
Kormánytájékoztató az ATOMKI (Atommagkutató Intézet) 2023. évi eredményeiről

Tartalom

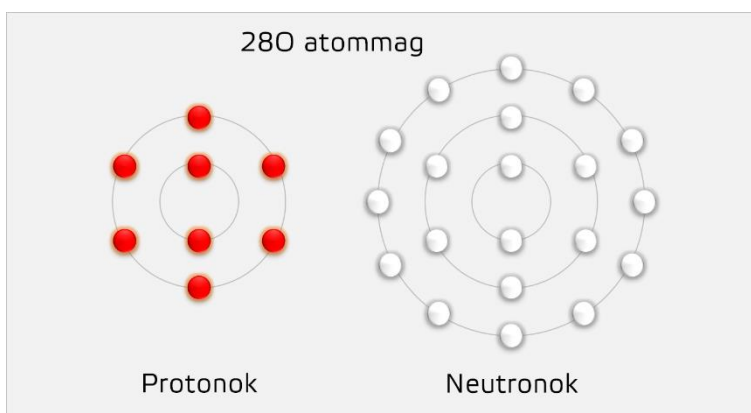
A 28-as tömegszámú oxigén atommag felfedezése	2
A ¹² C atommag protonbefogási hatáskeresztmetszetének átfogó vizsgálata	3
Kvantumállapotok és mérések hitelesítése preparálj-és-mérj elrendezésben.....	4
Légköri aeroszol szennyezés alakulása a COVID-19 válság előtt és alatt Debrecenben	5

A 28-as tömegszámú oxigén atommag felfedezése

Az atommagfizika egyik alapvető modellje, a héjmodell szerint az atommagban lévő protonok és neutronok különböző energiaszinteken helyezkednek el, melyek héjakba csoportosulnak hasonlóan ahhoz, ahogy az atommagok körül keringő elektronok elektronhéjakat alkotnak. Ezekon a héjakon a kvantumfizika törvényei szerint csak meghatározott számú neutron vagy proton helyezkedhet el. Ha egy atommagban minden héj teljesen betöltött, azaz zárt, akkor az atommag különösen stabil szerkezettel rendelkezik, ami általában gömbszerű alakkal jár együtt. A minket körülvevő atommagokban a zárt héjakhoz tartozó 2, 8, 20, 28, 50 és 82 kitüntetett proton- vagy neutronszámokat Wigner Jenő magyar származású Nobel-díjas fizikus után mágikus számoknak nevezzük. Az ilyen számú protont vagy neutront tartalmazó, nemesgázszerű atommagot mágikus atommagnak hívjuk. Ha a protonok és neutronok száma is mágikus, akkor az atommag kétszeresen mágikus. Az ilyen atommagok kiemelkedő szerepet játszanak az elméleti magmodellek fejlesztésében, tesztelésében, ezért kísérleti azonosításuk a legújabb kutatásoknak is az egyik elsődleges célja.

Az oxigén a periódusos rendszer nyolcadik eleme, atommagja 8 darab protont tartalmaz, zárt proton héjjal rendelkezik. A különböző oxigénizotópokban a 8 proton mellett különböző számú neutron található. A természetben előforduló oxigén leggyakoribb izotópja a tizenhatos tömegszámú ^{16}O . Ez az atommag a 8 protonon kívül 8 neutront foglal magába, tehát a zárt proton héj mellett zárt neutron héjjal is rendelkezik, így kétszeresen mágikus, kiemelkedően stabil szerkezetű. A debreceni HUN-REN Atommagkutató Intézet (HUN-REN ATOMKI) **Kísérleti Magfizikai Csoport** kutatói nemzetközi együttműködésben vesznek részt az oxigénizotópok kutatásában radioaktív ionnyalábokon végzett kísérletekben, amelyekhez az észlelőberendezések és a kiolvasó elektronika megtervezésével, megépítésével, a működésüket tesztelő szimulációs számításokkal, a mérési berendezés összeállításával és a kísérletek végrehajtásával járultak hozzá. A legújabb generációs részecskegyorsító berendezések lehetővé teszik a hétköznapi világunkon túli, extrém nagy neutrons számú oxigénizotópok előállítását és azok szerkezetének különleges körülmények között történő tanulmányozását. A HUN-REN ATOMKI Kísérleti Magfizikai Csoport kutatói korábban a franciaországi GANIL nemzeti laboratóriumban megmutatták, hogy a 16 neutront tartalmazó ^{24}O kétszermágikus tulajdonságokkal rendelkezik, most pedig a japán RIKEN részecskegyorsító centrumban nemzetközi együttműködés keretében elvégzett kísérletben a 8 protont és 20 neutront tartalmazó (1. ábra), így kétszeresen mágikusnak várt ^{28}O izotópot állították elő. Ez a legnagyobb neutrons szám/protons szám arányú ($20/8 = 2,5$) oxigén atommag, amit kísérletileg még létre lehet hozni. A kísérlet eredményeként arra a meglepő következtetésre jutottak, hogy az ^{28}O atommag a várakozásokkal ellentétben nem kétszeresen mágikus, nem mutat nemesgázszerű szerkezetet. Ezek az eredmények arra mutatnak rá, hogy extrém sok neutront tartalmazó atommagok esetében az atommagmodellek jóslatai nem megbízhatóak, azok további finomítása szükséges. A tanulmány a legrangosabb tudományos folyóiratában, a Nature-ben jelent meg.

