

Természetesen szisztematikusan és részletes vizsgálatokra van szükség ahhoz, hogy e kérdésben megbízható konklúzióra jussunk. Az [5] munkának és a jelen ismertetőnek csupán az a célja, hogy ráirányítsa a figyelmet Barut modelljére, és arra a körülményre, hogy az exobolygórendszerek tanulmányozása kitűnő lehetőséget kínál az ellenőrzésére.

Az első eredmények fényében számos érdekes kérdés fogalmazható meg. Csak néhányat említünk itt. A szimmetria által inspirált transzformáció inkább leírja, mintsem magyarázza a szabályosságot. (Hasonlóan a fizika más ágaiban alkalmazott számos szimmetria-alapú modellhez és elmélethez.) Miként függ össze az észlelt szabályosság a bolygórendszer keletkezésének dinamikájával? Ha irregularitást észlelünk, akkor az vajon rejtőzködő bolygóra utal? Kapcsolatban van szokatlan dinamikai effektusokkal a keletkezési mechanizmusban? Vagy hozzásegíthet külső eredetű égitest azonosításához?

A legizgalmasabb kérdésnek pedig az tűnik, hogy a kétestestprobléma tulajdonságai miként öröklődhetnek át egy olyan bonyolult folyamatba, mint a bolygórendszerek kialakulása.

A szimmetriamegfontolások szempontjából a kérdés tanulmányozása külön érdekességgel bír, hiszen egy eredendően kvantummechanikai fogalom égi mechanikában történő alkalmazásán alapul.

Irodalom

1. J. Kepler: *Mysterium Cosmographicum*. Tübingen, 1596.
2. Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest 1978.
3. A. O. Barut: Symmetry and dynamics: Two distinct methodologies from Kepler to supersymmetry. In *Symmetries in Science II*. Eds.: B. Gruber, R. Lenczewski. Plenum Press, New York, USA (1989) 37.
4. Györgyi G.: A Kepler-probléma rejtett szimmetriáiról. *Fizikai Szemle* 18 (1968) 142.
5. J. Cseh: Planetary systems and the hidden symmetries of the Kepler problem. *Symmetry* 2020. 12, 2109.
6. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

AZ UNIVERZUM SZÜLETÉSÉNEK VIZSGÁLATA A FÖLD ALÓL

Csedreki László, Gyürky György, Szűcs Tamás
Atommagkutató Intézet (ATOMKI), Debrecen

Ha körbenézünk világunkban, akkor a természet szinte végtelen megjelenési formáját látjuk a legapróbb vírusoktól a tőlünk akár milliárdnyi fényévre lévő csillagokig. Ezt a végtelen változatosságot a természetben előforduló csupán közel 100 kémiai elemnek köszönhetjük, amelyek változó arányban építik fel világunkat.

Ma már a tudomány nagy vonalakban magyarázatot tud adni e nagyfokú változatosság kialakulására

és dinamikájára, amely magában foglalja a kémiai elemek keletkezésének rendkívül bonyolult és összetett folyamatát, összefonódva a Világegyetem evolúciójával is.

A mára teljeskörűen elfogadottá vált elmélet szerint, közel 13,8 milliárd évvel ezelőtt a Világegyetem egy kataklizmikus eseményben, az ősrobbanásban jött létre. Ekkor született meg az anyag, az idő és a tér. Feltételezve a fizikai törvények univerzalitását és azt, hogy a Világegyetem nagy léptékben homogén és izotróp, az elmélet eredményeként sikerül magyarázatot adni olyan jelenségekre és kísérletileg vizsgálható mennyiségekre, mint a könnyű kémiai elemek gyakorisága, a kozmikus háttérsugárzás, a táguló Világegyetem és a Világegyetem nagyléptékű szerkezete [1]. Az erre vonatkozó elméleti és csillagászati megfigyelésekből származó tudásunkat az ősrobbanás standard kozmológiai modellje foglalja kerek egészbe.

