

# JEGES ÉGITESTEK IONOKKAL BOMBÁZOTT FELÜLETÉN ZAJLÓ FOLYAMATOK ÉS LABORATÓRIUMI MODELLEZÉSÜK

Sulik Béla,<sup>1</sup> Herczku Péter,<sup>1</sup> Juhász Zoltán,<sup>1</sup> Duncan V. Mifsud,<sup>1</sup>  
Kovács T. S. Sándor,<sup>1</sup> Sergio Ioppolo,<sup>2</sup> Rácz Richárd,<sup>1</sup> Biri Sándor,<sup>1</sup>  
Robert W. McCullough,<sup>3</sup> Rahul Kumar Kuswaha,<sup>1</sup> Zuzana Kaňuchova,<sup>4</sup>  
Vajda István,<sup>1</sup> Lakatos Gergő,<sup>1</sup> Nigel J. Mason<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Atommagkutató Intézet, Debrecen

<sup>2</sup>Aarhus University, Dánia

<sup>3</sup>Queen's University Belfast, Észak-Írország

<sup>4</sup>Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, Szlovákia

<sup>5</sup>University of Kent, Anglia

## Miért van szükség laboratóriumi asztrokémiára?

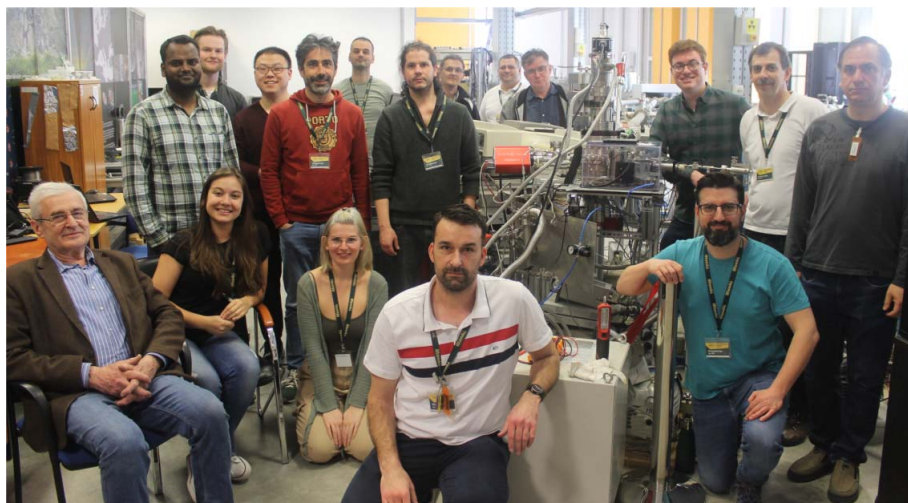
Naprendszerünk kutatása során abban a szerencsés helyzetben vagyunk, hogy a kiküldött szondákkal a helyszínen mérhetjük a vizsgált objektumok anyagösszetételét. Észlelhetjük a „gyorsan” lezajló – a kémiai folyamatok  $10^{-15}$  szekundumos skálájától a néhány éves időléptékben érvényesülő – folyamatokat is, és ez rendkívül gazdag információforrást jelent. A reakciók megértéséhez azonban laboratóriumi kísérletekre van szükség, és ugyanilyen fontos szerep jut az elméleti modellszámításoknak is. Az évezredek, évmilliók alatt akumulálódó hatások megismeréséhez, megértéséhez még inkább szükség van a modellezésre. Ilyen lassú folyamatok lehetnek például a különböző sugárzások (töltött részecskék és fotonok) által kiváltott kémiai átalakulások. A sugárzások egyedi becsapódásainak, eseményeinek energiája igen nagy lehet, kozmikus sugárzások esetén extrém, földi gyorsítókkal meg sem közelíthető energiaértékeket is felvehet. Ám az események tér- és időbeli sűrűsége alacsony, a felhalmozódó termékek közötti kölcsönhatások csak nagyon hosszú idő alatt eredményeznek makroszkopikus változásokat. Ezek megértésében – az elméleti modellek megalakítása mellett – fontos szerepet kap a laboratóriumban végzett kísérleti munka.

A Naprendszerben nagyon sok a jéggel borított objektum, a mikrometeoroidoktól az üstökösökön át a külső jeges bolygókig és azok holdjaiig. Az eddigi missziók meg-

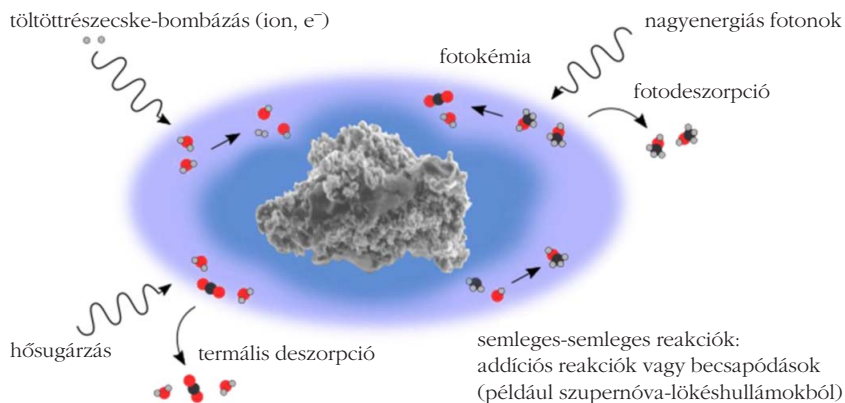
mutatták, hogy ezen jeges égitestek felszínén és légkörében igen sokrétű kémiai folyamatok zajlanak. Jó példa erre a Titan légkörében talált folyamatok gazdagsága, amelyet a Szaturnusz és környezetét vizsgáló Cassini–Huygens-misszió tárt fel. Ezek megértéséhez szintén elkerülhetetlen a reakciók laboratóriumi modellezése.