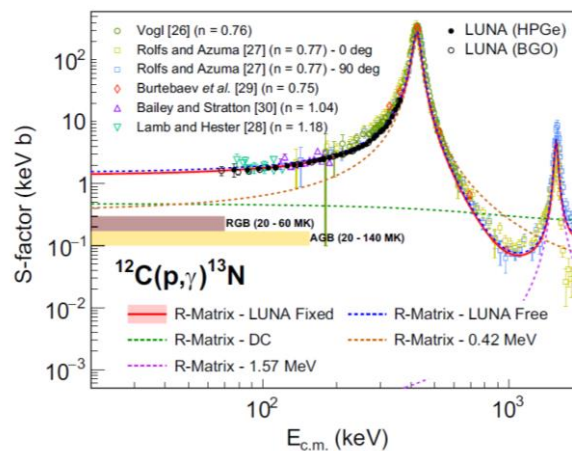
Y. Kondo et al., (100 szerző): *First Observation of ^{28}O* , Nature **620**, 7976 (2023) 965.



1. ábra: Az ^{28}O atommag szerkezete

A ^{12}C atommag protonbefogási hatáskeresztmetszetének átfogó vizsgálata

A Napunk és a Napunkhoz hasonló csillagok energiatermelése a hidrogén-égés folyamatainak keresztül zajlik. A folyamat során négy proton egy hélium maggá egyesül, a kötési energia-különbség pedig felszabadul. A csillag tömegének és összetételének függvényében a hidrogén-égés a proton-proton (p-p) láncok vagy a szén-nitrogén-oxigén (CNO) körfolyamatok révén mehet végbe. A CNO ciklus első lépése, hogy egy hat protont és ugyanennyi neutronból álló szén (^{12}C) atommag egy protont befogva hét protonból és hat neutronból álló nitrogén (^{13}N) maggá alakul. A létrejövő nitrogén mag a béta-bomlással szemben instabil, mintegy 10 perces felezési idővel hat protonból és hét neutronból álló szén (^{13}C) atommaggá alakul. A bomlást neutrínó kibocsátás kíséri. Napjainkban csúcs technológiáját használó detektorokkal végzett mérések eredményeként ezen kulcsfontosságú neutrínók hozama már néhány százalék pontossággal ismert. Amennyiben ezzel összemérhető pontossággal ismernénk a ^{12}C mag proton befogásának a valószínűségét (azaz hatáskeresztmetszetét) a Nap hőmérsékletének megfelelő energiatarományban akkor a neutrínó detektorok adatait felhasználva precízen meghatározhatnánk a Nap összetételét. Napunk belsejében ugyanakkor a kölcsönható protonok és ^{12}C magok energiája lényegesen alacsonyabb, mint a köztük fennálló Coulomb tasztítás ezért a proton-befogási folyamat rendkívül kis valószínűséggel, kizárólag a kvantummechanikai alagúteffektus révén mehet végbe.



