

A NAP SZÜLETÉSÉNEK FELTÉRKÉPEZÉSE RADIOAKTÍV ATOMMAGOKKAL

Maria Lugaro^{1,2,3,4,*}, Cseh Borbála^{1,2}, Szányi Balázs^{1,2,5}

¹HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (CSFK), Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

²CSFK, MTA Kiváló Kutatóhely, Budapest

³Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizikai és Csillagászati Intézet, Budapest

⁴School of Physics and Astronomy, Monash University, Victoria, Australia

⁵Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Szeged

*E-mail: maria.lugaro@csfk.org

A Nap nélkül a Föld sem létezne – meglepő módon mégsem ismerjük e fontos égitest, Nap kialakulás előtti történetének részleteit. Milyen környezetben és hány csillaggal együtt született? A Nap őstörténetének kutatása lehetővé tenné, hogy összehasonlítsuk a Napunk és a galaxisunk más csillagainak születési körülményeit; ezáltal a Nap, a Föld és az emberiség létezését a Tejútrendszerben található csillagok és bolygók (és a lehetséges egyéb létformák) milliárdjainak összefüggésében tudjuk tárgyalni.

A közelmúlt történelmi eseményeit a történészek tolalából ismerhetjük. Az időben távolabbi események datálásához viszont egyéb módszerekre kell támaszkodnunk. Az egyik legfőbb eszköz erre a radioaktivitás. A radioaktív atommagok az idő múlásával energia és részecskék kibocsátásával bomlanak. Egy adott t időpontban a radioaktív atomok $N(t)$ száma az exponenciális bomlási törvényt követi, ami a fizika egyik legegyszerűbb összefüggése: $N(t) = N(t_0) \exp\{-(t - t_0)/\tau\}$, ahol $N(t_0)$ a ($-z$ egyforma) radioaktív atomok kezdeti mennyisége (a t_0 időpontban), míg τ a közepes élettartam: a definíció szerint az az időtartam, amely alatt az atommagok mennyisége az e -ad részére csökken. A felezési idő ($T_{1/2}$) megadja, hogy mennyi idő szükséges ahhoz, hogy a kezdeti mennyiség fele elbomoljon, azaz $T_{1/2} = \ln(2)\tau$. Mivel τ időben állandó, az egyenletet egyszerű integrálni, amivel megkapjuk, hogy $t - t_0 = \tau \ln[N(t_0) - N(t)]$, ezáltal a t és a t_0 közötti időtartam közvetlenül kiszámítható, ha az $N(t_0)$ és az $N(t)$ mennyiségek ismertek.

A radiometrikus kormeghatározás erejének híres példája a radioaktív szén-14 (^{14}C , a továbbiakban a nuklidokra a szabványos jelöléssel hivatkozunk, vegyjellel és a tömegszámmal a bal felső indexben), amelynek felezési ideje 5730 év. Ez az izotóp folyamatosan keletkezik a légkörben a levegő és a kozmikus sugárzás, azaz a Földet megállás nélkül bombázó, a Napból vagy a Naprendsze-

ren kívülről származó szubatomi részecskék kölcsönhatása révén. Az élőlények felveszik a ^{14}C -t, így bennük a mennyisége (a teljes szénmennyiséghez viszonyítva) ugyanaz, mint a környező bioszférában. A haláluk után az élőlények már nem vesznek fel több ^{14}C -atomot, és a radioaktív bomlás lesz az egyetlen mód arra, hogy bennük a mennyisége megváltozzon. Példának okáért, ha egy csontlelet arányaiban feleannyi ^{14}C -t tartalmaz, mint amennyi a bioszférában található, az egyén 5730 évvel ezelőtt halhatott meg. Ebben az esetben $N(t_0)$ a ^{14}C -atomok bioszférában mért, míg $N(t)$ a csontokban mért száma.

