

GYORSÍTÓKKAL AZ ATOMFIZIKÁTÓL AZ ŰRKÉMIAIG

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

Bevezetés

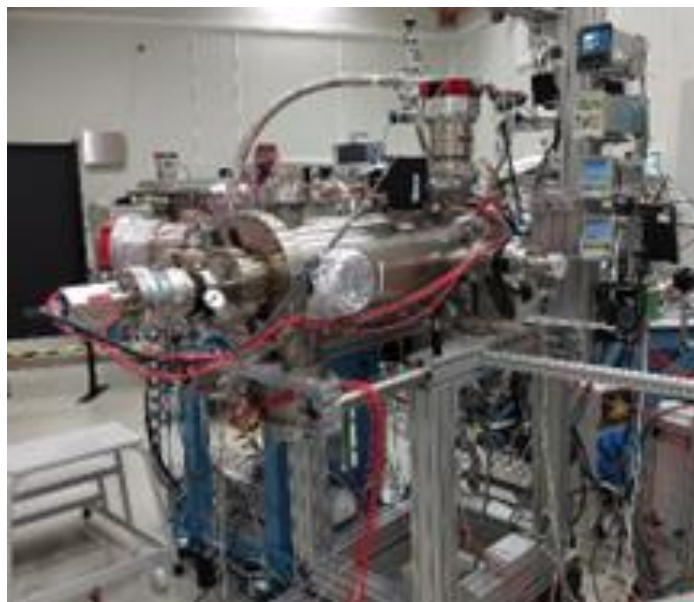
Az ATOMKI gyorsítói az 1970-es években a magfizika és az anyagvizsgáló módszerek mellett lehetővé tették egy új kutatási irány elindítását. Ez a nagy energiájú ionokkal bombázott atomok elektronhéjában lejátszódó folyamatok vizsgálata volt. Ezeknek a folyamatoknak a leglényegesebb jellemzője, hogy – 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 céltárgyatomnak. 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 anyagvizsgáló módszerek széles spektruma jött létre ionnyaláb-analítika gyűjtőnév alatt.

Az atomfizikusok hozzáférést a gyorsítókhoz az tette lehetővé, 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, Pálinkás 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 energiaeioszlása 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 szolgáltatott figyelemre méltó eredményeket, elsősorban a többszörös ionizáció (ESA-21) és a fotoionizáció (ESA-22, *1. ábra*) vizsgálatában [3–5]. Az utóbbi spektrométertípust 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 jeges: asztrofizika, asztrokémia, űrkémia

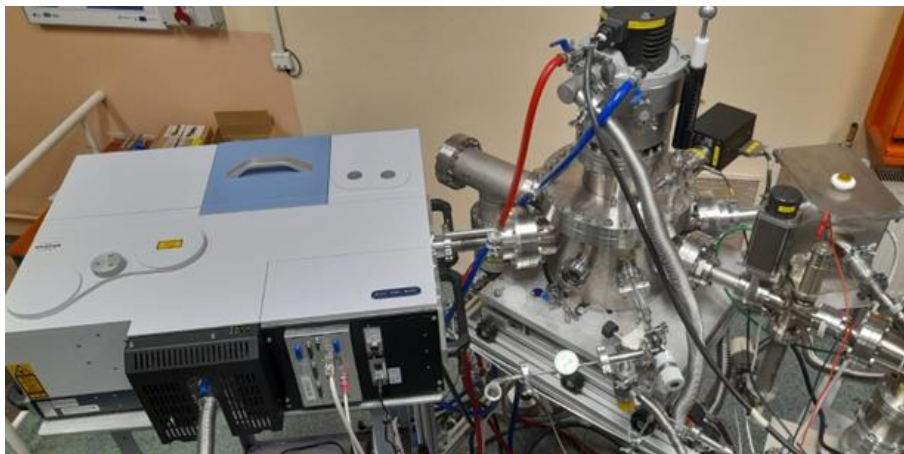
Az ATOMKI Atom- és Molekulafizikai Laboratóriuma egyik kutatócsoportjának kutatói ionok és különböző kis molekulák ütközéseiben a keletkező molekulatöredékek energia- és szögeloszlását vizsgálták. A kutatást az motiválta, hogy az ion-molekula ütközések fontos szerepet játszanak a légköri jelenségek értelmezésében, nemcsak a Földön, hanem általában a Naprendszer bolygóin 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 részecskékkel 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 egyeteméről. A 2018-as első közös ötletet követően mindössze két évbe telt egy új mérőegyes, 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 égitestek felületén zajló, részecskebombázással kiváltott fizikai és kémiai folyamatok laboratóriumi modellezéséhez is.

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 jeges 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 lökeshullámok 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 jegesben 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 mérőkamra 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].



2. ábra. Az AQUILA mérőegység az ECR ionforrásnál

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 lezajló 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 égitestek 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.

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, Mifsud Duncan V., Herczku Péter, Kanuchova -Zuzana: *Fizikai Szemle*, 73/7–8 (2023) 262–267.