Az űrbéli jeges objektumok felszínén és belsejében zajló folyamatok nem csak a csillagászat számára fontosak. Ma már általánosan elfogadott feltételezés, hogy a világűr kémiai fejlődése, evolúciója túlnyomórészt a kozmikus térben található porszemcsékre évmilliók alatt lerakódó, atomokból és egyszerű molekulákból álló jégrétegekben történik. A gáz- és plazmafázisban lévő atomok és ionok sűrűsége még a sűrű molekulafelhőkben sem elegendő ahhoz, hogy pusztán ütközések révén létrejöjjenek az ott észlelhető bonyolultabb molekulák. A hidrogén mellett többnyire szén-dioxid-, víz-, metán- és ammóniamolekulákból álló jeges azonban sűrű anyagok. Hidegek ugyan, de sokféle hatás érheti őket, amelyek kémiai változásokat eredményezhetnek. Ezt illusztrálja az *1. ábra*.

A cikk szerzői (bár nem mindenki) a mérésekre érkezett vendégkutatókkal az ATOMKI Tandetron-gyorsítójának munkatársaival az ICA-mérőkamra körül 2023 márciusában.



Ez a cikk a 2022. november 14-én a Magyar Tudomány Ünnepe alkalmából az MTA Székházban tartott Szegő Károly-emlékülésen elhangzott előadás rövidített változata.



1. ábra. A csillagközi porszemek jeges köpenyében lejátszódó fizikai és kémiai folyamatok vázlatos áttekintése [1] alapján.

A zömükben valószínűleg szupernóva-robbanások során keletkező, vas, szén és szilikát anyagú porszemcsék többsége mikron alatti méretű, és sűrűségük a csillagközi térben igen kicsi: egy száz méter élhosszúságú kockában átlagosan két porszemcse található. Az atomok, molekulák sűrűsége sem túl nagy, köbcentiméterenként átlagosan egy található belőlük. Sűrűségük a csillagközi ködökben persze ennél nagyobb, a molekulafelhőkben pedig lényegesen nagyobb lehet. A porszemcsék tömege a gázokénak 1-2 százalékát teszi ki.

A változatos összetételű jégekkel borított porszemcséket igen alacsony hőmérsékleten is sokféle olyan hatás éri, amely kémiai változásokat eredményezhet. A gárrészecskék lerakódása addíciós reakciókkal építhet molekulákat. A csillagokhoz közeledve a hőhatás, valamint a fotonok és a töltött részecskék (a „csillagszél” elektronjainak és ionjainak) becsapódásai kapnak egyre nagyobb szerepet. A nagy energiájú kozmikus sugárzás pedig még a sűrű anyagfelhők belső régióiban is létrehozhat kémiai változásokat.

A csillagközi térben molekulák sokasága észlelhető rádióteleszkópokkal és az infravörös tartományban adatokat gyűjtő űrszondák segítségével. A 2021-ig észlelt molekulákat mutatja be az 1. táblázat.

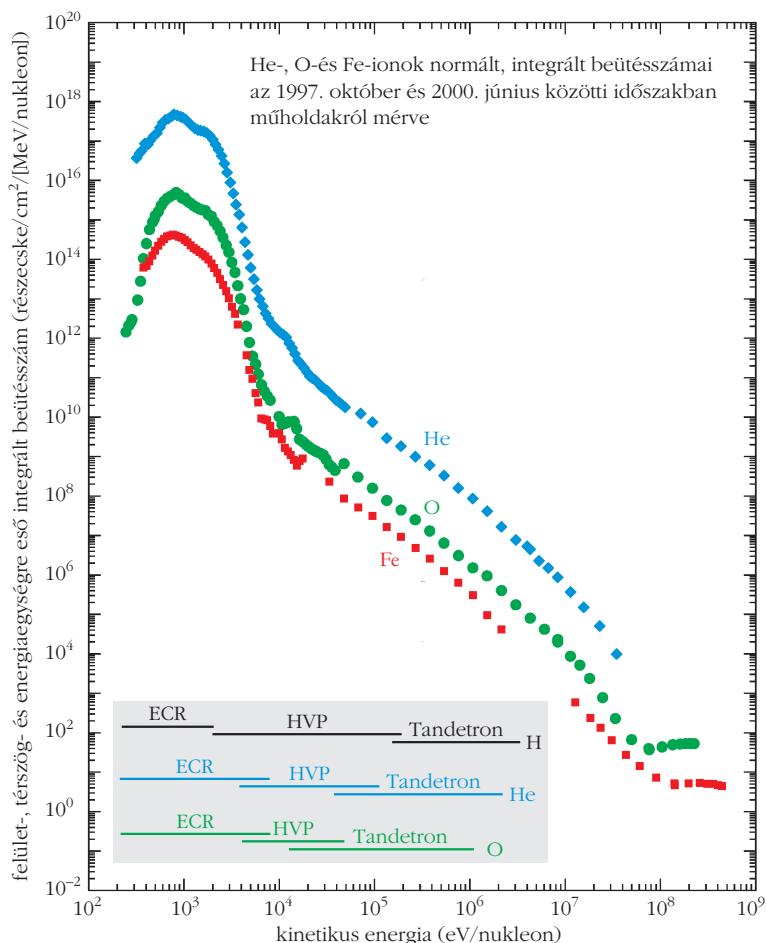
A listában nagyon sok szerves molekula szerepel, és ezek elég jelentős része biomolekulának vagy biomolekulák építőkövének tekinthető. Könnyen belátható, hogy az élet eredetének kutatásában az asztrokémiának jelentős szerepe van.