Pontosan ugyanezt a technikát alkalmazva, de más radioaktív atommagokat használva és más megközelítéssel számolva $N(t_0)$ -t és $N(t)$ -t, információkhoz juthatunk a Naprendszer anyagának főbb őstörténeti eseményeiről, így akár a Nap kialakulását közvetlenül megelőző időszakról (1. ábra). Valójában a galaktikus csillagközi anyag Naprendszerben végződő szelete, hasonlóan egy élő szervezethez, folyamatosan radioaktív atomokat cserélt a környezetével. Ebben az esetben a környezet (a bioszféra helyett) a csillagközi anyag, a radioaktív atommagokat pedig (a kozmikus sugárzással való kölcsönhatás helyett) a különböző csillagok mélyén zajló nukleáris folyamatok hozzák létre. A csillagok belsejében uralkodó rendkívül magas hőmérséklet (millió és milliárd kelvin



Cseh Borbála csillagászként végzett az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, jelenleg a HUN-REN CSFK Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézetének tudományos segédmunkatársa, az MTA Lendület Nukleáris Égés Csillagokban Kutatócsoport tagja. Kutatási témája a kettőscsillagok spektroszkópiai megfigyelése, valamint a báriumszillagok elemgyakoriságának és különböző aszimptotikus óriásági csillagok modelljeinek összehasonlítása és elemzése a lassú neutronbefogásos folyamat jobb megértése érdekében.



Maria Lugaro a HUN-REN CSFK Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézet tudományos tanácsadója, az MTA Lendület Nukleáris Égés Csillagokban Kutatócsoport vezetője. Korábbi tanulmányai és munkái során megfordult Olaszországban, Ausztráliában, az Egyesült Királyságban és Hollandiában. Kutatócsoportja a stabil és a radioaktív atommagok keletkezését vizsgálja a csillagok színképeinek és a meteoritikus csillagpor összetételének megértése érdekében.



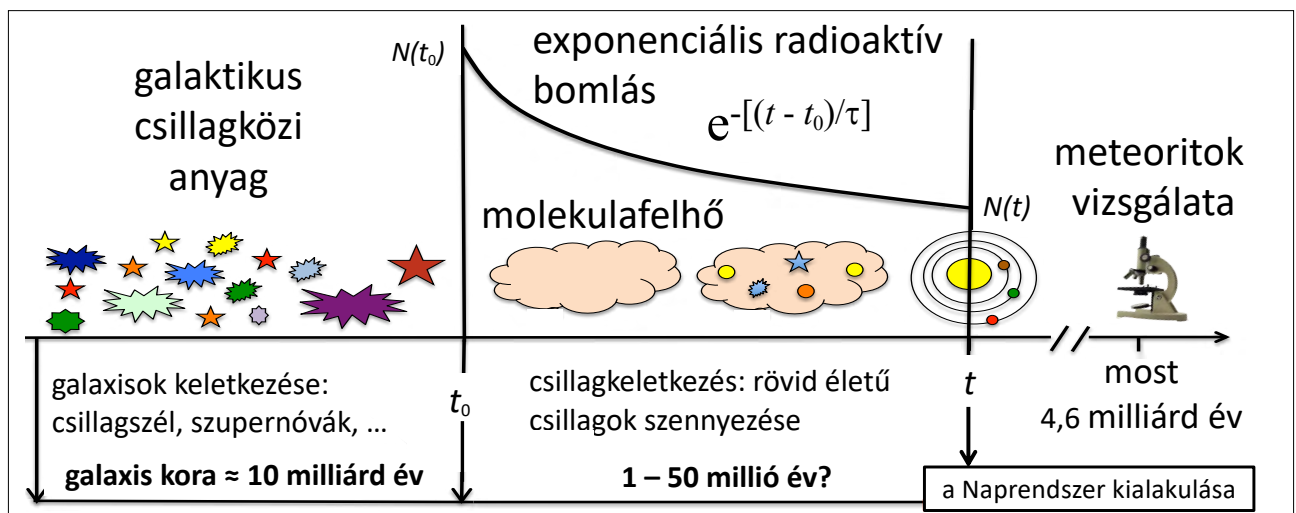
Szányi Balázs a Szegedi Tudományegyetem Fizika Doktori Iskola és a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet PhD-hallgatója, az MTA Lendület Nukleáris Égés Csillagokban Kutatócsoport tagja. Doktori tanulmányai során az aszimptotikus óriásági (AGB) csillagokban lejátszódó lassú neutronbefogás (s-folyamat) numerikus modellezésével foglalkozik.

