

ELKH 2020. ÉVI BESZÁMOLÓ

Kiemelt tudományos eredmények

Kutatóintézet neve: **Atommagkutató Intézet (ATOMKI)**
Cím: 4026 Debrecen, Bem tér 18/c
Postafiók címe: 4001 Debrecen, Pf. 51.
Telefonszám: (52) 509 200
Honlap: www.atomki.hu
E-mail: director@atomki.hu

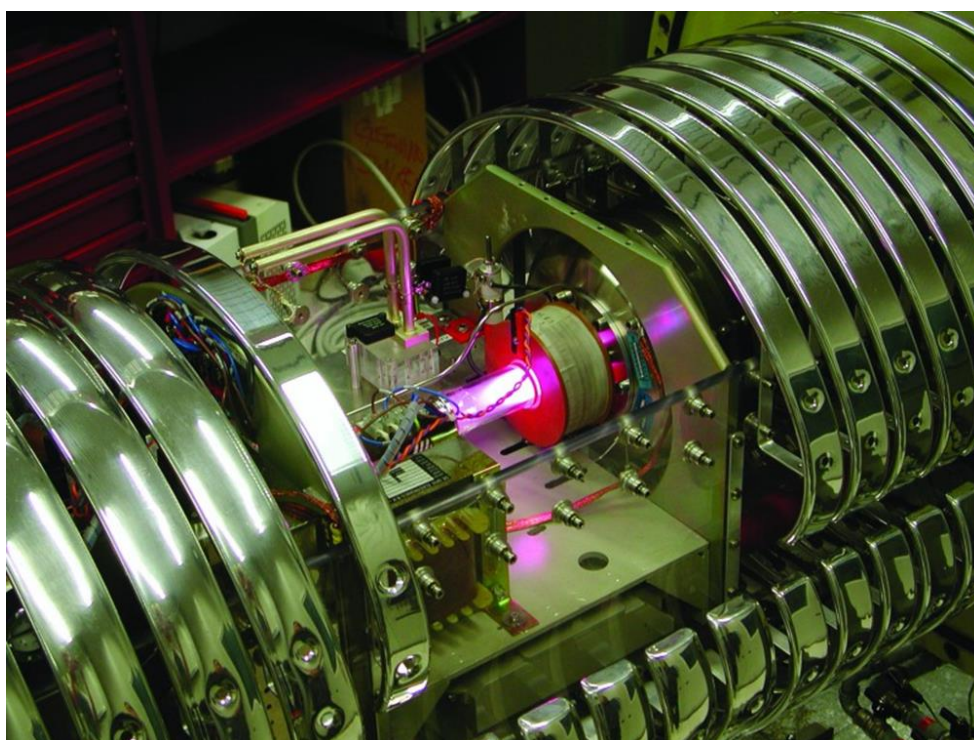
Tartalom

Az elemek keletkezésének nyomában	2
A stabilitási sávtól távol eső és a forgó atommagok szerkezete	4
Ultrahideg NaRb molekulák ütközéseinek optikai akadályozása	6
Szilícium napelem szeletek mikroszkopikus felületi szennyezettségének meghatározása	7
Szén-dioxidban gazdag természetes forrásvizek kutatása izotópos és elemanalitikai módszerekkel	8
Környezeti változások felderítése idős mézek szénizotópos és elemösszetétel vizsgálatával	10

Az elemek keletkezésének nyomában

(Energia: anyagszerkezet, űrkutatás)

Az Univerzum történetében a kémiai elemek létrejöttének első fázisa közvetlenül az ősrobbanás után játszódott le, amikor a legkönnyebb elemek, főként hidrogén és hélium keletkeztek. Ez az úgynevezett primordiális nukleoszintézis kozmológiai információt is hordoz, mint például a korai Univerzumra jellemző közönséges anyag sűrűsége (barionsűrűség). Az egyik, a Világegyetemben található deutérium gyakoriságát meghatározó magreakció a protonok és deutronok egyesülésekor a hélium egyik izotópját (^3He) termelő folyamat, amely eddig nem volt kellőképpen ismert. A **Tandetron Laboratórium Nukleáris Asztrofizikai Csoportja** a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics, lásd 1. ábra) nemzetközi együttműködés keretében elért új eredményei kiválóan egyeznek a mikrohullámú háttérsugárzás elemzéséből számított barionsűrűséggel. Ez az ősrobbanásmodellek helyességének fontos megerősítését jelenti [1].



