

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

LXI. évfolyam

2. szám

2011. február

HÉLIUMATOMMAGOK REAKCIÓJA AZ ŐSROBBANÁSBAN, A NAPBAN ÉS A LABORATÓRIUMBAN

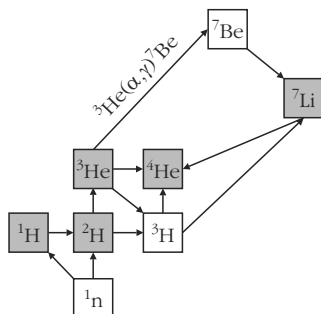
Gyürky György
MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

A ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ reakció asztrofizikai jelentősége

A periódusos rendszer második elemének, a héliumnak két stabil izotópja létezik, a hármas tömegszámú ${}^3\text{He}$, valamint a négyes tömegszámú ${}^4\text{He}$, aminek atommagját α -részecske névvel is illetjük. A természetben található hélium szinte kizárólag ${}^4\text{He}$ -ből áll, hozzávetőleg 750 000 ${}^4\text{He}$ atomra csak egy ${}^3\text{He}$ jut. A két héliumizotóp magjának fúziós reakciója, a ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be}$ folyamat, vagy a magfizikában megszokott jelöléssel a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció. Ez a reakció, amelynek során gamma-sugárzás kibocsátása mellett a He magokból ${}^7\text{Be}$ izotóp keletkezik, a mag-asztrfizika két különböző területén is nagy jelentőséggel bír. Ez a két terület az Ősrobbanás után lejátszódó elemszintézis, illetve a fősorozatbeli csillagok hidrogénégése.

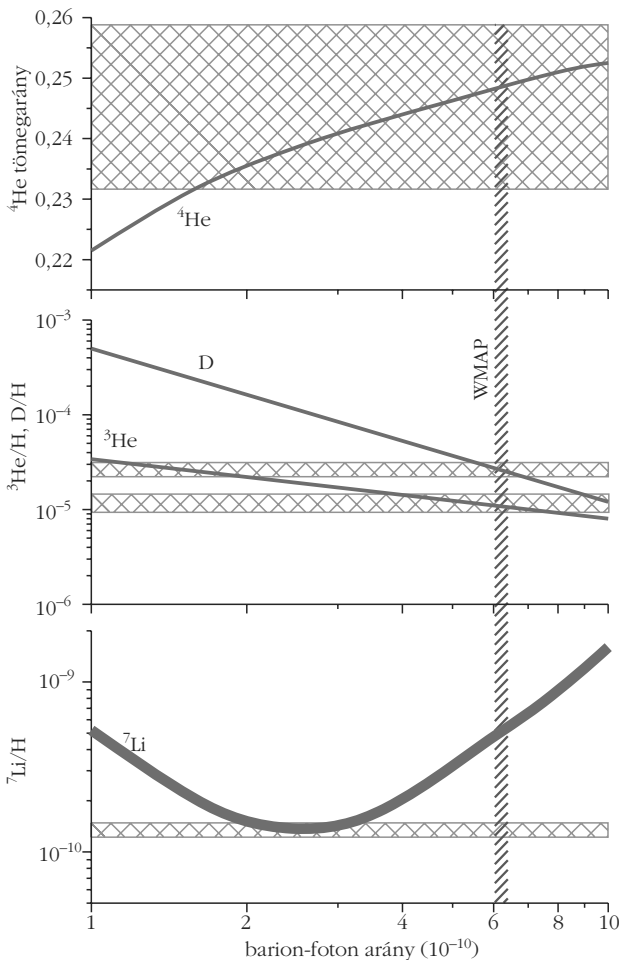
Világegyetemünk mintegy 13,7 milliárd évvel ezelőtt az Ősrobbanásban keletkezett [1]. A kezdeti, nagy sűrű-

1. ábra. Az Ősrobbanás során lejátszódó magreakciók hálózata. Az írás témáját képező ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció külön jelölve. A stabil izotópok szürke kitöltéssel láthatók.



