgyár” működött. Az ATOMKI új épületei később ennek a Cementipari Vállalatnak a helyére kerültek.
- LR:** Ez a Kísérleti Fizika mögötti részen volt.
- KÁ:** Igen. És volt ott egy gyógyszergyár is. Gyerekkoromban vashiány miatt vasbort kellett inni, és azt ott készítették. Sőt talán még valami pipakészítő műhely is működött ott, ahol cseréppipákat gyártottak.
- LG:** Cementgyár, gyógyszergyár, pipakészítő műhely, árvaház: igazán emblematisztikus intézmények. No de térjünk vissza az alapítás korába!
- AI:** Az intézet alapításakor az a megállapodás született, hogy amennyiben Szalay vállalja az uránkutatást, akkor az ő egyéb irányú kutatásait finanszírozzák. Mik voltak ezek? Szalay Sándor „felosztotta a világot” a tanítványai között. Csikai Gyulával a neutrínókísérletet tervezték, Koltay Edére a Van de Graaff-gyorsító fejlesztését bízta, Fényes Tibor kapta a magspektroszkópiát, ami akkor az alfa-spektroszkópia volt.
- LR:** Berényi Dénes pedig a béta-spektroszkópiát kapta meg. Alfa, béta, gamma: gamma-spektroszkópia szintén lett.
- AI:** Igen, Máthé Gyurka készítette az első gamma-spektrumot szcintillációs technikával. Az uránkutatást pedig, ahogy korábban mondtam, Szalay Sándor az ELTE-ről érkező fiatalokkal folytatta. Mi, Lovas Pista és én jártunk „szenet lapátolni” – ahogy ő emlegette ezt a tevékenységet. A fárasztó terepmunkákhoz gyakran kaptunk segítséget a Kísérleti Fizikai Intézet állományából. Velem jött néha Dézsi Zoltán tanársegéd, más alkalommal pedig Ács Miklós egyetemi hallgató. A szén-urán téma lezárása után következett az urántartalmú források keresése, mert a földrétegeken átszivárgó víz „hírt hozhat” a hegyben megbúvó uránércről. A zempléni forrásvízminták begyűjtésénél többnyire jelen volt még Scherf Emil geológus: az ő feladata volt meghatározni, hogy a forrás milyen típusú talajrétegekből jön ki.
- LG:** Az ELTE-ről érkezve, dunántúliként milyennek láltad Debrecent?
- AI:** Nagyon másnak. A falumban ott folyt a Séd patak a dombok között, Veszprémben pedig, ismerhetitek, nincs olyan utca, ami egyenes lenne. Debrecenben se folyó, se hegy, minden lapos; és egy kicsit – vagy nem is kicsit – olyan ósdi. Maga a város első ránézésre lehangelő volt, de az intézet és a kutatómunka izgalmasnak tűnt. Láttam az értelmét, a célját.
- LG:** Akkoriban egy fiatal kutatónak ez a pálya milyen perspektívát jelentett?
- AI:** Távoli cél nem volt kitűzve, de azt láttam, hogy az intézetben mindenki milyen érdekes dolgokkal foglalkozik. Napközben a nekem kiadott „szenes” munkát végeztem, utána a fennmaradó időmben tudtam foglalkozni az engem érdeklő témákkal. Az atommagfizika nagyon érdekelt. Megrendeltem a Blatt–Weisskopf „Elméleti atommagfizika” könyvet, ami 1954-ben egy modern könyv volt. Ezt olvastam, remélve, hogy egyszer majd ezzel foglalkozhatok. Lovas Pista pedig Dyson „Relativisztikus kvantummechaniká”-ját olvasta. Tehát mindannyian tudtuk, hogy a munkaadó által kiadott feladatot el kell végeznünk a fizetésünkért, de reméltük, hogy később olyasmit csinálhatunk, ami igazán érdekel minket.
- LG:** Mennyire lehetett akkor hozzájutni a külföldi folyóiratokhoz?
- LR:** Bizonyára lehetett olvasni őket: meg lehet nézni, hogy az ATOMKI könyvtárában mi van meg az akkori folyóiratok közül.
- AI:** Szidták a nyugatot meg Amerikát, de hozzá lehetett jutni a fontos eredményekhez.
- LR:** Mennyire befolyásolta a gondolkodásokat az, hogy az itthon megszerzett tudással akár külföldön, nyugaton is el tudnátok helyezkedni? Eleinte disszidálni kellett ehhez, később legálisan is lehetőség volt nyugati utakra.
- LG:** Jóval később, a nyolcvanas években egyetemistaként úgy láttuk, hogy kutatóként lehetőséget kaphatunk világot látni. Vagyis, hogy a kutatói pálya ugyanúgy segíthet kijutni nyugatra, mint a sportolói az NDK-ban.
- AI:** Ezt Lovas Pista írta le legjobban a „sztochasztikus vasfüggöny” fogalmával. Kezdetben nem lehetett átjutni a vasfüggönyön. Aztán lettek kiskapuk: ilyen-olyan bizottságok és meghívók segítségével mégis ki lehetett menni. Aztán a hatóságok észlelték, hogy sokan kimennek, és bevezették azt, hogy a kiskaput véletlenszerűen mozgatják. Tehát hiába adok én be kiutazási kérelmet úgy, mint tavaly, az nem ugyanarra az íróasztalra kerül, vagy nem ugyanahhoz a bizottsághoz, ezért most nem sikerül. És nem tudhatom, hogy miért sikerült tavaly, és miért nem sikerül idén. Miért lehetett kimenni az egyik országba, és miért nem lehet a másikba? Ez ilyen világ volt. Nem lehet megmagyarázni mai fogalmakkal és a mai fiataloknak.
- KÁ:** Az ilyen meghívások valóban jó lehetőségnek számítottak, de nem gondoltunk arra, hogy kint is maradjunk. Legalábbis a környezetemben legtöbben így voltak ezzel.
- LG:** 1956-ban elég sokan voltak diákok vagy pályakezdő természettudósok a kivándorolt 200 ezer magyar között. Ez azzal is járt, hogy a nyolcvanas-kilencvenes években a legjobb egyetemek és kutatóintézetek szinte mindegyikében találkozhatott az ember ötvenhatos magyar tudósokkal. De mivel egy szűk ge-

nerációt alkottak, szinte egyszerre mentek nyugdíjba az ezredforduló táján. Ezzel Magyarország fontos „hídállásokat” veszített el a nemzetközi tudományos életben.

LR: Azért vannak a mostani generációkból is ATOMKI-sek külföldön: például az USA-ban, Ausztráliában, Angliában.

LG: Mi volt a helyzet a másik iránnyal? Voltak látogatók külföldről? Vagy akár belföldről?

AI: Az ATOMKI megalakulása után, elsőként egy gimnáziumi diákcsoport (Földes Ferenc Gimnázium, Miskolc), majd egy neves külföldi tudós (prof. Erich Bagge, Kiel) jött látogatóba még 1954-ben. Ez a ketős vonzás máig érvényes: élő, aktív tudományos kapcsolatok rangos külföldi intézményekkel, és rendszeres „nyílt napok”, például a már több mint 40 alkalommal különböző megnevezéssel megrendezett „Fizikusnapok” az érdeklődő diákok és nagyközönség számára.

LG: Ezekről minden évben megkérdez bennünket a mindenkori fenntartónk is. Mint ahogy az is egy aktuális kérdés (bár korábban is időről időre előkerült), hogy mi az alaputatás és az alkalmazott kutatás kívánatos aránya. Az alapításkor mik voltak a preferenciák?

AI: Az intézet megalapítását egy konkrét alkalmazás, az uránkutatás motiválta, de az alapító okiratban már a kísérleti atommagkutatás szerepel a feladatként. A központi elvárások mellett az egyéni hozzáállás is számít. Egy csoporton belül más és más volt az egyes tagok mentalitása. Volt, akinek a készségképzés volt a fontos. Szalay Sándor számára az volt a fizikai kutatás, hogy eszközt kell építeni. Ezt látta Cambridge-ben is annak idején. Ez a már emlegetett „Szalay-iskola” lényege.

LG: De ez a hozzáállása valószínűleg korábbra datálódik. Az önéletrírása szerint a nyíregyházi középiskolai tanulmányai során sok időt töltött a gimnázium fizikaszertárában, ahol az ott tanító édesapja által készített műszerekkel és berendezésekkel foglalkozott. Ahogy írta, a játéka a fizikaszertár eszközei voltak. De mintha ez a minta tovább öröklődött volna a családban: a két fia, Sándor és András a Panta Rhei együttesben szintén saját kezűleg építették meg a szintetizátorait. A Panta Rhei egyike volt azon kevés együttesnek, amelyek Budapesten kívülről indulva értek el országos ismertséget. Igazából én a hetvenes évek végén gimnazistaként hamarabb ismerem meg a Szalay fiúk nevét, mint az édesapjukét. Sándor később a baltimore-i Johns Hopkins Egyetem kozmológus professzora lett, ahol Alexander S. Szalay néven publikál.

AI: Az együttes névadója Szalay Sándor felesége, Csongor Éva volt. Ő honosította meg Debrecenben a C-14-kormeghatározást, és ő hozta létre azt a világon egyedülálló adatsort, amelyben a csapadékvíz béta-aktivitását jegyezte fel 1952-től 1988-ig debreceni mérések alapján.

LG: Szalay Sándor későbbi „játékai” közül kiemelkedik a nevezetes neutrínókísérlethez használt Wilson-féle ködkamra és az 5 megavoltos Van de Graaff-gyorsító. Az előbbihez kapcsolódik az ATOMKI Bem téri kerítése mögött látható tábla, ami arról tájékoztatja a járókelőket, hogy az Európai Fizikai Társulat (EPS) történelmi emlékhelyénél (*historical site*) jár. Ez volt az első ilyen hely Magyarországon, de Európában is csak a tizedik. Később Magyarországon megkapta ezt a státuszt Budapesten az ELTE már említett Puskin utcai épülete is, ahol egykor a fizikai tanszékek működtek, és ahol Eötvös Loránd végezte a torziós ingás kísérleteit, valamint a fasori Evangélikus Gimnázium, Wigner Jenő és Neumann János egykori alma matere.

AI: A neutrínókísérlet alapötlete már korábban megfogalmazódott Szalay Sándorban. Végül 1953-ban Csikai Gyulát bízta meg, hogy fejlesszen ki egy olyan ködkamrát, amelyben le lehet fényképezni a hélium-6 izotóp bomlásakor kilépő elektront és a viszszalökött lítium-6 atommag pályáját. Ezekből lehet közvetve következtetni a folyamatban kibocsátott antineutrínó jelenlétére. Ehhez számos technikai problémát kellett megoldani, és több ezer felvételt kellett elkészíteni.

LG: Minderre 1956 őszén került sor. Szokás mondani, hogy 1956-ban lejátszódott egy másik forradalom is Magyarországon. Ez is egy olyan momentum, amikor az ATOMKI története és a világtörténelem összefonódott.

AI: Az eredményeket hatalmas sikerrel ismertették egy konferencián Padovában 1957 szeptemberében. Viszont az ATOMKI-ben végzett kísérletekkel nagyjából egy időben folyt egy másik kísérlet is az USA-ban, amelyben szintén kimutatták az antineutrínót. Reaktorból érkező antineutrínók ütköztek protonokkal és keltettek egy neutron és egy pozitron. Az eredményeket 1956 júliusában publikálta Clyde Cowan és Frederick Reines. 1995-ben Reines az eredményekért megkapta a fizikai Nobel-díjat (miután Cowan korábban elhunyt).

KÁ: Csikai Gyula később a neutronfizika felé fordult. Kollégáival megépítették az első neutrongenerátort. Később is ezzel foglalkozott, amikor 1967-ben átvette a Kísérleti Fizikai Tanszék vezetését.

AI: A neutronfizikai kutatásokhoz én is csatlakoztam Csikai Gyula felkérésére. Hatáskeresztmetszeteket mértünk. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) rájött, hogy Debrecenben 14 MeV-es neutronokkal végeznek méréseket, és előre látták, hogy a leendő fúziós erőművekben ilyen neutronok kerülnek kölcsönhatásba mindennel, a szerkezeti elemekkel is. Ezért fontos, hogy megmérjék a 14 MeV-es neutronok hatáskeresztmetszetét egy sor atommagon. Hajlandók voltak adni egy új neutrongenerátort, ami már a tanszéké lesz, mert az első még az ATOMKI-ben épült meg. Ljubjanából kellett ezt elhoznunk a Jozef Stefan Intézetből 1967-ben. A kollégák bemutatták a neutrongenerátort, aztán apró darabokra

szedték. Akkor volt egy rossz érzésem, mint a gyerekeknek, aki szétszedte a vekkerórát, hogy hogyan fogjuk mi ezt otthon összerakni.

LG: A neutronfizikával kapcsolatban jutott eszembe, hogy történetileg milyen mélyen is gyökereznek az egyes témák egy adott intézményben. Körülbelül húsz éve merült fel, hogy a felépítendő ESS (European Spallation Source) nagyberendezés Debrecenbe is kerülhetne. Három helyszín került szóba: Debrecen mellett Lund és Bilbao. Végül Lundba került, de egyáltalán az, hogy Debrecen felmerült lehetőségként, bizonyára az itteni neutronfizikai kutatásoknak volt köszönhető. No, de térjünk vissza a Van de Graaff-gyorsítóhoz! Ennek a gondolata mikor fogalmazódott meg?

KÁ: Már Cambridge-ből hazatérve tudta Szalay, hogy szükség van egy gyorsítóra, de az akkori anyagi viszonyok között nem volt realitása a megépítésének. Ezt helyettesítendő használták a pontszerű polónium alfa-forrást a kíséretekhez, de ez a technika gyorsan elavult. A háború után belekezdtek egy Van de Graaff-generátor építésébe: egy pálinkafőző üstöt gyártó cégnél készült a rézgömb, ejtőernyőselyemből csinálták meg a szalagot. Egy kaszkádgenerátor is elkészült, de annak kicsi volt a feszültsége, nem lehetett elég nagy protonenergiát kinyerni belőle, és az energiastabilitása sem volt túl jó, ami korlátozta a kutatás lehetőségeit. Felmerült az igény egy nagyobb gyorsító létrehozására. Az ATOMKI-ben létesítendő 5 MV feszültségű Van de Graaff-típusú gyorsítóra vonatkozó elképzeléseket 1964-ben a *Fizikai Szemlében* Koltay Ede írta le. Érdekes módon később a gyorsító építéséhez szükséges szakirodalmat részben egy Kínában kiadott koppintott könyvből vettük.

LG: Egyetemistaként hallottunk egy előadást tőled a magfizikai mérőmódszerek kurzuson, ahol arról beszéltél, hogy hogyan építettétek fel az 5 megavoltos Van de Graaff-gyorsítót.

KÁ: Koltay Ede vezette a munkát. Az alkatrészeket az akkori iparvállalatok bevonásával gyártattuk le.

LG: A gyorsítónak helyet adó IX. épület és a vele szomszédos VIII. épület 1969–70 körül épült. Én akkor az Andaházi utca túloldalán levő általános iskolába jártam kiselsősként. Tehát láthattam felépülni a későbbi munkahelyemet; azt az épületet is, ahol ma a dolgozószobám van.

AI: Két dolog volt, amire Szalay utólag jött rá, hogy kell: hidegfizika és elméleti fizika. A hidegfizika megteremtése Novák Dezső érdeme: ő is Budapestről jött 1955-ben.

LR: Az elméleti fizikusok közül Bori (Gyarmati Borbála) 1968 körül került az ATOMKI-be. Utána Vertse Tamás, harmadiknak pedig én következtem 1970-ben.

AI: Akkor már Bori elismert elméleti fizikai csoportvezető volt.

AI: Valamikor a hatvanas években történt, hogy az egyetemen Marosán György (akit a nép csak Buci Gyuri-

ként emlegetett) tartott egy beszédet a díszudvarban, és kikezdte Szalay Sándort, aki éppen nem volt itthon, azzal, hogy nyugatbarát, imperialista bérenc. Nem lehetett tudni, hogy ez Marosán saját kezdeményezése volt, vagy valamilyen testületi véleményt képviselt. A fáma szerint Szalay maga járt utána Budapesten az illetékeseknél, hogy mire számítsanak ezek után, mire azt a válasz kapta, hogy „Menjen haza, és dolgozzon!”.

LR: Ez a hatvanas évek elején lehetett, mert 1962 után Marosán megbukott és kiszorult a politikai vezetésből.

LG: Az autonóm tudósok elég sok rendszerben ütköztek az aktuális hatalommal. Szaharov a Szovjetunióban, de Oppenheimer is a McCarthy időszakban. Menynyire volt ideológiai befolyás alatt egy olyan kutatóintézet, mint az ATOMKI?

KÁ: Az „elvtárs” szót nem használták az intézetben. Mindenki „kartárs” volt. A marxista egyetemre el kellett járni, különösen az egyetemi oktatóknak, akik nem lehettek ideológiailag alulképzettek. Voltak fejtágítók, például az új gazdasági mechanizmus idején. Az előadó a Gördülőcsapágy Művekből jött. Ez már egy felvilágosultabb korszak volt. Szó volt például a lejtő elméletről, vagyis, hogy keletről szeretnek idejönni, tőlünk meg nyugatra, és ebből lesz az agyelszívás.

LG: Az új gazdasági mechanizmus időszakára, a hatvanas-hetvenes évek fordulójára az ATOMKI elérte a „kamaszkorát”, és nemzetközileg is elismert kutatóhely lett. Megépült az 5 MV-os Van de Graaff-gyorsító, és az intézet méretében is bővült. Ez egy olyan korszakhatár, ahol ha nem is abbahagyhatjuk, de megszakíthatjuk a beszélgetésünket. Amiket elmondtatok, abból számomra, aki jóval később kerültem az ATOMKI-be, két dolog szűrhető le. Az egyik az, hogy a korábbi korok hatása mennyire tovább élhet. Gondolok itt arra, hogy az ATOMKI mai kutatócsoportjai és kutatási témái közül több is visszakövethető arra az időre, amikor Szalay Sándor „felosztotta a világot” a tanítványai között. A másik pedig az, hogy Szalay Sándor meg tudta találni a megfelelő embereket a megfelelő feladatra, ami a vezetői és iskolateremtői képességét igazolja. Azt hiszem, hogy nyugodtan kijelenthetjük, hogy a szellemi öröksége ma is jelen van az ATOMKI-ben.

Az interjú bővebb, képekkel és linkekkel ellátott változata megtalálható az „ATOMKI-70” honlapon: <https://atomki.hu/atomki-70>

Irodalom

Medveczky László: Szalay Sándor. *Debreceni Szemle*, 2 (1994/4) 582–604. https://atomki.hu/files/2018/12/Debreceni_Szemle_2_1994_582_604.pdf

Hevessy József: A debreceni fizika története. *Debreceni Szemle*, 2 (1994/4) 569–581.

ATOMKI Kronológia 1954–1989. Összeállította Medveczky László, kiadta az MTA Atommagkutató Intézete, Debrecen, 1989.

Koltay Ede: Részecskegyorsítók az ATOMKI-ban. *Fizikai Szemle*, 14 (1964/12), 373.

AZ ATOMKI JELENE ÉS JÖVŐJE A MODERN KÍSÉRLETI MAGSZERKEZETI KUTATÁSOKBAN

Kunné Sohler Dorottya
HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

Az atommagok igen különleges, sok részecskéből álló, komplex kvantummechanikai rendszerek. Magreakciók során az atommagok gerjesztett állapotban állnak elő, ahonnan radioaktív bomlások, pl. béta- és gamma-sugárzások, neutron és könnyű töltött részecskék kibocsátásával jutnak a legalacsonyabb energiájú alapállapotba. Meghatározva a sugárzások, kibocsátott részecskék tulajdonságait fel tudjuk tárni a magállapotok jellemzőit, ezek segítségével pedig felderíthetjük a vizsgált atommag szerkezetét.

Az ATOMKI megalapítása óta egyik alaptevékenysége és mind a mai napig az egyik legsikeresebb kutatási ága az atommagszerkezet terén végzett vizsgálatok. Kutatócsoportunk már az 1980-as évek végén, az 1990-es évek elején az itthon megszerzett kiváló magszerkezeti és nukleáris elektronikai tapasztalatokra alapozva csatlakozott a világ vezető magfizikai részecskegyorsítói mellett végzett kísérletekhez. A jelenlegi magszerkezet-kutatásokban kiemelkedő érdeklődésre tartanak számot az egzotikus neutron/proton arányú és a különleges alakokkal rendelkező, ritka mozgásformákat mutató atommagok. Alapvető tulajdonságaik, szerkezetük minél teljesebb feltárása a mai magfizikai kutatások egyik legaktuálisabb irányvonalát képezi.

A szükséges kísérleteket élvonalbeli nemzetközi együttműködésekhez kapcsolódva végezzük a világ vezető magfizikai infrastruktúráit kiaknázva a francia GANIL-ban (Nagy Nehézion Gyorsító Központ), az olasz INFN-LNL-ben (a Nemzeti Magfizikai Intézet Legnarói Nemzeti Laboratóriuma), a német GSI-ben (Helmholtz Nehézion Kutatóközpont), a japán RIKEN-ben (Fizikai és Kémiai Kutatóintézet) és a CERN-ben (Európai Nukleáris Kutatási Központ). A nagyon kis valószínűséggel előálló jelenségek kimutatásához csúcstechnológiát felhasználó komplex észlelőberendezésekre van szükség. Az elmúlt évek infrastrukturális fejlesztései segítségével hozzájárultunk a RIKEN-i DALI2+ gamma-detektorrendszer felújításához és tagjai lettünk a legújabb fejlesztésű AGATA

nyomkövető gamma-detektorrendszerért felelős európai AGATA kollaborációnak. A fúziós-párolgási reakciókban a végtermékek azonosításához elengedhetetlen a könnyű töltött részecskéket észlelő berendezések használata. Sikeresen alkalmaztuk az ATOMKI által fejlesztett és működtetett DIAMANT töltött részecske-detektort az AGATA-nál és a lengyelországi HIL-ben a NEEDLE detektorrendszerénél.

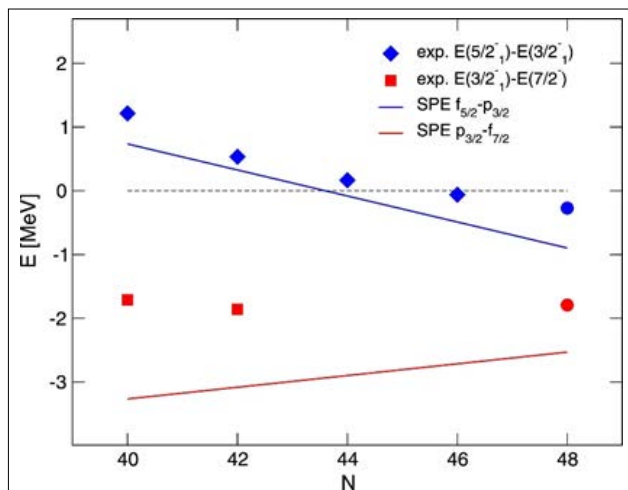
A stabilitási sávtól távolabb elhelyezkedő atommagok sajátosságai

A modern magszerkezeti kutatások egyik legaktívabb iránya a proton- és neutronelhullatási vonalak közelében fekvő atommagok szerkezetének feltárása radioaktív ionnyalábok segítségével. Az atommagban a protonok és a neutronok diszkrét energiaszintekkel rendelkező pályákon helyezkednek el. A pályák alhéjakba, héjakba csoportosulnak, amelyeket nagyobb energiaközök választanak el egymástól. Minden pályán csak a kvantummechanika szabályai szerint meghatározott számú proton vagy neutron helyezkedhet el [1]. Bizonyos számú neutron és/vagy protont tartalmazó atommagokban a héjak teljesen betöltöttek. Ezek a zárt héjú atommagok a nemesgázokhoz hasonlóan különösen stabil szerkezetűek és gömbszerű alakkal rendelkeznek. A stabilitási völgytől távolodva a könnyű magokban viszont azt tapasztaltuk, hogy módosulnak a nemesgáz-szerű magokat jellemző mágikus proton/neutronsámok: a stabilitási sáv mentén megszokottak eltűnnek és helyettük újak jelennek meg [2, 3]. Ahhoz, hogy a nukleonelhullatási vonalak közelében is használhatóak legyenek az elméleti előrejelzések, elengedhetetlen a magszerkezeti leírások alappilléreinek számító nemesgázszerű atommagok azonosítása.