1. ábra Csillagokban lejátszódó folyamatok vizsgálata a LUNA laboratóriumban

A csillagokban, így a Napunkban is lejátszódó energiatermelő proton-proton (p-p) lánc egyik kulcsreakciója a hélium két izotópjának (^3He és ^4He) egyesülésekor berilliumot termelő folyamat. A Nap hőmérsékletének megfelelő energiatartományban ezt a reakciót közvetlenül nagyon nehéz vagy nagyon nagy bizonytalansággal lehet tanulmányozni. Ezen a hőmérsékleten szerencsére olyan módon megy végbe a reakció, hogy lehetőség nyílik egy közvetett módszer alkalmazására. Ehhez az eljáráshoz folyamodva sikerült meghatározni a reakció lejátszódásának valószínűségét (hatáskeresztmetszetét) a Nap hőmérsékletének megfelelő energiatartományban [2].

A nehéz elemek, főként az igen ritka, úgynevezett p-magok kialakulásában fontos szerepet játszanak a hélium egyik izotópjának (^4He) részvételével zajló magreakciók. A csoport kutatói elsősorban az ATOMKI gyorsítóberendezéseinek végrehajtott méréseire hagyatkozva, egy alternatív eljárást javasoltak az ilyen reakciók valószínűségének (hatáskeresztmetszetének) számítására. Meglepő módon az egyszerű modelljük igen jól visszaadta számos reakció mért hatáskeresztmetszetét anélkül, hogy a paramétereket az adott reakcióra kellett volna hangolni. Ez nagy előnyt jelent az asztrofizikai modellekben korábban alkalmazott, igen bizonytalan modellek alkalmazásával szemben [3].

[1] V. Mossa et al. Z. Elekes, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky (50 szerző), *The baryon density of the Universe from an improved rate of deuterium burning*, Nature 587, 210 (2020)

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2878-4>

[2] G. G. Kiss, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, T. Szücs, Z. Halász, E. Somorjai, et al. (40 szerző), *Astrophysical S-factor for the $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reaction via the asymptotic normalization coefficient (ANC) method*, Physics Letters B 807, 135606 (2020)

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135606>

[3] P. Mohr, Zs. Fülöp, Gy. Gyürky, G. G. Kiss, and T. Szücs, *Successful Prediction of Total α -Induced Reaction Cross Sections at Astrophysically Relevant Sub-Coulomb Energies Using a Novel Approach*, Physical Review Letters 124, 252701 (2020)

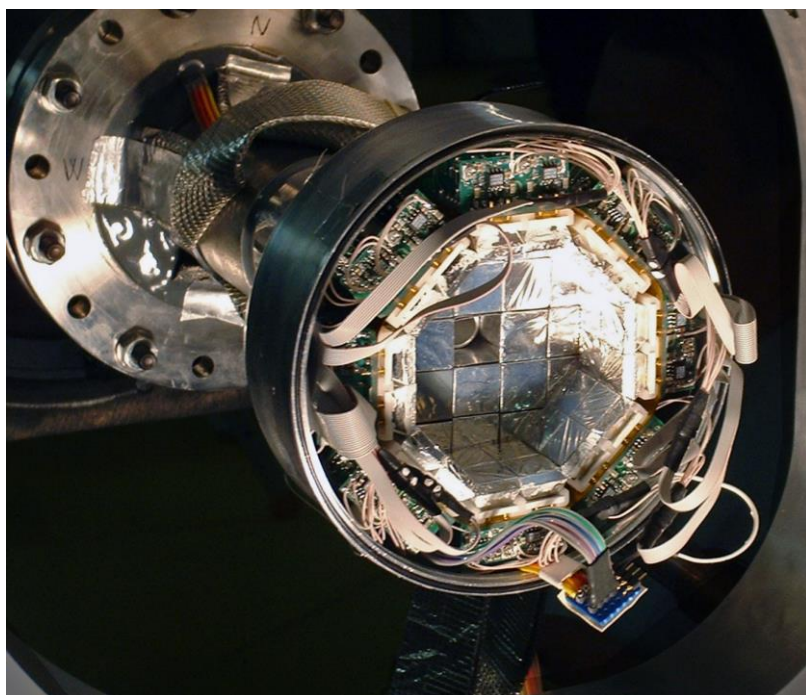
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.252701>