1. ábra: A ^{12}C mag protonbefogásának valószínűsége (asztrfizikai S-faktor egységben) a kölcsönható magok energiájának függvényében.

A reakció asztrfizikai fontossága miatt LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics = Földalatti laboratórium nukleáris asztrfizika vizsgálatokhoz) együttműködés tagjai célul tűzték ki a reakció parciális hatáskeresztmetszeteinek meghatározását a releváns energiatarományban a kibocsátott gamma sugárzás hozamának mérésével [1]. A kísérlethez a céltárgyak a HUN-REN Atommagkutató Intézetben (ATOMKI) készültek. A **Nukleáris Asztrfizika Csoport** tagjai által ionnyaláb analitikai technikákkal a targetek tulajdonságai is meghatározásra kerültek. A reakció rezonanciáinak pontos paramétereinek, valamint a teljes reakció hatáskeresztmetszetnek a béta-bomlás során kibocsátott pozitron annihilációjának mérésével való meghatározása az ATOMKI Tandetron gyorsítójával történt [2,3] a nukleáris Asztrfizika Csoport tagjai által.

Mindezen munkák eredményeként első alkalommal sikerült megmérni a ^{12}C atommag protonbefogási hatáskeresztmetszetét az asztrfizikailag releváns energiatarományban. A származtatott reakciósebesség értékek bizonytalansága mindössze 4-6% szemben a rendelkezésre álló, magasabb energiás mérések alapján számított adatok 30%-t meghaladó bizonytalanságával. Az eredmények az 1. ábrán láthatóak. Az új kísérleti adatok fontos lépést jelentenek Napunk összetételének pontosabb meghatározása felé, valamint megmagyarázzák a molekuláris ködök $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ arányának Naprendszerünkől eltérő értékének okát [1].

[1] J. Skowronski *et al.*, (46 szerző): *Proton-Capture Rates on Carbon Isotopes and Their Impact on the Astrophysical $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ Ratio*, Phys. Rev. Lett. **131**, 162701 (2023)

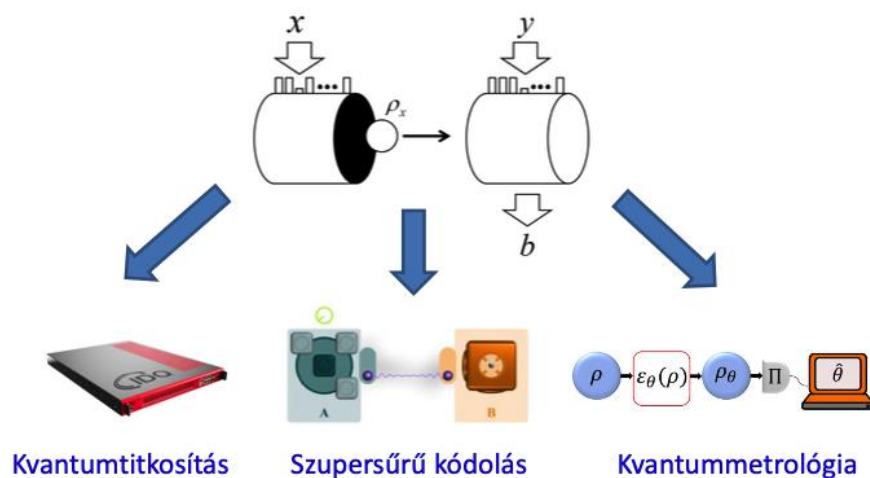
[2] Gy. Gyürky *et al.*, (6 szerző): *Cross section measurement of the $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ reaction with activation in a wide energy range*, Eur. Phys. J. A **59** 59 (2023)

[3] L. Csedreki *et al.*, (3 szerző): *Precise resonance parameter measurement in the $^{12}\text{C}(p,\gamma)^{13}\text{N}$ astrophysically important reaction*, Nuclear Physics A **1037** 122705 (2023)