Mind a Naprendszerben zajló folyamatok, mind a távoli molekulafelhőkben lejátszódó kémiai átalakulások megértéséhez szükség van azok laboratóriumi és elméleti modellezésére. A laboratóriumi modellezés során hasonló anyagok számára terem-

tünk hasonló feltételeket, és ellenőrzött körülmények között vizsgáljuk a folyamatokat. Ez a kutatási irány rendkívül szerteágazó [3, 4]. Ezen belül a nagy energiájú becsapódások laboratóriumi vizsgálata is igen kiterjedt, az elektron- és fotonindukált folyamatokat széles energiatarományban vizsgálják a világ számos laboratóriumában. Meglepően kevés kutatóhelyen vizsgálják az ionbombázás hatását az asztrofizikai és asztrokémiai szempontból releváns jég- és más alacsony hőmérsékletű mintákon. Európában a franciaországi

GANIL nehézion-gyorsítónál, Darmstadtban a GSI-ben és az olaszországi INAF-Osservatorio Astrofisico di Catania intézetben. Az Atommagkutató Intézet (ATOMKI) bekapcsolódását e kutatásokba az tette lehetővé, hogy a gyorsítói által szolgáltatott ionok vá-

2. ábra. Nagy energiájú részecskék (He-, O- és Fe-atommagok) 33 hónapos időszakra integrált hozama a napszéltől a galaktikus kozmikus sugárzás energiájáig [5, 6]. A protonadatok az ábrán nem jelennek meg, ezek körülbelül egy nagyságrenddel nagyobbak mint a He-adatok, és lefutásuk hasonló azokhoz. Az ATOMKI gyorsítóinak (ECR, Nagyfeszültségű Platform (HVP) és Tandetron) ionenergiatarományai a szürke betétben láthatók. Ezek 9-10 nagyságrend intenzitástartományban fedik a spektrumok intenzív részét.



## A csillagközi térben detektált molekulák listája a 2021-es állapot szerint [2].

2 atom		3 atom		4 atom		5 atom		6 atom		7 atom
CH	NH	H <sub>2</sub> O	MgCN	NH <sub>3</sub>	SiC <sub>3</sub>	HC <sub>3</sub> N	C <sub>4</sub> H <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> OH	CH <sub>3</sub> CHO	
CN	SiN	HCO <sup>+</sup>	H <sub>3</sub> <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> CO	CH <sub>3</sub>	HCOOH	CNCHO	CH <sub>3</sub> CN	CH <sub>3</sub> CCH	
CH <sup>+</sup>	SO <sup>+</sup>	HCN	SiCN	HNCO	C <sub>3</sub> N <sup>-</sup>	CH <sub>2</sub> NH	HNCNH	NH <sub>2</sub> CHO	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub>	
OH	CO <sup>+</sup>	OCS	AlNC	H <sub>2</sub> CS	PH <sub>3</sub>	NH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> O	CH <sub>3</sub> SH	CH <sub>2</sub> CHCN	
CO	HF	HNC	SiNC	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	HCNO	H <sub>2</sub> CCO	NH <sub>3</sub> D <sup>+</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	HC <sub>5</sub> N	
H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	HCP	C <sub>3</sub> N	HOCN	C <sub>4</sub> H	H <sub>2</sub> NCO <sup>+</sup>	C <sub>3</sub> H	C <sub>6</sub> H	
SiO	CF <sup>+</sup>	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	CCP	HNCS	HSCN	SiH <sub>4</sub>	NCCNH <sup>+</sup>	CH <sub>3</sub> NC	c-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	
CS	PO	C <sub>2</sub> H	AlOH	HOCO <sup>+</sup>	HOOH	c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> Cl	HC <sub>2</sub> CHO	CH <sub>2</sub> CHOH	
SO	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	C <sub>3</sub> O	l-C <sub>3</sub> H <sup>+</sup>	CH <sub>2</sub> CN	MgC <sub>3</sub> N	H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	C <sub>6</sub> H <sup>-</sup>	
SiS	AlO	HCO	H <sub>2</sub> Cl <sup>+</sup>	l-C <sub>3</sub> H	HmGNC	C <sub>5</sub>	HC <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	C <sub>5</sub> S	CH <sub>3</sub> NCO	
NS	CN <sup>-</sup>	HNO	KCN	HCNH <sup>+</sup>	HCCO	SiC <sub>4</sub>	NH <sub>2</sub> OH	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>	HC <sub>5</sub> O	
C <sub>2</sub>	OH <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>	FeCN	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	CNCN	H <sub>2</sub> CCC	HC <sub>3</sub> S <sup>+</sup>	C <sub>5</sub> N	HOCH <sub>2</sub> CN	
NO	SH <sup>+</sup>	HOC <sup>+</sup>	HO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	HONO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> CCS	HC <sub>4</sub> H	HC <sub>4</sub> NC	
HCl	HCl <sup>+</sup>	SiC <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	c-C <sub>3</sub> H	MgCCH	HCCNC	C <sub>4</sub> S	HC <sub>4</sub> N	H <sub>3</sub> HNH	
NaCl	SH	C <sub>2</sub> S	CCN	HC <sub>2</sub> N	HCCS	HNCCC	CHOSH	c-H <sub>2</sub> C <sub>3</sub> O	c-C <sub>3</sub> HCCH	
AlCl	TiO	C <sub>3</sub>	SiCSi	H <sub>2</sub> CN		H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>		CH <sub>2</sub> CNH		
KCl	ArH <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>	S <sub>2</sub> H					C <sub>5</sub> N <sup>-</sup>		
AlF	NS <sup>+</sup>	CH <sub>2</sub>	HCS					HNCHCN		
PN	HeH <sup>+</sup>	C <sub>2</sub> O	HSC					SiH <sub>3</sub> CN		
SiC	VO	MgNC	NCO					MgC <sub>4</sub> H		
CP		NH <sub>2</sub>	CaNC					CH <sub>3</sub> CO <sup>+</sup>		
		NaCN	NCS					H <sub>2</sub> CCCS		
		N <sub>2</sub> O						CH <sub>2</sub> CCH		