A stabilitási sávtól távol eső és a forgó atommagok szerkezete

(Energia: anyagszerkezet, energia)

A magreakciók során az atommagok gerjesztett állapotban állnak elő, ahonnan radioaktív bomlások, pl. gamma-sugárzás kibocsátásával jutnak az alapállapotba. Megmérve ezeknek a gamma-sugárzásoknak a tulajdonságait, fel tudjuk tárni a magállapotok jellemzőit, ezek segítségével pedig meg tudjuk határozni a vizsgált atommag szerkezetét. A **Magfizikai Laboratórium Magspektroszkópiai Csoportjának** kutatói nemzetközi együttműködésekben, bonyolult észlelőberendezéseket használva jelentős új eredményeket értek el az atommagok forgásának és a stabilitási sávtól távoli atommagok szerkezetének tanulmányozásában. Különleges mozgásformákat: a királítás új formáit, nagy gerjesztési energiákon megnövekedett oktupól korrelációt és speciális gamma-vibrációs forgási sávokat tártak fel a háromtengelyűen deformált, 120-130 protont és neutron tartalmazó atommagokban [4]. Számos erősen neutrontöbbletes atommagban kimutatták a neutron-illetve proton-héjak közötti energiakülönbségek jelentős csökkenését és emiatt a deformált magalakok megjelenését [5,6].

A proton-neutron párkölcsönhatásnak a ^{88}Ru atommagban történt kimutatásához [7] az AGATA és NEDA detektorrendszerek mellett felhasználták az elmúlt években az ATOMKI kutatói által továbbfejlesztett DIAMANT töltötttrészecske-detektorrendszert is (2. ábra). A magfizikában jól ismert, hogy a legkülső héjakon levő azonos nukleonok 0 spinű (egymással ellentétes irányba keringő) proton-proton illetve neutron-neutron párokat alkotnak. Régóta kérdés, hogy az atommagokban vannak-e protonból és neutronból álló maximális spinű, egymással azonos irányba keringő párok. Az ATOMKI kutatóinak részvételével korábban már sikerült kimutatni a maximális spinnel kapcsolt proton-neutron párok jelenlétét a gömbszerű ^{92}Pd atommag héjmodell-szerű állapotainak vizsgálatával. A ^{88}Ru atommagban a proton-neutron párok jelenlétének a deformált atommag forgási sávjára, a forgáshoz tartozó gerjesztett állapotok rendszerére való hatását sikerült kimutatni. A forgás során fellépő Coriolis-erő az egymással ellentétes irányba keringő párok esetén a két nukleonra ellentétes irányban hat, így elég nagy szögsebesség esetén szétszakítja a párt. Az egymással közel egy irányba keringő párok esetén az erők közel egyirányúak, ezért itt nagyobb szögsebesség kell a pár szétszakításához. A párok stabilitását sikerült nagy forgási sebességekig kimutatni a kísérletben.



2. ábra Az ATOMKI kutatói által üzemeltetett DIAMANT töltötttrészecske-detektorrendszer.

[4] S. Guo, I. Kuti, D. Sohler et al., (43 szerző), Evidence for pseudospin-chiral quartet bands in the presence of octupole correlations, Physics Letters B 807, 135572 (2020),

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135572>

[5] A. Revel, Zs. Dombrádi, Z. Elekes, I. Kuti, D. Sohler, L. Stuhl et al., (92 szerző), Extending the Southern Shore of the Island of Inversion to ^{28}F , Physical Review Letters 124 152502 (2020),

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.152502>

[6] M. Siciliano, I. Kuti, D. Sohler et al., (70 szerző), Pairing-quadrupole interplay in the neutron-deficient tin nuclei: First lifetime measurements of low-lying states in $^{106,108}\text{Sn}$, Physics Letters B 806 Paper: 135474 (2020),