között) és sűrűség (akár 10^7 – 10^9 g/cm³) lehetővé teszi, hogy az atommagok változatos módokon lépjenek kölcsönhatásba egymással. Ezek a nukleáris folyamatok a magfúziótól (beleértve a proton- és neutronbefogást, illetve a nehezebb atommagok, például a ¹²C fúzióját), a maghasadáson át (beleértve a fotodezintegrációt, azaz a nehezebb atommagok szétesését a csillagplazma nagyenergiájú γ -fotonjai hatására) a különböző radioaktív bomlásokig (α - és β -bomlás, illetve elektronbefogás) terjednek. Ezek a folyamatok nagymértékben meg tudják változtatni a csillag anyagának kezdeti összetételét. A csillag élete végén ez az új összetételű anyag a csillagszél vagy szupernóva-robbanás következtében kidobódik. Ezek a kidobódások folyamatosan frissen keletkezett elemekkel gazdagítják a galaktikus csillagközi anyagot, nemcsak stabil (beleértve a testünkben található C-t és O-t), de radioaktív atommagok formájában is.

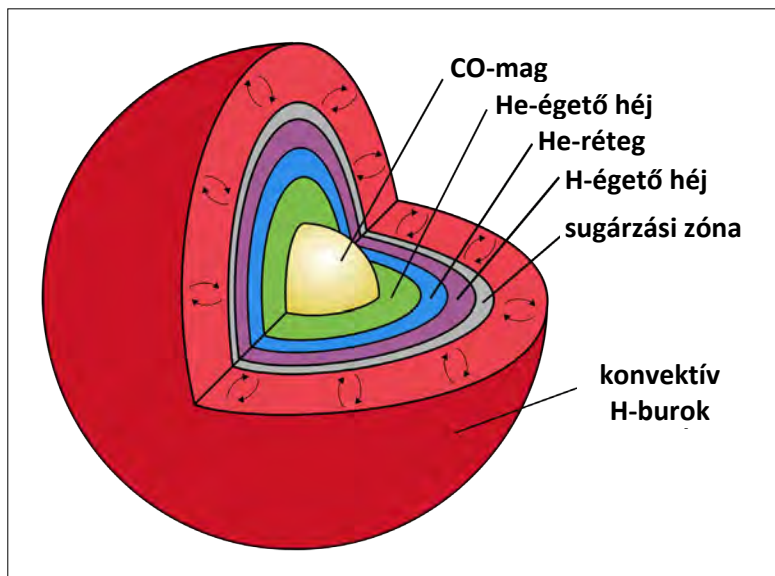
A Naprendszer anyaga eredetileg a galaktikus csillagközi anyag része volt, így folyamatosan elnyelte a csillagok által frissen termelt radioaktív atommagokat, egészen addig, amíg be nem épült egy úgynevezett molekulafelhőbe, a Tejútrendszer egy csillagkeletkezési régiójába, ahol a gáz hidegebb és sűrűbb, mint az átlagos csillagközi anyag, így lehetővé téve a csillagok születését. A Nap születésének esetében ez az időpont feleltethető meg a kezdeti t_0 -nak (a fenti ¹⁴C példájában ez az élőlény halálának felel meg). Ettől az időponttól kezdve a molekulafelhőknél hosszabb élettartamú csillagok által termelt radioaktív atommagok már nem adódhattak hozzá a molekulafelhő anyagához; azaz a radioaktív atommagok mennyiségét innentől csakis a bomlási törvény szabályozta (1. ábra). A kezdeti $N(t_0)$ mennyiséget nem lehet mérni, de a csillagokban lejátszódó nukleáris reakciók és a Tejútrendszer anyaga fejlődésének modellezésével becsülhető. Ez a nukleáris asztrofizikusok feladata. Mivel azt az időtartamot akarjuk mérni, amely alatt a Nap a szülő molekulafelhőjében megszületett, $N(t)$ a radioaktív atommagok gyakoriságát jelenti a Naprendszer ki-