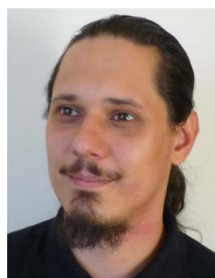
A kozmológusok a Világegyetem jelenlegi állapotának megfigyeléséből próbálnak következtetni arra az



Csedreki László fizikus, az ATOMKI tudományos főmunkatársa. 2009-ben végzett a Debreceni Egyetemen környezetkutatóként. 2015-ben szerzett PhD fokozatot magreakció-hatáskeresztmetszetek meghatározása témakörből. 2016–2020 között posztdoktorként dolgozott az INFN-LNGS intézetben a LUNA nemzetközi együttműködés keretében működtetett föld alatti gyorsító laboratóriumban. Kutatási területe a könnyű magokon végbemenő, asztrofizikailag releváns reakciók vizsgálata.



Gyürky György fizikus, az MTA doktora, az ATOMKI tudományos tanácsadója. Kutatási területe a kísérleti nukleáris asztrofizika. E tématerületen belül kiemelten foglalkozik a nehéz, protongazdag izotópok szintéziséért felelős p-folyamat magreakcióival. E munkáját az European Research Council pályázata is támogatta. Emellett részt vesz a LUNA nemzetközi együttműködés munkájában, ahol a világon egyedülálló, föld alatti gyorsítóval vizsgálják az asztrofizikailag fontos reakciókat.



Szűcs Tamás fizikus és fizikatanár (ELTE, 2008), az ATOMKI tudományos főmunkatársa. PhD disszertációját (DE, 2012) alacsony hatáskeresztmetszetek mérési módszereiről írta. Kétszer két évet töltött posztdoktor-kutatóként a drezdai HZDR kutatóintézetben, ahol egy új föld alatti gyorsítólaboratórium kialakításában vállalt meghatározó szerepet. Két évig az MTA posztdoktori ösztöndíjasa. A LUNA nemzetközi együttműködés tagja. Asztrofizikailag releváns magreakciókat vizsgál mind itthon, mind külföldön.

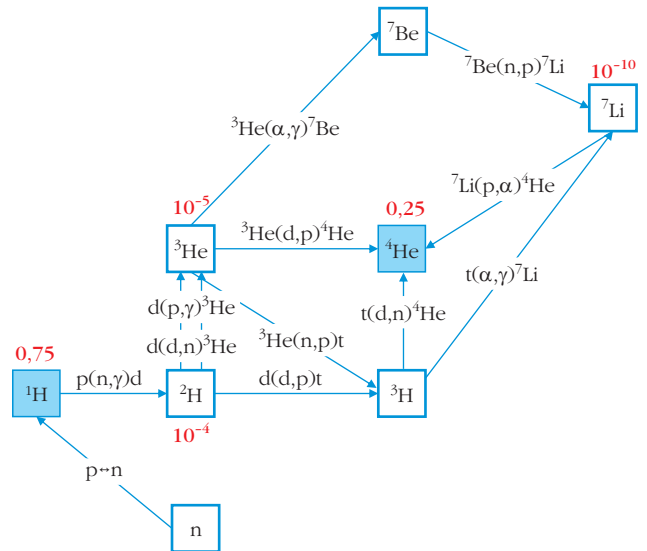
egzotikus fizikára, ami az Univerzumunk születését követő pillanatokat vezérelte. Világegyetemünk tágul, ezt főként a megfigyelt galaxisok egymástól való távolodásából látjuk. A jelenlegi Világegyetem hideg, egyenletesen kitöltve körülbelül 3 kelvin hőmérséklettel egyenértékű hősugárzással, amit kozmikus háttérsugárzásként (Cosmic Microwave Background – CMB) ismerünk. Azonban, ahogy az időben visszafelé haladunk, Világegyetemünk egyre forróbbá és sűrűbbé válik, növekvő energiájú kozmikus részecskével, amelyek egyre erőszakosabb ütközéseken mennek keresztül. Az úgynevezett kozmikus „atomkorszakban”, mikor az Univerzum 400 000 éves volt, olyan forró körülmények uralkodtak, hogy az atomok nem semleges állapotban, hanem a folytonos ionizáció révén, a szabad elektronok és atommagok által alkotott plazma formájában léteztek. Még tovább haladva visszafelé az időben, az ősrobbanás után 1 másodperccel olyan magas volt a hőmérséklet, hogy az atommagok is csak alkotóikként léteztek, a protonok és neutronok formájában. Ez a „nukleáris korszak”, aminek végén kialakultak a Világegyetemben megfigyelhető legkönnyebb kémiai elemek, mint a hidrogén, hélium és lítium. Ezt a folyamatot ősrobbanás kori nukleoszintézisnek (Big Bang Nucleosynthesis – BBN) nevezzük.