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135474>

[7] B. Cederwall, I. Kuti, B. M. Nyakó, D. Sohler, J. Tímár et al., (71 szerző), Isospin Properties of Nuclear Pair Correlations from the Level Structure of the Self-Conjugate Nucleus ^{88}Ru , Phys. Rev. Lett. 124 062501 (2020)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.062501>

Ultrahideg NaRb molekulák ütközéseinek optikai akadályozása

(Digitalizáció: fizika, kvantumtechnológia)

Az ultrahideg atomi és molekuláris gázok esetén olyan fázisátalkulások (szuperfolyékonyság, szupravezetés) hozhatók létre, amelyeket korábban csak a jóval nagyobb részecskesűrűségű folyadékokban vagy szilárdtestben figyeltek meg. Ezen kvantumos jelenségek tanulmányozásában a jóval kisebb részecskeszám miatt a kvantumgázoknak igen fontos szerep jut. Az atomokhoz képest a molekulák jóval gazdagabb belső szerkezettel rendelkeznek, így külső manipulálásuk sokrétűbb. Alkalmazási területük a nagy felbontású molekulaspektroszkópián vagy az alapvető fizikai elméletekre irányuló precíziós méréseken túl az úgynevezett hideg kémián (a kémiai reakciók kvantumos szinten történő irányítása) keresztül a kvantumtechnológiáig terjed, például kvantuminformációs eszközök fejlesztésében, a kvantum-összefonódás tesztelésében, kvantumszimulátorként vagy a kvantumszámítógépek megvalósításában van szerepük.

Az elmúlt időszakban ezen molekuláris gázok létrehozásában és csapdázásában jelentős előrelépések történtek, azonban a kvantum alkalmazásokhoz szükséges részecskeszámot nem sikerült kellően hosszú ideig fenntartani. Ultrahideg, poláris, bialkáli alapállapotú molekulák esetén a kísérleti tapasztalat az, hogy ezen csapdázott molekulákat relatíve rövid ideig lehet tárolni még azokban az esetekben is, amikor alapállapotban nem reaktívak.

Az **Atom- és Molekulafizikai Laboratórium**, a Paris-Saclay és a Burgundiai Egyetem kutatói a reaktív folyamatok csökkentésére egy optikai árnyékolási eljárást javasoltak, amelynek során az ütköző alapállapotú molekulákat lézer segítségével egy taszító molekula-komplex állapottal csatolják össze. Ennek hatására az ütköző molekulák távolodnak egymástól, ezáltal a reaktív folyamatok valószínűsége csökken, így az eredetileg csapdázott részecskeszámot konzerválni lehet megőrizve a molekulák kezdeti belső kvantumállapotát. Ezen árnyékolási eljárásra vonatkozó számításokat az $^{23}\text{Na}^{87}\text{Rb}$ bozonikus molekulák esetén végezték el. Számításaik azt mutatják, hogy jelentősen csökkenteni lehet a reaktív folyamatok létrejöttének valószínűségét, és az árnyékolás hatékonysága független a fény polarizációjától. A javasolt eljárás más, erős dipól momentummal rendelkező, bialkáli molekulák esetén is alkalmazható [8].

[8] Xie T., Lepers M., Vexiau R., Orbán A., Dulieu O., Bouloufa-Maafa N., Optical Shielding of Destructive Chemical Reactions between Ultracold Ground-State NaRb Molecules, Physical Review Letters 125, 153202 (2020)