A neutrontöbblet növelésével az atommagokban a pályák energiái fokozatosan módosulnak, ami kihat az atommagok szerkezeti tulajdonságaira. A legújabb elméleti kutatások szerint a neutrongazdag atommagokban az energiaszintek módosulását az okozza, hogy a nagy neutrontöbblet miatt a neutronok a következő héjon, a protonokéval erősen átfedő pályán helyezkednek el. Ebben az esetben láthatóvá válik a nemrégiben javasolt tenzor kölcsönhatás hatása, amely a neutronok és protonok között hat egy töltött pion cseréjével. Ez a kölcsönhatás a protonok és neutronok relatív spinbeállásától függően vonzó vagy taszító – változtatva ezzel a spin partner pá-



Kunné Sohler Dorottya fizikus (PhD, 1997) az ATOMKI tudományos főmunkatársa. Kutatási témája főleg a héjzáródások tanulmányozása neutrontöbbletes atommagokban és az $A \sim 100$ tömegszám környéki atommagok szerkezetének vizsgálata gamma-spektroszkópiai módszerekkel. Az intézetben a Kísérleti magfizikai csoport vezetője, a radioaktív nyalábokon végzett gamma-spektroszkópiai kísérletek koordinátora.



1. ábra. Az első 5/2, 3/2 és 7/2 spinű állapotok energiakülönbségei a neutrontöbbletes réz izotópokban. A rombuszsal és a négyzettel jelölt adatok az irodalomból származnak, a körrel jelölt adatok a kísérleti eredményeinkből kapott értékek. Az egyenes vonalak a magtörzsként alkalmazott nikkel izotópokra vonatkozó protonpálya-energiák különbségeit mutatják

lyák energiaközeit. A RIKEN-ben végzett egyproton-kilökéses folyamatban a 77-es tömegszámú réz atommag szerkezetét vizsgálva azonosítottuk az alacsonyan fekvő gerjesztett állapotait. Az alkalmazott reakció szelektív jellegének köszönhetően meg tudtuk határozni, hogy ebben az izotópban milyen pályákon tartózkodnak a protonok és energiában hol helyezkednek el ezek a pályák. Összehasonlítva a kapott energiakülönbségeket a stabilitási sáv mentén előforduló értékekkel azt találtuk, hogy a legkülső spin partner pályák közötti energiakülönbség körülbelül a felére csökken a stabilitási sáv és az ettől távoli egzotikus atommagok között (lásd 1. ábra), ami összhangban van a tenzor erő várt hatásával. Ezzel direkte kísérleti bizonyítékát adtuk a tenzor erő létének.

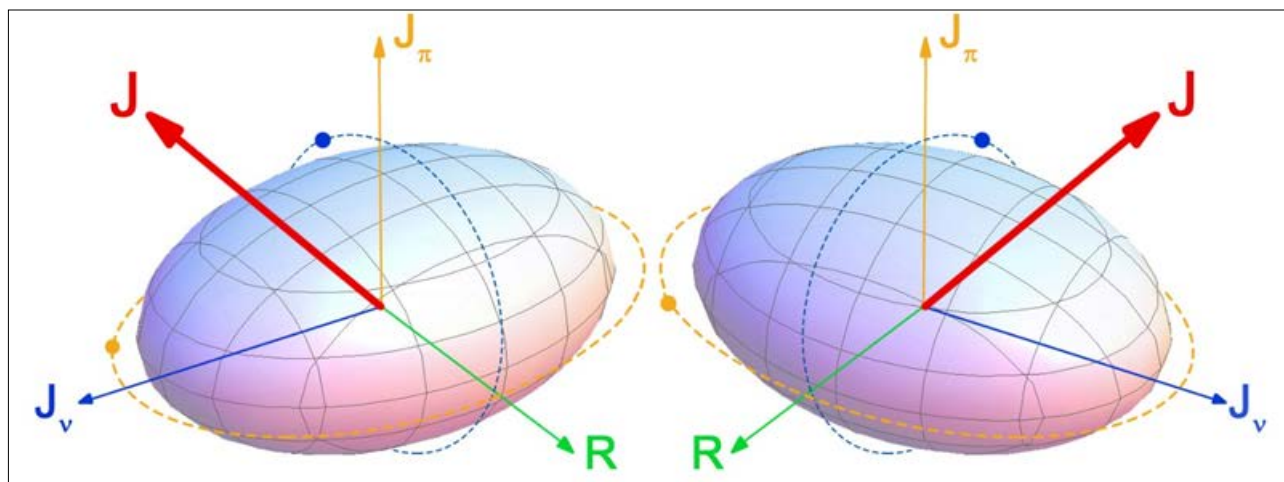
Az atomokkal ellentétben az atommagok alakja eltérhet a gömbszimmetrikustól, a zárt héjak között elhelyezkedő atommagok alakja deformált is lehet. A radioaktív ionnyalábokkal végzett kísérletek tapasztalatai szerint

az eltűnő héjzáródásoknál már az alapállapotban is deformált alakkal rendelkező atommagok szigete alakul ki [4]. Ilyen szigetet azonosítottak a 20-as és a 40-es neutron héjzáródások közelében is. A szigeteken lévő atommagokat azóta számos kísérletben tanulmányoztuk [5, 6], azonban határaikat még nem sikerült teljesen felderítenünk. Legújabb eredményeink azt mutatják, hogy az 59-es és 61-es tömegszámú vanádiumizotópok a 40-es neutronsámú sziget „délnyugati” határvidékén helyezkednek el, de ezekben az atommagokban a megszokott kvadrupólus deformáció mellett a hexadekapólus deformáció szerepét is figyelembe kell venni.

Háromtengelyű ellipszoid atommagokban kialakuló mozgásformák jellemzői

Míg a stabilitási sávtól távoli atommagok esetén az egzotikus proton/neutron arány adja az újdonságot, addig a stabilitási sávhoz közeli atommagokban az elérhető lényegesen nagyobb gerjesztési energiákkal és perdületekkel rendelkező komplexebb, egzotikus magállapotok jelentik ezt, melyek különleges magalakokhoz, mozgásformákhoz kapcsolódnak. Ilyenek például a háromtengelyűen deformált ellipszoid atommagokban az imbolygó mozgáshoz és a királis szerkezetekhez köthető állapotok.

A kvantummechanika törvényeinek megfelelően a deformált atommagok foroghatnak, és a forgásuk jellemzői a deformáltság jellegétől és mértékétől, valamint a belső szerkezettől függenek. A nem gömb alakú atommagok többségének az alakja közelítőleg forgási ellipszoid, ami szivaralakhoz hasonló. Az ilyen alakú atommagok a szimmetriatengelyre, a szivar hossztengetelyére merőleges tengely körül foroghatnak, amely forgástengely iránya egybeesik a perdületvektor irányával és a térben állandó. Egyes neutron- és protonszám-tartományba tartozó atommagok alakja háromtengelyű ellipszoid, vagyis három egymásra merőleges irányban különböző mértékben megnyúlt alak. Ezen atommagok az egyszerű forgáson



2. ábra. Az aktív nukleonok és a magtörzs perdületvektorainak jobb- és balsodrású elrendeződése

kívül bonyolultabb forgást is végezhetnek. Az egyik ilyen mozgás során az atommagok gyorsan forognak az egyik főtengely körül és ez a forgástengelyük a térben állandó perdületvektor körül lassabban körbefordul. Ez némileg hasonló a Föld forgástengelyének elfordulásához az állócsillagokhoz képest és imbolygó forgásnak nevezik. Az imbolygó forgást korábban nagyon kevés atommagban sikerült kimutatni, a kb. 100 nukleont tartalmazó atommagokban egyáltalán nem volt ismert. Nemrégiben a 105-ös tömegszámú palládium atommagban azonosítottuk a gerjesztett állapotok egy új, az imbolygó forgáshoz rendelhető csoportját, ezzel bizonyítva az imbolygó forgás megjelenését ebben a magtartományban [7].

A háromtengelyű ellipszoid atommagokban megjelenhet királis szimmetriához kapcsolódó szerkezet is, amelyet a speciális alak és a legkülső, aktív proton és neutron különleges konfigurációjának együttes hatása hoz létre. Ha az aktív proton és neutron közül az egyik egy kevésbé betöltött, a másik pedig egy majdnem teljesen betöltött alhéjon található, akkor perdületvektoraik energetikai okokból egymásra merőlegesen a kis- és a nagy tengely irányába állnak be. Az atommag forgáshoz tartozó perdületvektor pedig a közepes tengely irányába áll be, mert ellentétben a makroszkópikus (merev test) ellipszoidokkal, az atommagban erre a legnagyobb a tehetetlenségi nyomaték. Így a három perdületvektor egymásra kölcsönösen merőleges, ebből fakadóan két energetikailag egyenértékű belső állapot lehetséges a vektorok jobb- illetve balsodrású elrendezésének megfelelően (lásd 2. ábra). Ezek egymás királis párjai. Mivel az atommag forog, mindegyik belső állapothoz egy-egy forgási szerkezet tartozik, amelyek egyformának várhatók a két belső állapot szimmetrikus volta miatt. Az elmúlt években több magtartományban is megfigyeltünk királis szerkezetet. A 100-as magtartományban először azonosítottunk királis forgást páratlan tömegszámú atommagban, valamint többszörös, különböző konfigurációkra épülő királis szerkezetet ugyanabban az atommagban. Az irodalomban először mutattuk ki az alap- és gerjesztett állapotra épülő királis forgások kialakulását.

Lézer-indukált mesterséges transzmutációs kutatások magfizikai vonatkozásai

A hosszú felezési idejű radioaktív hulladékok tárolása rendkívül komoly fejtörést okoz a szakembereknek. A problémára az egyik megoldás az lehetne, hogy ezeket a hosszú felezési idejű izotópokat jelentősen rövidebb felezési idejű izotóppokká alakítják (mesterséges transzmutáció). Ehhez a radioaktív anyagot be kell sugározni valamilyen részecskével, hogy magreakciók során más izotópok jöjjenek létre. Az egyik legjobbnak tűnő

módszer a neutronos átalakítás. A Szegedi Egyetemmel folytatott kezdőprojekt során azt vizsgáljuk, hogy az ELI-ALPS intézetben lézerindukált folyamatokban hogyan és milyen mértékben lehet a leghatékonyabban előállítani neutronokat. Az ATOMKI munkatársai ehhez a kutatáshoz a neutronok energia- és térbeli eloszlásának mérésével, és a kísérletek szimulációjával járulnak hozzá. A keltett neutronok nemcsak a radioaktív hulladékok átalakítására lesznek használhatók, hanem biológiai kísérletekre is, amelyek már el is kezdődtek a Szegedi Egyetem Onkoterápiás Klinikájával történő együttműködés keretében. Ezen túl a neutronok lelassításával (moderálásával) termikus neutronnyaláb állítható elő, amely neutronradiográfiában is alkalmazható.

Kitekintés

Az új generációs gyorsítóknak és az egyre érzékenyebb észlelőberendezéseknek köszönhetően a magszerkezet-kutatás a mai magfizikai kutatásoknak is az egyik legaktívabban művelt területe. Várhatóan a közeljövőben kísérletileg is elérhetővé válnak a nukleonelhullatási vonalakon vagy akár azokon túl elhelyezkedő atommagok szerkezeti vizsgálatokra és felderíthetjük a nukleonstabilitás határait. Az ATOMKI Kísérleti magfizikai csoportja a jövőben is jelentős szerepet kíván betölteni ezekben az izgalmas eredményekkel kecsegtető, előremutató kutatásokban. Ehhez jó alapot biztosítanak a rendelkezésre álló új eszközök és az egyre aktívabb nemzetközi kollaborációs részvételünk.

Köszönetnyilvánítás

Az eredményekhez kapcsolódó kutatásokat a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alap TKP2021-NK-TA-42 és K147010 számú projektjei támogatták.

Irodalom

1. Fényes T.: Atommagfizika I., Debreceni Egyetemi Kiadó 2009.
2. Dombrádi Zs.: A héjszerkezet átrendeződése egzotikus atommagokban. *Fizikai Szemle*, 57/7 (2007) 221.
3. Elekes Z.: Mágikus számok, nemes atommag. *Fizikai Szemle*, 58/3 (2008) 98.
4. Dombrádi Zs., Kunné Sohler D., Lépine-Szily A.: Mágikus sziget az atommagok térképén. *Természettudományi Világ*, 143/5 (2012) 200.
5. Begala M., Kunné Sohler D.: A ^{32}Mg atommag szerkezetének vizsgálata egyproton-kilökéses reakcióban. *Fizikai Szemle*, 70/2 (2020) 57.
6. Elekes Z.: Különleges szigetvilág a neutrongazdag atommagok tengerén. *Fizikai Szemle*, 71/10 (2021) 329.
7. Kruzsi B., Kuti I., Kunné Sohler D., Timár J.: Kísérleti bizonyíték a ^{105}Pd atommag imbolygó forgására. *Fizikai Szemle*, 70/5 (2020) 147.

A CSILLAGOK MAGFIZIKÁJA (NEM CSAK) AZ ATOMKI GYORSÍTÓI MELLŐL

Gyürky György, Kiss Gábor Gyula
HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

Talán túlzás nélkül állítható, hogy az atommagfizika a 20. század egyik kulcsfontosságú tudományága volt; elég csak az atomerőművekre, vagy a magfizika számtalan, mindennapi életünkben megjelenő alkalmazására gondolni. A magfizika fejlődésének jelentős hozzáadása volt a csillagok működésének, az energiatermelés és az elemszintézis folyamatainak megértése, ami életre hívta a nukleáris asztrofizika tudományágát. Ebben a cikkben a tudományág jelenlegi helyzetéről ejtünk pár szót az ATOMKI kutatói által végzett kísérletek fényében.

Bevezetés

A csillagok működésének rejtélye, az energiaforrás keresése végigkísérte az emberiség történelmét. A 20. század elején az atommag felfedezése, majd az a felismerés, hogy a protonok és neutronok e kötött rendszerei jelentős energiát tárolnak, elvezettek a megoldáshoz. A könnyű atommagok (a Naphoz hasonló, fősorozatbeli csillagok esetén a protonok) fúziós reakciói révén felszabaduló energia fedezi a csillagok megfigyelt energiakibocsátását és ez megmagyarázza a megfigyelhető tulajdonságaikat. Szintén magfizikai folyamatok révén a csillagok képesek arra is, hogy az Ősrobbanásból származó hidrogénből és héliumból kiindulva felépítsék a világunkat alkotó nehezebb kémiai elemeket is.

Természetesen mind az energiatermelés, mind az elemszintézis részleteinek megértése az atommagok fizikájának alapos ismeretével lehetséges csak, így a múlt század közepére a magfizikából kinőtt annak csillagászati vonatkozású ága, a nukleáris asztrofizika. Ezt követően a csillagok működése szempontjából fontos magreakciók kísérleti és elméleti vizsgálata révén nagy vonalakban sikerült megérteni a főbb folyamatokat és az azokban lejátszódó reakciók szerteágazó hálózatait. Megmagyarázhatóvá vált így a legtöbb csillagászati megfigyelés is.

A 21. századra azonban a csillagászati modellek és megfigyelések korábban szinte elképzelhetetlenül pon-

tossá és részletessé váltak. Ezzel a fejlődéssel a nukleáris asztrofizikának is lépést kell tartani, a csillagok szempontjából fontos magreakciók jellemzőit már nem elegendő a korábban elért precizitással ismerni. A nukleáris asztrofizika így korántsem lezárt tudományág, hanem – versenyfutásban a csillagászzal – folyamatosan fejlődik. Az ATOMKI-ban három évtizede zajlanak kísérleti nukleáris asztrofizikai kutatások mind az intézet gyorsítóinak felhasználásával, mind nemzetközi együttműködések keretében. A alábbiakban két nagyobb területen, a hidrogénégés kulcsreakcióinak, illetve a nehézelem-szintézis folyamatainak tanulmányozása kapcsán ismertetjük az aktuális kihívásokat és az ATOMKI kutatói által ezekre adott válaszokat.

A hidrogénégés kulcsreakcióinak tanulmányozása

A csillagok spektrumában megfigyelhető nagy mennyiségű hidrogén és hélium, valamint a ${}^4\text{He}$ atommag nagy kötési energiája hamar világossá tette, hogy a csillagok fő energiaforrása a hidrogénfúzió, melynek során négy protonból egy ${}^4\text{He}$ mag jön létre jelentős energiafelszabadulás kíséretében. A folyamat több módon mehet végbe. A Nap esetén a főszerepet az úgynevezett pp-láncok játsszák, míg a nagyobb tömegű csillagokban főként a szén-nitrogén-oxigén (CNO) ciklus révén zajlik a fúzió [1].

A két folyamat együtt nem több, mint körülbelül egy tucat magreakciót foglal magában. Így ezeket a reakciókat már elméleti oldalról is, valamit számos kísérletben tanulmányozták a múltban. Mégsem ismerjük ezeket kellő pontossággal. Ennek egyik oka az asztrofizikai reakciókkal kapcsolatos általános probléma. A reakciók szempontjából lényeges energiatartományt a csillag magjának hőmérséklete szabja meg, ami egy Naphoz hasonló



Gyürky György az MTA doktora, az ATOMKI tudományos tanácsadója. Kutatási területe a kísérleti nukleáris asztrofizika. E tématerületen belül kiemelten foglalkozik a nehéz, protongazdag izotópok szintéziséért felelős p-folyamat magreakcióival. E munkáját az European Research Council pályázata is támogatta. Emellett részt vesz a LUNA nemzetközi együttműködés munkájában, ahol a világon egyedülálló, föld alatti gyorsítóval vizsgálják az asztrofizikailag fontos reakciókat.



Kiss Gábor Gyula fizikus, az MTA doktora, az ATOMKI tudományos tanácsadója, a Nukleáris Asztrofizika Kutatócsoport vezetője. Stabil és radioaktív nyalábokat előállító részecskegyorsítókkal a vasnál nehezebb kémiai elemek keletkezésében szerepet játszó reakciókat és bomlásokat vizsgálja. 2008-ban szerzett PhD-fokozatát követően az olaszországi INFN-LNS és a Japán RIKEN Nishina Központban dolgozott vendégkutatóként.

csillag esetén 10 millió kelvin nagyságrendű, de még egy szupernóvarobbanás esetén sem haladja meg a pár milliárd fokot. Ez figyelembe véve a magreakciók jellemzőit is, a Nap esetén egy néhányszor 10 keV-es energiát jelent. Ilyen energián kellene ismerni a reakciók hatáskeresztmetszetét. Magfizikai szempontból ez extrém alacsony energia, az atommagok közötti Coulomb-taszítás miatt a hatáskeresztmetszetek általában mérhetetlenül alacsonyak [2].

A kísérleteket tehát magasabb energiákon végezték, és elméleti modellek felhasználásával extrapoláltak a csillagok energiáira. Mind a (magasabb energia ellenére meglehetősen alacsony) hatáskeresztmetszetek mérése, mind az extrapoláció jelentős bizonytalanságot okozott, így a reakciókat nem ismertük az elvárt pontossággal.

Ráadásul ez az elvárt pontosság egyre csak fokozódik – ami a további vizsgálatok szükségességét indokolja. A Nap tulajdonságainak megfigyelésében komoly előrelépést jelentett, hogy ma már nemcsak a felszínről származó sugárzást tudjuk mérni, hanem például a magból származó, a fúziós reakcióról közvetlen információt hordozó neutrínók fluxusát is. Egyes esetekben a mért fluxus pontossága 3%-nál jobb is lehet. A Napszeizmológia, vagyis a Nap felszíni oszcillációinak megfigyelése szintén igen pontossá vált, ami a Nap szerkezetének és dinamikájának jobb megértését segítette elő.

Ezek a megfigyelhető mennyiségek lehetővé teszik a standard napmodell, a Nap működésének leírására kifejlesztett általános elmélet ellenőrzését. Mivel a megfigyelések igen pontossá váltak, azoknak a napmodellel való összehasonlításában gyakran a hidrogénégés folyamataiban részt vevő magreakciók nem pontos ismerte okozza a legnagyobb bizonytalanságot. E reakciók hatáskeresztmetszeteinek az új és precízebb mérése így napjaink nukleáris asztrofizikájának egyik legfőbb célja.

Mivel a minél nagyobb pontosság a cél, a méréseket a lehető legkisebb energián, legközelebb a Napra jellemző energiához kell elvégezni, ahol a hatáskeresztmetszetek igen alacsonyak. A sikeres méréshez így a zavaró háttérsugárzás csökkentése elengedhetetlen. Ennek egyik módja a kísérlet mélyen föld alá telepítése, ahol a kozmikus sugárzás hatása szinte teljesen kiküszöbölhető.

Az ATOMKI nukleáris asztrofizikai csoportja a 2000-es évek elejétől részt vesz a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) nemzetközi együttműködés munkájában, ami egy olaszországi mély föld alatti laboratóriumban üzemeltet részecskegyorsítót. Az egyedülálló körülményeknek köszönhetően az együttműködés számos magreakció hatáskeresztmetszetét mérte meg a korábbiaknál alacsonyabb energián vagy nagyobb pontossággal. Egy nemrégien lezajlott kísérletről a *Fizikai Szemlében* is közöltünk részleteket [3].

A föld alatti laborban, extrém alacsony energián kivitelezett mérés bár igen hasznos, önmagában nem elegendő. Ha a csillagra jellemző energiatartomány nem érhető el (és a reakciók többsége esetén ez a helyzet), akkor elméleti számítások segítségével kell a hatáskereszt-

metszetet alacsonyabb energiákra extrapolálni. Ez pedig általában annál megbízhatóbb, minél szélesebb energiatartományban és minél pontosabb kísérleti információ áll rendelkezésünkre. Az ATOMKI gyorsítóival számos, a hidrogénfúzióban szerepet játszó reakciót vizsgáltunk széles energiatartományban, gyakran a LUNA kísérleteket kiegészítve. Ezek közül most kettőt említünk röviden.

A ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ reakció nemcsak a pp-láncok egyik kulcsreakciója, hanem az ősrobbanásban lejátszódó elemszintézisben is nagy jelentőséggel bír [4]. A reakció alacsonyenergiás hatáskeresztmetszetét a LUNA és több más kutatócsoport is vizsgálta, ám magasabb (néhány MeV) energián nem volt kísérleti adat az irodalomban, pedig a keletkező ${}^7\text{Be}$ mag szerkezete miatt ez a tartomány is lényeges a reakciót leíró modellekhez, és így a megbízható extrapolációhoz. Az ATOMKI ciklotron gyorsítójával több méréssorozatot végeztünk erre a reakcióra. Eredményeink – kiegészítve az kisenergiás mérések adatait – hozzájárulnak a reakció ismeretéhez és így közvetve a napmodellnek a pontosításához.

A hidrogénfúzió CNO ciklusának kulcsreakciója pedig a ${}^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow {}^{15}\text{O}$ folyamat – mivel ez a leglassúbb, ez határozza meg a teljes ciklus sebességét és hozzájárulását a csillagok energiatermeléséhez. A ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ esetéhez hasonlóan a túl kicsi hatáskeresztmetszet miatt ezt a reakciót sem lehet közvetlenül az asztrofizikai energiákon vizsgálni. Így a szükséges extrapoláció itt is megköveteli a széles energiatartományban rendelkezésre álló, pontos kísérleti adatokat. Az ATOMKI Tandetron gyorsítójának felhasználásával aktivációs módszerrel, azaz a keletkező ${}^{15}\text{O}$ bomlásának detektálásával mértük a reakció hatáskeresztmetszetét. Ezt a módszert még soha nem alkalmazták korábban a vizsgált energiákon, így az eredményül kapott, asztrofizikailag lényeges teljes hatáskeresztmetszet a modellek független ellenőrzési és pontosítási lehetőségét biztosítja.

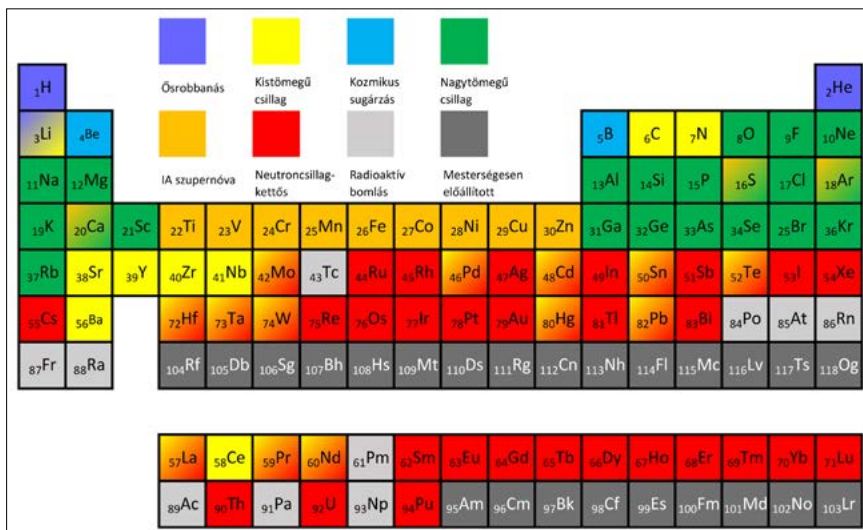
A vasnál nehezebb elemek szintézise

Már a nukleáris asztrofizika tudományágának születésekor nyilvánvaló volt, hogy a vasnál nehezebb elemek és izotópjaik előfordulási gyakoriságának értelmezéséhez legalább három, lényegesen eltérő körülmények között végbemenő nukleoszintézis folyamatot szükséges feltételezni. A XXI. század első évtizedeiben rendkívüli módon bővült a minket körülvevő világegyetemről a tudásunk, és így az eredeti klasszikus kép pontosítására, illetve kiegészítésére is sor került.