Az ősrobbanás kori nukleoszintézis

Amikor a BBN elkezdődött, a Világegyetem nukleonokból (protonok és neutronok), elektronokból, fotonokból és neutrínókból álló forró leves volt. Ahogy a hőmérséklet csökkent, a nukleonokból először a hidrogén egy nehezebb izotópjá jött létre, az egy protonból és egy neutronból álló deuteron (a deutérium atommagja). Később, sorozatos magreakciók révén képződtek a ${}^3\text{He}$ és végül a ${}^4\text{He}$ izotópok. Csupán 3 perc elteltével, az Univerzumban a tömegarányt tekintve 75%-ban hidrogén- és 25%-ban hélium-atommagok voltak jelen, nyomnyi mennyiségű deutérium, ${}^3\text{He}$ és ${}^7\text{Li}$ atommagokkal. Így nagyrészt a BBN felelős a Világegyetemet felépítő két leggyakoribb elem (hidrogén és hélium) keletkezésért. A lítiumnál nehezebb kémiai elemek csak jóval később, az első csillagok működése és halála során jelentek meg. A BBN-ben lejátszódó magreakciók rendszerét mutatja az 1. ábra.

A BBN egységes leírását szolgáltatja a Standard BBN (SBBN) elmélet, amely feltételezi a téridő leírását az általános relativitáselmélettel és a Lambda-Cold Dark Matter modell érvényességét. Az utóbbi az ősrobbanás kozmológiai modelljének paraméterezése, amelynek értelmében az Univerzum három fő komponenset tartalmaz: a kozmológiai állandót, amelyet a görög Λ -val jelölünk és kapcsolódik a sötét energiához; a hideg, sötét anyagot (cold dark matter); és a közönséges, látható anyagot.

Az SBBN-ben a mikrovilág fizikáját a részecskefizika standard modelljének részecskéi és kölcsönhatásai határozzák meg. A modell három neutrínófajtát



1. ábra. Az ősrobbanás kori nukleoszintézis (BBN) folyamata. A piros számok az egyes elemek BBN-t követő relatív tömeggyakoriságát jelölik.

(elektron, müon, tau) feltételez és azt, hogy a BBN-ben a sötét anyag és a sötét energia elhanyagolható hatással bírt [2].

A kozmológusok és a csillagászok az Univerzumban megfigyelhető könnyű elemek mennyiségéből következtetnek azok ősi (az első csillagok megjelenése előtti) gyakoriságára. Az ilyen mérések alátámasztották például, hogy a ${}^4\text{He}$ ősi gyakorisága 25% volt. Ezeket a megfigyeléseket összevetve a SBBN elméleti modell jóslataival lehetővé válik a modell ellenőrzése.

A deutérium mennyiségének mérése további döntő információt szolgáltat, mivel a deutérium hidrogénhez képesti gyakorisága (D/H) érzékenyen függ a barionikus anyag kozmikus sűrűségétől ($\Omega_b h^2$, ahol Ω_b a barionsűrűség-paraméter, h a redukált Hubble-állandó) és a neutrínófajták effektív számától (N_{eff}),¹ mint az SBBN-modell két paraméterétől. Barionikus anyag vagy látható, fénylő anyag minden, amely protonokból és neutronokból épül fel, azaz minden elem a periódusos rendszerben.

A BBN-modell ellenőrzéséért folytatott versenyben a deutérium hidrogénhez viszonyított ősi gyakoriságát csillagászati megfigyelésekből 1% pontossággal sikerült meghatározni [3]. Ez a nagy vöröseltolódással rendelkező, azaz távoli gázfelhők abszorpciós vonalainak vizsgálatával lehetséges, amelyeknél a gázfelhő mögött valamilyen háttérfényforrás (például egy olyan kompakt csillagászati objektum, mint a kvazár) helyezkedik el. A deutérium megfigyelt gyakoriságából következtetni lehet az $\Omega_b h^2$ értékére, ami a kozmikus háttérsugárzás vizsgálatából is függetlenül meghatározható [4].