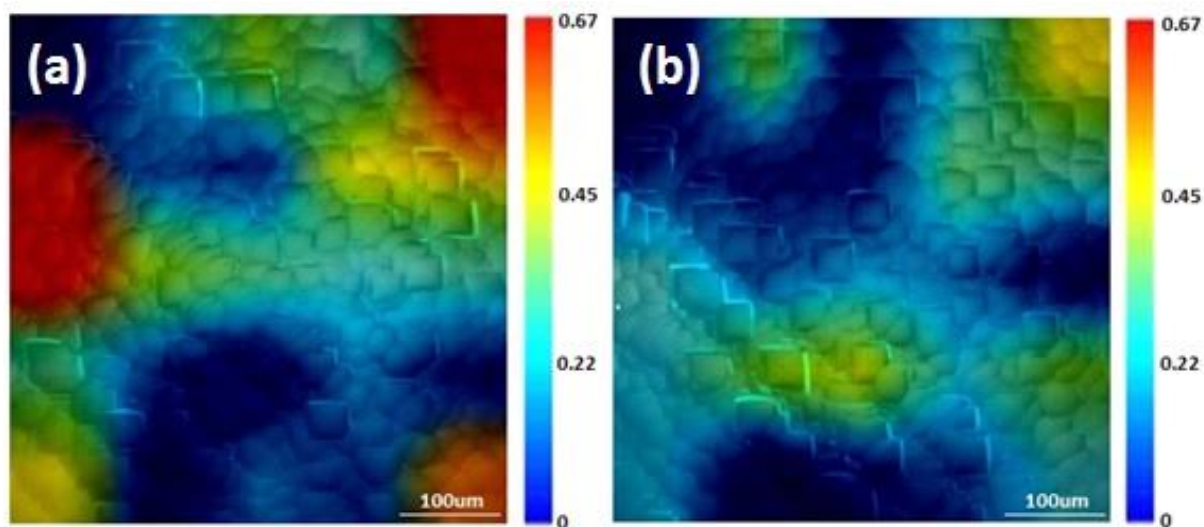
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.153202>

Szilícium napelem szeletek mikroszkopikus felületi szennyezettségének meghatározása

(Energia: az anyagszerkezet, energia)

A napelemek minőségét több más paraméter mellett a konverziós hatásfok is jellemzi. A konverziós hatásfok megadja, hogy a napelem felületét érő napenergia hány százaléka alakul át elektromos energiává. A gyártó és fejlesztő cégek nagy hangsúlyt fektetnek a konverziós hatásfok növelésére, mivel az egyúttal a napelem teljesítményének növelését is jelenti.

A szilícium monokristályos napelem cellák alapjául szolgáló szilícium lemezeket a félvezetőiparban alkalmazott szokásos technológiai eljárásnak megfelelően mechanikai szeleteléssel készítik szilícium kristálytömbből. A szeletelést fém vágókorongokkal végzik, ami a szeletek felületének az elszennyezéséhez vezet. A vágókorongból származó szennyezés eltávolítására a szeletelés után vegyszereket alkalmaznak. Ez a felülettisztítás azonban nem tökéletes folyamat, a tisztítás után is marad még némi felületi szennyeződés a Si szeleteken. Napelemek esetében ez hangsúlyozottan káros, mert jelentős konverziós hatásfok csökkenést okoz, még ppb nagyságrendű felületi szennyeződés esetén is (1 ppb szennyeződési szint azt jelenti, hogy minden 10^9 felületi atomra jut egy szennyező atom). Ezért a felületi tisztaság fontos követelmény. Az ilyen alacsony szintű szennyeződés kimutatása azonban nem egyszerű feladat. Az **Anyagtudományi Laboratórium** és a belgiumi IMEC intézet kutatóinak azonban sikerült kidolgozni egy eljárást [9], mellyel megmérték a tisztítás után maradt felületi szennyeződés mértékét, azonosítani tudták a szennyező elemeket és a szennyező elemek felületi eloszlását oly módon, hogy a felület kis területének egy vékony rétegét lézernyalábbal eltávolították és tömegspektrométerrel analizálták (3. ábra).



3. ábra. Tisztítás utáni maradék felületi réz szennyező laterális eloszlása Si napelemcellák $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ területén. A felületi szennyeződés mértéke (a) 1000 ppb, (b) 30 ppb volt.

Az intenzitás skála a ^{63}Cu izotóp intenzitását mutatja. A vörös szín nagyobb intenzitást, a kék szín alacsonyabb intenzitást jelent. A szennyezőelem foltos elhelyezkedése jól mutatja, hogy a szennyező elem nem a 20-30 μm skálájú négyzetes felületi durvasághoz kötődik, hanem nagyobb méretű felületi inhomogenitásokhoz.