Jelenlegi ismereteink szerint a vasnál nehezebb stabil izotópok mintegy fele neutronbefogások révén, vörös óriáscsillagok belsejében, az s-folyamat során keletkezik [5]. 2017-ben gravitációs hullámok detektálásán keresztül az emberiség először tudta megfigyelni neutroncsillagok összeolvadását. Sőt, a robbanást követő elektromágneses sugárzás vizsgálatával bebizonyoso-

dott, hogy nehéz, neutrongazdag magok is létrejönnek ilyen asztrofizikai események során. Azonosították tehát az r-folyamat [6] asztrofizikai környezetét, melyben a vasnál nehezebb neutrongazdag atommagok döntő többsége keletkezik! Napjainkban már vizsgálni tudjuk a galaxisunk peremén található nagyon öreg, fémszegény csillagok összetételét is. Az eredmények arra utalnak, hogy a magösszeomló szupernóvák robbanását követően a lelökött anyagban a stroncium és ezüst között található neutrongazdag atommagok jöhetnek létre az úgynevezett gyenge r-folyamat keretében. A klasszikus kép szerint a protongazdag (úgynevezett p-) magok fotobomlási reakciók révén keletkeznek a γ -folyamat során IA vagy II típusú szupernóvák robbanása közben [7]. Ugyanakkor bebizonyosodott, hogy neutroncsillagból és vörös óriásból álló kettős rendszerekben – úgynevezett röntgenkitörések során – extrém protongazdag magok (egészen a 100-as tömegszámig) jöhetnek létre, majd ezen izotópok bomlása fontos járulékot adhat a könnyű p-magok előfordulási gyakoriságához. Mindezen elemkeletkezési folyamatokban közös, hogy modellezésükhöz kiterjedt, akár több ezer izotópot tartalmazó hálózatok szükségesek.

A felsorolt nukleoszintézis-folyamatok egy része a stabilitás völgyének környezetében, más része pedig az ismert atommagokat bemutató izotóptérkép proton-, illetve neutrongazdag szélein játszódik le. Előbbi folyamatok – úgymint s-, gyenge r-, illetve γ -folyamat – vizsgálatához a kölcsönható magok között végbemenő reakciók tulajdonságait szükséges ismerni. Ilyen méréseket – melyek keretében a releváns magreakciók hatáskeresztmetszeteit és magfizikai paramétereket vizsgáljuk – az ATOMKI részecskegyorsítóival végzünk. Széles tömegszám-tartományban vizsgáltunk alfa-részecske-befogási reakciókat és adatbázisunkra támaszkodva egy új, az alfa-részecskék és nehéz atommagok alacsonyenergiás kölcsönhatását leíró optikai potenciált dolgoztunk ki. A továbbiakban a neutroncsillagok összeolvadásakor, valamint röntgenkitörések során végbemenő elemkeletkezési folyamatok tanulmányozásához a létrejövő extrém proton-, illetve neutrontöbbletes atommagok jellemzőit (elsősorban tömegeiket és béta-bomlásuk jellemzőit) kell meghatároznunk, melyre radioaktív ionnyalábok használatával van lehetőség. Ilyen célú méréseket nagy nemzetközi együttműködések vezető szereplőiként a Japánban található RIKEN Nishina Központ gyorsítóival végzünk [8]. Kísérleteink célja az r-folyamat befejező, kifagyási szakaszát jellemző asztrofizikai körülmények meghatározása.



1. ábra. A földön található kémiai elemeket létrehozó legfőbb folyamatok és asztrofizikai körülmények. Átmeneti színnel azokat az elemeket jelöltük, ahol két folyamat összemérhető hozzájárulást ad

Összegzés, kitekintés

Részben a szélesebben fejlődő csillagászati megfigyeléseknek és asztrofizikai modelleknek köszönhetően a nukleáris asztrofizika napjainkban is a magfizika igen fontos és aktívan kutatott területe, mivel az asztrofizikai jelenségek értelmezéséhez a mögöttük zajló magfizikai folyamatok mind precízebb és széleskörűbb ismerete szükséges.

Az ATOMKI nukleáris asztrofizikai csoportja a jövőben is aktív szerepet kíván játszani ebben az izgalmas tudományágban. Ehhez saját gyorsítóink kiváló alapot biztosítanak, amit nemzetközi együttműködésekben való mind aktívabb részvételünkkel kívánunk erősíteni.

Irodalom

- Gyürky Gy. (2012): Hidrogénfúziós reakciók csillagokban. *Nukleon*, V. évf. 108., <https://nuklearis.hu/nukleon/hidrogenfuzios-reakciok-csillagokban>
- Szücs T. (2018): Alacsony háttérű magfizikai mérések, avagy a nukleáris asztrofizika kihívásai. *Fizikai Szemle*, 67/7–8, 230. <https://fizikaiszemle.elft.hu/szemle/tartalom/40>
- Csedreki L. et al. (2021): Az univerzum születésének vizsgálata a föld alól. *Fizikai Szemle*, 71/6, 185. https://fizikaiszemle.elft.hu/uploads/2021/06/fizszem-202106-csedreki-es-tarsai_14_07_55_1624882075.43.pdf
- Gyürky Gy. (2011): Hélium atommagok reakciója az ösrobbanásban, a Napban és a laboratóriumban. *Fizikai Szemle*, 61/2, 37. <https://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz1102/gyurky1102.html>
- Csedreki L. et al. (2020): Az asztrofizikai s-folyamat és a $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ reakció. *Fizikai Szemle*, 70/2, 39. <https://fizikaiszemle.elft.hu/szemle/tartalom/78>
- Kiss G. Gy. (2017): Az asztrofizikai r-folyamat vizsgálata radioaktív nyalábokkal. *Fizikai Szemle*, 67/1, 7. https://fizikaiszemle.elft.hu/uploads/2017/01/fizszem2017-01_02kissgabor_15_13_14_1485439994.976.pdf
- Gyürky Gy. (2010): Az asztrofizikai p-folyamat – A nehéz elemek protongazdag izotópjainak keletkezése. *Fizikai Szemle*, 60/2, 37. <https://fizikaiszemle.elft.hu/archivum/fsz1002/GyurkyGyorgy.pdf>
- Kiss G. Gy. (2020): A későneutron-kibocsátás jelensége, alkalmazása, illetve kísérleti vizsgálata. *Nukleon*, XIII. évf. 226., https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/13_1_226-KissG_2.pdf

ÚJ RÉSZECSCKE KÍSÉRLETI KIMUTATÁSA AZ ATOMKI-BAN

Krasznahorkay Attila

HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

Bevezetés

Az 1954-ben alapított ATOMKI első átütő tudományos eredménye a neutrínó kinematikai kimutatása volt. A β -bomlásban keletkező elektron és a visszalökődött atommag iránya nem mindig esik egy egyenesbe, ezt sikerült megfigyelniük egy expanziós ködkamra segítségével, és ezzel bizonyították a feltételezett új részecske (neutrínó) létét. A kísérlet eredményeit külföldön is olyan nagyra értékelték, hogy Csikai Gyulát és Szalay Sándort Nobel-díjra is felterjesztették.

Korunk fizikájának egyik legnagyobb kihívása az eddig ismert (látható) anyagnál lényegesen nagyobb tömegű, a csillagászok által bevezetett, úgynevezett sötét anyag tulajdonságainak és szerkezetének megismerése [1, 2]. Csoportunk 2016-ban az ATOMKI-ban egy eddig ismeretlen anomáliát figyelt meg a ^8Be atommag 18,15 MeV-es állapotának elektron-pozitron belső párkeltéssel történő lebomlása során, amit egy új, $\approx 17 \text{ MeV}/c^2$ tömegű, az irodalomban később X17-nek nevezett, részecske keletkezésével és elbomlásával magyaráztunk [3]. Az X17 részecske kapcsolatot teremthet a sötét anyaggal, ezért a kísérleti eredményeink nagy nemzetközi érdeklődést váltottak ki. Publikációnk a hivatkozottsága alapján a magfizika élvonalbeli kutatásairól szóló közlemények felső 0,1%-ába került.

Új motiváció a magfizikai kísérletekhez: sötét anyag és sötét foton

Milyen részecskékből állhat a sötét anyag? Van-e kapcsolat a látható és a „sötét” világunk között? Ezeket a kérdéseket jelenleg egyre több fizikus vizsgálja. A sötét anyag fizikájának megértése napjaink fizikájának egyik legaktívabban tanulmányozott problémája lett. A sötét anyag kutatása új kutatási iránnyá vált.

1978-ban egy nagy kihívást jelentő magfizikai kísérletet indítottak egy új részecske, az axion kimutatására,

amelyet Steven Weinberg Nobel-díjas elméleti fizikus jósolt meg. Az axion az egyik legmeggyőzőbb megoldás volt az erős kölcsönhatás egy rejtélyes szimmetria-problémájára, amit máig sem értünk. Thomas William Donnelly az $1^+ \rightarrow 0^+$ *atommagátmenetekben* létrejött e^+e^- párok szögkorrelációjának tanulmányozását javasolta az axion bomlásának jellemzőjeként. Ezt a részecskét a MeV/c^2 tömegtartományban azonban gyorsan kizárták, árnyékot vetve ezzel a további kísérletekre.

Mind ez ideig sem a CERN-ben, sem a világ más nagy részecskefizikai laboratóriumában nem sikerült olyan új részecskéket kimutatni, amelyek valamilyen módon kapcsolatosak lehetnének a sötét anyaggal.

A sötét foton bomlásából származó e^-e^+ párok szögkorrelációjának mérése az ATOMKI-ban

A sötét fotont a sötét anyag mértékbozonjaként vették be, ami a látható fényhez hasonló szimmetria-tulajdonságokkal rendelkezik, csak nem az elektromos töltések közötti kölcsönhatást, hanem a sötét anyag részecskéi közötti kölcsönhatást lenne hivatott közvetíteni.

Habár a sötét foton tömegére csak nagyon durva becsléssel rendelkezünk, $1 \text{ MeV} < m_x < 1 \text{ GeV}$, mégis nagy erővel kezdtek el annak a kísérleti kimutatását. Ezekbe a kutatásokba kapcsolódtunk be mi is. A részecske élettartama nagyon rövidnek volt várható, és ha a tömege $m_x < 100 \text{ MeV}$, akkor a részecske domináns bomlási módja az elektron-pozitron párra történő bomlás.

A vizsgálatainkhoz olyan nagyenergiás, 18 MeV-es e^-e^+ párokat nagy hatásfokkal detektáló spektrométerre volt szükség, amellyel a párok relatív szöge is néhány fok pontossággal meghatározható. A nagyon ritka események detektálására az elektront és a pozitront egy időben észlelő, ún. e^-e^+ -koincidenciaspektrométert építettünk. A detektorok és spektrométerek építésének Debrecenben már nagy hagyománya van. Elektron-spektrométerek építésében az intézet különösen jelentős nemzetközi elismertségnek örvend. A spektrométer tervezésében és építésében jelentős segítséget kaptunk nemcsak az intézet tagjaitól, hanem holland és német kollégáinktól is.

A spektrométer 5 db sokszálas proporcionális számlálóból (MWPC), valamint vékony (ΔE) és vastag (E), úgynevezett plaztikus szcintillációs detektorokból áll. A gáztöltésű proporcionális számlálók a detektálandó e^- és e^+ becsapódási helyének meghatározására, a vékony



Krasznahorkay Attila fizikus, az MTA doktora, az ATOMKI tudományos tanácsadója, a Szege-di Egyetem címzetes egyetemi tanára és az Academia Europaea tagja. Eredményei jelentősek az atommaghasadás és az azt megelőző, erősen deformált állapotok vizsgálatában, az atommagok neutronbőr-vastagságának pontos mérésében, a neutrongazdag maganyag állapotegyenletének pontosításában és az alapvető kölcsönhatások vizsgálatában. Hat éven át képviselte hazánkat az Európai Magfizikai Koordinációs Bizottságban.

és vastag szcintillátorok pedig a részecskék azonosítására és energiájuk meghatározására szolgálnak.

Ezeket a detektorokat a nyalábirányra merőlegesen 0° , 60° , 120° , 180° és 270° -os szögekben helyeztük el. A szögirányokat úgy választottuk ki, hogy a spektrométer határfoka az e^-e^+ -párkorrelációs szög függvényében körülbelül egyenletes legyen.

A spektrométer minden részét a céltárgy környezetében az utolsó csavarig gondosan beépítettük a GEANT Monte Carlo-szimulációba, hogy megkaphassuk a spektrométer választát mind az e^-e^+ párokra, mind az intenzív γ -sugárzásokra. A belső párkeltési folyamat mellett a γ -sugárzások okozta háttérrel, a külső párkeltést és a sokszoros e^- , illetve e^+ -szóródásokat is figyelembe vettük, hogy minél pontosabban megértsük a detektorok és a spektrométer válaszfüggvényeit.

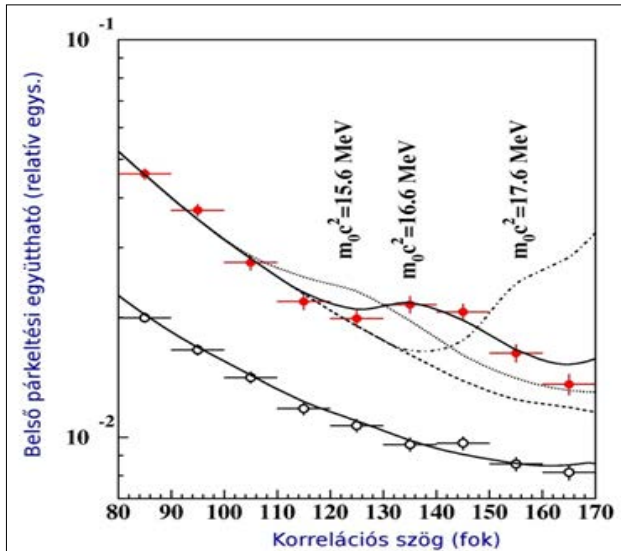
A spektrométerrel megvizsgáltuk a ^8Be atommag $18,15\text{ MeV}$ -es állapotának legerjesztődésekor keletkező e^-e^+ párok szögkorrelációját, és abban 140° környékén a belső párkeltés elméleti értékeitől csúcsszerű eltérést találtunk (lásd 1. ábra). Legjobb tudásunk szerint ez jelenleg semmilyen magfizikai effektussal nem magyarázható. A kísérleti és az elméleti értékek eltérése jelentős, és az csak egy új részecske bevezetésével magyarázható, aminek tömege $16,7 \pm 0,35$ (statistikai hiba) $\pm 0,5$ (szisztematikus hiba) MeV .

Meghatároztuk a feltételezett részecske keletkezésének elágazási arányát is a $18,15\text{ MeV}$ -es gamma-átmenethez képest, és azt $6,0 \cdot 10^{-6}$ -nak találtuk. Ezen kísérleti eredményünk alapján hamar kiderült, hogy ez a részecske nem lehet a sötét foton, hanem valami más, talán még érdekesebb részecske. Ezt mutatta az eredmények elméleti értelmezésére írt csaknem 500 hivatkozás.

Az új e^+e^- -spektrométerünk

A feltételezett új (az irodalomban X17-nek keresztelt) részecske további tanulmányozására egy olyan nagy hatásfokú e^+e^- -koincidenciaspektrométert építettünk, ami képes a $4\text{--}20\text{ MeV}$ -es magátmenetekből származó, belső párkeltéssel keletkező e^+e^- párok szelektív, kis háttérrel történő detektálására.

Az e^+e^- részecskék energiaveszteségének és a részecskék áthaladási pontjainak meghatározására modern, szilíciumból készített DSSD (double-sided silicon strip detector) detektorokat használtunk. Ezek $0,5\text{ mm}$ vastag $50 \times 50\text{ mm}^2$ méretű szilíciumlapkák. Mindkét oldalukra $1,5\text{ mm}$ széles vezető csíkokat párologtattak annak érdekében, hogy az áthaladó elektronok és pozitronok által keltett töltések pontos helyét meghatározhassuk. A plasztik szcintillátorok méreteit úgy választottuk meg, hogy bennük a nagyenergiás részecskék teljesen lefékeződjenek. Ahhoz, hogy a detektorokat a céltárgyhoz minél közelebb rakhassuk, azok orrait speciálisan alakítottuk ki.



1. ábra. A ^8Be $18,15\text{ MeV}$ -es átmenetéhez tartozó e^-e^+ párok rezonancián mért szimmetrikus (sötét pontok hibákkal), illetve aszimmetrikus (üres körök hibákkal) energiaeloszlással kapuzott szögkorrelációja, összehasonlítva a különböző energiájú részecskét feltételező szimulációk eredményeivel

Kísérletek az új Tandetron gyorsítóval

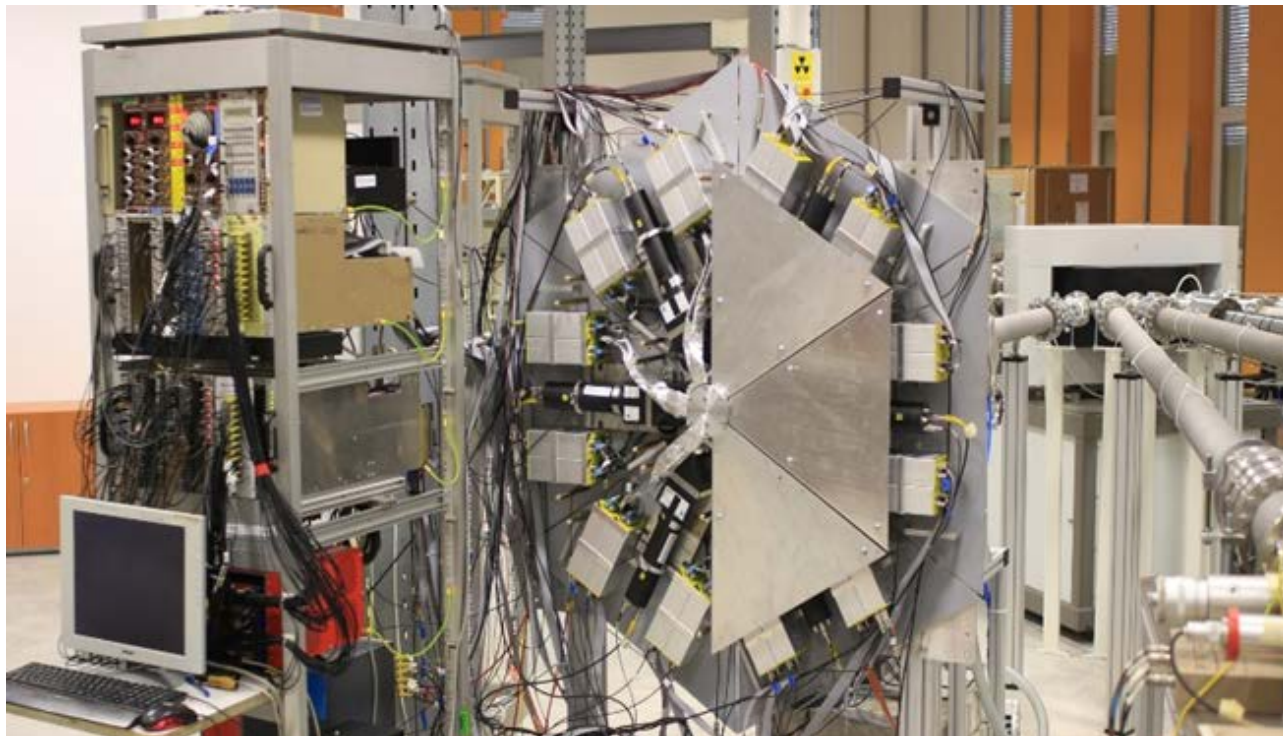
Az elmúlt években a spektrométerünket áthelyeztük az ATOMKI új Tandetron gyorsítója mellé a 2. ábrán látható módon.

Először megismételtük és megerősítettük a ^8Be -anomáliára vonatkozó kísérleti eredményeinket. Következő lépésként a $^3\text{H}(p, e^+e^-)^4\text{He}$ magreakcióból származó e^+e^- párok szögkorrelációját vizsgálva is sikerült megfigyelnünk az anomáliát. Ebben az esetben a nagyobb gerjesztési energia miatt az anomália 115° -nál jelent meg [4]. A ^4He e^+e^- -bomlásának alapos vizsgálata során az is kiderült, hogy az anomália megjelenését a protonok közvetlen befogása által generált E1 multipolaritású sugárzások okozzák.

Legújabb eredményeinket pedig a $^{11}\text{B}(p, e^+e^-)^{12}\text{C}$ magreakció vizsgálatával kaptuk [5]. A reakciót $E_p = 1,3\text{ MeV}$ és $2,3\text{ MeV}$ között vizsgáltuk hat különböző bombázási energián, amelyek egy $17,0$ és $18,0\text{ MeV}$ közötti gerjesztésienergia-tartományt (E_x) fedtek le, ami egy $1,05\text{ MeV}$ széles rezonancia energiaintervalluma. A legkisebb nyalábergiánál az e^+e^- -szögkorreláció kizárólag az E1 multipolaritású sugárzás belső párkeltési folyamatával volt értelmezhető, mivel a gerjesztési energia kisebb volt, mint az X17 részecske tömege. Magasabb energiáknál viszont figyelembe kellett venni az X17 bomlás hozzájárulását is. Az anomális csúcs helye különböző gerjesztési energiáknál mérve 170° -ról 150° -ra csökkent.

Összefoglalás

E vizsgálatok eredményeként mára már meggyőző kinematikai bizonyítékokkal rendelkezünk az X17 részecske léte.



2. ábra. Az ATOMKI Tandemron Laboratóriumában az egyik nyálbécsontra telepített elektron-pozitron párokat regisztráló spektrométer legújabb verziója

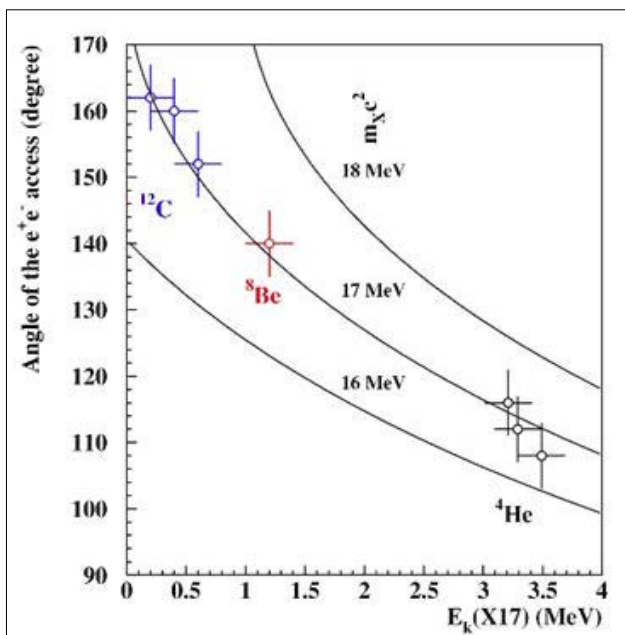
Az atommagok vizsgálendő gerjesztett állapotait minden esetben protonbefogással állítottuk elő, aminek során az atommag pontosan meghatározott gerjesztett állapotba került. Ez az energia szolgált az X17 részecske keltésére, a maradék pedig a részecske kinetikus energiáját biztosította. Egy mozgó részecske e^+e^- részecskére bomlik. A két részecskés bomlás kinematikájának kiszá-

mításával az adódik, hogy minél nagyobb a részecske kinetikus energiája, annál kisebb az e^+ és e^- részecskék által bezárt szög. A kinematikai számítások eredményeit – különböző tömeget feltételezve az X17 részecskére – a 3. ábrán folytonos vonallal tüntettem fel. Az ábrán jól látható, hogy a ^8Be -ra, ^4He -ra és ^{12}C -re kapott kísérleti eredményeink jól illeszkednek a 17 MeV/c²-es tömeget feltételező számítás eredményére. Eredményeinkről nemrég a *Nuclear Physics News*-ban [6] és a legutóbbi NuPECC-ülésen (Magfizikai Európai Együttműködési Bizottság), Pozsonyban is beszámoltam.