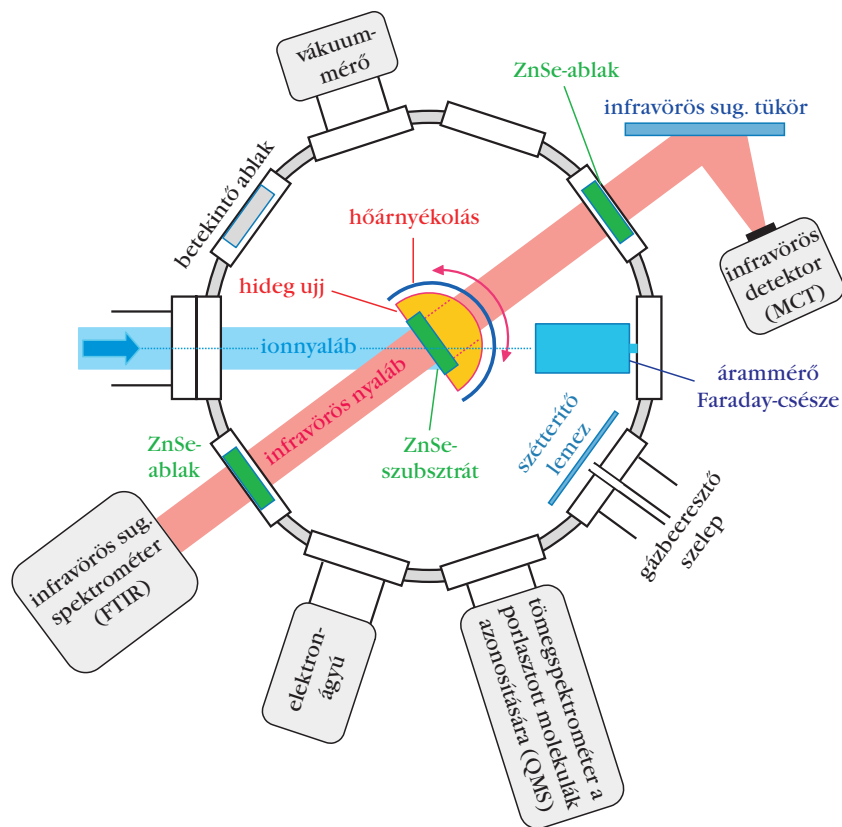
8 atom	9 atom	10 atom	11 atom	12 atom	13 atom	PAH <sup>1</sup>	fullerének
HCOOCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	HC <sub>9</sub> N	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CN	1-C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> CN	C <sub>60</sub>
CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	CH <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H	n-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> CN	HC <sub>11</sub> N	2-C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> CN	C <sub>60</sub> <sup>+</sup>
C <sub>7</sub> H	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OCHO	i-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> CN		C <sub>9</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>70</sub>
CH <sub>3</sub> COOH	HC <sub>7</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>5</sub> N	CH <sub>3</sub> COOCH <sub>3</sub>	1-C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> CN			
H <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> CHCH <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub> COCH <sub>2</sub> OH	2-C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> CN			
CH <sub>2</sub> OHCHO	C <sub>8</sub> H	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>				
HC <sub>6</sub> H	CH <sub>3</sub> CONH <sub>2</sub>						
CH <sub>2</sub> CHCHO	C <sub>8</sub> H <sup>-</sup>						
CH <sub>2</sub> CCHCN	CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub>						
NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> SH						
CH <sub>3</sub> CHNH	HC <sub>7</sub> O						
CH <sub>3</sub> SiH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> NHCHO						
NH <sub>2</sub> CONH <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> CCCHCCH						
HCCCH <sub>2</sub> CN	HCCCHCHCN						
CH <sub>2</sub> CHCCH	H <sub>2</sub> CCHC <sub>3</sub> N						

<sup>1</sup>sokgyűrűs aromás szénhidrogének

lasztéka és energiatartománya kiegészíti a többi kutatóhelyét. Szerencsés módon nemcsak kiegészíti, hanem ki is bővíti. Egy rövidesen üzembe helyezendő kis gyorsító (nagyfeszültségű platform, HVP) segítségével a napszél ionválasztékát és teljes energiatartományát, valamint a galaktikus eredetű kozmikus sugárzás alacsony energiás tartományát is szolgáltatni

tudjuk. „Napszélgenerátorunk” képességeit a 2. ábra mutatja be, ahol a napszél ionjainak hosszabb időn át mért adatait vetjük össze az ATOMKI gyorsítói által nyújtott lehetőségekkel.

A továbbiakban röviden ismertetjük az ATOMKI új asztrofizikai/asztrokémiai laboratóriumát, és az ott végzett kutatásokba is némi bepillantást nyújtunk.



3. ábra. A jeges mérőkamra (Ice Chamber for Astrophysics/Astrochemistry, ICA) felépítése a Tandetron-gyorsítónál [1].

## Az ATOMKI asztrofizikai/asztrokémiai laboratóriuma

Az új laboratórium ötlete 2018-ban született, amikor *Nigel J. Mason*, az Europlanet Society elnöke, az Intézet Atom- és Molekulafizikai Laboratóriumába látogatott. Az ötlet gazdája Mason professzor, az ATOMKI ion-molekula ütközéseket vizsgáló kísérleti molekulfizikai csoportjának tagjai és az ATOMKI Gyosítóközpontjának munkatársai voltak. Hamarosan több intézmény vezetése is felkarolta az ügyet, és kialakult egy többoldalú együttműködés az ATOMKI és Egyesült Királyság-beli egyetemek, úgymint a University of Kent (UoK), a Queen Mary University of London (QMUL) és a Queens University of Belfast (QUB) között, amelyhez később a dániai Aarhusi Egyetem is csatlakozott. Itthon az ELTE, a Miskolci Egyetem és az Energiakutató Központ kutatócsoportjaival működünk együtt. Az együttműködők három év alatt két komplett mérőállomást hoztak létre, egyet a 2 MV-os terminálfeszültségű Tandetron-gyorsító [7], egyet pedig az elektronciklotron-rezonanciás ionforrás (ECR ionforrás [7]) mellé telepítve.