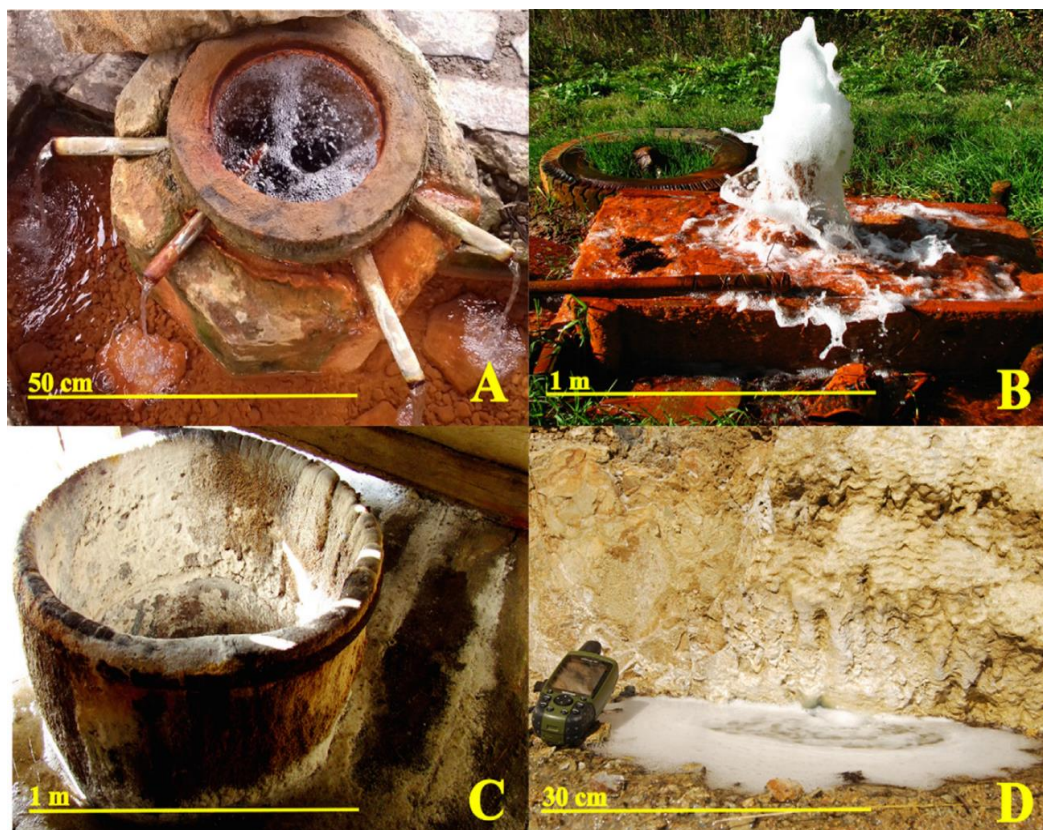
[9] M. Soha, M. Braun, V. Takáts, J. Hakl, T. Fodor, Á. Braun, I. Szabó, M. Haslinger, J. John, K. Vad, Investigation of ppb-level surface contamination of n-type silicon solar cells, Applied Surface Science 520, 146299 (2020)

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146299>

Szén-dioxidban gazdag természetes forrásvizek kutatása izotópos és elemanalitikai módszerekkel

(Környezet és biztonság: környezet)