alakulásának idején. Mivel az általunk vizsgálni kívánt események 4,6 milliárd évvel ezelőtt történtek, az összes, számunkra érdekes radioaktív atommag mára elbomlott, így számuk nem mérhető közvetlenül. A meteoritminták és azok zárványainak laboratóriumi elemzése mégis lehetővé teszi számuk közvetett mérését. Ez a következők arányának megméréseivel történik: i) azon típusú stabil atommagok száma, amelyekké az adott radioaktív atommag bomlik (más néven leánymag), és ii) ugyanazon elem egy másik atommagjának száma. Például a ²⁶Mg/²⁴Mg arányból megtudhatjuk a radioaktív ²⁶Al kezdeti gyakoriságát, amely $T_{1/2} = 0,7$ millió év (Myr) alatt bomlik ²⁶Mg leánymagjává. Ha ez az arány korrelál annak a két elemnek az elemarányával, amelyhez a radioaktív atommag és a leánymag tartozik (azaz az Al/Mg), akkor bátran következtethetünk arra, hogy a ma mért leánymagok eredetileg radioaktív előanyaguk formájában kerültek a kőzetbe, hiszen a két elem kémiaiilag másképp viselkedik. Ez az elemzés a kozmokémikusok feladata.

Mivel a kérdéses időtartamok néhány évtől néhány tízmillió évig terjednek, az e probléma megoldására érzékeny óráként felhasználható radioaktív atommagok felezési idejének hasonló nagyságrendűnek kell lennie. Valójában, ha a felezési idő sokkal rövidebb, az atommagok jelentős része t_0 és t között elbomlott volna, és a gyakoriságuk túl alacsony lenne ahhoz, hogy mérni lehessen. Ha a felezési idő sokkal hosszabb, a számuk olyan kevésbé változott volna, hogy az eltérés az $N(t)$ és $N(t_0)$ hibahatárain belül lenne, ami megakadályozza a szignifikáns eredményt. A természetben 18 megfelelő felezési idejű atommag áll rendelkezésre, a könnyűtől (pl. ⁵³Mn, $T_{1/2} = 3,74$ Myr) a nagyon nehéz (pl. ²⁴⁷Cm, $T_{1/2} = 15,6$ Myr) atommagokig. Azonban a meteoritokban nem mindegyik atommag mérhető pontosan. Azok száma, amelyek $N(t)$ gyakoriságát jelenleg kísérletekből jól ismerjük, nagyjából tíz. Ezek közül különösen hasznosak azok az atommagok, amelyek azonos típusú csillagokban keletkeznek, mivel feltételezhető, hogy a galaktikus csil-



1. ábra. A molekulafelhő kialakulásától a Nap születéséig eltelt idő mérésére szolgáló radioaktív módszer sematikus ábrázolása



2. ábra. Egy AGB-csillag sematikus képe. A héliumrétegben neutronok szabadulnak fel, és ebből a rétegből periodikusan anyag keveredik a csillag felszínére. Módosítva Magnus Vilhelm Persson ábrája alapján (https://figshare.com/articles/figure/Internal_structure_of_AGB_star/653683; CC BY 4.0)

lagközi anyagban azonos ütemben dúsulnak. Az alábbiakban az egyik ilyen csoportra összpontosítunk: a Nap tömegének nagyjából 2–4-szeresével rendelkező vörös óriáscsillagokban a szabad neutronok befogásával keletkező, releváns felezési idejű radioaktív atommagokra. Négy ilyen atommag van: ^{107}Pd ($T_{1/2} = 6,5$ Myr) és ^{182}Hf ($T_{1/2} = 8,9$ Myr), amelyeknél $N(t)$ jól ismert; valamint ^{135}Cs ($T_{1/2} = 1,3$ Myr) és ^{205}Pb ($T_{1/2} = 17,3$ Myr), amelyeknél $N(t)$ kevésbé ismert.