A jövőben tervezzük az X17 részecske 2γ-kibocsátással történő bomlásának vizsgálatát, illetve az atommagok X17 kibocsátásakor elvitt pálya-impulzusmomentumának a megmérését is, hogy pontosabban meghatározhassuk az X17 részecske spinjét és paritását és ezzel pontosabb képet adjunk annak elméleti értelmezéséhez.

Hivatkozások

1. Németh Judit: A sötét anyag. *Fizikai Szemle*, 56/11 (2006) 362.
2. Fényes Tibor: Az Univerzum uralkodó anyagfajtája a „sötét anyag”. *Fizikai Szemle*, 58/3 (2008) 81.
3. Krasznahorkay Attila János: Az 5. kölcsönhatás nyomában. *Fizikai Szemle*, 2016/7–8, 248.; A.J. Krasznahorkay et al.: *Phys. Rev. Lett.*, 116 (2016) 042501.
4. A. J. Krasznahorkay, et al.: *Phys. Rev. C* 104 (2021) 044003.
5. A. J. Krasznahorkay, et al.: *Phys. Rev. C* 106 (2022) L061601.
6. Krasznahorkay Attila János, Krasznahorkay Attila, Csatlós Margit, Csige Lóránt, Tímár János: *Nuclear Physics News*, 32 (2022) 10.



3. ábra. A különböző atommagokban megfigyelt anomáliák szögét az X17 részecske kinetikus energiájának függvényében láthatjuk

ŰRKUTATÁSSAL KAPCSOLATOS TEVÉKENYSÉGEK AZ ATOMKI-BAN

Angeli István¹, Csige István², Fenyvesi András², Kereszturi Ákos³, Kiss Árpád Zoltán²,
Molnár József², Rácz Richárd², Szarka Máté², Zilizi Gyula¹

¹Debreceni Egyetem, Természettudományi és Technológiai Kar, Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék, Debrecen

²HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

³HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Csillagászati Intézet, Budapest

Bevezetés

Az ATOMKI-ban az 1960-as évektől folynak olyan kutatások és fejlesztések, melyeknek űrkutatási vonatkozásai is vannak. A hazai és nemzetközi programokhoz kapcsolódó munkák eredményei nemcsak a Föld körüli pályákon, hanem a bolygóközi térben valamint a Naprendszer égitestjeinek környezetében és felszínén ember nélkül vagy űrhajósok által folytatott űrtevékenységek szempontjából is fontosak.

A kutatások legtöbbje azt vizsgálja, hogy a kozmikus sugárzási környezet miként hat a világűrbe juttatott anyagokra, élőlényekre és a légkör nélküli égitestek felszínére.

Az ATOMKI részecskegyorsítóinál és ⁶⁰Co radioizotóp-forrásánál ionizációs és atomkilökődési folyamatok útján keltett anyagszerkezeti elváltozások, sugárkémiai folyamatok és sugárbiológiai hatások vizsgálhatók. Plazmák, γ -fotonok, protonok, α -részecskék, nehezebb ionok és neutronok állnak rendelkezésre a vizsgálatokhoz.

Alább áttekintjük a kutatásokat és néhány eredményüket.

Egy neutronfizikai alapkutatási eredmény sugárvédelmi és űrkutatási vonatkozása

Az 1960-as években neutronfizikai kutatások vezettek az első olyan eredményre, melynek űrkutatási vonatkozásai is lettek. 1954 és 1967 között a Kossuth Lajos Tudományegyetem Kísérleti Fizika Tanszékét és az ATOMKI-t is Szalay Sándor vezette. Csikai Gyula irányította a két intézmény neutronfizikai kutatásait, melyek egyike a neutronindukált magreakciók hatáskeresztmetszeteinek kísérleti és elméleti vizsgálata volt. Angeli István és Csikai Gyula 1970-ben és 1971-ben publikált egy fizikai modellt, ami igen jó közelítést ad arra, miként függ az atommag tömegszámától és a neutronenergiától az atommag és a neutron között lehetséges kölcsönhatások teljes valószínűségét megadó ún. totális hatáskeresztmetszet. Akkoriban a NASA egyik prioritása a kozmikus sugárzási mezők transzportfolyamatainak és kölcsönhatásainak számítógépes modellezése volt. A neutrontranszport-egyenletük tartalmazta a totális hatáskeresztmetszetet is. A NASA kutatói azonnal felismerték,

hogy az Angeli–Csikai-modell [1] használata jelentősen csökkenti a transzportegyenletük numerikus megoldásának idejét és költségét is a dozimetriai és sugárvédelmi feladatok megoldása során.

Űrdozimetriai kutatások és fejlesztések

Az 1960-as évektől nemzetközileg elismert eredmények születtek az ionizáló részecskék nyomainak fotoemulziókkal, valamint műanyagokból készült filmekkel és lemezekkel történő detektálása területén is az ATOMKI-ban. Az 1980-as évekre a Somogyi György, majd Hunyadi Ilona által vezetett Nyomdetektor Csoport nemzetközi hírűvé vált. Nagy szerepük volt az ionizáló részecskék nyomainak rögzítésére alkalmas olyan szilárdtest nyomdetektorok kifejlesztésében, melyek a kíváló optikai tulajdonságokkal rendelkező CR-39 műanyagból készíthetők. A Magyar Optikai Művek Mátészalkai Gyáregységével megvalósították a MA-ND márkanévű nyomdetektoruk gyártását. Az Interkozmosz Programban a Moszkvai Orvosbiológiai Problémák Intézetével együttműködve alacsony földköri pályán keringő műholdakra kihelyezett nyomdetektor-kötegeikkel mérték a kozmikus ionsugárzás töltés és energia szerinti eloszlását. Az eredmények alapján meghívták Csige Istvánt a San Francisco-i Egyetemre a NASA LDEF műholdján besugárzott nyomdetektorok kiértékelésére. Az adataik a kozmikus környezetek és hatásaik modellezésére és az űrhajósok sugárvédelmének tervezésére szolgáló szoftverek javítását és a Nemzetközi Űrállomás tervezését is segítették.

Sugárkárosodási vizsgálatok mesterséges égitestek fejlesztéséhez

ATOMKI-s szakemberek az 1990-es évek végétől vesznek részt műholdfejlesztésekkel kapcsolatos munkákban. Először a svéd HUGIN és MUNIN műholdak elektronikáinak fejlesztésében működtek közre. Egy svéd-magyar program során hozzájárultak az Európai Űrgynökség (ESA) és Svédország együttműködése keretében megépített SMART-1 ionhajtóműves műhold fejlesztéséhez is. Részben az ATOMKI-ban γ -fotonokkal és gyors ne-

utronokkal elvégzett sugárzástűrési tesztek [2] alapján választották ki a memória IC-ket a fedélzeti adattároló tömegtároló egységéhez. A sikert jól mutatta, hogy 2003-ban – útban a Hold felé – a SMART-1 egy különösen intenzív napvihar idején jelentős sugárterhelésnek kitéve haladt át a Föld Van Allen sugárzási övein. Később Hold körüli pályára állt, elvégezte a 2006. szeptember 3-ig tartó feladatait, majd irányítottan a Hold felszínébe csapódott. Több sikeresen pályára állított magyar kisméretű műhold – MASAT-1, MASAT-2, PULI-2, SMOG-P, SMOG-1, MRC-100 (SMOG-2) – elektronikáinak fejlesztéséhez is az ATOMKI-ban történtek meg a γ -fotonokkal végzett, az ionizációs hatások okozta érzékenységeket vizsgáló sugárzástűrési tesztek.

Sugárvédelmi árnyékoló anyagok vizsgálata

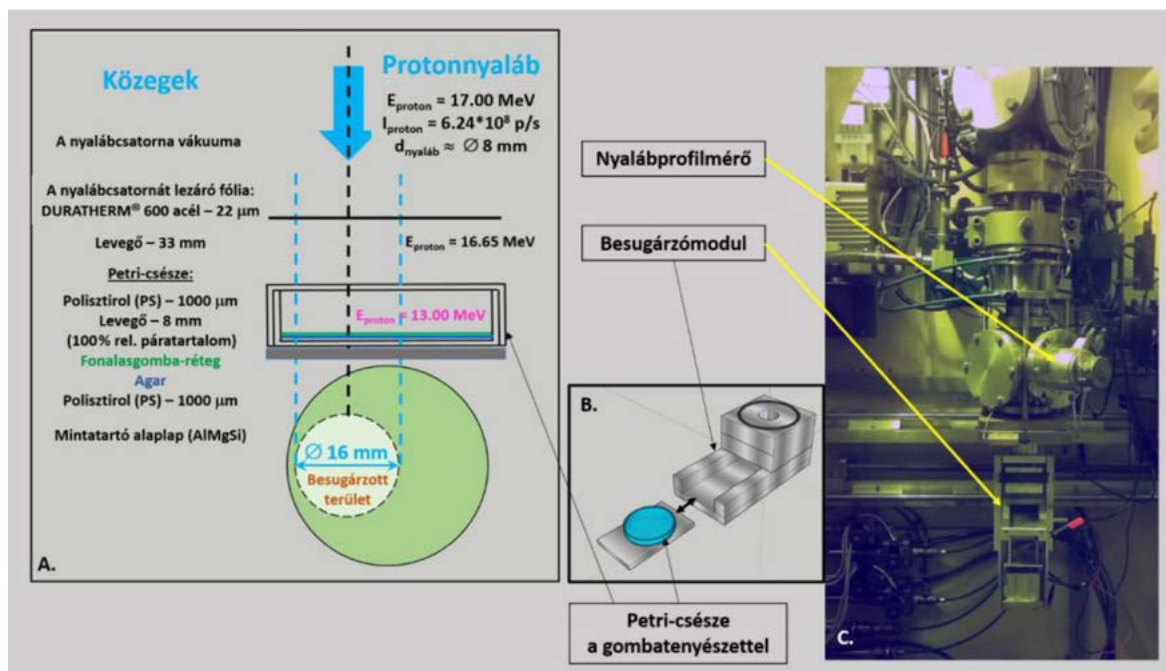
Magyar fejlesztésű, műgyantaalapú szén-szálas kompozit anyagok különböző sugárzási környezetekben történő alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata is elkezdődött az ATOMKI-ban egyetemi és ipari fejlesztőpartnerekkel közösen. A besugárzási tesztek célja új, könnyű, innovatív kompozit anyagok és szendvicsszerkezetek alkalmazhatóságának vizsgálata az űreszközök fedélzeti sugárvédelmében. A besugárzott mintákon az esetleges felületi és térfogati roncsolódások vizsgálata mellett sor kerül a legfontosabb mechanikai jellemzők (rugalmassági, szilárdsági és törési paraméterek) mérésére különböző részecskefluensektől eredő ionizációs és atomkilökődési hatások és elnyelt dózisok függvényében.

Élettani kutatások

Súlytalanságban az izmok leépülnek. Az űrhajósokat ért sugárterhelés és a súlytalanság összetett hatása befolyásolja az izomsejtek működését, módosíthatja azok membránszerkezeteit, melyek kulcsfontosságúak az izom működésében, így ez az izomvesztésre is hatással lehet. A Debreceni Egyetem Élettani Intézete az ATOMKI-val együtt a membránszerkezet sugárkárosodása és az izomsejtek működése közötti összefüggést vizsgálja, hisz ennek feltérképezése segíthet hatékonyabb terápia megoldásokat találni mind az űrutazás során, mind a földi körülmények között jelentkező izomvesztéssel járó betegségek ellen.

Sugárbiológiai vizsgálatok

Az űrhajósokkal mikrobák is utaznak az űrhajókon. A kozmikus sugárzás (pl. a napkitörések nagy energiájú protonjai) a mikrobák szervezetében is okozhat elváltozásokat. Jelentősen megváltozhatnak például a mikrobák anyagcsere-folyamatai, vagy megnövekedhet a fertőzőképességük is, ami egészségügyi kockázatot jelenthet az űrhajósok számára. Ezért a Debreceni Egyetem Biotechnológiai Intézete az ATOMKI-val közösen sugárbiológiai vizsgálatokat folytat az *Aspergillus nidulans* fonalgombá mint modellorganizmus felhasználásával. Az ATOMKI gyorsítóinál protonokkal végzett besugárzások (1. ábra) lehetővé tették a biológiai válaszok részletes, a gomba összes génjére



1. ábra. (A) Az *Aspergillus nidulans* fonalgomba esetén protonokkal elvégzett sugárbiológiai célú besugárzások elvi elrendezése. (B) A protonokkal végzendő sugárbiológiai kísérletekhez kifejlesztett besugárzómodul. (C) Az ATOMKI GGC-20E ciklotronjánál a függőleges nyalábcsontra végén kialakított besugárzó elrendezés

kiterjedő vizsgálatát. E változások tanulmányozása kulcsfontosságú az űrhajósok egészségügyi kockázatainak megértéséhez.

Gyógyszerek sugárkárosodásának vizsgálata

Az űrutazások során az űrhajósokkal utaznak a fedélzeten tárolt gyógyszerek is a kozmikus sugárzási környezetben. Ezért ismerni kell, hogy miként változhatnak meg a gyógyszerek a küldetés időtartama alatt, csökkenhet-e a hatóanyag-tartalmuk és képződhetnek-e az űrhajósok egészségére ártalmas bomlástermékek a fedélzeti kozmikus sugárzási környezetben. Az ATOMKI gyorsítóinál (Tandetron, ciklotron) az Aedus Space Kft.-vel együttműködve olyan kísérletek kezdődtek, melyek keretében az űrutazás során várható kozmikus sugárzási környezetet modellezve gyógyszerek besugárzása történik. Ily módon információkat kaphatunk az űrhajó fedélzetén történő tárolás során várhatóan fellépő elváltozásokról. A kísérletek eredményei segíthetik az olyan készítmények kifejlesztését, melyek biztonságosan tárolhatóak és hatékonyan használhatók fel a hosszú távú űrmissziók során mindvégig.

Kozmikus anyagok vizsgálata nukleáris módszerekkel

Az ATOMKI az 1960-as évektől vesz részt az űrből származó anyagok (kozmoszpor, meteoritok) kutatásában.

A pásztázó nukleáris mikroszondán PIXE módszerrel (μ PIXE) (PIXE: proton-induced X-ray emission, protonindukált röntgenemisszió) mikrométeres feloldású elemterképek készíthetők a vizsgált minta, így a Földön begyűjtött kozmikus anyag fő-, mellék- és nyomelem-eloszlásáról. A μ m méretű gömböcskékből (szferulákból) álló kozmikus por jellegzetes elemösszetételének meghatározása jelentősen hozzájárult a perm-triász földtörténeti kor határán bekövetkezett szupernóva-robbanás kutatásával foglalkozó nemzetközi program magyar résztvevőinek sikeréhez. A Barringer-kráter (arizonai meteoritkráter) környékén begyűjtött anyag (szferulák, valamint nem gömbi részecskék) elemanalíziséből meghatározták az ásványi összetételeket, és a nyomelem-tartalom vizsgálatából következtetni lehetett a kozmikus eredetre [3].

A kabai meteorit μ PIXE-vizsgálata 1995-ben kezdődött el. A néhány mikrométeres feloldással készült elemterképek és a kvantitatív elemösszetétel meghatározása lehetővé tette a különböző ásványi fázisok jó elkülöníté-

sét. Az ATOMKI-ban végzett egyéb vizsgálatok eredményeit is bemutatták a meteor hullásának 160. évfordulóján rendezett konferencián [4].

Az ATOMKI közreműködik a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (CSFK) Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézet azon kutatási programjában (OTKA K_138594) is, mely a kisbolygókhoz küldendő expedíciók tervezését támogatja.

Az űrszondák infravörös színképelemzőkkel is vizsgálják majd az égitestek felszínét. A mérések értelmezéséhez tudni kell, hogy a kozmikus sugárzások (pl. a napszél) miként módosítják a kisbolygók felszínének kémiai összetételét, anyagszerkezetét és így az infravörös színképi jellemzőit.

A Naprendszerben a kozmikus sugárzás főleg a Napról származó elektronok, protonok (hidrogénionok), α -részecskék (He-atommagok) és kisebb részben C, N, O, Si, Fe és más elemek ionjai alkotta plazmák áramlása (napszél). A leggyakoribbak az 1 keV energiájú protonok. Az ATOMKI elektron-ciklotronrezonanciás ionforrásánál végzett besugárzások során a napszél ionjainak hatásai széles ionenergia tartományokban modellezhetők. Meteoritokból vett minták besugárzása történik, melyek anyaga hasonló a kisbolygókéhoz. A besugárzások 10–100 millió évnyi kozmikus sugárzás terhelésének felelnek meg. Az anyagszerkezeti elváltozások vizsgálata a CSFK analitikai eszközeivel történik.

Összefoglalás

Az ATOMKI-ban számos űrkutatási vonatkozású kutatás és fejlesztés feltételei állnak rendelkezésre. A tevékenységek hazai és nemzetközi partnerek együttműködéseinek keretei között egyaránt végezhetők. A <https://atomki.hu/atomki-70> weboldalon a jelen cikkhez kapcsolódó szakirodalmi hivatkozások, továbbá részletes kiegészítő anyagok érhetőek el.

Irodalom

1. Angeli I.: Totális neutron-hatáskeresztmetszetek tömegszám-függése; leírásuk félklasszikus optikai modellel. *Fizikai Szemle*, 1990/10, 290.
2. Molnár J., Fenyvesi A.: Fejlesztések a CMS műondetektorainak helyzetérzékelő rendszeréhez. *Fizikai Szemle*, 2004/2, 47.
3. Uzonyi I., Szőőr Gy., Rózsa P., Pelicon P., Simčič, J., Cserhádi C., Daróczy, L. Kiss Á. Z.: Investigation of impact materials around Barringer Meteor Crater by SEM-EDX and micro-PIXE techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 267 (2009) 2225–2228.
4. Átfogó kutatások a kabai meteoriton. Comprehensive research on Kaba meteorite. *Acta Geoscientia Debrecina 1. különszám* (Debreceni Egyetemi Kiadó), Szerkesztők: Nagy Mihály, Rózsa Péter, McIntosh Richard William, 2018.

fizikaiszemle.elft.hu

A honlapon megtalálhatja régebbi és új lapszámainkat, valamint számos mellékletet!

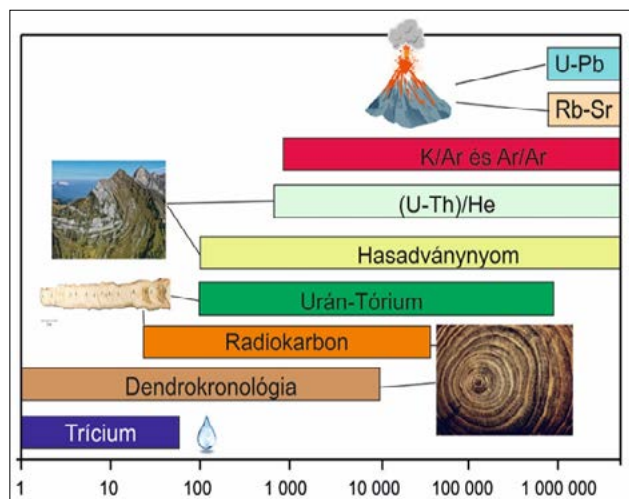
KRONOLÓGIA KÜLÖNBÖZŐ IDŐLÉPTÉKEKBEN

Palcsu László¹, Lisztes-Szabó Zsuzsa^{1,2}, Benkó Zsolt^{1,2}, László Elemér¹

¹ HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

² Debreceni Egyetem, Ásvány és Földtani Tanszék, Debrecen

Az ATOMKI-ban a légköri, hidrológiai, geológiai, üledéktani, környezeti, klimatológiai, régészeti kutatásokat integráló multidiszciplináris szemlélet gyökerei az alapításig nyúlnak vissza. E kutatási területek nem nélkülözhetik, hogy a vizsgálati objektum korát – valamely időskálán – a kutatott tárgyhoz rendeljük. Egy ásvány, egy rétegsor, egy faégyűrű képződési ideje, változásainak időbeli lefutása kulcsfontosságú a kutatás kérdéseinek megválaszolása érdekében. Cikkünk rövid áttekintést nyújt az intézetben elérhető kormeghatározási módszerekről és azok alkalmazásairól.



1. ábra. Az ATOMKI-ban alkalmazott geokronológiai módszerek

Bevezetés

Szalay Sándor, a debreceni Kossuth Lajos Egyetem professzoraként külföldi tanulmányaiból hazatérve, az 1950-es évek elején Vendl Aladár geológussal együttműködve tisztázta az urán dúsulásának kémiai folyamatát szerves anyagokban gazdag üledékekben. Később Szalay felismeréseit is alkalmazva a geológusoknak sikerült azonosítani az első urán-nyersanyagtelepet a Mecsek-hegységben. Szalay Sándor felismeréséért Kossuth Díjat kapott, és felkérést egy atommagkutatóval foglalkozó intézet alapítására Debrecenben. Az atommagkutató és a geológia így már az intézet alapításának kezdete óta összefonódik. Ennek az együttműködésnek a gyümölcse már a kezdetektől a (geo-)kronológia módszereinek, laborhátterének fejlődése. Az ATOMKI fizikusai és mérnökei folyamatosan fejlesztenek és használnak olyan műszereket, melyek nehezen mérhető elemek, izotópok koncentrációit vagy izotóparányait képesek meghatározni. E vizsgálatok egyik fő célja valamilyen környezeti elem (víz, kőzet, üledék, jég, faégyűrű stb.) korának meghatározása. A kormeghatározás különféle időskálán történik attól függően, hogy mi a kutatás célja, melyik az ehhez kiválasztott izotóp, és mi az elérhető analitikai pontosság és kimutatási határ. Az intézet kutatói már a 70-es években elkezdtek a geológiában használatos módszerek alkalmazását a rubídium-stroncium, valamint a kálium-argon módszerek meghonosításával (1. ábra). Az elsőként bevezetett módszerek a hosszú felezési idejű izotópok



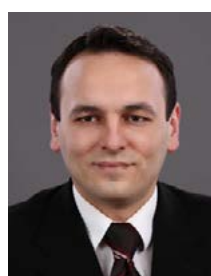
Palcsu László fizikus, tudományos főmunkatárs, az Izotópklimatológiai és Környezetkutató Központ vezetője. Érdeklődési területei: a kozmogén trícium és a Napciklus kapcsolata, jégvétegek korolása, izotóphidrológia, paleoklímarekonstrukció. Egy OTKA-pályázat vezetője.



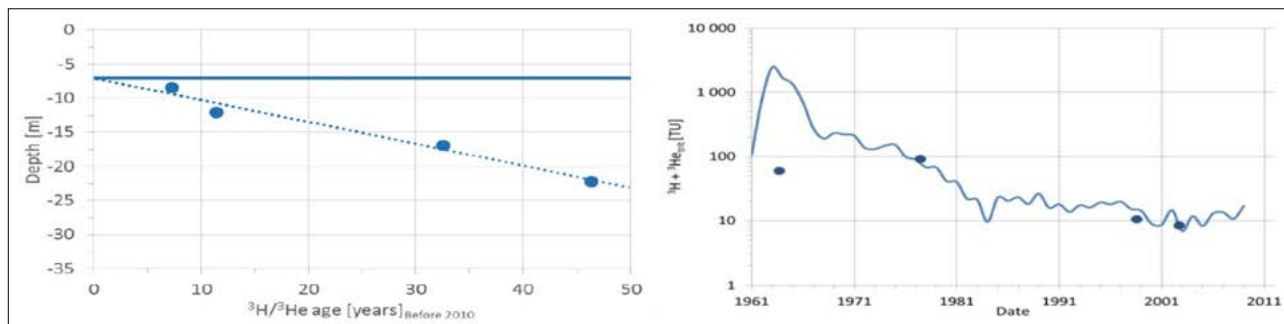
Lisztes-Szabó Zsuzsa biológus-ökológus, tudományos főmunkatárs, címzetes egyetemi tanár. Érdeklődési területek: holocén klímaváltozások a Kárpát-medencében, paleokörnyezet rekonstrukciók célú fitolit- és növényi mikromaradvány-elemzés, növényi szilíciumakkumuláció.



Benkó Zsolt geológus, egyetemi docens, a DE Ásvány és Földtani Tanszékének vezetője, az Atommagkutató Intézet tudományos főmunkatársa. Érdeklődési területei a magmás, metamorf és üledékes kőzetek geokronológiája, a karbonátok genetikája, szilárd ásványi nyersanyagtelepek képződése, valamint a fluidum-kőzet kölcsönhatás vizsgálata.



László Elemér meteorológus, az Atommagkutató Intézet, Izotópklimatológiai és Környezetkutató Központjának tudományos munkatársa. Érdeklődési területei: a csapadéki izotópok meteorológiai alkalmazásai, izotóphidrológia, borok izotópbélyegének meghatározása, légköri modellezés. Egy NKFIH-pályázat vezetője.