A Keleti-Kárpátok neogén és a negyedidőszaki vulkáni láncolata a természetes erőforrások változatos terepe, mely különféle ásványvizeknek ad otthont. Ezek többsége különböző típusú szén-dioxidban gazdag, természetes forrás formájában jelenik meg, amely a CO₂ kibocsátással jár. A vizek eredetének és a megfigyelt fizikai-kémiai tulajdonságokért felelős természetes folyamatoknak a megértése, valamint a hidrogeológiai rendszer sérülékenységének, a környezeti változásoknak és lehetséges szennyeződéseknek való kitettségének a meghatározása érdekében az **Izotópklimatológiai Laboratórium** részt vett 121 ásványvízforrás és kút vizsgálatában [10]. Az elvégzett vizsgálatok betekintést nyújtottak a vizek eredetét, kémiai összetételét befolyásoló folyamatokba, amelyek kémiai és izotópos összetételek széles skálájához vezettek (4. ábra). A terület földtani felépítésének sokfélesége, az átalakulási folyamatok és a CO₂-vel való kölcsönhatás magyarázza a vizsgált vizek hidrogeokémiai fáciesének változatosságát (5. ábra). Három fő hidrogeokémiai típust azonosítottak, amelyek a vizsgálati terület geológiai változatosságának és a víz/közet kölcsönhatásának az eredményei: Ca – Na – Mg – HCO₃, Ca – Na – Mg / Na – Ca ± Mg – HCO₃ – Cl ± SO₄, és Na – Cl vizek. A geokémiai jellemzők további változásai a különböző víztípusok feláramlása során bekövetkező keveredésnek tulajdoníthatók, amelyet a terület tektonikai beállítása fokoz. Figyelembe véve a vizek izotópos összetételét ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), többségük csapadék (meteorikus) eredetűnek bizonyult. A nehezebb izotópokban dúsult vizek esetén extrém izotóp eltolódást figyeltek meg 11 minta esetén. Ezeket a bedúsulásokat a víz agyagásványokkal való kölcsönhatásának és a diagenézisnek tulajdonították. Mivel ezen vizek többsége meteorikus eredetű, felszínre kerülésüket meteorológiai tényezők is befolyásolhatják. A víztartó rétegek keveredése nagyon sekély vizekkel valószínűleg megkönnyíti a külső szennyeződésnek való kitettségüket.



4. ábra Vas-oxi-hidroxidban gazdag szén-dioxidos vizek felszínre bukkanásai a Keleti-Kárpátokban.

[10] Boglárka-Mercedesz Kis, Călin Baci, Andreea-Rebeka Zsigmond, Ladislau Kékedy-Nagy, Krisztina Kármán, László Palcsu, István Máthé, Szabolcs Harangi, Constraints on the hydrogeochemistry and origin of the CO₂-rich mineral waters from the Eastern Carpathians – Transylvanian Basin boundary (Romania), *Journal of Hydrology* 591, 125311 (2020)

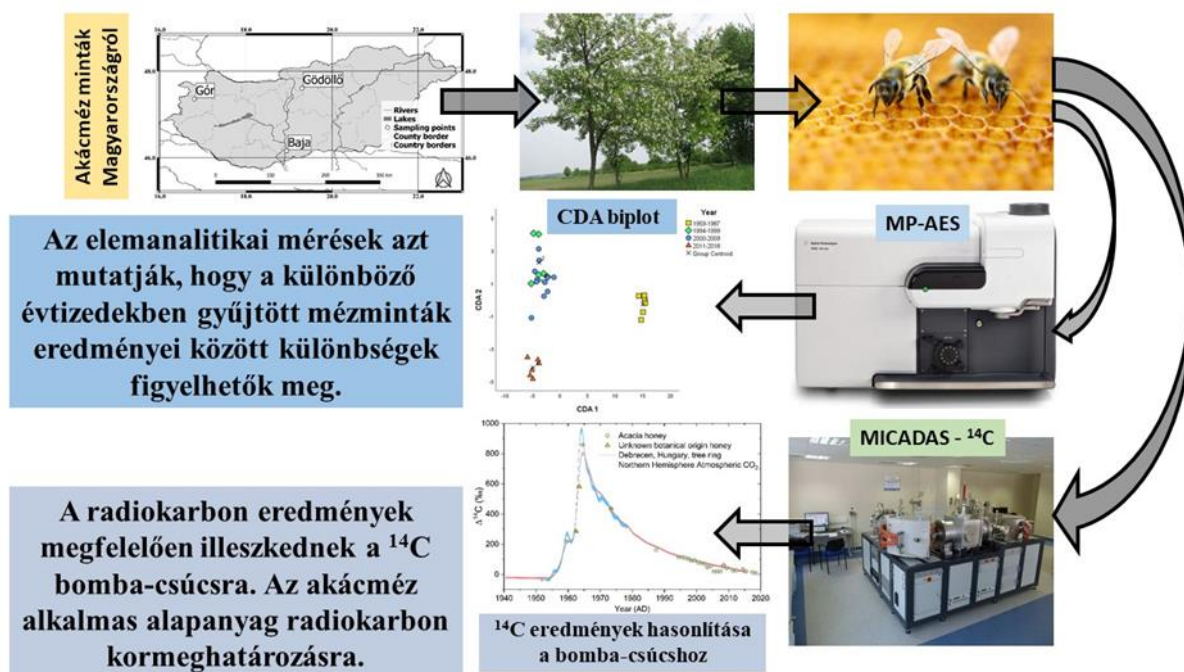
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125311>