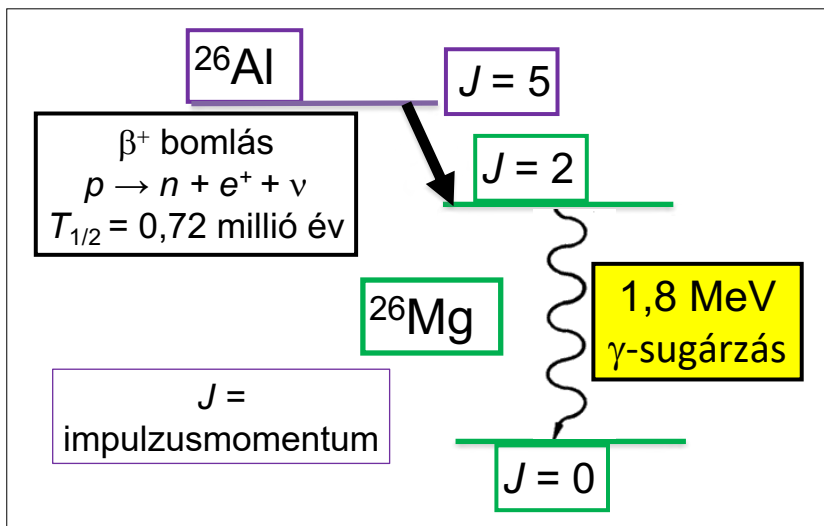
Az ilyen típusú csillagok a hosszú fősorozati fázison keresztül fejlődnek (ahol most a Nap is van), amikor a magjukban a hidrogén ég, majd kitágulnak, vörös óriáscsillagokká válnak, elégetik a magjukban lévő összes héliumot is, és végül aszimptotikus óriásági csillagokká (AGB) válnak. Életük ezen szakaszában a hidrogén és a hélium váltakozó fúziójával termelnek nukleáris energiát olyan héjakban, amelyek az inaktív mag felett és egy nagy burok alatt helyezkednek el (2. ábra). Az inaktív mag a gravitációs összeomlás ellen olyan elektronok segítségével tartja fenn magát, amelyek az összes legalacsonyabb kvantumállapotot betöltik (degenerált elektrongáz). A csillag felszínét a csillagszél folyamatosan erodálja, amíg végül csak a mag marad meg, és fehér törpévé válik. Az AGB fázisban szabad neutronok szabadulnak fel, amikor a ^{13}C és ^{22}Ne atommagok héliumatommagokat fognak be. A szabad neutronokat a vasnál nehezebb atommagok is befogják, így a stroncium és az ólom közötti elemek nagy mennyisége keletkezik. Az így keletkezett atommagok között van a fent felsorolt négy radioaktív atommag is.

Az AGB-csillagok belsejében leírt égési folyamatok kiszámíthatók olyan számítógépes módszerek segítségével, amelyek célja a következők megoldása: i) a csillag szerkezetét szabályozó egyenletek (a hidrosztatikai egyensúly, energiatranszport, tömegmegmaradás és energiamegmaradás, a nukleárisenergia-termelés az ál-

lapotegyenlet és az opacitás alapján), hogy megkapjuk a hőmérsékleteket és a sűrűségeket, és meghatározzuk azokat a területeket, ahol az anyag keveredik; ii) a különböző atomok mennyiségét szabályozó egyenletek hálózata, amelyet a nukleáris folyamatok, például a fúzió és a bomlás sebessége határoz meg. A magfolyamatok sebessége alapvető bemeneti adat a pontos és precíz modelljósolatok eléréséhez, azonban ezek nem mindig ismertek.

Egy jelentős példa, amely az elmúlt évtizedekben hátráltatta a módszer fejlődését, a kormeghatározási megközelítésünk szempontjából érdekes négy radioaktív atommag közül az egyik, a ^{205}Pb bomlási sebességének meghatározása volt. Ez az atommag elektron befogásával bomlik, átlagos élettartama a hőmérséklettel és a sűrűséggel is változik, így élettartama a csillagok belsejében jelentősen változhat. Továbbá a ^{205}Pb leánymagja, a ^{205}Tl , bár a Földön stabil, 200 millió kelvinnél magasabb hőmérsékleten elbomolhat – ez a hőmérséklet az AGB-csillagokban elérhető. A probléma az, hogy ezek a bomlások nem mérhetők földi laboratóriumi körülmények között, hiszen a Földön a ^{205}Tl stabil.