Kvantumállapotok és mérések hitelesítése preparálj-és-mérj elrendezésben

A piacon már elérhető, illetve a jövőben megjelenő kvantum eszközök bizonyos feladatok elvégzésére jóval hatékonyabbak, mint a hagyományos eszközök, és olyan problémák megoldását ígérik, amelyek klasszikus módszerekkel nem, vagy csak nagyon hosszú idő alatt oldhatók meg. Az eszközt használó felhasználónak jogos igénye lehet, hogy meg tudja bizonyosodni arról, hogy az eszköz az elvárt módon működik különösen, ha a gyártóban nem bízunk meg. Gyakran ki lehet dolgozni olyan hitelesítési eljárásokat, amelyekkel ezt megteheti anélkül, hogy az eszköz pontos működésével tisztában lenne. Elegendő lehet az eszköznek különféle bemeneti értékekre adott válaszainak a statisztikai elemzése, kiegészítve esetleg valamilyen csekély feltevessel az eszközről. Kvantumfizikai kísérletekben tipikus elrendezésben egy forrás részecskét bocsát ki a beállításától függő állapotban (preparálás), melyen ezután valamilyen, a műszer beállításától függő mérést végeznek. Ez az úgynevezett preparálj-és-mérj (PM) elrendezés számos olyan protokollban is szerepet játszhat, amely kvantum eszköz alapjául szolgál, ilyen például kvantumkulcsok elosztása titkosítási eljárásoknál, a szupersűrű kódolás, valódi véletlen számok előállítás, vagy a kvantummetrológia (ld. ábra). Az Intézet munkatársai a PM elrendezés számos aspektusát vizsgálták, beleértve a hitelesítés kérdéskörét is, a témakörben nemzetközileg jelentős eredményeket értek el. Több cikkük megjelent, vagy készülóban van. A Physical Review Letters folyóiratban a közelmúltban megjelent cikk Ausztriában, illetve Spanyolországban dolgozó kutatókkal együttműködve készült. A munka módját ad tiszta állapotok bármilyen halmazának a hitelesítésére a PM scenárió keretén belül több mint két állapotú, azaz több mint kétdimenziós kvantumrendszerek esetén is, feltéve, hogy a dimenziószám ismert. Korábbi cikkek vagy kétdimenziós rendszerekre, azaz kvantumbitekerekre, vagy nagyon speciális halmazokra korlátozódtak. A szerzők olyan kifejezést adtak meg, amely az állapothalmazon elvégzett alkalmas mérések eredményeiből számítható ki, és amely értékét az illető állapotok maximalizálják. Ha a kifejezés értéke egy ismeretlen (de megfelelő dimenziószámú) állapothalmaz esetén maximális értékű, az biztosítja, hogy a tagjainak a páronkénti átfedéseinek az abszolút értéke minden párra megegyezik a kívánt állapothalmazbeli értékekkel. Kétdimenziós esetben ebből következik, hogy az ismeretlen halmaz egy globális szimetriatranszformációtól eltekintve azonos a kívánt halmazzal, ami elegendő a hitelesítéshez. Több mint két dimenzió esetén ez sajnos többnyire nem igaz. Wigner tételének egy a véges méretű halmazokra való általánosításával sikerült elérni, hogy a hitelesítendő halmaznak újabb állapotokkal való kiterjesztésével a hitelesítés mégis elvégezhető legyen. A cikk további eredménye, hogy a tetszőleges állapothalmaz hitelesítésének lehetőségét felhasználva megmutatta, hogyan lehet magasabb dimenziós állapotokon végzett általánosított méréseket hitelesíteni. A cikkben bemutatott elméleti módszerek hasznosulhatnak jövőbeli kvantum eszközök hitelesítésében.

Miguel Navascués, **Károly F. Pál**, **Tamás Vértesi**, and Mateus Araújo: *Self-Testing in Prepare-and-Measure Scenarios and a Robust Version of Wigner's Theorem*, Phys. Rev. Lett. **131**, 250802 (2023).



Légköri aeroszol szennyezés alakulása a COVID-19 válság előtt és alatt Debrecenben

Napjainkban a légköri aeroszol, vagy hétköznapi nevén szálló por (PM) szennyezés a legnagyobb környezeti egészségügyi kockázat Európában. A legfrissebb adatok szerint az EU városi lakosságának 97%-a van kitéve az Egészségügyi Világszervezet legutóbbi határértékeit meghaladó PM_{2.5} koncentrációnak (2,5 µm-nél kisebb átmérőjű részecskék). Az aeroszol terhelés csökkentése és a levegő minőségének a javítása kormány és a társadalom egyik fontos célja.