¹A modellben használt neutrínók effektív száma (N_{eff}) nem egész, mert értéke nem csupán a neutrínófajták számától függ, hanem a paraméter tartalmazza a neutrínók és az elektron-pozitron párok közötti csatolást a korai Univerzum kialakulása idején. Ezzel a paraméterrel szokás jellemezni a korai Univerzum relativisztikus energiasűrűségét.

1. táblázat

A deutérium termelésében és megsemmisülésében szerepet játszó reakciók és az SBBN-moddellel számolt, az ősi deutériumgyakoriság bizonytalanságához való hozzájárulásuk.

reakció	bizonytalanság
$p(n,\gamma)D$	0,08%
$D(p,\gamma)^3He$	2,34%
$D(d,n)^3He$	0,75%
$D(d,p)^3H$	0,49%

Összeségében elmondható, hogy a deutérium gyakoriságát megadó csillagászati megfigyelésekből és a CMB-ből kapott $\Omega_b h^2$ lényegesen pontosabb, mint a SBBN-elmélet által jósolt érték. Ennek elsődleges oka a számolásokhoz szükséges magreakciók (1. ábra) hatáskeresztmetszeteinek kísérleti bizonytalansága, amelyek közül a deuteronszintézishez köthető reakciók kiemelt szerepet játszanak. A továbbiakban ezeket a reakciókat tekintjük át!

A deuteron keletkezésében szerepet játszó reakciók

A deutérium termelésében és megsemmisülésében (más szóval égésében) szerepet játszó reakciókat és az SBBN-moddellel számolt, az ősi deutériumgyakoriság bizonytalanságához való hozzájárulásukat mutatja be az 1. táblázat, ahol egy fix $\Omega_b h^2 = 0,02207$ [5] értéket vettünk alapul. A táblázatból világossá válik, hogy kiemelt fontosságú a $D(p,\gamma)^3He$ (vagy $^2H(p,\gamma)^3He$) reakció, amelyben egy deutériummagból és egy protonból 3He keletkezik. Ez rendelkezik a legnagyobb relatív bizonytalansággal, lényegesen meghaladva a többi reakció hozzájárulását.

A teljesség kedvéért fontos megemlíteni, hogy a $D(p,\gamma)^3He$ sugárzásos befogási reakció az ősrobbanás után kívül is számos asztrofizikai környezetben rendkívül fontos szerepet tölt be. Példának okáért a Napunkhoz hasonló, viszonylag kistömegű, fősorozatbeli csillagok energiatermelése az úgynevezett pp-láncon keresztül valósul meg, amelynek eredményeként 4 protonból kiindulva, közel 26,7 MeV energia felszabadulásával egy héliumatommag keletkezik [6]. Ezen többlépéses folyamat második lépése a $D(p,\gamma)^3He$ reakció, ennek lejátszódási valószínűségét (hatáskeresztmetszetét) a Nap hőmérsékletének megfelelő, asztrofizikailag releváns, alacsony energiatartományban ($E_{c.m.} = 3-20$ keV) közvetlen mérésekből már kelendő pontossággal ismerjük [7].

E reakció szerepe még érdekesebb a csillagok fejlődésének egyik legkorábbi fázisában, a protocsillagok evolúciójában. A csillagok születésének helyszínét adó óriási gáz- és porfelhők belsejében a gravitációs összehúzódás hatására megnő a nyomás és a sűrűség. Amikor a hőmérséklet eléri a $\sim 10^6$ K-t, beindul

a $D(p,\gamma)^3He$ reakció, a gravitációs összehúzódás és a hőmérséklet növekedésének üteme csökken. Ennek következtében a kialakuló protocsillag életideje megnő és megfigyelhető tulajdonságai, mint a felszíni hőmérséklet és fényesség, változatlanok maradnak egészen addig, amíg a deutérium teljesen elhasználódik [8].

Térjünk vissza a $D(p,\gamma)^3He$ magreakció szerepére az ősrobbanásban. Itt $E = 30-300$ keV a reakció releváns energiatartománya, tehát lényegesen magasabb, mint a fent említett, csillagokban zajló asztrofizikai események esetében.