Ennek az akadálnak a megoldására egy zseniális kísérletet tervezett és hajtott végre egy nemzetközi kutatócsoport, amely 12 ország 37 intézményének tudósaitól állt. A ^{205}Tl bomlása csak akkor mérhető, ha az atomot megfosztják mind a 81 elektronjától, és néhány órán keresztül ilyen rendkívüli körülmények között tartják. Ezt a németországi GSI/FAIR nehézion-kísérleti tárológyűrűjében (Experimental Storage Ring) sikerült megvalósítani. A mérést már az 1980-as években javasolták, de évtizedekig tartó fejlesztés és munka kellett ahhoz, hogy a végleges számokat be lehessen építeni az AGB-csillagok számítógépes modelljeibe. 2024-ben sikerült megbízhatóan megjósolni, hogy mennyi ^{205}Pb -t löknek ki az AGB-csillagok szelei, és így mennyi volt jelen a galak-



3. ábra. A ^{26}Al bomlásának vázlatos ábrája. A ^{26}Al és a ^{26}Mg alapállapota között túl nagy az impulzusmomentum-különbség ahhoz, hogy az ^{26}Al közvetlenül ^{26}Mg -ra bomoljon. A bomlás ehelyett a ^{26}Mg gerjesztett állapotába történik, amely azonnal az alapállapotba kerül, nagy energiájú fotont kibocsátva

tikus csillagközi anyagban, amely végül a Naprendszerünkbe került. Más szóval, végre némi bizonyossággal meg tudtuk jósolni az $N(t_0)$ értéket, amely a radioaktív egyenlet megoldásához és a Nap molekulafelhőben való születési időskálájának levezetéséhez szükséges. Ezt az időintervallumot viszonylag hosszúnak találtuk, a legvalószínűbb érték 10 Myr körül van, ha a másik három radioaktív atommagból kapott eloszlással együtt vizsgáljuk, amelyek ugyanazokban az AGB-csillagokban keletkeztek.

Mivel minél nehezebb a molekulafelhő, annál tovább él, és annál több csillag születhet benne, ez az eredmény megerősíti, hogy Napunk nem egyedül született, hanem egy nagy családban, sok más csillagtestvérrel, amelyek már régen szétszóródtak, és elveszítették egymást. A molekulafelhő kialakulásától a Nap kialakulásáig eltelt idő segít annak felderítésében is, hogy vajon más csillagok is fejlődtek és elpusztulhattak-e ugyanabban a felhőben, mielőtt a Nap kialakult. A legvalószínűbb 10 Myr időtartam alatt egy nagyjából 20 naptömeg minimális tömegű csillag keletkezhetett, majd pusztulhatott el ugyanabban a molekulafelhőben a Nap születése előtt – tekintve, hogy a nagyobb tömegű csillagok rövidebb életet élnek. Ez az eredmény hasznos egy másik rejtély megoldásához

is, a ^{26}Al radioaktív atommag eredetének megfejtéséhez a korai Naprendszerben. Ennek $T_{1/2} = 0,7$ Myr felezési ideje azt jelenti, hogy valószínűleg helyben hozta létre egy közeli csillag. A ^{26}Al radioaktív bomlása nagy mennyiségű energiát termel (3. ábra), ami a Naprendszerben az első, nagyjából 100–1000 km méretű szilárd közzettetek felmelegedéséért volt felelős – a Földhöz hasonló bolygók később ezekből alakultak ki. A radioaktív bomlás a hőtermelésen keresztül döntő szerepet játszott ezen közzettetek hosszabb távú összetételének, például a bennük lévő víz mennyiségének meghatározásában. Ezért kell meghatározni ennek a bomlásnak a forrását is, hogy megértsük, hogy a Tejútrendszerben hogyan jött létre a Föld, a vízzel és az étellel.

Irodalom

- Lugaro M., Ott U., Kereszturi Á. (2018): Radioactive nuclei from cosmochronology to habitability. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 102, 1–47.
- Lugaro M., Pignatari M., Reifarh R., Wiescher M. (2023): The s process and beyond. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 73, 315–340.
- Leckenby G., et al. (2024): High-temperature ^{205}Tl decay clarifies ^{205}Pb dating in early Solar System. *Nature*, 635, 321–326.
- Lichtenberg T., et al. (2019): A water budget dichotomy of rocky protoplanets from ^{26}Al -heating. *Nature Astronomy*, 3, 307–313.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat jelen van a **facebook**-on!



<https://www.facebook.com/people/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/100057390380604/>