Az ATOMKI elektrosztatikus Tandetron-gyorsítójának terminálfeszültsége 0,085–2,0 MV tartományban változtatható. Két multicusp ionforrással rendelkezik a proton- és hélium-ionnyalábokhoz, és egy céziumporlasztásos ionforrással a nehezebb ionokhoz. Pro-

tonokra az ionenergia-tartomány 0,2–4,0 MeV, 200  $\mu$ A-nál nagyobb nyalábáram mellett. Nehezebb ionlövedékeknél (héliumtól aranyig) legalább néhány  $\mu$ A ionáram lehetséges a céltárgyakon, az energiát a  $V_t$  terminálfeszültség és a gyorsított ion  $q$  töltésállapota határozza meg az

$$E_{\text{nyaláb}} = V_0 + V_t(q+1)$$

összefüggés szerint, ahol  $V_0$  az ionforrás kivonófeszültsége. A Tandetron nyalábenergia-tartománya a napszél nagyenergiás részének felel meg (2. ábra).

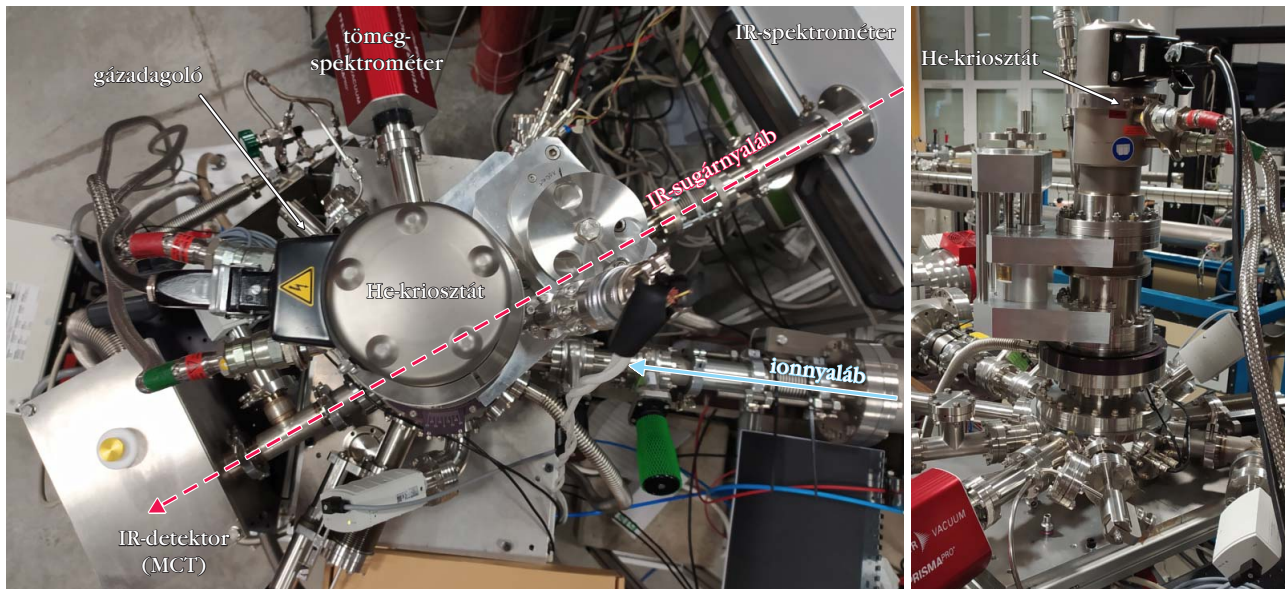
Miután az így létrehozott infrastruktúra bekapcsolódott abba a konzorciumba, amely elnyerte a 2020 januárjában induló H2020-as Europlanet 2022 RI infrastruktúra-projektet [8], a további fejlesztések és a kutatások jórészt ennek keretében folytak. A projekt nemzetközi hozzáférést biztosító (transnational access, TA) alprogramja keretében eddig nyolc, egyenként kéthetes

méréssorozatot hajtottunk végre Debrecenben, és a programtanács még ugyanennyire elfogadta a vendégkutatók javaslatait.

Az elsőként telepített, a Tandetron-gyorsító mellett működő ICA-mérőkamra (jeges mérőkamra asztrofizikai és asztrokémiai vizsgálatokra, Ice Chamber for Astrophysics/Astrochemistry, [9]) felépítését és fontosabb funkcióit a 3. ábra mutatja be, felül- és oldalnézeti képét a 4. ábra. A mintatartó és a mintahordozó felépítése pedig az 5. ábrán látható.

Az ICA vákuumkamrájának közepén egy hőárnycokolt réz mintatartó helyezkedik el, amelyben akár négy, infravörös sugárzásra átlátszó (tipikusan cinkszelenid, ZnSe) mintahordozó (szubsztrát) rögzíthető. Ezek felületén asztrofizikai jéganalógok állíthatók elő (5. ábra). A mintatartó a kamra függőleges tengely mentén mozgatható, és e tengely körül el is forgatható. Ez a kialakítás lehetővé teszi azonos módon felépített asztrofizikai jéganalógok négy független besugárzását. A ZnSe-szubsztrátok egy részére jó áteresztőképességű, hálószerű aranymintázat került (5. ábra). Ezeket nagy ionáramok esetén használjuk, hogy elkerüljük a minta felületének olyan mérvű feltöltődését, amely szikrázást eredményez. A kamrában a nyugalmi vákuumszint  $5 \cdot 10^{-9}$  mbar. Ez elegendően kicsi ahhoz, hogy a maradékgázokból ne rakódjon le a méréseket zavaró mennyiség a hűtött mintatartóra.