A COVID-19 világjárvány miatti lezárások és korlátozások egy egyedülálló lehetőséget teremtettek a városi levegőminőség változásának tanulmányozására egy olyan időszakban, amikor az antropogén eredetű kibocsátás jelentősen csökkent.

A HUN-REN Atommagkutató Intézet (ATOMKI) **Örökségtudományi Csoportjában** végzett munka célja az volt, hogy tanulmányozzák és megértsék az aeroszolszennyezés és más levegőminőségi paraméterek változását Debrecen városában 2018 és 2022 között. Annak érdekében, hogy a légszennyezettség alakulását befolyásoló összes folyamatot megértsék, bevezettek egy integrált megközelítést, amely ötvözi a szennyezőforrások azonosítását, a trajektória-alapú statisztikai módszereket, és figyelembe veszi a helyi és regionális meteorológiai helyzet alakulását.

A kutatók meghatározták a légköri aeroszol koncentrációját, összetételét és forrásait négy, különböző szintű korlátozással járó időszakra, két átmeneti és két lazítási időszakra 2020-22-ben, és az eredményeket összehasonlították a 2018-19-es megfelelő bázisértékekkel.

A következő szennyező forrásokat azonosították: talaj, tüzelés, biomassza égetése (pl. fatüzelés, kerti hulladék égetése), növényi kibocsátás, közlekedés, másodlagos szulfát (SO₂ gázból a légkörben keletkező szulfát aeroszol), tengeri só, építési munkálatok és útépités. A fűtési időszakban a biomassza égetése és a tüzelés volt a fő szennyező, míg nyáron a talaj mellett a másodlagos aeroszolak és a biogén kibocsátás adta a legnagyobb hozzájárulást.

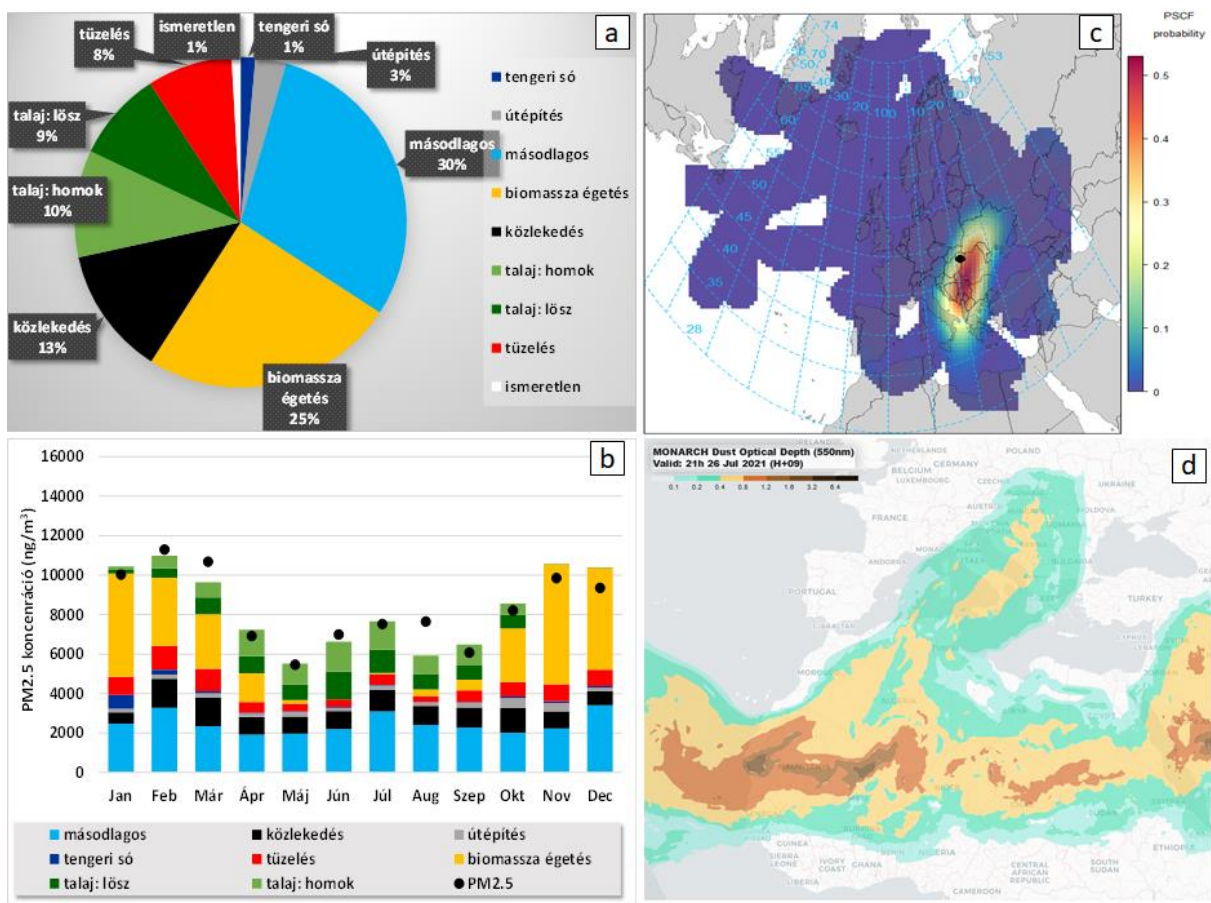
2020 márciusától a világjárvány miatti korlátozások erősen befolyásolták valamennyi légszennyező koncentrációját, a két év átlagában 20-25%-os csökkenés volt kimutatható. A durva frakcióban (2,5 és 10 µm közötti átmérőjű részecskék) a közlekedés és a talaj hozzájárulása csökkent a legnagyobb mértékben, valamint kimutatható volt a város körüli mezőgazdasági tevékenység hatásának a jelentős csökkenése is. PM_{2,5} 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. A közlekedéssel kapcsolatos szennyezőanyagok maximális koncentrációjának eltolódása a tanévről a nyári pihenő időszakokra szintén a városi lakosság megváltozott szokásait jelezte.