2. ábra. Sekély talajvíz kormeghatározása $^3\text{H}/^3\text{He}$ módszerrel Menteleken. Bal ábra: $^3\text{H}/^3\text{He}$ korok a mélység függvényében 2010-ben (a vízszintes kék vonal az átlagos talajvízszintet jelöli); jobb ábra: a becsült kezdeti tríciumkoncentrációk ($^3\text{H} + ^3\text{He}_{\text{trit}}$) a naptári korok függvényében (a kék színű görbe a bécsi csapadék átlagos tríciumkoncentrációját mutatja)

rendszerek voltak (a ^{87}Rb , felezési ideje: 49,2 milliárd év; a ^{40}K felezési ideje: 1,25 milliárd év), melyek geológiai időskálán használatosak. Nagy igény volt ugyanakkor a fiatal környezeti és éghajlatváltozási folyamatok vizsgálatához a rövidebb felezési idejű izotópok alkalmazására. Csongor Éva (Szalay Sándor felesége), később Hertelendi Ede olyan proporcionális számlálócsőrendszert épített, mellyel a szén 5700 év felezési idejű radioaktív izotópját (^{14}C) lehetett mérni kellő érzékenységgel és világszínvonalú pontossággal. Az izotóparány mérési technikák bővülésével a mérhető izotópok száma is nőtt, ami újabb és újabb földtani anyagok és események korának meghatározását tette lehetővé. A következő fejezetekben néhány példán keresztül mutatjuk be, hogy az ATOMKI-ban jelenleg milyen kormeghatározási módszereket használunk a környezet- és földtudományok területén.

Hidrológiai kormeghatározás

A víz korán azt értjük, hogy mennyi idő telt el azóta, hogy a víz a felszín alá került. Elviekben a felszín alatt található víztest minden molekulája más és más időt tölthetett el a felszín alatt, azaz a víznek van egy koreloszlása. Ennek meghatározására, jellemzésére szolgálnak a kormeghatározási módszerek. A víz korolásnak két legelterjedtebb eszköze a trícium- és radiokarbon-módszerek. A fiatal vizek kormeghatározása – többek között – a hidrogén radioaktív izotópjával, a tríciummal valósítható meg (felezési ideje 12,32 év), azonban ehhez nagyon érzékeny mérés technika szükséges az alacsony természetbeli koncentrációja miatt. Szerencsére az utóbbi évtizedek módszertani fejlesztéseinek köszönhetően a trícium leányeleme, a ^3He mennyiségének tömegspektrométeres meghatározásával ennek az izotópnak a pontos mérése is lehetségessé vált az Intézetben. Ha ismerjük a kezdeti tríciumkoncentrációt, akkor a vízben mért mennyiség alapján a víz kora kiszámítható a radioaktív bomlástörvény segítségével. Azonban a felszín alá beszivárgó csapadék kezdeti tríciumkoncentrációja az utóbbi évtizedekben a légköri nukleáris fegyverkísérletek miatt nem volt állandó: a 60-as évek közepére a természetes szint több mint százszorosára emelkedett. Ez az úgynevezett 1963-as bombacsúcs. Ha viszont nemcsak a víz tríciumkoncentrációját mérjük, hanem a vízben található leányelemét is,

akkor a kettő viszonyából meghatározható a kezdeti tríciumkoncentráció és így a víz kora is az alábbi képlettel:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{^3\text{H} + ^3\text{He}_{\text{trit}}}{^3\text{H}} \right).$$

A képletben a t a víz kora, a λ a trícium bomlási állandója (0,05626 1/év), ^3H a víz tríciumkoncentrációja, a $^3\text{He}_{\text{trit}}$ pedig a vízben oldott ^3He tríciumbomlásából származó járuléka.

Az úgynevezett $^3\text{H}/^3\text{He}$ kormeghatározás alkalmazásának egy szemléletes példája a Duna–Tisza közén található beszivárgási területen végzett kutatás. A kút létesítésekor, 1998-ban a talajnedvesség tríciumtartalmát vizsgálták, s megtalálták a maximális tríciumkoncentrációval rendelkező mélységet, amelyet az 1963-as beszivárgással azonosítottak. Ha nincs lehetőségünk a bombacsúcsot megtalálni, akkor más kormeghatározási módszereket kell használnunk. A mintavétel évében, 2010-ben a trícium- és héliumvizsgálatokból számolt $^3\text{H}/^3\text{He}$ korok egyértelműen növekedtek a mélységgel (2. ábra). A kor-mélység összefüggés megadja a víz vertikális áramlási sebességét, mely 320 ± 7 mm/évnek adódott. Ha ezt a mennyiséget megszorozzuk az effektív porozitással, akkor megkapjuk a beszivárgási tényezőt, melyre 48 ± 6 mm/évet kaptunk. Ez az érték az 505 mm-nyi éves összcsapadéknak mindössze csak a 9,5%-a.

Idősebb vizek kormeghatározása legtöbbször a vízben oldott szervesetlen szén, elsősorban a HCO_3^- , radiokarbon-tartalmán keresztül történik. De hogy kerül a szén a vízbe? A felszín alá beszivárgó csapadék a gyökérzónában szén-dioxidot old magába, melynek radiokarbon-tartalma megegyezik a légköri radiokarbon-mennyiséggel. Ahogy a víz halad tovább, az áramlási pályája mentén két lényeges folyamat történik: 1) a szén-dioxidos víz karbonátot old a befogadó kőzetből, ami csökkenti a radiokarbon összes szénhez viszonyított arányát; 2) a radiokarbon mennyisége csökken a radioaktív bomlás következtében. Ezek a folyamatok megfelelő geokémia modellel becsülhetők, így a kor kiszámolható. Mivel a radiokarbon felezési ideje 5700 év, ezért a korlási tartomány néhány ezer évtől néhány 10 ezer évig terjed. Míg az intézet korai évtizedeiben radioaktív számlálási technikával vizsgálták a radiokarbont, ahol nagy mennyiségű minta (1 g szén) hosszú idejű (1 hét) mérése volt szüksé-

ges, mára ez lecsökkent mg-os szintre, és 1-2 órás mérési időre a gyorsító tömegspektrometria bevezetésével.

Uránsoros kormeghatározás

Az ATOMKI legújabb, nagyon nagy mérési pontosságot igénylő módszertani fejlesztése az uránsoros kormeghatározás. A módszer segítségével fiatalon képződött karbonátok, pl. barlangi cseppkövek, mésztufagátak vagy tengeri korallok korát lehet igen pontosan meghatározni. Ez lényegében egy módszercsoport, amelynek mindegyik tagja a ^{238}U vagy ^{235}U bomlási sorának különböző bomlástermékein alapul. Cseppkövek esetén legtöbbször a bomlási sor elején lévő ^{238}U -, ^{234}U - és ^{230}Th -izotópok mérése és mennyisége mérvadó. E kormeghatározási módszer alapja, hogy az urán jól oldódik a vízben uranil-ion formájában, míg a tórium nem, tehát megszakad a bomlási sor. A cseppkőképződés folyamán a vízből az uranil-ion beépül a kalcium-karbonát szerkezetébe. A beépült urán bomlásnak indul, és tórium (^{230}Th) keletkezik. Ha a minta egyéb Th-tartalmú ásványoktól, főleg agyagásványoktól mentes, az anya- és leányelem izotóparányainak mérésével a karbonátos üledékek kora nagyon pontosan meghatározható. Tiszta, alacsony tóriumtartalmú cseppkövek kora éves-évtizedes pontossággal meghatározható ezer-tízezer éves időskálán is.

Geológiai léptékek

Az eddig tárgyalt módszerek segítségével a földtani közmúltnak azokat a pár ezer-tízezer éves eseményeit, történéseit tanulmányozhatjuk, amelyek az emberiség történetével közel egyidősek, vagy közvetlen kihatással vannak a civilizációra. A Föld 4,5 milliárd éves korához képest ez azonban csak az utolsó, bár kétségtelenül nagyon fontos „másodperc”. Ahhoz, hogy a földtörténet idősebb, hegységeket, medencéket, vulkánokat és nyersanyagtelepeket létrehozó eseményeit vagy a Föld belső szerkezetét megismerhessük, olyan hosszú felezési idejű izotópokra van szükség, amelyek bomlási idejei nagyságrendileg egybevetethetők a Föld korával. Ilyen izotópos rendszer az U/Pb (felezési idő: 4,5 milliárd év), a Rb/Sr (49,2 milliárd év) vagy a K/Ar és Ar/Ar módszerek (1,25 milliárd év). A geokronológia e klasszikus módszerei segítségével elsősorban a vulkánok és mélységi megfelelőik, valamint az átalakult (metamorf) kőzetek korának meghatározását célozták meg az elmúlt évtizedekben.

Ezt a célt szolgálta az ATOMKI-ban a Balogh Kadosa által alapított K/Ar-laboratórium is, amely hosszú évtizedeken át szolgálta ki a közép-kelet-európai geológusokat, lehetővé téve különböző kőzettestek „abszolút” korának meghatározását. Az új évezred új kihívásokat hozott a geokronológia terén is. A pillanatszerű események (pl. vulkánkitörés) korának meghatározása mellett egyre több figyelem irányul a hőtörténeti események korának meghatározására. Ezek olyan időben elhúzódó folyamatok, amelyek idejének meghatározása már csak több módszer és számos tudományterület, mint az ásványtan, geokémia,

fizika együttes alkalmazásával lehetséges. Ezzel a geokronológiát felváltja a termokronológia – ami gazdasági jelentőséggel is bírhat. Egy hegység, pl. a Himalája vagy a Kárpátok kiemelkedése, a medencék süllyedése (pl. Alföld, Amazonas-medence) hosszú évmilliók alatt következett be. Ha a medencékbe kerülő üledékek a mélységgel felmelegednek, a bennük lévő szerves anyag szénhidrogénné érik. Ha ezek után a medence kiemelkedik, és hegyessé gyűrődik, akkor a felhalmozódott kőolaj és földgáz elbomlik vagy elvándorol. A süllyedés vagy kiemelkedés sebessége és ideje döntő hatással van a szénhidrogén érési és migrációs eseményeire. Annak érdekében, hogy a szénhidrogén érési – vagy hogy például az arany, ezüst, réz, ritkaföldfémek képződési – folyamatait időben és térben értelmezni lehessen, van szükség a termokronológiára. Ennek az igénynek a kielégítését szolgálja a K/Ar-laboratórium fejlesztései között az új multikollektoros nemesgáz tömegspektrométer, a lézeres mintafeltárás, valamint a minták besugárzását igénylő Ar/Ar módszer, továbbá a hasadvány nyom módszerek bevezetése is.

Paleoklimatológiai kutatások

Az ATOMKI-ban folyó paleoklimatológiai kutatások többek között különböző üledékek (jégkori tavak, tőzeglápok, lösz, eltemetett talajok, hullámterek, régészeti üledékek) rétegsorainak szerves és szervetlen archívumain mért izotóp- és geokémiai adataira támaszkodnak. Az üledék és jég fúrásmagok, a cseppkövek rétegei és a faévgűrűk, mint archívumok vizsgálata hasonló elven alapul. Ezek a természetes adattárak évről évre (vagy akár évszakosan) mérhető adatsorokként rögzítik a vizekben zajló biológiai és kémiai folyamatok nyomait, a kiülededett, bemosódott, kicsapódott anyagokat. A precíz terepi mintavételt követően a minta rétegsoraihoz valamilyen izotóp-geokronológiai módszerrel kort rendelünk, és vizsgáljuk a rétegsorok fizikai-kémiai jellemzőinek időbeli lefutását, amellyel végső soron értelmezni tudjuk a környezet és a klíma változásait. Az üledékelemzésen alapuló kutatásokban a radiokarbonos kormeghatározás jelentős szerepet játszik, mivel segítségével számos széntartalmú anyag kora meghatározható, mint például növényi és állati szubfosszilis maradványok, faszén, tőzeg, csont, tavi üledék, csigahéj vagy akár cseppkő. A ^{14}C -kormeghatározással, mely sok esetben az egyetlen megfelelő korlási módszer, egy külön közlemény foglalkozik ebben a folyóirat számban. A számos módszer közül az üledékekben a növényi mikro- és makrofossziliák azonosítását, szemcseméret-elemzést, elemanalitikai elemzéseket, valamint radioaktív és stabilizotóp-vizsgálatokat végzünk, melyek eredményeivel az őskörnyezet rekonstruálható.

A klíma megváltozása hatást gyakorol a környezetre, ugyanakkor az utóbbi évtizedekig a klíma természetes folyamatok során bekövetkezett változások hatására módosult, melynek léptéke eddig – napjaink klímaváltozásával ellentétben – az emberiség kronológiáján messze túlmutatott.

Az örökségtudomány egy viszonylag új megnevezés a kulturális és természeti örökségünkkel kapcsolatos komplex kutatásokra, amelyek felölelik az örökség kezelését, elemzését, konzerválását, interpretációját és dokumentálását. Az új tudományágban nagy szerepet játszik a természettudományos módszerek, ezen belül az érzékeny analitikai eljárások használata a régészet, muzeológia, művészettörténet, antropológia és paleontológia terén. Az ATOMKI ezen eljárások alkalmazásában és fejlesztésében több évtizedes hagyománnyal rendelkezik.

Örökségünk tárgyi emlékeit nemcsak formájuk, stílusjegyeik, hanem anyaguk és fizikai tulajdonságaiknak összessége is jellemzi, amelyből megfelelő értelmezéssel történeti jelentőségű információ is kinyerhető. Az ATOMKI-ban folyó archeometriai vizsgálatok elsősorban elem- és izotópanalitikai technikák alkalmazásával, illetve spektroszkópiai és képalkotó módszerek kombinálásával történnek. Hazai múzeumok, régészek, egyetemi kutatócsoportok és nemzetközi partnerek számára biztosítunk kutatási lehetőséget.

Roncsolásmentes analitika

Műtárgyak, régészeti leletek esetében különösen fontos, hogy lehetőség szerint roncsolásmentes technikát válasszunk a tárgyak vizsgálatához. Az ATOMKI Tandetron gyorsítójának egyik nyalábsatornájára telepített ionnyaláb-analitikai mérőelrendezés az elemek koncentrációjának és eloszlásának meghatározására szolgál jó térbeli feloldással, mind vákuumban, mind levegőn (ez utóbbi elengedhetetlen nagyobb, illetve érzékeny tárgyak esetén). Az ionnyaláb-analitikai módszerek lényege, hogy néhány millióelektronvolt energiájú részecskékkel (legtöbbször protonokkal) sugározzuk be a mintát, és a kölcsönhatás jellegétől függően a mintára beeső részecskék szóródhatnak, lefékeződés, illetve abszorpció következhet be, miközben az atomok gerjesztődhetnek, ionizálódhatnak, továbbá atommag-átalakulások is létrejöhetnek. E folyamatok elektromágneses sugárzás (optikai, röntgen-, gamma-) vagy részecskék (elektron,

proton, alfa stb.) kibocsátásához vezetnek. A fizikai folyamatok során keletkező sugárzások, illetve részecskék energiái jellemzőek az azokat kibocsátó atomokra vagy atommagokra, azaz a vizsgált anyag elemi összetevőire, míg intenzitásuk a mintában lévő elemek mennyiségétől függ. Az ún. ionmikroszkonda erős elektromágnesi fókuszálja a beeső ionnyalábot, és ha ezt a fókuszált nyalábot pásztázzuk a mintán, térképszerűen jeleníthetjük meg a mintában lévő elemek felületi eloszlását.

Elemanalízis, illetve elemterképezés – szükség szerint – mikro-XRF (röntgenfluoreszcencia) berendezéssel is történhet. A hagyományosabb optikai képalkotó módszerek mellett elérhető egy digitális 3D mikroszkóp, amely a kiváló képminőség mellett kvantitatív információt is nyújt a tárgyakon lévő struktúrákról. Szintén rendelkezésre áll egy alacsonyvákuum-üzeműben is működő pásztázó elektronmikroszkóp, különböző analitikai lehetőségekkel. Végül a Raman-spektroszkópia a mintára eső fény rugalmatlan szórásán alapul, ilyenkor a szórt fotonok energiája nem egyezik meg a beeső fotonokéval. A frekvencia megváltozása a közeg rezgéseitől függ, így az ún. Raman-eltolódás a minta kémiai és szerkezeti azonosítására szolgál. A nagy pontosságú elemanalízis, az ásványfázisok azonosítása, a képalkotás mikro- és nanoskálán információt nyújtanak a leletek, műtárgyak származásáról, készítési technológiájáról, a nyersanyagok eredetéről, a tárgyak állagáról. A fenti technikák bizonyos megszorításokkal roncsolásmentesnek tekinthetők, így széles körben alkalmazhatók kulturális örökség vizsgálatára.



Major István az ATOMKI Nemzetközi Radiokarbon AMS Kompetencia és Képzési Központ tudományos főmunkatársa. PhD-fokozatát a Debreceni Egyetemen szerezte 2017-ben, a légkörben található széntartalmú szennyezők radiokarbonos vizsgálatából. Azóta környezeti és régészeti területeken is dolgozik, mégpedig légköri aeroszolok és régészeti csontminták radiokarbonos és stabilizotópos vizsgálatával.



Szikszai Zita fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa. Kutatási területe az ionnyaláb-analitika interdiszciplináris alkalmazásai, illetve az archeometria. Az Európai Örökségtudományi Kutatási Infrastruktúra (E-RIHS) magyarországi kapcsolattartója.



Horváth Anikó vegyész, munkahelye az ATOMKI Izotópklimatológiai és Környezetkutató Központ. Kutatási területe a nehéz geoelemek (stroncium, ólom) izotóparányának vizsgálata élelmiszeripari termékek és régészeti leletek azonosításában. Jelenleg védés előtt áll a DE TTK Fizika Tudományok Doktori Iskolában. Publikációi az előbbi területen kívül kiterjednek a hidrológia és geológia területére és a témával kapcsolatos ismeretterjesztésre is.

Radiokarbonos kormeghatározás, stabil izotópok

A földi élet szempontjából egyik legjelentősebb elem a szén, amelynek 14-es tömegszámú radioaktív izotópja természetes úton van jelen a Földön. A kozmikus sugárzás a Föld felsőlégréjében jelentős mennyiségben hoz létre szabad neutronokat, melyek hatására a radiokarbon (^{14}C) a légköri nitrogénből egy magreakció végmagjaként keletkezik. A radiokarbon a légkörben gyorsan oxidálódik szén-dioxidá, és folyamatosan „nyomjelzi” a légköri szén-dioxidot. Az instabil ^{14}C mindeközben 5700 ± 40 év felezési idővel radioaktívan elbomlik, visszaalakul ^{14}N -né. Mivel a kozmikus sugárzás intenzitása hosszú idő óta közel állandó, és ehhez képest a ^{14}C felezési ideje rövidnek tekinthető, a Földön a kozmogenikus ^{14}C mennyisége radioaktív egyensúlyi állapotban van.

A légköri szén beépülésével formálódó képződmények létrejöttékor azok szénének fajlagos ^{14}C radioaktivitása folyamatosan követi az atmoszferikus szén fajlagos radiokarbon-aktivitását. Ekkor széntartalmukat radiokarbon-tartalom szempontjából modernnek nevezzük. A beépülési folyamat megszűnte után – például egy élőlény elpusztulásával az anyagcsere leállásakor – további ^{14}C -felvétel nem történik, ezért a ^{14}C koncentrációja az adott anyagban a felezési időnek megfelelően exponenciálisan csökken a radioaktív bomlás miatt. Ez egyben a radiokarbon-kormeghatározás elve is, hiszen a kezdeti aktivitást ismerjük, és amikor később a leletben mérjük a maradék ^{14}C mennyiségét, a csökkenés mértéke megadja az eltelt időt. A módszernek nagy jelentősége van a régészetben, mivel segítségével a leletek mintegy 50 ezer évig visszamenően dátumozhatók.

A radiokarbon természetes radioaktivitása igen csekély mértékű, csak igen gyenge béta-sugárzással jár. Az 1980-as évektől 2010-ig az ATOMKI-ban a leletek radioaktivitásának mérésével határozták meg a radiokarbon kort, ám 2010 után már lehetőség van a sokkal kisebb munkamennyiségeket igénylő és gyorsabban elvégezhető gyorsító tömegspektrométeres (Accelerator Mass Spectrometry, AMS) módszerre, ami új dimenziókat nyitott a régészeti kutatásokban is [1].

A legkülönbébb széntartalmú anyagokból készült használati tárgyak, ékszerek keltezése sok esetben magának a megtalálási lelőhely korának a meghatározásához is nélkülözhetetlen. Az állati vagy a letűnt kultúrák emberi csontjaiban megmaradó kollagén segítségével meghatározható a leletek kora, míg a szén, nitrogén és kén stabilizotóp-arányok ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, $\delta^{34}\text{S}$) mérésével a táplálkozási szokásokról, vagy a vándorlási folyamatokról is információt kaphatunk. A stabil izotópok aránya abszolút értelemben rendkívül kicsi, ezért ezeket inkább egy referenciaanyag nullának tekintett izotóparányaihoz képest szokták megadni ezrelékben kifejezve, ezt jelöljük a δ szimbólummal. Így például mikrofoszília-elemzések segítségével a növénytermesztés történetét is pontosíthatjuk. A csontokba zárt szervesen apatitfrakciót alkotó

hidrogén és oxigén ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) stabilizotópok a környezeti tényezőkről tanúskodnak, míg ugyanitt a stronciummal ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) az emberi és állati vándorlási folyamatok, vagy egy-egy tárgy esetében annak származási helye vizsgálható.

Együttműködések

Az örökségtudományban a hazai együttműködések elsősorban a Kárpát-medence területén talált régészeti leletek tanulmányozására vonatkoznak, és több korszakot ölelnek át az őskortól a korai középkorig:

- A felső paleolitikum Kárpát-medencei állati- és embericsont-mintáinak izotópos vizsgálata, kultúrrétegek értelmezése, a paleokörnyezet rekonstrukciója
- Emberi népcsoportok megjelenése és eltűnése a Kárpát-medencén belül (pl. a rézkori Jamnaja kultúra, vagy a népvándorlás kora)
- A magyarországi réz-, bronz- és vaskori kultúrák életvitelével, szokásaival, eszközeivel kapcsolatos elem analitikai, izotópos és egyéb mérések
- A hajdúsági kései bronzkor fém, csont és kerámia leleteinek komplex archeometriája [2]
- Honfoglalás-kori leletek vizsgálata [3]

A Nyemija-sisak

A debreceni Déry Múzeumban őrzött, lelőhelye alapján Nyemija-sisakként ismert lelet a 10–11. századi északi



1. ábra. A Nyemija-sisak vizsgálata az ATOMKI Tandetron Laboratóriumban kihozott nyalábos mikro-PIXE módszerrel (PIXE: részecskeindukált röntgenemisszió)



2. ábra. Az avar kori harcos életnagyságú rekonstrukciója (Fotó: Déri Múzeum, Debrecen)

kultúra emlékei közé tartozik. Vizsgálatainkkal megállapítottuk, hogy a vassisak díszítő lemezei vörösrézből készültek. A rézlemezek ötvözőanyagot nem, csak a rézércből származó szennyezőanyagokat tartalmaztak. A vörösréz szép színe mellett lágy, jól hajlítható, formálható anyag, a nemes- és színesfémeknél szokásos ötvöstechnikákkal (poncolás, domborítás, cizellálás) kialakítható díszítésekhez ideális. Az aranyréteget tűzi aranyozással (amalgámozással) vitték fel a felületre, amiről a jelentős higanytartalom tanúskodott.

A kagán lovasa

A Déri Múzeum munkatársai 2017 tavaszán egy lovával és fegyverzetével elhantolt avar kori harcos sírját tárták fel a Hajdú-Bihar megyei Derecske délnyugati határában. Az átfogó régészeti és természettudományos vizsgálatok keretében intézetünk is kapott mintákat mind a harcos, mind pedig a lóva csontvázából. Ezeket ^{14}C -kormeghatározást végeztünk, illetve meghatároztuk a táplálkozási szokásokra utaló stabil szén- és nitrogénizotóp-arányokat, valamint a környezeti viszonyoktól függő, és így az esetleges helyváltoztatásra utaló stronciumizotóp-arányokat. A stronciumeredmények alapján a lovas ezen a vidéken született és nőtt fel, jelentős vándorlás lehetősége nem volt kimutatható [4]. A lovas táplálkozására az utolsó pár évében a nagyobb mennyiségű állati fehérje bevitele, illetve a köles gabonanövény alkalmankénti fogyasztása volt a jellemző, amit ebben az időben már elterjedten használtak a Kárpát-medencében [5]. A radiokarbonos kormeghatározás alapján a lovast és a lovát valamikor Kr. u. 580 és 650 között temethették el közvetlenül egymás mellé.