A mintatartó zárt ciklusú héliumkriosztát segítségével 20 K-re hűthető, és hőmérséklete – egy fűtőblokk



4. ábra. Az ICA jeges mérőkamra felül- és oldalnézetben [1].

segítségével – a fűtés és a hűtés közötti egyensúly beállításával szabályozható. Ez 20–300 K működési hőmérséklet-tartományt tesz lehetővé.

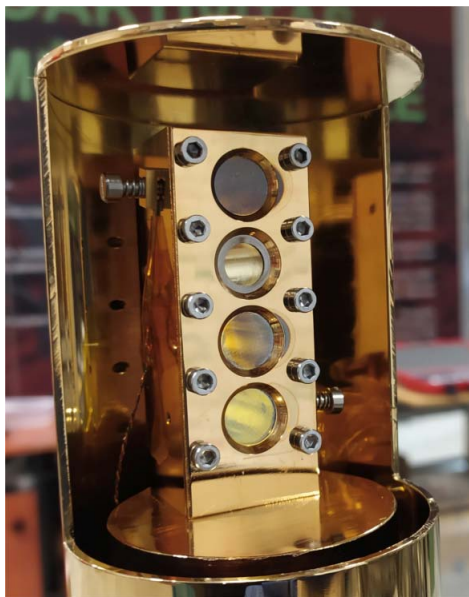
A jéganalógokat pontosan adagolt gázok vagy gőzök keverékének a hideg felületre történő lerakódásával állítjuk elő a szubsztrátokon. Ez vagy a kamra egyenes elárasztásával, vagy egy, a szubsztráthoz közel tolt fűvókán át történhet. A gázokat és gőzöket – egy szelepes keverőrendszer segítségével – először egy keverőtartályba vezetjük. Miután itt egyensúlyba kerültek, egy finomszabályzó tűszelepen keresztül engedjük be azokat a fő vákuumkamrába. A jégretek vastagsága a néhányszor tíz nanométertől a néhány mikronig terjedő tartományba esik.

A kamra számos vákuumátvezetővel, nyílással van ellátva (3. ábra). Ezek a Tandetron-gyorsító által kibocsátott ionnyaláb fogadására, a vizsgálandó gázok bevezetésére, valamint a mérőeszközök (vákuummérő, Infravörös (IR) spektrométer, kvadrupól tömegspektrométer (QMS)) csatlakoztatására szolgálnak. A kvadrupól tömegspektrométert a maradékgázok és az ionnyaláb által porlasztott molekulák analíziséhez használják. Elektronágyúval történő, az ionnyalábbal egyidejű vagy attól független besugárzásra is lehetőség van. Két, egymással szemben elhelyezett kamranyílás az infravörös (IR) sugárzást áteresztő cink-szelepid (ZnSe) ablakokkal van el-

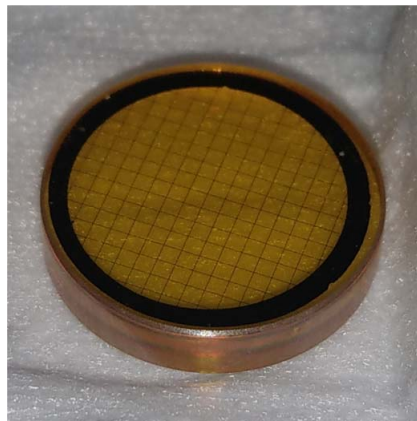
látva, hogy be- és kilépőnyílásként szolgáljanak a spektroszkópiai megfigyelés számára.

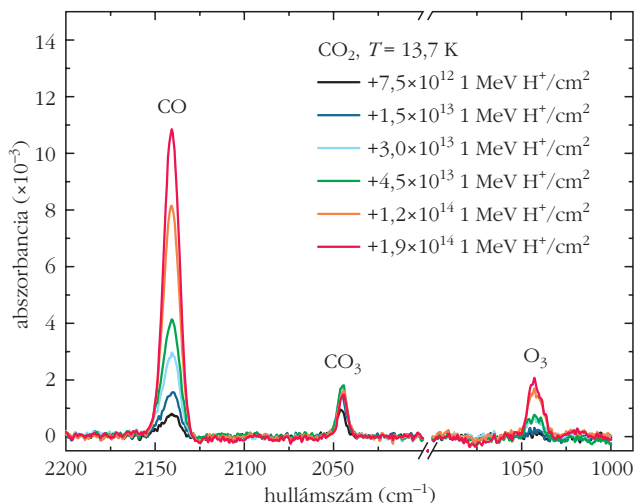
Az asztrofizikai jéganalóg minták fizikai-kémiai tulajdonságait elsősorban infravörös (Fourier Transform Infrared, FTIR) abszorpciós spektroszkópiával [11] követjük nyomon, a 3. ábrán látható módon. A mintán áthaladó infravörös sugarat a fő vákuumkamrán kívül elhelyezett, cseppfolyós nitrogénnel hűtött detektor érzékeli. A spektrumok a jéglerakódás és a besugárzás során folyamatosan felvehetőek, ezzel segítve a teljes mérési idő lerövidítését.

Az FTIR-spektroszkópiát nem csak a jéganalógokban jelen lévő molekulafajták azonosítására használjuk, hanem mennyiségi meghatározásukra is [1]. Lehetőség van a jégretek programozott felmelegítéssel történő, fokozatos deszorpciójára is.



5. ábra. Bal oldalon a több minta besugárzására alkalmas mintatartó, körülötte a hőárnyékolással. Minden felület aranyozott. A jobb oldali képen az egyik, aranyhálóval ellátott ZnSe-mintahordozó (szubsztrát) látható, átmérője 15 mm, vastagsága 3 mm.