Égészen a közelmúltig a $D(p,\gamma)^3He$ reakcióra kevés kísérleti adat volt birtokunkban a BBN szempontjából fontos energiatartományban. A rendelkezésre álló kísérleti adatok alapján a $D(p,\gamma)^3He$ reakció hatáskeresztmetszetének bizonytalansága 6-10%-ra volt tehető. Ezen túl a reakció hatáskeresztmetszetének pusztán elméleten alapuló – úgynevezett ab initio módszerrel végzett – számítása arra a következtetésre vezetett, hogy a kísérleti adatok alapján számolt reakcióhozamok túlságosan alacsonyak [9].

Ha ez így van, akkor a BBN-számolások pontatlan deutériumgyakoriságot eredményeznek. Ez azért nagyon fontos, mert a deutérium gyakoriságára a megfigyelésekből és a BBN-számolásokból kapott értékek közötti bármilyen eltérés arra is utalhat, hogy eddig ismeretlen fizikai törvények játszottak szerepet a korai Univerzumban. A kozmológiai modellek ezért megkövetelik az olyan kísérleteket, amelyek segítségével a kulcsfontosságú magreakciók hatáskeresztmetszeteit a csillagászati megfigyelésekkel összemérhető pontossággal tudjuk megadni.

A LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) együttműködés több éves munkájának eredményeként a $D(p,\gamma)^3He$ reakcióra vonatkozó ismereteink bizonytalanságát jelentősen sikerült csökkenteni, amellyel lehetővé vált az SBBN-modell minden eddiginél megbízhatóbb ellenőrzése. A továbbiakban ezt a kísérletet és az ebből levont következtetéseket mutatjuk be, amelyben a debreceni Atommagkutató Intézet (ATOMKI) munkatársai is jelentős szerepet játszottak [10, 11].

Föld alatti mérések

A könnyű kémiai elemekről elmondható, hogy az asztrofizikailag releváns hőmérsékleteken a keletkezésükért felelős töltött részecske-reakciók mélyen a rájuk jellemző Coulomb-gát alatti energiákon mennek végbe. Ezen energiákon a reakciók hatáskeresztmetszete ezért extrém alacsony, ami miatt a kísérleti vizsgálatok során a reakcióból származó gyenge jeleket a kozmikus sugárzás által okozott laboratóriumi háttér teljesen elfedheti [12].

Erre jelent megoldást az olaszországi Gran Sasso Nemzeti Laboratórium (LNGS) – Rómától észak-keletre, az Appenninekhez tartozó, ugyanilyen nevű hegy belsejében – mélyen a föld alatt kialakított kutatóhe-

lye, ahol a laboratóriumot fedő több, mint egy kilométeres sziklaréteg árnyékolásának köszönhetően a kozmikus sugárzás intenzitása a földfelszínén mért érték egymilliomod része.

Az LNGS ad helyet a világon egyedülálló, mélyen a föld alatt üzemelő 400 kV terminál-feszültségű LUNA400 részecskegyorsítón alapuló asztrofizikai laboratóriumnak, amelyet a LUNA együttműködés működtet mintegy 20 éve (2. ábra). A föld alatti helyszín révén az eltelt két évtizedben lehetővé vált számos, nukleáris asztrofizikai szempontból fontos magreakció közvetlen vizsgálata minden korábbinál alacsonyabb energián [13, 14].