Kitekintés, jövőkép

A partnerekkel végzett közös kutatásokon túl módszertani kutatásokat valósítunk meg, ide tartoznak a mérések, illetve az adatkiértékelés optimalizálása az általunk vizs-

gált anyagcsoportokra, a kimutathatósági határ csökkentése, a pontosság növelése, új területek feltérképezése, illetve a területen nagyon fontos szempontként az anyagvizsgálati módszerek biztonságos határainak kijelölése.

Az ATOMKI 2009 óta részese olyan európai projekteknek, amelyek keretében a résztvevők hozzáférést biztosítanak műszerparkjukhoz vendégkutatók számára a kulturális örökség témakörben [6]. E projektek alapot szolgáltatnak egy új, ún. elosztott székhelyű európai infrastruktúra létrehozásához. Az Európai Örökségtudományi Kutatási Infrastruktúra (European Research Infrastructure for Heritage Science, E-RIHS) jelenleg megvalósítási szakaszban van. Az infrastruktúra magában foglalja majd az E-RIHS központot és a tagállami csomópontokat, rögzített és mobil infrastruktúrákat, fizikailag hozzáférhető archívumokat és virtuálisan elérhető adatbázisokat. Célunk, hogy intézetünk legyen ennek az infrastruktúrának az egyik pillére [7].

Irodalom

1. Molnár M. (2012): A radiokarbon ezer arca. *Természet Világa*, 143/5, 236–238.
2. Angyal A., et al.: A második hajdúböszörményi szitula elemanalitikai vizsgálata. In: V. Szabó, Gábor; Bálint, Marianna; Váczi, Gábor (szerk.) A második hajdúböszörményi szitula és kapcsolatrendszere. Budapest, Magyarország, Hajdúböszörmény, Magyarország: ELTE BTK Régészettudományi Intézet, Hajdúsági Múzeum 278 (2017) 69–77.
3. Ilés-Muszka A., Angyal A. (2021): Négyzet alakú övveretek a 10. századi Kárpát-medencében : Régészeti és archeometriai vizsgálatok. *Magyar Régészet*, 10/2, 24–37.
4. Horváth A., Palcsu L.: Az avar lovas eredetének vizsgálata stroncium izotóparány-méréssel. In: Dani, János; Hága, Tamara Katalin (szerk.) A kagán lovasa Debrecen, Magyarország: Déri Múzeum (2021) pp. 135–138.
5. Major I., et al.: Miről árulkodik az avar lovas stabil szén- és nitrogénizotópos vizsgálata. In: Dani János, Hága Tamara Katalin (szerk.) A kagán lovasa Debrecen, Magyarország. Déri Múzeum, (2021) 129–134.
6. Szikszai Z. (2012): A rejtélyes baltakő. *Természet Világa*, 143/5, 234–235.
7. <https://e-rihs.hu>

FÓKUSZBAN A LEVEGŐMINŐSÉG

Kertész Zsófia¹, Haszpra László^{1,2}, Molnár Mihály¹

¹HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

²HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

A Föld légkörében a fő összetevők mellett jelen vannak nyomnyi mennyiségben egyéb gázok, illetve különböző folyadék és szilárd halmazállapotú részecskék is.

A légkörben lebegő cseppfolyós és szilárd részecskéket nevezzük légköri aeroszolrészecskének; ezeknek a hétköznapi használatban elterjedt elnevezése a szálló por. Bár a légköri aeroszolrészecskék a levegő tömegének csak egy töredékét (~százmilliomod-egy-milliárdod részét) teszik ki, napjainkban mégis a figyelem középpontjába kerültek. Ennek egyik oka az, hogy az aeroszolrészecskék közvetett és közvetlen módon hatással vannak a Föld sugárzási egyensúlyára. A nap-sugárzás szórásában, elnyelésében, valamint a felhőképződésben játszott szerepük jelentős a klíma alakításában. Másrészt a légköri aeroszolrészecske-szennyezés (particulate matter, PM) jelenti az egyik legnagyobb környezeti egészségügyi kockázatot a világban. A legfrissebb adatok szerint az EU lakosságának 97%-a van kitéve az Egészségügyi Világszervezet legutóbbi iránymutatásait meghaladó PM_{2.5}-koncentrációnak (2,5 µm-nél kisebb átmérőjű részecskék).

A légkörben számos olyan nyomanyag található, amely bár nem jelent közvetlen egészségügyi kockázatot, megnövekedett mennyisége jelentős környezeti hatással bír, közvetetten ronthatja életminőségünket. Ezeket a nyomanyagokat is légszennyező anyagoknak tekinthetjük, ha egy adott helyen és időben koncentrációjuk nagyobb, mint amennyi az emberi kibocsátás nélkül lenne. Ebbe a körbe tartoznak az úgynevezett üvegházhatású gázok, melyek sajátos molekulaszervezetük következtében részben elnyelik a Föld-légkör rendszer hőmérsékleti kisugárzását, és ezzel befolyásolják a bolygó éghajlatát. Az 1950-es évek végén merült fel komoly formában, hogy az emberiség által a fosszilis tüzelőanyagok elégetése révén a légkörbe bocsátott szén-dioxid már egy évszázadon belül is súlyos gazdasági, társadalmi és politikai következményekkel járó drasztikus éghajlatváltozást okozhat.

Az itt leírtak alapján nyilvánvaló, hogy az üvegházhatású gázok, valamint a légköri aeroszol tudományos

igényű elemzése és monitorozása nemcsak a kutatóknak fontos, hanem lényeges információval szolgál a kormányok, környezetvédelmi hatóságok, az egészségügy és a társadalom számára is, valamint megalapozza a hatékony kibocsátáscsökkentési stratégiákat.

Az ATOMKI-ban mind a légköri aeroszol, mind az üvegházhatású gázok kutatása több évtizedes múltra tekint vissza.

Szemelvények a légköri aeroszolkutatásból

Légköri aeroszolkutatást három évtizede végzünk, amelynek alapja egyrészt a minták elemösszetételének meghatározása ionnyaláb-analitikai módszerekkel, másrészt a minták szénizotóp-vizsgálata gyorsító és stabilizotóp-tömegspektrométerekkel. Ez idő alatt létrehoztunk egy Európában is egyedülálló, folyamatosan bővülő adatbázist, amely megalapozta ezt a kutatási területet. Az adatbázis többek között tartalmazza a PM_{2.5} fő-, mellék- és nyomnyi összetevői mellett a fosszilis és nem fosszilis eredetű szénkomponenst egyaránt. Kutatásaink egyik fő iránya a városi aeroszolszennyezés monitorozása, fizikai és kémiai jellemzése, a szennyezés forrásainak azonosítása modern mintavételi, analitikai és statisztikai módszerek és terjedési modellek segítségével. Az alábbiakban két példán keresztül mutatjuk be a legújabb kutatási eredményeinket.



Haszpra László meteorológus-levegőkémikus, az MTA doktora, az ATOMKI tudományos tanácsadója, a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet munkatársa. Kutatási területe: az üvegházhatású gázok légköri forgalma.



Kertész Zsófia fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa. Kutatási területe: az ionnyaláb-analitika és multidiszciplináris alkalmazásai, valamint légköri aeroszolkutatás.



Molnár Mihály az ATOMKI Radiokarbon és Szénciklus Kutatási csoport vezetője, szakterülete a ¹⁴C-izotópos mérésekre alapozott környezetkutatás és kor meghatározás, különös tekintettel a légköri széntartalmú gázok forrásainak és változásainak elemzésére.

A légköri aeroszolszennyezés alakulása a COVID-19-válság előtt és alatt Debrecenben

A COVID-19-világjárvány miatti lezárások és korlátozások egyedülálló lehetőséget teremtettek a városi levegőminőség változásának tanulmányozására egy olyan időszakban, amikor az antropogén eredetű kibocsátás jelentősen csökkent. Kihasnálva ezt az alkalmat, vizsgáltuk az aeroszolszennyezés változását a levegőminőség többi paraméterével együtt Debrecen városában 2018 és 2022 között. Meghatároztuk a légköri aeroszol koncentrációját, összetételét és forrásait négy, különböző szintű korlátozásokkal járó időszakra, két átmeneti és két lazítási időszakra 2020–22-ben, és az eredményeket összehasonlítottuk a 2018–19-es megfelelő bázisértékekkel.

A következő szennyezőforrásokat azonosítottuk: talaj, tüzelés, biomasszaégetés, biogén (növényi eredetű) kibocsátás, közlekedés, másodlagos szulfát, tengeri só, építési munkálatok és útépítés. A fűtési időszakban a biomassza égetése és a tüzelés volt a fő szennyező, míg nyáron a talaj mellett a másodlagos szulfát aeroszolkok és a biogén kibocsátás adta a legnagyobb hozzájárulást (1. ábra).

2020 márciusától a világjárvány miatti korlátozások erősen befolyásolták valamennyi légszennyező koncentrációját, a két év átlagában 20–25%-os csökkenés volt kimutatható. A durva frakcióban (2,5 és 10 μm közötti átmérőjű részecskék) a közlekedés és a talaj hozzájárulása csökkent a legnagyobb mértékben, valamint kimutatható volt a város körüli mezőgazdasági tevékenység jelentős csökkenése is. PM2.5 esetében az energiatermeléssel kapcsolatos források csökkentek a legnagyobb mértékben. Ezzel szemben 2020 és 2021 tavaszán a kényszerű otthonmaradás és a hidegebb időjárás a háztartási fűtésből származó biomasszaégetés jelentős növekedéséhez vezetett. Jelentős időszakos helyi szennyező források voltak még az építkezések és az

útépítések. A város határában megvalósuló nagyszabású ipari telephelyfejlesztés hatása 10 km-es távolságból is érzékelhető volt.

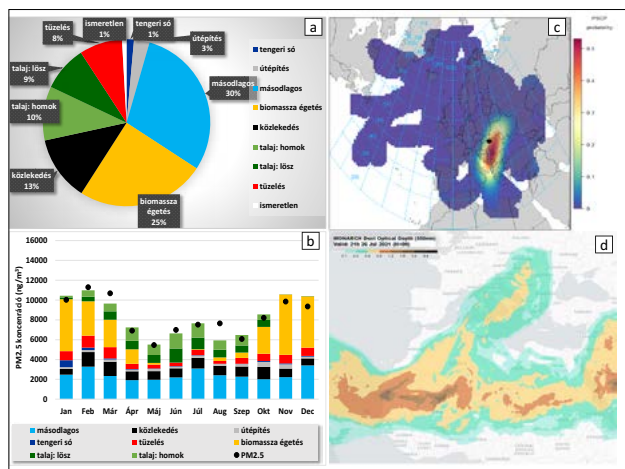
Debrecenben az aeroszolszennyezés nagy része regionális és nagy távolságú transzportból származik. A másodlagos szulfát aeroszol fő forrásvidékei a nyugat-balkáni országok és Délnyugat-Románia voltak (1. ábra), így a kibocsátás változása ezekben az országokban erősen befolyásolta a légszennyezettségi szintet Debrecenben. A helyi meteorológiai paraméterek, a légtömegek eredete és a nagy távolságú transzportfolyamatok, többek között az egyre gyakoribb saharaipor-epizódok szintén jelentős hatással voltak az aeroszolszennyezettség alakulására.

A széntartalmú aeroszol forrásai

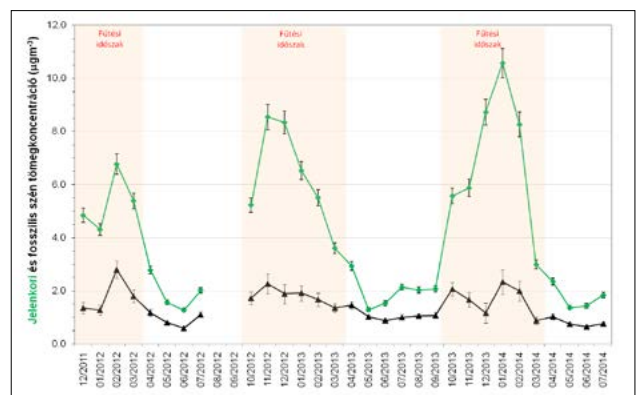
A városi aeroszolrészecskék egyik fő összetevője a szén, amely főleg korom és szerves vegyületek formájában van jelen. A széntartalmú részecskék forrásai a biogén kibocsátás, a fosszilis tüzelőanyagok égetése, valamint a biomasszaégetés. A fosszilis és jelenkori szenet tartalmazó összetevőket a szén 14-es tömegszámú izotópjának (radiokarbon) mérésével lehet elkülöníteni egymástól. A stabil szénizotópok aránya további információval szolgál az aeroszolrészecskék eredetéről.

Debrecenben 2011 óta folyamatosan gyűjtünk olyan PM2.5-mintákat, amelyek alkalmasak a széntartalmú aeroszol vizsgálatára. Meghatározzuk a PM2.5-minták teljes szén-, elemiszén- (korom – EC), szerveszén- (OC) koncentrációját, valamint a ^{14}C és a stabil szénizotópok arányát. Az első 4 év adatainak feldolgozása alapján megállapítottuk, hogy minden mért paraméter erős szezonális ingadozást mutat, a fűtési időszakban 2–3-szor nagyobb koncentrációkkal a nyári hónapokhoz (vegetációs időszak) képest.

A fűtési időszakban mért viszonylag nagy másodlagos szervesaeroszol-koncentráció, valamint 6,9-es OC/EC arány arra utal, hogy az aeroszol részecskék különböző égetési folyamatokból származnak. A jelenkori szén aránya a fosszilis szénhez képest pedig azt mutatta, hogy a fa és a biomassza tüzelőanyagok égetése dominált a szénnel



1. ábra. A PM2.5-források relatív járuléka 2020–21-ben (a). A PM2.5-források járuléka havi bontásban 2020–21-ben (b). A Debrecenben mért másodlagos szulfát aeroszol forrásterületei 2018–2021-ben (c), a saharaipor-epizód 2021. július 26-án (d)



2. ábra. A jelenkori és a fosszilis szén tömegkoncentrációja a PM2.5-mintákban Debrecenben 2011–2014-ben

vagy olajjal szemben (2. ábra). A stabilizotóp-vizsgálat kimutatta, hogy a fatüzeléshez főleg fehér akácot, tölgyet és bükkfát használtak a debreceni lakosok. Az őszi időszakokban kimutatható volt a mezőgazdasági hulladék-égetés hatása a város levegőjében.

Az üvegházhatású gázok kutatása

A célzott légköri üvegházhatású gáz kutatásokba az ATOMKI 2008-ban kapcsolódott be egy nagy pontosságú városi (Debrecen) légköri monitoring rendszer fejlesztésével, valamint több hazai helyszínen (Debrecenben, Dunaföldváron és a hegyhátsági háttérállomáson) elindított folyamatos szénizotópos megfigyelésekkel. A légköri CO₂ mennyiségének és radiokarbon tartalmának együttes mérésével lehetőség nyílik a fosszilis eredetű (¹⁴C-mentes) emberi hozzájárulás pontosabb mennyiségi becslésére. Ezzel eloszthatók a kételyek az emberi hozzájárulás jelentőségét és mértékét illetően. Műszaki fejlesztéseket végeztünk a üvegházhatású gázok megbízható méréséhez szükséges előkészítő berendezéseken, valamint szénizotópos mérési technikát fejlesztünk a CO₂ mellett a légköri metán elemzésére is, mely nagyban hozzájárulhat a nagyon összetett forrásszerkezet elemeinek és szerepének jobb megértéséhez.

Magyarország európai viszonylatban az elsők között indult meg a légkör szén-dioxid-mennyiségének folyamatos mérése. Az Országos Meteorológiai Szolgálat által 1981-től a Kiskunságban lévő K-pusztán mérőállomáson megkezdett, majd 1993-tól a kibővített mérésprogramú hegyhátsági mérőállomáson folytatott méréseket 2020-tól az ATOMKI vette át. A mérőállomás a Meteorológiai Világszervezet globális légköri megfigyelési programjának (Global Atmosphere Watch), az amerikai Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatal (US National Oceanic and Atmospheric Administration) globális mérőhálózatának és a pán-európai üvegházgáz-megfigyelő rendszernek (Integrated Carbon Observation System, ICOS ERIC) is tagja.

1982-ben, a mérések első teljes évében a lakott területektől, forgalmasabb utaktól távoli magyarországi mérőállomáson a szén-dioxid évi átlagos légköri koncentrációja 346 ppm (ppm = milliomod térfogatrés) volt, míg ez az érték 2023-ra 424 ppm-re nőtt, azaz több mint

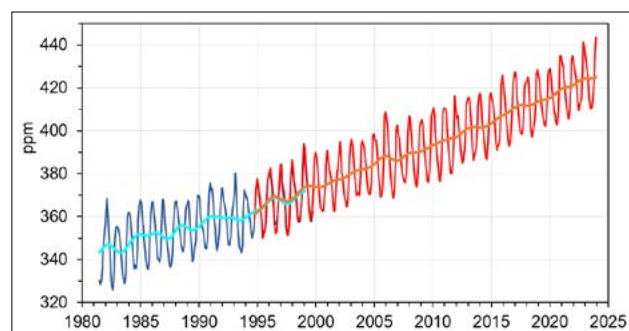
22%-kal emelkedett (3. ábra). A szén-dioxid hosszú légköri tartózkodási idejét és így a légkörben való egyenletes elkeveredését, globális hatását jól jelzi, hogy ezek az értékek mindössze 1%-kal magasabbak, mint a minden antropogén forrástól távoli óceáni szigeteken. Ismereteink szerint ezzel a jelenlegi légköri szén-dioxid-koncentráció már nagy valószínűséggel magasabb, mint bármikor az elmúlt bő 10 millió évben volt, ami az éghajlat várható alakulása szempontjából több mint aggasztó.

Nem biztató a kép az emberi tevékenység által a légkörbe juttatott második legfontosabb üvegházhatású gáz, a metán esetében sem. Ennek mennyisége a levegőben a 2000-es évek elejéig nagyjából összhangban emelkedett az emberi kibocsátás növekedésével, ezt követően azonban gyorsabb ütemre váltott. A metánnak jelentős természeti forrásai is vannak (mocsarak, lápos-vizenyős területek), amelyek kifejezetten érzékenyek az éghajlat alakulására. Az emberi hatások miatt változó éghajlat növeli a természetes források metánkibocsátását, ami ugyancsak hozzájárul a megindult éghajlatváltozás erősödéséhez a visszacsatolásokon keresztül. Fennáll a veszélye, hogy pusztán az emberi kibocsátás visszaszorításával már nem akadályozható meg a metánkoncentráció további emelkedése – az egy új egyensúlyi állapot eléréséig folytatódni fog, kihatva az éghajlat további alakulására.

Jelenleg az emberi eredetű üvegházhatású gázok kibocsátását statisztikai adatok alapján becsülik, ami részben a módszerek bizonytalansága, részben a forrásokra vonatkozó elégtelen ismereteink miatt nem feltétlenül adja meg a tényleges kibocsátást. Ha egy földrajzilag kiterjedt mérőhálózat állomásain ismerjük az egyes légköri anyagok koncentrációjának időbeli változásait és ismerjük a légköri áramlások aktuális alakulását is, akkor közvetlenül megbecsülhetjük, hogy mely területekről mekkora anyagmennyiség került a levegőbe. A tényleges kibocsátás pontosabb ismerete mind az éghajlatvédelmi intézkedések hatékonyságának, mind azok betartásának ellenőrzése szempontjából kulcskérdés. E célból indította az Európai Unió a Párizsi Megállapodásra is utaló Horizon Europe PARIS projektet (Process Attribution of Regional Emissions), melynek az ATOMKI is résztvevője. A kutató-fejlesztő munka során a partnerországokban, illetve Magyarországon végzett célzott üvegházgáz-mérésekből a légköri terjedési modellek felhasználásával országos kibocsátásleltár készül, mely a jövőbeni kibocsátás-csökkentési intézkedések alapját is adhatja.

Irodalom

1. Kertész Zsófia, et al.: Characterization of urban aerosol pollution before and during the COVID-19 crisis in a central-eastern European urban environment. *Atmospheric Environment*, 318 (2024) 120267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120267>
2. Major István, et al.: Source identification of PM_{2.5} carbonaceous aerosol using combined carbon fraction, radiocarbon and stable carbon isotope analyses in Debrecen, Hungary. *Science of the Total Environment*, 782 (2021) 146520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146520>



3. ábra. A légköri CO₂-koncentrációjának alakulása Magyarországon a K-pusztán (kék) és Hegyhátsálon (piros) mért adatok alapján

A MIKRO- ÉS NANOVILÁG MEGISMERÉSE ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZEREKKEL

Csik Attila, Hunyadi Mátyás, Vad Kálmán
HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

Az Atommagkutató Intézet 70 évvel ezelőtti alapításakor elsődleges kutatási irányvonalnak a magfizikai kutatást határozták meg. Színvonalas eredmények eléréséhez a folyamatosan bővülő és különböző energiatartományokban működő gyorsítók mellett – elsősorban a hidegháborús elszigeteltség okozta nyugati műszervásárlási tilalom miatt – szükség volt saját fejlesztésű berendezések építésére, elektronikai és vákuumtechnikai eszközök fejlesztésére. Az Intézet munkatársainak ez irányú tevékenységei végül olyan új irányvonalak elindítását – és a későbbiek során magas színvonalra történő fejlődését – eredményezték, mint a kvadrupólus-tömegspektrometria (*Berecz István, Bohátka Sándor, Langer Gábor*), elektronspektroszkópia (*Varga Dezső, Kövér László, Cserny István, Tóth József*) vagy éppen az alacsony hőmérsékletek fizikája (*Novák Dezső, Mészáros Sándor, Vad Kálmán*). Felismerve a változás szükségességét, a magfizikai kutatások kiszolgálása mellett e területeken is saját kutatási témák indultak, majd kifejlődtek a napjainkban is elérhető műszeregyüttesek, amelyek elektronspektroszkópiai és tömegspektrometriai, röntgendiffrakciós és mikroszkópiai módszereken alapulva lehetővé teszik az anyagok felületének és határreégeinek elemi, kémiai és szerkezeti analizését.

A felületfizikai kutatási programjainkban e három tudományterületen elért eredményeink és tapasztalataink hasznosulnak. A megszerzett tapasztalatokra építve kutatási koncepciónk irányvonala a mikro- és nanométeres tartományban felületek, felületközeli rétegek, vékony- és többrétegű struktúrák fizikájának megismerése. Renделkezőnk olyan, a modern fizikai módszerek alkalmazásán alapuló vizsgálati eljárásokkal, melyek alkalmasak a felületek és vékonyrétegek elemzésére. Több évtizedes hagyománya van laboratóriumunkban az elektronspektroszkópiai kutatásoknak mint önálló tudományterületnek, de a felületvizsgálatokra alkalmazunk még kisenergiás ionszórás technikát és pásztázótűs mikroszkópiát is. Ugyancsak sokéves szakmai tapasztalattal

rendelkezőnk néhány nanométer vastagságú vékonyfilmek és vékonyfilmszerkezetek előállításában és azok minősítésében. Függetlenül attól, hogy egy felületi réteg készítése fémre vagy szigetelőre történt, a rétegszerkezet feltárását és elemzését minden esetben el tudjuk végezni. A mérés technikánk alapelve, hogy a vizsgálandó mintát ismert energiájú és intenzitású fotonokkal vagy ionokkal besugározzuk és a visszaverődő, vagy a felületi rétegből kilépő másodlagos fotonokat és részecskéket elemezzük. A kilépő részecskék intenzitásából, energiájából, a kilépés szögéből lehet következtetni a felületi réteg szerkezetére. Attól függően, hogy mivel sugározzuk be a mintát és milyen kilépő részecskéket vizsgálunk, más és más felületvizsgálati módszerről beszélhetünk. Minden egyes módszer esetén az adott vizsgálatra jellemző információhoz jutunk, sok esetben egy többrétegű struktúra összetettsége megköveteli ugyanazon minta több módszerrel történő vizsgálatát a tulajdonságok teljes és pontos feltérképezése céljából.

A modern szilárdtestfizika egyik aktívan kutatott területe a nanométerközeli méretskálán lejátszódó folyamatok tanulmányozása. A méret csökkenésével a nanoskálájú anyagokban a fizikai törvényszerűségek megváltoznak a tömbi anyagokra érvényesekhez képest. Módosulnak az elektronállapotok, az optikai tulajdonságok, az elektromos vezetőképesség, a mechanikai tulajdonság vagy szupravezető estében a szupravezetőátmeneti hőmérséklet. Elég csak az egyik dimenzióban



Hunyadi Mátyás fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa. Nukleáris technológiai és anyagtudományi K+F projektek vezetője. Jelenleg új detektoranyagok és gyógyászati célú radioizotóp-eltávolítási módszerek fejlesztésével foglalkozik.