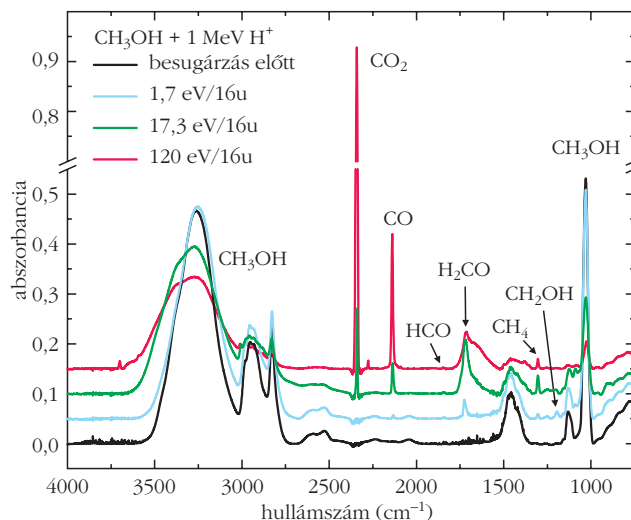
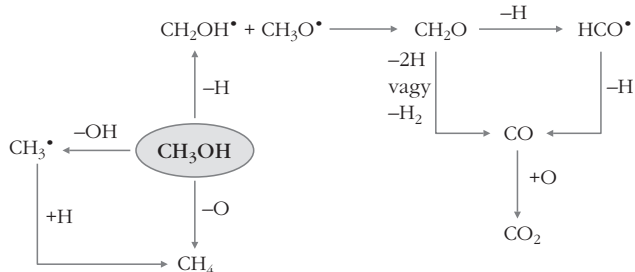
6. *ábra.* Egy korai (2019) mérés és egy demonstratív (bár kvalitatív) eredmény: az ábrán a szén-dioxid-jég besugárzásakor keletkező termékek abszorpciós vonalainak tartományát látjuk. A koncentrációval arányos csúcsok nagysága a növekvő besugárzási szinttel növekszik. Jól látható, hogy a besugárzással növekvő mennyiségű CO-fragmentum mellett megjelennek a szintetizált molekulák is. Ezen a hőmérsékleten a CO<sub>3</sub> is molekulaként létezik. Megjegyzés: az abszorbanca (vagy abszorpciós tényező) az elnyelődő anyag által előidézett relatív intenzitás-csökkenés negatív logaritmusosa, amely az anyag koncentrációjával arányos [10].

Kvantitatív mérések végzéséhez pontosan kell ismernünk a minta felületét érő ionnyaláb áramát. További követelmény, hogy a besugárzás homogén kell legyen, az áramsűrűség nem változhat a minta felületén. Mindezt a nyaláb – a katódsugárcsőves tévékészülékekben és monitorokban alkalmazott eltérítéshez hasonló – szétterítésével és a minta felületére eső tényleges áram folytonos monitorozásával érjük el.

Nem célunk, hogy mindazon méréseket bemutassuk, amelyeket eddig, többnyire a mérési javaslatokat benyújtó együttműködő partnereinkkel közösen végeztünk. Ezek egy része egyszerű molekulákból álló jegek viselkedését vizsgálja besugárzás hatására, más részük komplex szerves molekulák (sokgyűrűs aromás szénhidrogének és aminosavak) degradációját méri különböző besugárzási paraméterek mellett.

A kísérletek jellegét érzékeltetendő, két példát mutatunk be első méréseinkből. A 6. *ábra* szén-dioxid-jég besugárzásának hatását mutatja az elérhető legalacsonyabb mintahőmérsékleten. Csak azt a tartományt mutatjuk, amelyben a besugárzás hatására megjelenő

8. *ábra.* Reakciócsatornák az ionokkal bombázott metanoljégben [1].



7. *ábra.* Koncentrációváltozások 20 K hőmérsékletű metanoljégben az 1 MeV energiájú protonok dózisének növekedésével. A dózisteljesítmény különös egysége (eV/oxigénatom-tömeg) a sugárkémia-ban széles körben használatos. Itt a 120 eV/16u dózis  $4 \cdot 10^{15}$  ion becsapódásának felel meg négyzetcentiméterenként [1].

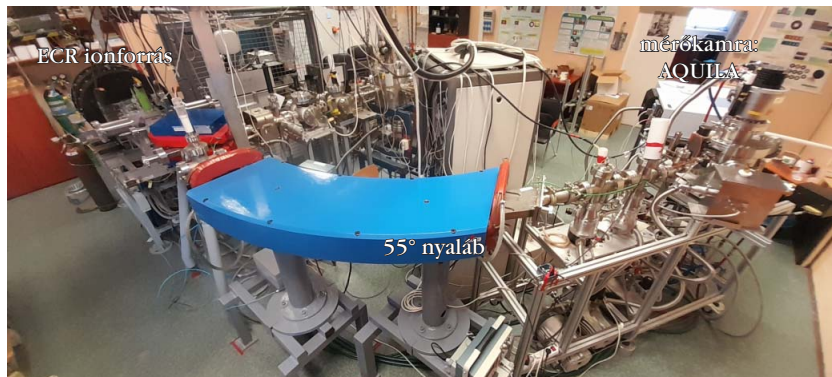
termékek abszorpciós vonalai láthatók, maga a szén-dioxid-csúcs ezeknél sokkal nagyobb amplitúdójú. A csúcsok területe (közelítőleg amplitúdója is) a termékek koncentrációjával arányos. Az *ábra* nagyon jól demonstrálja, hogy a besugárzás hatására létrejövő molekulaszintézis, amely gázokban nagyon kis valószínűségű folyamat, jegekben nem valami különleges, ritka kivétel, hanem szabályszerűen megjelenik. Az *ábra* három csúcsa közül csak a CO-csúcs felel meg az eredeti CO<sub>2</sub>-molekula széttörésének, *fragmentációjának*. A másik két csúcs már olyan molekulákat jelez, amelyek csak fragmentumok egyesülésével jöhetnek létre.

A 7. *ábrán* a 20 K hőmérsékletű metanoljégben létrejövő változásokat követhetjük az 1 MeV energiájú protonok dózisének növekedésével, a 8. *ábrán* pedig a reakciócsatornák térképét az ionokkal bombázott metanoljégben. Itt a fragmentumok keletkezése a domináns folyamat. Az is megfigyelhető, hogy a kis dózisoknál megjelenő termékek egy része nagyobb dózisoknál maga is fogyni kezd (például CH<sub>4</sub>).