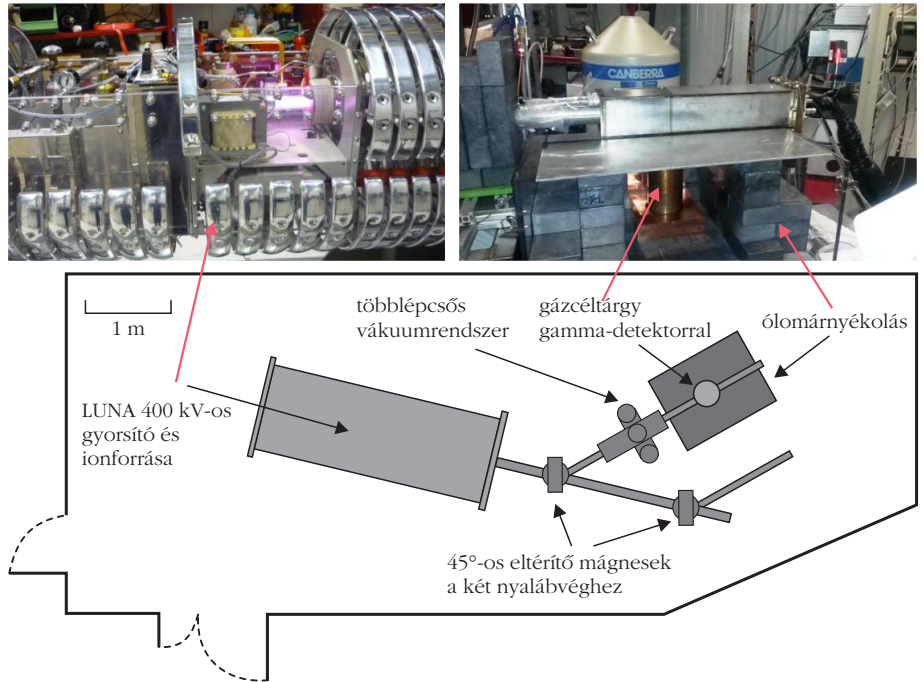
A gyorsító kifejezetten alacsony energiás nukleáris asztrofizikai mérésekre lett optimalizálva, lehetővé téve a mérésekhez szükséges többszáz μA nyalábtintenzitást (proton és alfa-részecske) és a kiváló energia- és nyalábbáram-stabilitást.

A gyorsító által szolgáltatott protonnyalábbal történt a 99,99%-ra dúsított deutérium-gázcéltárgy besugárzása. A speciális kialakítású mérőkamrában a nyaláb – a többlépcsős vákuumrendszernek köszönhetően – minimális energiavesztéssel éri el a céltárgyat. A beérkező protonok számát a mérőkamrát lezáró és így „beam-stop”-ként működő kaloriméterrel határoztuk meg. A mérőkamrában elhelyezett nyomás- és hőmérséklet-szenzorok segítségével a céltárgyatommagok számát nagy pontossággal tudtuk meghatározni.

A $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$ reakcióban keltett gamma-fotonokat nagy tisztaságú germániumdetektorral mértük. A detektor hatásfokát radioaktív forrásokkal, sugárzásos befogási magreakciókkal és Monte-Carlo-szimulációval határoztuk meg, amelynek eredményeként a detektálási hatásfok bizonytalanságát, mint szisztematikus hibaforrást, 2,0%-ra sikerült csökkenteni.

Figyelembe véve a $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció reakcióhőjét ($Q = 5,493 \text{ MeV}$),² a keletkezett gamma-fotonok energiája messze a természetes radioaktív izotópok által keltett laboratóriumi háttérsugárzás energiatarományára ($\sim 3,1 \text{ MeV}$) fölé esett, ahol így már csak a kozmikus sugárzás okozhat háttérrel. Itt viszont a föld alatti helyszín biztosítja az alacsony háttérrel, így ennek és a fent bemutatott kísérleti körülményeknek köszönhetően lehetővé vált a $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció kívánt pontoságú, közvetlen vizsgálata [11].

²Egy magreakcióban résztvevő magok összes nyugalmi energiájának változását a Q értékkel jellemezzük. Pozitív érték esetén ennyi energia szabadul fel a reakcióban, az itt tárgyalt reakció esetén gamma-sugárzás formájában.