Környezeti változások felderítése idős mézek szénizotópos és elemösszetétel vizsgálatával

(Környezet és biztonság: környezet)

A mézek minősége és elemösszetétele nagyban függ a környezeti és földrajzi körülményektől, amit számos nemzetközi tanulmány is alátámasztott már. Izotópanalitikai vizsgálatok korábban rámutattak arra, hogy a mézekben botanikai és geográfiai eredetre utaló mintázatokat lehet felismerni. Egyes nyomelemek aránya jellemző és eltérő lehet a különböző típusú növények nektárjából származó mézekre, illetve szén stabilizotóp-arány mérésekkel a mézhamisítás is kimutatható.

A természetes és az emberi hatásra bekövetkező környezeti változások nyomot hagyhatnak egy adott területről származó méz összetételének alakulásában az évtizedek során. Ennek felderítésére a **Radiokarbon Kompetencia Központ** kutatói egy egyedülálló hazai mézgyűjtemény segítségével az elmúlt több, mint fél évszázadra visszamenően (1958-2018) különböző évekből származó mézminták elemösszetétel és szénizotópos összehasonlító vizsgálatát végezték el [11]. Huszonhat ismert korú tiszta akácméz és további három vegyesméz minta nyomelemtartalmát határozták meg mikrohullámú plazma atomemissziós spektrometriás (MP-AES) módszerrel. A mézek származási évjáratának független igazolását az elmúlt évszázadra nagy érzékenységgel alkalmazható „légköri bombacsúcs-alapú” radiokarbon (^{14}C) kormeghatározással végezték el. Az ismert korú minták ^{14}C izotópos méréseivel így elsőként tudták igazolni, hogy a méhek által gyűjtött akácméz, illetve az abból készült termékek akár éves felbontású radiokarbon kormeghatározásra is alkalmasak (5. ábra).



5. ábra Az előkészítéstől a mérésen át az eredményekig: az alkalmazott elemanalitikai és a ^{14}C módszertan folyamatábrája.

Eredményeik alapján a vizsgált akácméz nyomelemösszetétele szignifikáns változást mutatott az elmúlt hat évtizedben. Egyes elemek a korábbi évek akácmézeiben még fellelhetők voltak (cink és ólom), viszont a jelenkori mézekben már alig vannak jelen, míg például a bór koncentrációja az 1990-es évek elejétől emelkedő tendenciát mutatott a vizsgált mintákban.

Bizonyítást nyert, hogy az akácméz szénizotópos összetétele és nyomelemtartalma megőrzi a begyűjtés idejére jellemző értékeket, így alkalmas indikátor lehet a múltbeli környezeti változások és

hatások (pl. szennyezési események, csapadékviszony alakulások, helyi- vagy regionális ipari és mezőgazdasági hatások) kimutatására, akár utólag is. Bemutatták, hogy a tiszta akácméz radiokarbon kormeghatározásra is alkalmas, így akár komplex biológiai-, élelmezési-, környezeti- valamint régészeti célú kutatásokhoz is felhasználható. Egyes minták esetében kimutatható volt a fosszilis CO₂ kibocsátás radiokarbon-tartalmat hígító hatása, így akár a városi, illetve ipari forrásokhoz köthető légköri üvegházhatású gázok kutatásába is bevonható.

Ezek a vizsgálatok nem pusztán kutatási célt szolgálnak, hanem gazdasági vonatkozásuk is jelentős lehet, mivel a méz kiemelt import és export termék a nemzetközi élelmezésben.

[11] Tamás Varga, Zsófi Sajtos, Zita Gajdos, A J Timothy Jull, Mihály Molnár, Edina Baranyai, Honey as an indicator of long-term environmental changes: MP-AES analysis coupled with ¹⁴C-based age determination of Hungarian honey samples, Science of the Total Environment 736, 139686 (2020)

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139686>