Csik Attila fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa. Kutatási tevékenysége vékonyrétegek és rétegszerkezetek magnetronos porlasztással történő előállítása, röntgendiffrakciós és tömegspektrometriás vizsgálata. Az ELFT Vákuumfizikai Szakcsoport és a Magyar Vákuumtársaság titkára.

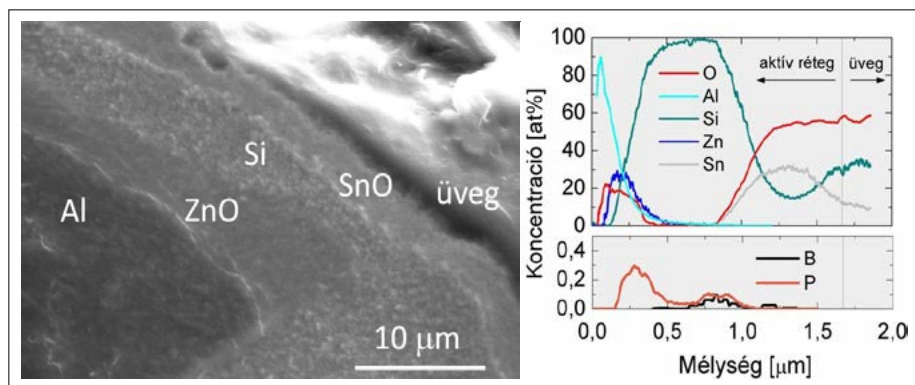


Vad Kálmán fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa. Kutatási tevékenysége az alacsony hőmérsékletű fizika, vékonyrétegfizika, és a felületfizika témakörökhöz kapcsolódik. Vezető szerepet játszott a felületfizikai laboratórium és a hozzá kapcsolódó kutatási profil kialakításában.

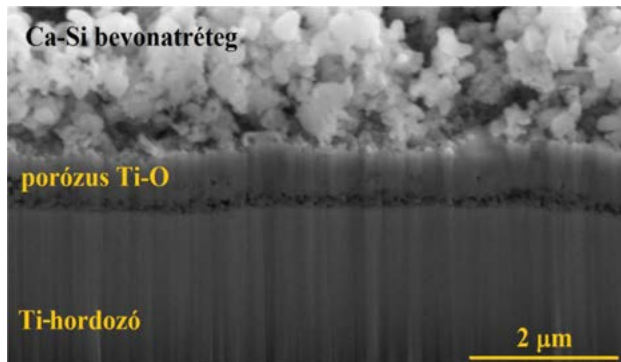
lecsökkenteni a méretet, a kvantumos jelenségek már megjelennek az anyagban. Ezért a nanoskálájú anyagok tanulmányozása az alapfizikai ismeretszerzésen túlmutatóan gyakorlati jelentőséggel is bír, hiszen az ipari technológiák az egyre vékonyabb rétegek és az ezekből kialakított egyre bonyolultabb rétegszerkezetek előállítását teszik lehetővé, melyeknek fontos szerepük van a modern technológiákban. Ma már néhány nanométer vastag, egy- és többrétegű struktúrák kialakítására is lehetőség van – egyre kisebb és több funkciót ellátó eszközök megépítését biztosítva ezzel. Néhány nanométeres rétegvastagsággal rendelkező felületi bevonatokat igen elterjedten alkalmaznak pl. hőszigetelő üvegek, gázérzékelők, élelmiszer-csomagolóanyagok, színes tűzihorganyzott felületek vagy éppen forgácsolóeszközök élettartalmát növelő rétegek előállítására.

A felületi bevonatok szerkezeti feltárása és az alkotóelemek kémiai állapotának a meghatározása fontos alapkutatási terület mind kutatás-fejlesztési, mind technológiai szempontból. Ezek minősítésére és vizsgálatára alkalmas a felületfizikai kutatócsoport másodlagosselegesrészcseke-tömegspektrométere (Secondary Neutral Mass Spectrometer, SNMS) [1]. Segítségével vizsgálhatjuk az anyagok felületi és határrégeinek elemi és szerkezeti összetételét. Többrétegű struktúrákkal találkozhatunk például a napelemek, hőszigetelő ablaküvegek vagy a szemüveglencsék esetében. Egy napelem táblából kivágott minta vizsgálata során megállapíthatjuk például a minta elemi összetételét és egy következő lépésben a már ismert elemek mélységi eloszlását is feltérképezhetjük. Ezzel információt kaphatunk a napelem teljes szerkezetére, az egyes rétegek elemösszetételére és a rétegek vastagságára is (1. ábra).

A tömegspektrometriai módszert kiegészítve a minta mikroszkópos keresztmetszeti vizsgálatával direkt információt is kapunk a rétegek belső szerkezetéről, a határfelületek minőségéről. A keresztmetszeti vizsgálattal nemcsak az elemek mélységi eloszlásváltozása követhető nyomon, de kimutatható volt például a titánhordozó felületén kialakuló titán-oxid-réteg porozitása, mely magyarázatot adott a bevonatréteg és a hordozó közötti kötési szilárdság csökkenésére (2. ábra).



1. ábra. Egy vékonyréteg-napelem rétegszerkezetéről készített elektronmikroszkópos felvétel és a kémiai alkotóelemek mélységi eloszlása



2. ábra. Fogászati implantátumok és orvosi protézisekként alkalmazott titánhordozók felületén kialakított nanoszemcsés CaSi-kerámia bevonatréteg. Jól látható a hordozó határfelületénél hőkezelés hatására létrejövő titán-oxid-réteg porozitása

A mikroelektronika által használt áramkörök szinte kivétel nélkül fém-félvezető rétegszerkezetek és többrétegű struktúrákból épülnek fel. A működés közben fellépő hőterhelés e rendszereket instabillá teszi, így termikus stabilitásuk megismerése a hosszú távú működés biztosítása érdekében fontos paraméter. Az elmúlt évek során nanométeres méretskálán végbemenő atommozgások tanulmányozására kidolgoztunk egy mérés-technikai módszert, mellyel érzékenyen tudjuk mérni az atomok felületközeli és felületi koncentrációit. A termikusan előidézett gyors atomi mozgás jelenségeit elsősorban az elektronikai alkalmazások szempontjából fontos anyagpárok alkotta nanorétegszerkezetekben (Cu/Si, Cu/Ni) vizsgáljuk, alacsony hőmérsékleti tartományban (150–200 °C). A vizsgálati módszerek (kisenergiás ionszórás – LEIS és pásztázó tűszondás mikroszkópia – SPM) érzékenysége lehetővé teszi, hogy kísérleteink során a mintákat hőkezelve, az elektronikus berendezések üzemi körülményeit modellezve vizsgáljuk az atommozgási folyamatokat. Az izraeli Bar-Ilan Egyetemmel együttműködésben a Si-atomok felületi koncentrációját és elrendeződését mérve polikristályos Cu-rétegen történő átvándorlásuk hatására megállapítottuk, hogy az általánosan elfogadott elméleti kép helyett, mely szerint folytonos 2D atomi réteg alakul ki a felületen, atomi szigetképződés valósul meg [2, 3].

Az anyag mikro- és nanoszerkezeti tulajdonságainak megismerésére hagyományos anyagtudományi eszközök mellett az ATOMKI-ban rendelkezésre álló nukleáris mérés-technikát is felhasználjuk. Ilyen munka a szintetikus perovszkitkristályok különböző vékonyréteg-struktúráinak vizsgálata, különböző gerjesztések hatására történő lumineszcens tulajdonságainak megismerése. Az új generációs fotovoltaiikus és fotoemisz-

sziós eszközökben funkcionális elemként alkalmazható perovszkitkristályok fotokonverziós hatásfoka egyedülálló optoelektronikai tulajdonságaiknak köszönhetően ma már összemérhető az általánosan használt szilíciumalapú napelemekével, nanokristályos formában pedig erős és stabil fotolumineszcenciát mutatnak. Kutatásaink ezen új anyagok kémiai szintézisét, anyagszerkezeti karakterizálását és funkcionális paramétereinek meghatározását foglalják magukban. Vizsgáljuk ezeknek az anyagoknak radioaktív sugárzásokra adott szcintillációs válaszát. Kísérleteink bizonyítják, hogy egy CsPbBr_3 nanokristályos réteggel kiegészített detektorrendszer [4] a nanométeres kristálméretnek köszönhetően a manapság legelterjedtebben használt szcintillátorokhoz képest jelentősen gyorsabb, időzítésre alkalmasabb jelalakokkal rendelkezik.

A Szegedi Tudományegyetem Fizikai Kémiai és Anyagtudományi Tanszékével együttműködésben előállított réz központú perovszkit vékonyrétegről ($\text{Cs}_3\text{Cu}_2\text{X}_3$, CsCu_2X_3 , ahol X: I vagy Br) kimutattuk, hogy alkalmas töltött részecskék spektroszkópiai detektálására, ugyanakkor érzéketlen a gamma-sugárzásra, ami bizonyos mérési körülmények között kifejezetten előnyös [5]. Megmutattuk, hogy a fotolumineszcencia hatásfok és a bomlási idők érzékenyen függenek a bór-, illetve jód-tartalom arányától, valamint meghatároztuk a vegyületek sávszerkezetét, abban a csapdaállapotok helyzetét és sűrűségét [6]. Bizonyítottuk, hogy a perovszkit vékonyrétegeink alkalmasak töltött részecske-sugárzások spektroszkópiai elemzésére, és képesek akár egyetlen radioaktív bomlás detektálására is. Emellett vizsgáltuk a rétegeink stabilitását extrém vákuum- és hőmérsékleti körülmények között, valamint nagy besugárzási dózisok esetén azok sugártűrőképességét – fókuszálva az űralkal-

mazások területére. Eredményeinkre alapozva egy nemzetközi szabadalmi beadvány is született.

Az Atommagkutató Intézet több évtizedes vákuumtechnikai, kriofizikai, elektronikai tervezési és kutatási tapasztalat birtokában nemcsak alapkutatási tevékenységet végez, de sikerült a kísérleti kutatások és műszerfejlesztések során szerzett gyakorlatot ipari problémák megoldására is hasznosítani. A VákuumTömörség és MérésTechnika (VTMT) Kft. 2006-ban történő megalapításával létrehozott spin-off társaságunk ipari körülmények között felmerülő szivárgásellenőrzési problémák megoldását tűzte ki célul, és jelenleg is sikeresen működve végzi ipari berendezések és tartályok tömörségvizsgálatát. Gyártósorba integrálható speciális tömörségvizsgáló célberendezéseket, egyedi ipari vákuum- és áramlástechnikai, illetve kriotechnikai rendszereket tervez és készít. Széles körű szolgáltatásai közé tartozik ipari hűtőrendszerek tömörségvizsgálata, rendszerépítés, célműszerek tervezése és építése, bakteriális és virológia tömörségi szintek ellenőrzése ipari körülmények között.

Összességként elmondhatjuk, hogy kutatási programjaink az alapfizikai jelenségek feltárására mellett olyan eredmények elérésére irányulnak, melyek nemcsak az alapkutatás szempontjából fontosak, de gyakorlati alkalmazásokban is hasznosulnak. Az ipari együttműködések keretein belül végzett mintadarabok vizsgálatával a gyártástechnológia során felmerülő kérdések megválaszolására, hibák feltárására törekszünk. Alapkutatási eredményeink társadalmi hasznosulását tekintve pedig, pl. a perovszkitalapú vékonyrétegek esetében célunk egy olyan kis méretű detektor építése, mely könnyű és megbízható üzemképességű még extrém környezeti körülmények között is; a világűrben vagy egy atomreaktor belsejében is alkalmas a sugárzás típusának, irányának és energiájának meghatározására.



3. ábra. Perovszkit vékonyréteges fotoelektron-sokszorozóval egybeépített detektor prototípusa

Irodalom

1. K. Vad et al. (2009): Secondary neutral mass spectrometry – a powerful technique for quantitative elemental and depth profiling analyses of nanostructures. *Spectroscopy Europe*, 21/4, 13–16. <https://www.scopus.com/record/display.uri?origin=inward&e-id=2-s2.0-77950361012>
2. E. Bodnar et al. (2022): Grain boundary diffusion of Si in polycrystalline copper film. *Vacuum*, 203, 111260. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25516>
3. V. Takáts et al. (2024): Characterization of nanoscale atomic motion of Si in polycrystalline Cu layer. *Heliyon*, 10/3, e25516. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25516>
4. M. Hunyadi et al. (2021): Charged-particle induced radioluminescence emitted by nanoclusters of lead-halide perovskite quantum dots. *Materials Letters*, 289, 129398. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.129398>
5. M. Hunyadi et al. (2022): Scintillator of polycrystalline perovskites for high-sensitivity detection of charged-particle radiations. *Advanced Functional Materials*, 32/48, 2206645. <https://doi.org/10.1002/adfm.202206645>
6. G. F. Samu et al. (2023): The effect of halide composition on the luminescent properties of ternary cesium-copper halide pseudo-perovskite films. *Advanced Optical Materials*, 11/21, 2300825. <https://doi.org/10.1002/adom.202300825>

GYORSÍTÓKKAL AZ ATOMFIZIKÁTÓL AZ ŰRKÉMIAIG

Sulik Béla, Juhász Zoltán, Herczku Péter, Biri Sándor, Rác Richárd
HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

Bevezetés

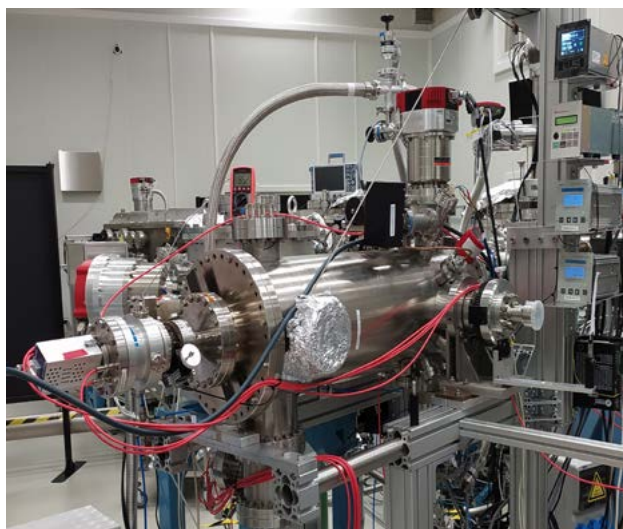
Az ATOMKI gyorsítói az 1970-es években a magfizika és az anyagszervi vizsgálati módszerek mellett lehetővé tették egy új kutatási irány elindítását. Ez a nagy energiájú ionokkal bombázott atomok elektronhéjában lejátszódó folyamatok vizsgálata volt. Ezeknek a folyamatoknak a leglényegesebb jellemzője, hogy – szemben a fotonokkal vagy elektronokkal történő gerjesztésekkel – az atomi energiaskálához képest óriási lehet a lövedék kinetikus energiája, és ennek elég nagy része át is adódhat rugalmatlan folyamatok során a céltárgyatommak. A bombázó ion elektronok sokaságát távolíthatja el az atomból, néhányat akár magával is vihet.

Az iongyorsítók alkalmazása atomfizikai vizsgálatokra a hatvanas évek végén indult, és az atom- és molekulafizika három évtizedes reneszánszát eredményezte. Addig sohasem mért új folyamatokat (sokszoros ionizáció és elektrontranszfer) lehetett tanulmányozni, új jelenségeket észleltek (pl. elektronok befogása a lövedék folytonos állapotaiba), és mindezt elméletileg értelmezni kellett. Új utak nyíltak a plazmafizikában, és új anyagszervi vizsgálati módszerek széles spektruma jött létre ionnyaláb-analitikai gyűjtőnév alatt.

Az atomfizikusok hozzáférését a gyorsítókhoz az tetten lehetősé, hogy a magfizikai kutatás frontvonala egyre nagyobb energiák felé tolódott, így a kisebb gyorsítók más célokra is hozzáférhetővé váltak. Az ATOMKI Berényi Dénes vezette csoportja a hetvenes évek elején, a felívelő szakaszban kapcsolódott be ezekbe a kutatásokba. Hamarosan világszerte ismertté váltak az elért eredményeik – részben az ATOMKI-ban 1981 és 2004 között nagyjából háromévenként megrendezett nemzetközi műhelytalálkozóknak (Workshop on Fast Ion-Atom Collisions) és nemzetközi konferencia-előadásoknak köszönhetően. Így kerülhetett sor több nemzetközi kutatóhellyel közösen végzett munkákra (Prágai, Dubnai Magfizikai Intézet, Kiotói Egyetem, a londoni UCL, Giesseni Egyetem). Kiemelkedő kísérleti és elméleti eredmények kapcsolódnak egyebek közt a lövedékirányú elektronemisszió, az ionokkal keltett többszörös ionizáció, a fotoionizáció és a többszörös elektronszórás folyamatok vizsgálatához.

Az alapító tagokhoz (Berényi Dénes, Schlenk Bálint, Varga Dezső, Kádár Imre, Kövér Ákos, Kövér László, Hock Gábor, Ricz Sándor, Pálkás József, Sarkadi László) hamarosan új generációk csatlakoztak. Az eredmények tömör összefoglalója az ATOMKI *Annual Reports* 2009-es számában [1] olvasható, ennek már a később bekapcsolódó kutatók is szerzői. Ekkor a kutatás súlypontja már a molekuláris ütközések és az alkalmazások irányába tolódott el.

Az atomi ütközésekről talán a legértékesebb információt az emittált elektronok szög- és energiaszórása hordozza. Az ATOMKI kutatócsoportjának sikerét nagyban elősegítette, hogy Varga Dezső és társai, Kádár Imre, Kövér Ákos, Kövér László és Ricz Sándor kimondottan a vizsgált jelenségkör mérésére optimalizált elektronspektrométerek sorozatát hozták létre és állították a kutatás szolgálatába. Ezek (ESA-11, ESA-31) egyrészt a mai napig sikeresen segítik az anyagtudományi kutatásokat [2], másrészt különböző gyorsítók és szinkrotronok mellett szolgáltatnak figyelemre méltó eredményeket, elsősorban a többszörös ionizáció (ESA-21) és a fotoionizáció (ESA-22, 1. ábra) vizsgálatában [3–5]. Az utóbbi spektrométertípus számos együttműködő csoport is használta és használja a nagy európai szinkrotronok mellett [6]. Ennek egyik módosított változatát 2023-ban telepítettük az ELI-ALPS SYLOS-LONG nyalábvégére, ahol hamarosan szolgálatba áll.



1. ábra. Az ESA-22 elektronspektrométer

Ionokkal bombázott gázok és jegek: asztrofizika, asztrokémia, űrkémia

Az ATOMKI Atom- és Molekulafizikai Laboratóriuma egyik kutatócsoportjának kutatói ionok és különböző kis molekulák ütközéseiben a keletkező molekulatöredékek energia- és szögeloszlását vizsgálták. A kutatást az motiválta, hogy az ion-molekula ütközések fontos szerepet játszanak a légköri jelenségek értelmezésében, nemcsak a Földön, hanem általában a Naprendszer bolygói és holdjain lejátszódó folyamatokban is. A Napból kiáramló ionok és elektronok (az úgynevezett napszél töltött részecskéi) folyamatosan bombázzák az égitestek

légkörét, légkör és mágneses védőpajzs híján pedig azok felszínét. Kisebb intenzitással, de jóval nagyobb energiájú részecskékkal ugyanezt teszi a kozmikus sugárzás is. Az ion–molekula kölcsönhatás első lépése igen gyors. Egy nem túl nagy energiájú, 25 keV-es proton az átlagos atomméret négyszeresének megfelelő távolságot 10^{-16} s (100 attoszekundum) alatt teszi meg, ezalatt zajlanak le az elsőrendű ütközési folyamatok: a gerjesztés, az ionizáció és a töltéscsere. Ezek *fizikai* folyamatok. Sűrű közegben ezután zajlanak le azok a nagyságrendekkel lassúbb *kémiai* folyamatok, melyeket az elsődleges ütközés termékei keltenek.

Az ATOMKI modern részecskegyorsítóinak széles ionválasztéka [7] új együttműködő partnereket vonzott az Egyesült Királyság egyetemeiről. A 2018-as első közös ötleteket követően mindössze két évbe telt egy új mérőegyettes, az ionbombázással kiváltott asztrofizikai és asztrokémiai folyamatokat alacsony hőmérsékleteken vizsgáló jeges mérőkamra (Ice Chamber for Astrophysics/Astrochemistry, ICA) üzembe helyezése az ATOMKI Gyorsítóközpont Tandetron gyorsítójának ionnyalábján. A fejlesztésben a University of Kent, a Queen Mary University of London, a Queen's University of Belfast kutatói vettek részt, majd később bekapcsolódtak az Aarhus Universitet (Dánia) kutatói is. Ezzel a légköri folyamatokat vizsgáló, gázfázisú méréseink mellett megnyílt az út a jeges égítetek felületén zajló, részecskebombázással kiváltott fizikai és kémiai folyamatok laboratóriumi modellezéséhez.

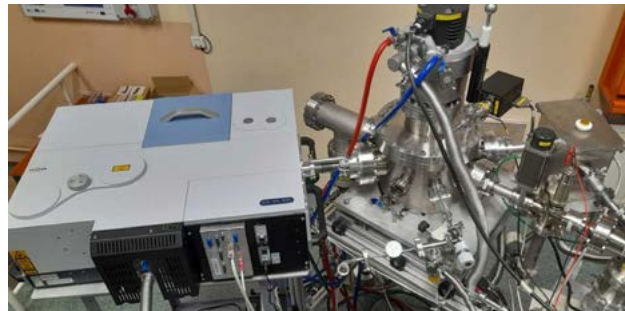
Az új eszközökkel kibővült a vizsgálható jelenségek köre. Lehetőség nyílt a távoli világűr csillagbölcsőiben, a molekuláris felhőkben zajló folyamatok laboratóriumi modellezésére is. Jelenlegi ismereteink szerint a csillagközi térben észlelt legtöbb molekula a csillagközi porszemcséken kifagyott hideg (10–20 K), nanométeres vastagságú jégrétegekben képződhet. Ezek a jegek kezdetben egyszerű molekulákból állnak (H_2O , CO vagy NH_3), amelyek a szemcsék felülete által katalizált reakciók vagy a gázfázisú molekuláris anyagok kondenzációja eredményeként képződnek. A galaktikus kozmikus sugarak, csillagszélionok, ultraibolya fotonok és lökéshullámok által betáplált energia azonban olyan kémiai folyamatokat indíthatnak el, melyek összetett szerves molekulák (complex organic molecules, COM) szintézisét is lehetővé teszik. Ezeket a rádiófrekvenciás és infravörös tartományban kibocsátott vagy elnyelt sugárzás alapján észlelni is tudjuk a csillagközi térben. Mivel itt az élethez szükséges alapvető építőkövek szintéziséről van szó, érthetően erős a motiváció a csillagközi jegekben zajló kémia laboratóriumi és elméleti modellezésére.

Az ATOMKI kutatócsoportja csatlakozott ahhoz a konzorciumhoz, amely 2019-ben javaslatot nyújtott be az EUROPLANET 2024 RI, egy új Horizon2020 infrastruktúra-hálózatra. A projektet 2020-as kezdéssel elfogadták, azóta ennek keretében történnek a további fejlesztések is. Az Europlanet projekt segítette egy második jeges mérőkam-

ra üzembehelyezését az elektron-ciklotronrezonanciás ionforrás (ECRIS) újonnan kialakított nyalábvégén. Ez a mérőállomás az ATOMKI és a Queen's University of Belfast együttműködésével jött létre, és az AQUILA (Atomki Queens University Ice chamber for Laboratory Astrochemistry) nevet kapta (2. ábra) [8].

Az ICA és az AQUILA a projekt transznacionális hozzáférési (transnational access, TA) programján belül négy éven át az egyik legnépszerűbb asztrokémiai laboratóriummá vált. Az intenzív nemzetközi együttműködés rövid időn belül figyelemre méltó eredményeket tett lehetővé. Ezek többségét a *Fizikai Szemle* 2023. július–augusztusi számában, két cikkben ismertettük [9, 10].

Az űrkémia kutatási köre nemcsak a természetben lejárolt folyamatok laboratóriumi és elméleti modellezését öleli föl. Az űrkutatáshoz kapcsolódó minden emberi tevékenység tervezéséhez szükség van az anyagok és szerkezetek viselkedésének ismeretére űrbéli körülmények között. A feladatok sokrétűek, az űreszközök burkolatának optimális kialakításától a más égítetek felszínére telepítendő – esetleg ember által is lakott – kutatóállomások tervezéséhez szükséges adatok szolgáltatásáig. A hőmérséklet, nyomás és sugárzási környezet modellezésére alkalmas mérőkamráink ezekre a vizsgálatokra is alkalmasak. Terveink mind ebben az irányban, mind az asztrokémiai folyamatok laboratóriumi modellezéséhez szükséges eszköztár bővítésére kiterjednek. Mindezt szoros nemzetközi együttműködések keretében tervezzük.