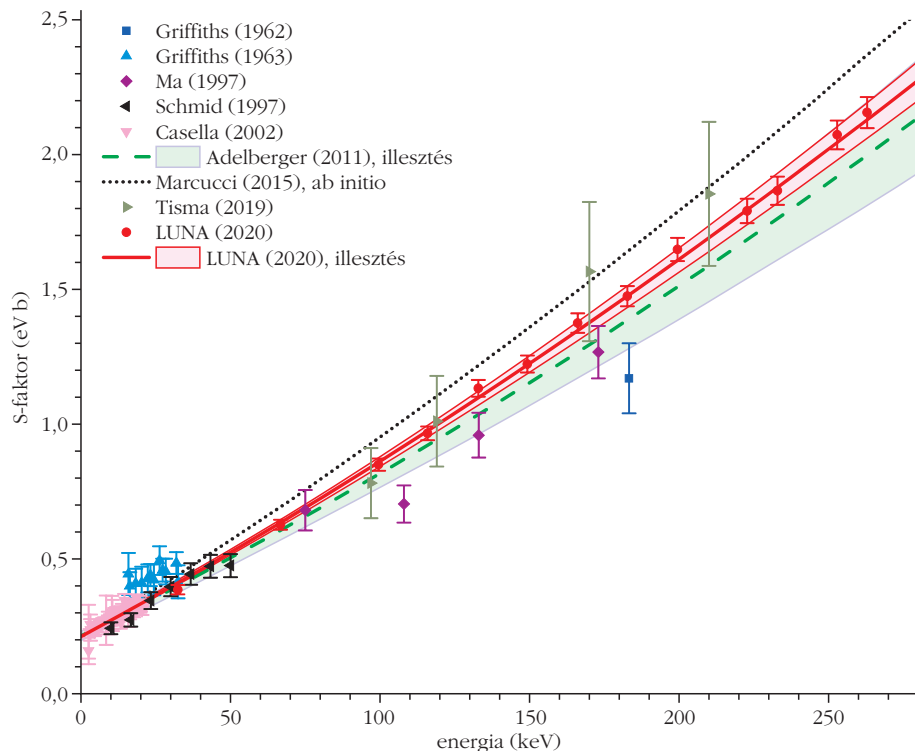
2. ábra. A LUNA400 részecskegyorsító és a mérésekhez használt gázcéltárgyas nyalábcsonna.

A 3. ábra mutatja be az irodalomban fellelhető, kísérletileg és elméleti (ab initio) számolás alapján meghatározott és a LUNA által újonnan mért asztrofizikai S-faktor értékeket. Praktikus okok miatt a mérésekből számolt hatáskeresztmetszetekből az úgynevezett asztrofizikai S-faktort származtatják, amellyel kompenzálható az alagúteffektus erős energiafüggése és így az adatok ábrázolása lényegesen könnyebb lesz. Az új kísérleti hatáskeresztmetszetek magasabbak a korábbi, hiányosabb és pontatlanabb értékeknél, viszont jelentősen alacsonyabbak, mint az elméleti számításokból előre jelzett érték (fekete pontozott vonal).

Az ábrán zöld szaggatott vonal mutatja a korábbi mérések felhasználásával illesztett S-faktor görbéjét a hozzá tartozó, világoszöld sávval jelölt bizonytalansággal. A LUNA által elvégzett precíz kísérleti munka eredményeként a korábbi 9%-os bizonytalanságot kevesebb, mint 3%-ra sikerült csökkenteni az $E_{\text{c.m.}} = 32\text{--}263 \text{ keV}$ tartományban, amint azt a piros folytonos vonal mutatja a megfelelő bizonytalansági sávval. Ez lehetővé teszi a korábbinál pontosabb SBBN-számítások elvégzését, amelyek bizonytalansága így már sokkal közelebb van a csillagászati megfigyelésből kapott deutériumgyakorosság bizonytalanságához.

Kozmológiai következtetések

A $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció lényegesen pontosabb S-faktor adatait felhasználva az SBBN-moddal segítségével újraszámolható a barionsűrűség az ősrobbanást követő néhány perces időszakban. Az SBBN modellszámítások elvégzésére alkalmas PARthENOPE kóddal ez az érték $\Omega_b h^2 = 0,02233 \pm 0,00036$, amely kettes faktorialább pontosabb a korábbi adatok alapján számolt értéknél



3. ábra. A $D(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció asztrofizikai S-faktor adatai.

($0,02271 \pm 0,00062$). Így az SBBN alapján számolt és a független, Planck³ [15] együttműködés munkája eredményeként, a CMB alapján meghatározott barionsűrűség ($\Omega_b h^2 = 0,02230 \pm 0,00021$) kiváló egyezést mutat.

Itt fontos megjegyezni, hogy a BBN és CMB alapján számolt $\Omega_b h^2$ a Világegyetem két, időben 380 000 évvel eltérő állapotára vonatkozik. Azonban a Λ -CDM-modell feltételezése alapján a barionsűrűség értékét csak az Univerzum tágulása befolyásolja. Így, amennyiben a modell helyes, a $\Omega_b h^2$ mai értékére mind a CMB mind a BBN alapján ugyanazt kell kapnunk. Az SBBN és CMB alapján kapott $\Omega_b h^2$ értékek kiváló egyezése, tovább erősíti a modell megbízhatóságát és arra utal, hogy nincs szükség a jelenlegi ismereteinken túlmutató fizikai folyamatok feltételezésére a BBN utáni pár százezer év vonatkozásában. E számításokban a neutrínófajták effektív számát fix paraméterként kezeltük, $N_{\text{eff}} = 3,045$.