Jelentős időszakos helyi szennyező források voltak még az építkezések és az útépitések. A város határában megvalósuló nagyszabású ipari telephelyfejlesztés hatása 10 km-es távolságból is kimutatható volt.

Kimutatták továbbá, hogy Debrecenben az aeroszolszennyezés nagy része távolabbi, regionális és nagy távolságú transzportból származik. A másodlagos szulfát aeroszol fő forrásvidékei a nyugat-balkáni országok és Délnyugat-Románia. Így a kibocsátás változása ezekben az országokban erősen befolyásolta a légszennyezettségi szintet Debrecenben. A helyi meteorológiai paraméterek, a légtömegek mozgása és a nagytávolságú transzportfolyamatok szintén jelentős hatással voltak az aeroszolszennyezettség alakulására. Ezeknek a hatása hasonló nagyságú volt, mint a lezárások okozta változások.

Kimutatták, hogy a COVID-19 járvány miatti speciális helyzetnek köszönhetően a forgalom és az ipari termelés jelentős helyi és globális csökkentése 20%-kal javította Debrecen levegőminőségét. A kutatás rávilágított annak fontosságára, hogy megértsük és leírjuk a helyi és globális meteorológiai helyzetek, a hosszútávú transzportfolyamatok és a légtömegek mozgásából adódó komplex hatásokat. Az eredmények azt mutatják, hogy csak megfelelően célzott helyi és regionális intézkedésekkel együttesen lehetne a városi légszennyezést a kívánt szintre csökkenteni.



1. ábra: (a) PM2.5 források relatív járuléka 2020-21-ben
 (b) PM2.5 források járuléka havi bontásban 2020-21-ben
 (c) Debrecenben mért másodlagos szulfát aeroszol forrásterületei 2018-21-ben
 (d) Szaharai poredizód 2021 júliusában (aeroszol optikai mélység térkép)

Zs. Kertész, S. Aljboor, A. Angyal, E. Papp, E. Furu, M. Szarka, S. Bán, Z. Szikszai: *Characterization of urban aerosol pollution before and during the COVID-19 crisis in a central-eastern European urban environment*, Atmospheric Environment **318** Paper: 120267 (2024)