A 2. *ábrából* jól látható, hogy az ECR-ionforrás energiatartománya oda esik, ahol a Napból áramló ionok intenzitása, a napszél a legintenzívebb. Ezért az ECR mellett 2022 szeptemberében üzembe helyeztük az eredetileg a QUB-ban, a jegek ionbombázással történő porlasztásának vizsgálatára kifejlesztett és az ATOMKI-ban komplex mérőállomássá alakított mérőegytést. AQUILA nevet (ATOMKI – Queens University Ion-beam Laboratory for Astrochemistry) kapta, és különösen nagy szerepet szánunk neki a Naprendszeren belül zajló folyamatok laboratóriumi modellezésében. Végleges felépítése az ICA-kamrához nagyon hasonló, ezt is ugyanazok a besugárzási és detektálási funkciók jellemzik (9. *ábra*). A következő másfél évre az AQUILA-mérőegytésre már 9 progra-

munk van előjegyezve, ebből 6 külső felhasználókkal közös projekt.

A következő cikkben azokról a mérésekről lesz szó, amelyeket az Európai Űrügynökség (ESA) által 2023 áprilisában indított JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer) misszió [13] tervei ihlettek. A Jupiter környezetét vesszük majd szemügyre, és olyan, már publikált méréseinket ismertetjük, amelyek eredményei értékesek lehetnek a JUICE-misszió számára.



9. ábra. A napszél ionenergia-tartományában végzett besugárzások mérőhelye (AQUILA), az ECR-ionforrásnál [12].

## Irodalom

1. Herczku P., Mifsud D. V., Ioppolo S., Juhász Z., Kaňuchová Z., Kovács S. T. S., Traspas Muña A., Hailey P. A., Rajta I., Vajda I., Mason N. J., McCullough R. W., Paripás B., Sulik B.: The Ice Chamber for Astrophysics-Astrochemistry (ICA): A new experimental facility for ion impact studies of astrophysical ice analogs. *Rev. Sci. Instr.* 92 (2021) 084501.
2. Brett A. McGuire: 2021 Census of Interstellar, Circumstellar, Extragalactic, Protoplanetary Disk, and Exoplanetary Molecules. *ApJS* 259 (2022) 30, DOI 10.3847/1538-4365/ac2a48
3. Arumainayagam, C. R. et al.: Extraterrestrial prebiotic molecules: photochemistry vs. radiation chemistry of interstellar ices. *Chem. Soc. Rev.* 48 (2019) 2293.
4. Rothard, H. et al., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 50 (2017) 062001.
5. Mewaldt, R. A. et al.: Long-term fluences of energetic particles in the heliosphere. *AIP Conference Proceedings* 598 (2001) 165; <https://doi.org/10.1063/1.1433995>
6. <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/fluences/HeOfFeFluences.jpg>
7. Biri S., Rác Z., Gyürky Gy., Fülöp Zs., Juhász Z., Sulik B., Mifsud D.: Astrophysics, astrochemistry and laboratory space research with particle accelerators. *Giants – Gruppi Italiani di Astrofisica Nucleare Teorica e Sperimentale* 13 (2021) 9–12.
8. <https://www.europlanet-society.org/europlanet-2024-ri-facts-and-figures/>
9. <https://www.europlanet-society.org/europlanet-2024-ri/ta2-dplf/ta2-facility-11-atomki-ice-chamber-for-astrophysics-astrochemistry-ica/>
10. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Lambert-Beer-törvény>
11. [https://hu.wikipedia.org/wiki/Fourier-transzformációs\\_infra\\_vörös\\_spektroszkópia](https://hu.wikipedia.org/wiki/Fourier-transzformációs_infra_vörös_spektroszkópia)
12. <https://www.europlanet-society.org/europlanet-2024-ri/ta2-dplf/ta2-facility-12-atomki-ecris-laboratory/>
13. [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Juice](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Juice)

# LABORATÓRIUMI ASZTROKÉMIAI VIZSGÁLATOK A JUPITER JEGES HOLDJAIT FELDERÍTŐ JUICE-MISSZIÓ JEGYÉBEN

Juhász Zoltán,<sup>1</sup> Duncan V. Mifsud,<sup>1</sup> Herczku Péter,<sup>1</sup> Zuzana Kaňuchová<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Atommagkutató Intézet, Debrecen  
<sup>2</sup>Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, Szlovákia

A cikkben olyan laboratóriumi mérésekről lesz szó, amelyeket az Európai Űrügynökség (ESA) által nemrég indított JUICE-misszió (Jupiter Icy Moons Explorer [1]) tervei ihlettek. A méréseket az ATOMKI Tandetron-laboratóriumában végeztük, az előző cikkben leírt ICA (Ice Chamber for Astrophysics/Astrochemistry) nevű jeges mérőkamrában [2, 3]. A különböző összetételű jegeket kénionokkal, kéntartalmú jegeket

pedig elektronokkal bombáztuk, és az ennek hatására lezajló kémiai változásokat vizsgáltuk. A méréseket elsősorban az tette lehetővé, hogy a Tandetron-gyorsító kiválóan alkalmas nagy intenzitású kénionnyalábok előállítására széles energia- és töltésállapot-tartományban.

A következő részben először a Jupiter környezetét vesszük szemügyre, majd két olyan, már publikált, mérést ismertetünk, amelyek eredményei értékesek lehetnek a JUICE-misszió számára. A Jupiter jeges holdjain számos olyan folyamat zajlik, amely a Naprendszer kémiai fejlődését, evolúcióját meghatározza,

Ez a cikk a 2022. november 14-én a Magyar Tudomány Ünnepe alkalmából az MTA Székházban tartott Szegő Károly-emlékülésen elhangzott előadás rövidített változata.