A modellszámításokhoz szükséges hatáskeresztmetszetek pontosítása lehetővé teszi a neutrínófajták effektív számának vizsgálatát, illetve azt, hogy mi a valószínűsége az eddig ismeretlen és új fizika jelenlétének a standard részecskefizikai ismereteinken túl.

Két megközelítésben vizsgáltuk a fenti problémát. Az első esetben a deuterongyakoriság SBBN által jósolt és a csillagászati megfigyelésekből származó értékét, valamint a CMB-ből kapott barionsűrűséget vettük rögzítettnek. A számításokból kapott $N_{\text{eff}} = 2,95 \pm 0,22$ érték tökéletes egyezést mutat a standard

N_{eff} értékkel. A második esetben a számolásokat a deuteron és a ^4He tömeggyakoriság SBBN-ből származó és csillagászati megfigyelésből kapott értékére alapoztuk, és a barionsűrűséget szabad paraméterként kezeltük. A neutrínófajták effektív számára kapott érték ebben az esetben $N_{\text{eff}} = 2,86 \pm 0,28$ -nak adódott, amely ugyan alacsonyabb a standard értéknél, de figyelembe véve az érték nagyobb bizonytalanságát még mindig konzisztensnek tekinthető.

Összefoglalás

Az Univerzum születéséről és fejlődéséről rendelkezésre álló, megfigyelésekkel alátámasztott információinkat az ősrobbanás kozmológiai elmélete foglalja kerek egészbe, amelynek fontos állomása a könnyű elemek

keletkezéséért felelős ősrobbanás kori nukleoszintézis. A modellszámítások elvégzéséhez szükséges a könnyű elemek szintézisében szerepet játszó magreakciók hatáskeresztmetszetének kellő pontosságú ismerete, amelyek közül kiemelt fontosságú a deuteron kialakulásához kapcsolódó $D(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció.

A debreceni Atommagkutató Intézet munkatársainak részvételével működő LUNA együttműködés által, az olaszországi Gran Sasso Nemzeti Laboratórium mélyen a föld alatti helyszínén elvégzett kísérleteknek köszönhetően a korábbiaknál sokkal pontosabban ismerjük a $D(p,\gamma)^3\text{He}$ reakció hatáskeresztmetszetét. Az eredmények hozzájárulnak ahhoz, hogy az Univerzumban a barionos anyag sűrűségét (ami mintegy 4%-a a teljes sűrűségnek) még biztosabban határozzuk meg a standard BBN-modell segítségével. Ez az új érték már 1%-os pontossággal megegyezik a CMB-ből számított értékkel. Ilyen szintű egyezés igazi diadal a kozmológia alapvető elméletének.

Irodalom

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Big_Bang
2. Cyburt R. és mts., *Rev. of Mod. Phys.*, Volume 88 (2016)
3. Cooke R. és mts., *Astrophys. J.* 855 (2018) 102.
4. Fields B. és mts., *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 03 (2020) 010.
5. Di Valentino E. és mts., *Phys. Rev. D* 90 (2014) 023543.
6. Gyürky és mts., *Nukleon* 5 (2012) 108.
7. Casella C. és mts., *Nucl. Phys. A* 706 (2002) 203.
8. Adelberger E. G. és mts., *Rev. Mod. Phys.* 83 (2011) 195.
9. Marcucci L. és mts., *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) 102501.
10. Mossa V. és mts., *Eur. Phys. J. A* 56 (2020) 144.
11. Mossa, V. és mts., *Nature* 587 (2020) 210.
12. Szücs T., *Fizikai Szemle* 68/7–8 (2018) 230.
13. Gyürky Gy., *Fizikai Szemle* 61/2 (2011) 37.
14. Csedreki L. és mts., *Fizikai Szemle* 70/2 (2020) 39.
15. https://hu.wikipedia.org/wiki/Planck_m%C5%B1hold

³Planck nemzetközi együttműködés a Planck műhold eredményeire alapozva határozta meg minden eddiginél pontosabban a kozmikus háttérsugárzás különböző tulajdonságait.