2. ábra. Az AQUILA mérőegyettes az ECR ionforrásnál

Irodalom

1. https://real-j.mtak.hu/11549/1/AnnualReport_2009_compressed.pdf
2. Stobinski L., Lesiak B., Kövér L., Tóth J., Biniak S., Trykowski G., Judek J.: *Journal of Alloys and Compounds*, 501 (2010) 77–85.
3. Kádár I., Ricz S., Végh J., Sulik B., Varga D., Berényi D.: *Physical Review A* 41 (1990) 3518–3533.
4. Ricz S., Buhr T., Kövér Á., Holste K., Borovik A. Jr., Schippers S., Varga D., Mueller A.: *Phys. Rev. A* 90 (2014) 013410.
5. Ricz S., Ricsóka T., Holse K., Borovik A. J., Bernhardt D., Schippers S., Kövér Á., Varga D., Müller A.: *Phys Rev A* 81 (2010) 043416.
6. Ábrók L., Buhr T., Kövér Á., Varga D., Holste K., Borovik A. A., Schippers S., Müller A., Gulyás L., Ricz S., Orbán A.: *J. El. Spectr. Rel. Phenom.*, 258 (2022) 147209.
7. Biri S. et al.: *Eur. Phys. J. Plus* 136 (2021) 247.
8. <https://europlanet.atomki.hu/>
9. Sulik Béla et al.: *Fizikai Szemle*, 73 (2023) 256–262.
10. Juhász Zoltán, Mífsud Duncan V., Herczku Péter, Kanuchova Zuzana: *Fizikai Szemle*, 73/7–8 (2023) 262–267.

HERCEGNŐTORTA ISMERETTERJESZTŐ MÓDRA

Király Beáta

HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

Bizonyára mindenkivel előfordult már, hogy leült meghallgatni egy érdekesnek ígérkező előadást, és szomorúan vagy bosszúsan kellett megállapítania, hogy ez bizony nettó időpocsékolás volt, mert az előadó esélyt sem adott arra, hogy a közönség megértse a mondanivalót. Egy ilyen alkalommal gondolatban elemezni kezdtem az ismeretterjesztő előadások szintjeit, vagy ha úgy tetszik: rétegeit. Próbáltam az elméletemhez modellt találni; a svéd hercegnőtorta tökéletesnek bizonyult.

Ebben a rövid írásban bemutatom, hogy az ATOMKI tudományos titkáráként milyen elképzeléseim vannak az ismeretterjesztésről.

Miért pont a hercegnőtorta?

Képzeliük el az előadandó témát úgy, mint a svéd hercegnőtortát. Ez a torta nagyjából félgömb alakú, zöld színű marcipán borítja, alatta vastag tejszínhabréteg, amely alatt most – az eredeti recepttől eltérően – legyen csokoládéval átitatott piskótaalap, ahol a félgömb közepe felé haladva egyre feketébb és keserűbb a csokoládé. Az előadó feladata, hogy a hallgatóság alapismeretének avagy ízelelképességének függvényében vágjon szeleteket a tortából és tálalja fel fogyasztásra. Ez nem is olyan egyszerű feladat még akkor sem, ha a közönség homogén összetételű, csaknem azonos ízelelvárással.

Vannak előadók, akik kizárólag a népszerűsége törekseinek; ők csak a marcipánt és az édes tejszínhabot találják fel. Valljuk be, időnként nem is szabad mélyebbre menni. Vannak előadók, akik épp ellenkezőleg járnak el. Szerintük az édesség egészségtelen, de legalábbis a keserűbb részeket kell először elfogyasztani, aztán esetleg jöhet a tejszínhab és a marcipán – ha még maradt közönség.

Véleményem szerint úgy kell a tortaszeletet megválasztani, hogy a hallgatóság ízeelésének megfelelő, még

édesnek érzett réteghez hozzá kell csippenteni egy keveset a számára keserűbb részekből is. Csak annyit, hogy még ne köpjék ki, de már érezzék meg a magasabb rendű ízharmóniát.

A különböző témák különböző ízrétegekkel rendelkeznek. Van torta, amelyik csak a közepén válik keserűvé, amikor a témának igazán a mélyére ásunk. Vannak azonban olyan torták, amelyek kizárólag ínycsecknek valók, mert már a külső marcipán is keserű rajtuk. (Én ide sorolom az elméleti fizikát, amiből nehéz jó szeletet vágni, azaz élvezetes ismeretterjesztő előadást tartani.)

De honnan tudjuk előadóként, hogy milyen szeletet vágjunk? Nyilván fel kell mérni a közönség ízsintjét, keserűségűző képességét. Erre kiváló módszer, hogy előadás közben kérdéseket teszünk fel és figyeljük a válaszokat: velünk vannak-e még és tovább kóstolgathatjuk a tortát, vagy már elvesztettük őket, a keserű íz fintort rajzolt az arcukra.

Számos esetben volt szerencsém megtapasztalni, hogy jól sikerült a szelet megválasztása, a vendégek a látogatás végén sem akartak távozni, feszülten figyeltek, milyen érdekességek hangzanak még el, várták az újabb ízeket. Inhomogén ízelelő közönség esetén sem lehetetlen feladat úgy megválasztani a szeletet, hogy se a laikusok, se a szakértők ne fintorogjanak. Tanúja voltam, amikor az intézet műszaki igazgatója olyan mesterien váltogatta a keserű és az édes adagolását, hogy mindenki epedve várta a következő falatot.

Ismeretterjesztés az Atomkiban

Intézetünkben évtizedekre visszanyúló hagyománya van az ismeretterjesztésnek; az első *Fizikusnapokat* 1979-ben rendezték meg, amellyel még most is minden évben jelentkezőnk. Az eseményről rendszeresen jelentek meg cikkek a *Fizikai Szemlében*.

A Fizikusnapok tematikáit, programjait, cikkeit a [2] weboldal foglalja össze. Az érdeklődő tanároknak és a nagyközönségnek az ATOMKI-weblap *Fizika mindenkinek* [3] menüpontjának tanulmányozását és az ATOMKI youtube-csatornájának [4] követését ajánlom.

A világlágyvány elmúltával 2023-ban tértünk vissza a rendes mederbe, a Fizikusnapok nevet azonban *ATOMKI Nyílt Napokra* változtattuk, mert intézetünkben egyre több nem fizikus végzettségű kutató dolgozik, akik szintén tartanak rendhagyó órákat az iskolás csoportoknak, továbbá hangsúlyozni szeretnénk, hogy nem csak



Király Beáta matematika-fizika szakon szerzett diplomát, magfizikából doktorált. Első és eddig egyetlen munkahelye az ATOMKI, 2011 óta tudományos titkár. 2010-ben vette át a látogatócsoportok szervezését, 2012 óta egyedül szervezi a fizikus- (nyílt) napok egyhetes rendezvényét, 2022 óta vezeti az intézeti szemináriumokat; szervezi a Kutatók Éjszakája és a Magyar Tudomány Ünnepe programjait. Szakmai vezetője volt az ATOMKI *Megérthető-elérhető fizika* címen futó ismeretterjesztő projektjének 2013–15-ben [1].

fizikatanárokat várunk kísérőként. Az újraindulás meg-
lepően jól sikerült, az előzetes regisztrációk során 1665
látogatóórát foglaltak le, amit – leszámítva a mindig elő-
forduló néhány hiányzó tanulót – igénybe is vettek. Az
idén, 2024-ben ez a szám 1789 volt.

A *Kutatók Éjszakája* alkalmával 2023-ban kizárólag
folyékony nitrogénes kísérletekkel készültünk. A terv
szerint kétóránként fogadtunk volna legfeljebb 40 főnyi
látogatót, de a nagy érdeklődésre való tekintettel sűríté-
ni kellett a programot, így végül 10 csoportban csaknem
400 fő jött el hozzánk egyetlen nap alatt.

A fenti két program célcsoportja a nagyközönség,
elsősorban a középiskolások, az általános iskola felső ta-
gozata és a laikus érdeklődők. Ennek megfelelően igyek-
szünk a tortaszeletet kellően édesre és csak kicsit keserű-
re választani. Eddig azonban a kutatók magukra voltak
hagyva annak eldöntésében, hogyan lehet ezt az általuk
kiválasztott téma esetén elérni.

Ezért a minőségbiztosítás jegyében elindítottam az
ún. *frissítő szemináriumokat*. Régóta vagy kevésbé régóta
futó ismeretterjesztő előadásainkat vesszük sorra azért,
hogy 1) az előadó kritikusan gondolja át és frissítse fel az
előadása anyagát, 2) a kollégák szakmai és módszertani
megjegyzéseivel és javaslataival tovább javíthassuk az
előadás minőségét, érthetőségét és élvezhetőségét – ez-
által frissen tartva a célközönség figyelmét, 3) az ismer-
etterjesztő előadással még nem rendelkező kollégáknak
kedvet csináljunk egy érdekes téma kiválasztásához és
feldolgozásához – ezáltal frissül az intézet repertoárja,
4) az intézet szerteágazó szakmai összetételű gárdájából
az adott témában járatlanok is kedvet kapjanak a szemi-
náriumok látogatásához – ezáltal frissítve ismereteiket
és az emberi kapcsolatokat.

Úgy illett, hogy én magam nyissam meg a sort a saját
ismeretterjesztő előadásommal (*Atomreaktor a termé-
szetben*). Azóta már jónéhány kolléga vállalta ezt a ki-
hívást, és nagyon pozitívak a tapasztalatok. A közönség
(most a saját kollégák) sok hasznos megjegyzéssel segíti
az előadót, sok kérdés felmerül, sok javaslat hangzik el.
A legörömtelibb számomra az, hogy a közönség igen ak-
tívvá vált, és ez szépen átszivárog a többi szeminárium-
ra is. Kezdjük lassan visszahozni az igazi szemináriumi
hangulatot, amikor élénk beszélgetés alakul ki az el-
hangzottakkal kapcsolatban.

Meggyőződésem, hogy az intézeti szeminárium is
ismeretterjesztő előadás – vagy legalábbis annak kelle-
ne lennie –, csak itt a tortaszelet lehet sokkal keserűbb.
Nagy hiba azonban, ha az előadó úgy érzi, hogy minden
édes réteget kikerülve elegendő feltálnia a mélyen fekvő,
legkeserűbb csokival átítatott piskótát. Különösen

akkor, ha az adott intézetben (vagy az adott országban,
esetleg az egész világon) csupán néhány olyan ember lé-
tezik, aki ezt szívesen fogyasztja. Az ilyen előadást jobb,
ha szűk szakmai megbeszélés keretében tartja meg az
előadó.

Hisz a szemináriumok célja, hogy megismerjük,
mivel foglalkoznak mások, milyen eredményeket értek
el, milyen kérdésekre keresik a választ, milyen nehé-
zségekkel néznek szembe, milyen technikai problémák
álltak elő, vagy esetleg az általuk használt eszközöket,
módszereket, eredményeket hogyan hasznosíthatjuk a
saját tudományterületünkön. Az előadó akár a közön-
ség soraiból is kaphat segítséget vagy választ a felme-
rülő kérdéseire, kialakulhatnak gyümölcsöző szakmai
kapcsolatok. De csak akkor, ha van közönség. Ezért kell
mindent megtenni azért, hogy a nézősorok ne kiürül-
jenek, hanem megteljenek.

Próbálom elérni, hogy a szemináriumaink előadói
ne a saját tudásukat akarják bizonyítani – azt már vélhe-
tően bizonyították, ezért is kaptak felkérést előadóként –,
hanem a szélesebb tudományos közösség épülésére és
örömeire egyszerűen és érthetően mutassák be munkájuk-
at, eredményeiket. A mély részleteket pedig majd meg-
beszéljük később azzal a néhány kiválasztott emberrel.

Ez a törekvés egyáltalán nem új az Atomkiban. Az
előadótermünk előterében a falat két idézet díszíti. Az
első táblát az alapítóigazgató, *Szalay Sándor* készítette
az ATOMKI hőskorában:

„TANÍTÁS, IRÁS - MÓDJA. Némelly tudósnak tu-
dod szokása homályosan irni, és beszélni, azon okból,
hogy meg nem értethetvén, ánnál inkább tsudáltassék.
Ha eleitől fogva a böltsek magokat, a dolgokba mind-
nyáján tisztán magyaráztak volna, sokkal töb ésszel
birnánk már, de úgy vélekedtek, hogy ha nagyon ki
mondják értelmeket majd mindentül meg értetnek,
s nem fognak annyira tsudáltatni. Sokan mentik ma-
gokat a dolognak mélységével, hogy t.i. nem lehet”
– Bessenyei Görgy, *A holmi*, Bécs, 1779.

A második táblát a második igazgató, *Berényi Dénes*
függesztette ki:

„Ha valaki nem tudja megmagyarázni a munkáját egy
kívülállónak, rendszerint maga sem érti azt igazán.”
– V. F. Weisskopf

Irodalom

1. Király B.: Egyensúlyban a lovon. Ismeretterjesztés az Atomkiban.
Természet Világa, 146 (2015) 160.
2. www.atomki.hu/fizikusnapok
3. www.atomki.hu/fizmind
4. www.youtube.com/@ATOMKI-Debrecen



INNOVATÍV TEHETSÉGGONDOZÁS ÉS PÁLYAORIENTÁCIÓ

Borbélyné Bacsó Viktória
Medgyessy Ferenc Gimnázium, Debrecen

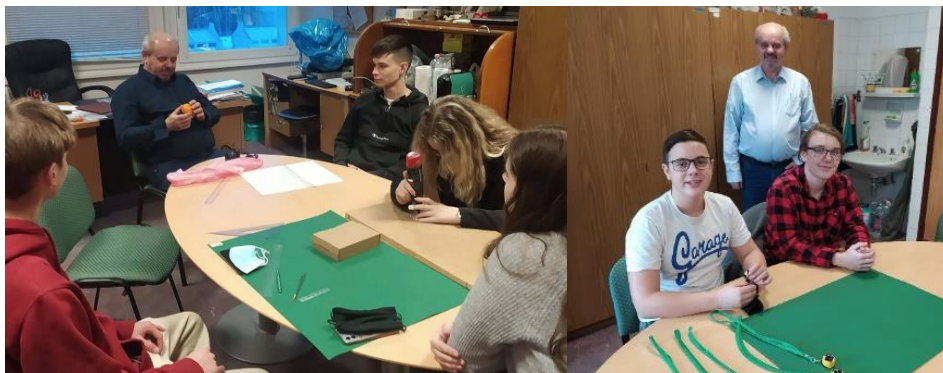
Az ATOMKI kutatói a tehetséggondozásban is részt vállaltak. A középiskolás tehetségeket segítő korábbi program mellett 2022-től a Fizikai Innovációs Kutatóműhely foglalkozásai is helyet kapnak az intézményben. A kutatóprogram középpontjában a problémamegoldó gondolkodás, az innovatív szemléletmód, a csapatmunka és a proaktivitás fejlesztése áll.

Radonmérés

Több éve folyik radonmérési kutatás az érdeklődő tanulók részvételével. A foglalkozások célja debreceni középiskolák, valamint lakások radonszintjének vizsgálata, radontérkép létrehozása. A diákok az ATOMKI saját fejlesztésű maratottonyom-detektoros radonmérő eszközeit irányított munka során elkészítik, csomagolják és adatlappal látják el, majd iskolánként 20–30, illetve lakásonként 3–3 mérőpontra kihelyezik. Az évszakok változásához igazított negyedéves besugárzási időszakok után a radonmérők által gyűjtött információkat mentoruk segítségével kiértékelik. A két éven keresztül tartó folyamat során a fizikusi és mérnöki pályákra hangolás mellett a tanulók megismerkednek a radioaktivitással, a környezeti háttérsugárzással, a radon élettani szerepével és a káros hatásai elleni védekezés lehetőségeivel (1. ábra).

Pásztázó elektronmikroszkópia

Pásztázó elektronmikroszkópia segítségével a tanulók részesei lehetnek egy olyan vizsgálatnak, amely a jelenlegi zuhanykabinok anyagát veti mikroszkóp alá, így nanométeres mérettartományban kapnak információt a felületek morfológiájáról, elemösszetételéről. A tiszta és a vízkővel szennyezett felületekről nyert adatok összehasonlításával



1. ábra. Radonmérés dr. Csige István vezetésével



2. ábra. Kétsugaras pásztázó elektronmikroszkópia (FIB-SEM) dr. Csík Attila vezetésével

javaslatot tehetnek olyan felületkezelési eljárás kifejlesztésére, amely hatékonyabban véd a vízkőtől (2. ábra).

Inflációs kozmológia

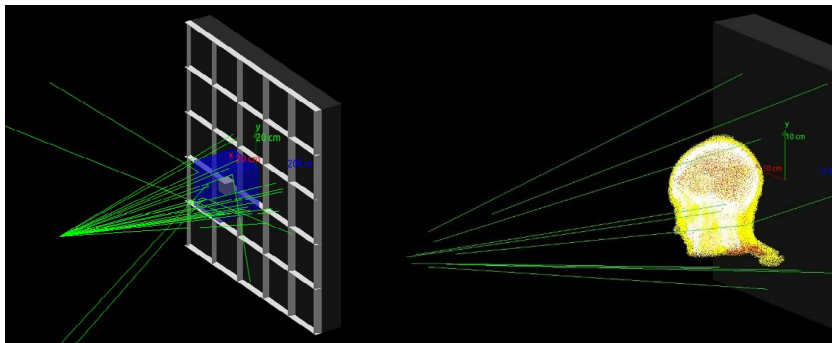
Az inflációs kozmológia leírja a korai Univerzum fejlődésének azon szakaszát, amikor az egy exponenciális táguláson ment keresztül. Ez a gyors tágulás számos dolgot megmagyaráz, mint például a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás izotrópiáját. Az infláció leírására számos modell született. Középiskolás kutatóinknak megmutatjuk, hogyan lehet elvégezni a szakirodalomban fellelhető valamennyi modellre az úgynevezett lassúlegördülés-analízist, ami lehetővé teszi a modell jóslatainak összehasonlítását a Planck-misszió által szolgáltatott legújabb adatokkal [1, 2] (3. ábra).



3. ábra. Dr. Nándori István és dr. Márián István Gábor mentorok Lupó Patrik diákkutatóval



Borbélyné Bacsó Viktória a Medgyessy Ferenc Gimnázium kutatótanára, igazgatóhelyettese. A Debreceni Egyetemen elméleti részecskefizikából szerzett PhD-fokozatot. Az ATOMKI-ban és a Debreceni Egyetemen működő Fizikai Innovációs Kutatóműhely koordinátora, középiskolás diákok felkészítő tanára. Kiemelt feladatának tekinti a természettudományos-kutatói és mérnöki pályáorientációt.



4. ábra. Röntgengépek fejlesztése Geant4-szimulációval

Tudományos Diákköri Konferencia (TDK)

Több évre visszamenően szép eredményekkel vesznek részt mentorált középiskolás diákjaink az egyetemi TDK rendezvényeken. A legügyesebbeket az országos megméretésre is benevezzük (5. ábra).

Alumni-Maraton

Ezt 2023 decemberében szerveztük (6. ábra). Mivel az ATOMKI számos dolgozója csatlakozott előadóként az MTA-Alumni programhoz, intézményünkkel hidat képezve a középiskolák és a pályorientációs program között segítettünk még szélesebb körben ismertté tenni a kezdeményezést. A Magyar Tudomány Ünnepe programsorozat utolsó akkordjaként lehetőséget biztosítottunk 160 középiskolás tanuló számára, hogy kiemelkedő fizikus és orvos kutatók munkásságával ismerkedjenek meg interaktív előadások és moderált beszélgetések keretében.



6. ábra. 160 diák hallgatta az Alumni-Maraton előadásokat

Röntgengépek fejlesztése Geant4-szimulációval

A projekt célja egy olyan röntgen-képképzési módszer kidolgozása Geant4-ben végzett szimulációkkal (Geometry and Tracking: az adott geometriájú anyagon áthaladó sugárzást szimuláló algoritmus), amely a rácskiváltás módszerével csökkenti a páciensre érő sugárdózis nagyságát, és még elegendő egy éles kép rekonstrukciójához. A röntgengépek detektorára egy rácsot szokás helyezni, aminek a célja a szóródott sugárzás kiszűrése. Egy megfelelő algoritmussal azonban lehetséges a szóródott sugárzást is tartalmazó képből egy éles képet rekonstruálni, így rácsra nincs szükség. A rács sok fotont elnyel, így annak elhagyásával több sugárzás juthat a detektorba, amiből egy élesebb képet hozhatunk létre. A programozás mélyebb elsajátítása és a Geant4 felhasználói felületének megismerése után megmutatjuk a tanulóknak az egyszerűbb szimulációk elkészítésének módját, így betekintést nyerhetnek egy több éven át tartó kutatómunka folyamatába (4. ábra).

Tandetron

A 16 évnél idősebb tanulók 2014-ben üzembe helyezett Tandetron gyorsítónál is végezhetnek vizsgálatokat. Dr. Rajta István vezetésével a mágneses tér értékét mérjük a diákokkal a protonenergia függvényében. Egy 90°-os analízáló mágnes segítségével lehet kiszűrni a nem megfelelő energiájú protonokat. Kutató diákjaink az analízáló mágnesben jó egyezést kaphatnak a Lorentz-erő elméleti képletével. Ezzel bizonyíthatják, hogy a mágnesben nagyon jó közelítéssel homogénnek tekinthető a mágneses tér nagysága.



5. ábra. Díjazott középiskolások az egyetemisták között

A kutatómunka nem csak tudományos szempontból jelenthet sokat a tanulók számára. Csapatjátékosokká válnak, személyiségük fejlődik, kapcsolataik bővülnek. Mentorált középiskolásaink a 2023/24-es tanév során több országos megméretésen is szép eredménnyel vettek részt (7. ábra).



7. ábra. Erdélyi Zsuzsanna kiemelt díjszertben részesült

Irodalom

1. N. Aghanim et al. [Planck-együttműködés]: Planck 2018 eredményei. VI. Kozmológiai paraméterek. *Astron. Astrophys.*, 641 (2020) A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
2. N. Aghanim et al.: Erratum. *Astron. Astrophys.*, 652 (2021) C4. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910e>

VACUUM TIGHTNESS AND MEASUREMENT TECHNIQUE LTD.

Spin-off company of the HUN-REN Institute for Nuclear Research

Goal: Practical solution for special industrial vacuum integrity and leak tightness problems using vacuum technology and mass spectrometry

Tradition

Vacuum Tightness and Measurement Technique Ltd.

Physical research

- Particle accelerators
- Mass spectrometers
- Electron spectrometers
- Cryotechnique

Founded: 2006

- 30 years experience in vacuum technique, cryophysics, electronic design and research
- Industrial applied R&D
- On-line leak testers
- Task-specific industrial vacuum technical and gas flow systems
- Design, production, installation, servicing

Technical conditions

- Special vacuum technical equipments
- Planning, production, servicing

Services

- General Consultancy (free of vendor bias)
- Consultancy
- System Building
- Design and test of task specific instruments
- Rapid Lab Scale Experiments (early problem solving)
- Industrial high vacuum tightness testing
- Bacterial and virological leak testing
- Design of in-line QC&QA tightness testers



On-site special leak testing

Reference works:

Linde, Electrolux, Teva, Vibracoustic, GE, MOL, BOSCH, Oerlikon Eldim, Johnson Controls, BME, SZTE, ANSTO, ELI-ALPS, HUN-REN Centre for Energy Research

Information: Dr. S. Mészáros, HUN-REN ATOMKI
4026 Debrecen, Bem tér 18/C

A LEGKORSZERŰBB VÁKUUMTECHNIKA AZ IPAR ÉS A TUDOMÁNY FELADATAIHOZ



Vacube vákuumszivattyú

Intelligens érintőképernyős vezérlés.
400–4600 m³/órás szívóteljesítménnyel.
Végvákuum: 0,01 mbar

Turbószivattyú minden alkalmazásra.
Néhány kiegészítő tartozékával felszerelve.

Turbovac 350 iX tartozékaival



Kézi vákuum-mérő műszer

Bárhol, bármikor történő pontos vákuummérésre.



Univex berendezések

Univerzális és flexibilis vákuum-berendezések az ipar és a kutatás számára.



Dryvac FP

Fertőtleníthető, lemosható száraz vákuumszivattyú az élelmiszer- és a csomagolóipar számára.
Integrált kipufogórendszerrel.
200–1200 m³/óra szívóteljesítménnyel
Végvákuum:
0,01 mbar