ségű és hőmérsékletű állapotból körülbelül a harmadik perc végére az Univerzum annyira lehűlt, hogy a kvarokból protonok és neutronok álljanak össze. A hőmérséklet azonban még elegendően magas volt ahhoz, hogy a protonokból és neutronokból magreakciók révén összetett atommagok jöjjenek létre. A részletes számítások azt mutatják, hogy az Ősrobbanás után az 1. ábrán látható reakcióhálózat reakciói játszódhattak le. Az a tény, hogy 5-ös és 8-as tömegszámú stabil atommag nem található, megakadályozta a nehezebb izotópok kialakulását. Újabb néhány perc elteltével a hőmérséklet annyira csökkent, hogy további magreakciók már nem mehettek végbe. A folyamat eredményeképp a megmaradó protonokon (azaz egyes tömegszámú hidrogénmagokon) kívül mindössze négyféle összetett atommag jött létre jelentősebb mennyiségben: a deuteron (kettes tömegszámú hidrogén), a hélium két stabil izotópja, valamint a lítium 7-es tömegszámú izotópja. A szintén keletkező ${}^3\text{H}$ és ${}^7\text{Be}$ radioaktív magok, valamint a megmaradó neutronok rövid időn belül β -bomlás révén rendre stabil ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ magokká, illetve protonná alakultak.

Az 1. ábra hálózatában szereplő reakciók sebességének ismeretében kiszámítható az Ősrobbanás során keletkezett izotópok előfordulási gyakorisága, ami összehasonlítható a természetben megfigyelt izotópgyakoriságokkal. Az összehasonlítás eredményét mutatja a 2. ábra. A számítások szabad paramétere az Univerzumunkra jellemző egyik kozmológiai paraméter, a barion-foton arány. A 2. ábra ennek függvényében, sötétszürke sávok formájában mutatja a számított izotópgyakoriságokat. A vízszintes, négyzetácsosan kitöltött sávok mutatják a csillagászati megfigyelések



2. ábra. Az Ősrobbanásban keletkezett könnyű elemek számított és mért gyakoriságának összehasonlítása (a ^4He esetén az Univerzum teljes tömegének arányában, míg a másik három izotóp esetén a hidrogén gyakoriságához viszonyítva). A sötétszürke sávok mutatják a négy izotópra a számítások eredményét az Univerzumra jellemző baryon-foton arány függvényében. A sávok szélessége a fizikai eredetű bizonytalanságot tükrözi. A vízszintes, négyzetláncosan kitöltött sávok mutatják a megfigyelt gyakoriságokat, míg a függőleges, átlósan vonalkázott sáv a baryon-foton arány WMAP műhold mérésin alapuló értéke.

ből származó gyakoriságokat. A 2001-ben felbocsátott WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) űrszonda igen nagy pontossággal megmérte a mikrohullámú háttérsugárzás térbeli hőmérséklet-ingadozásait (anizotrópiáját) [2]. Ebből a baryon-foton arány precízen meghatározható, a kapott értéket mutatja az ábrán átlósan vonalkázott függőleges sáv. Ennek ismeretében az elemszintézis számításai ellenőrizhetők.

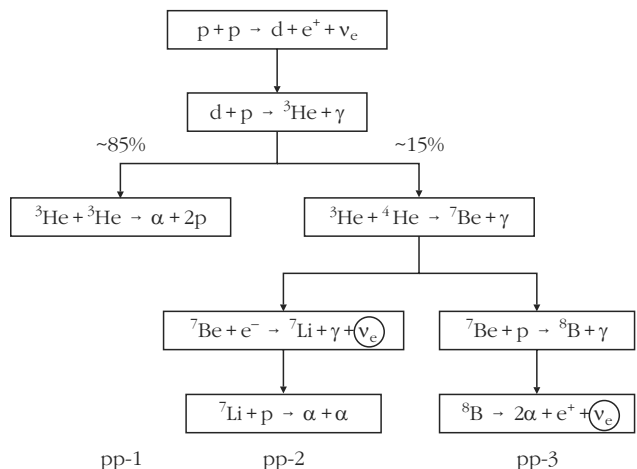
A ^4He megfigyelt gyakorisága sajnos igen nagy hibával terhelt, így nem túl meglepő, hogy a számított gyakoriság jól egyezik a megfigyeltenél (a ^4He görbe a WMAP sávot a megfigyelt gyakoriság sávján belül metszi). Sokkal inkább figyelemre méltó az egyezés a deutérium és a ^3He esetén, amelyek gyakorisága nagy pontossággal ismert és a számítások tökéletesen reprodukálják a megfigyelt értékeket az ismert baryon-foton arány értéknél. Ez az Ősrobbanásos elemszintézis modelljének nagy sikere és egyben az Ősrobbanás fontos bizonyítéka.

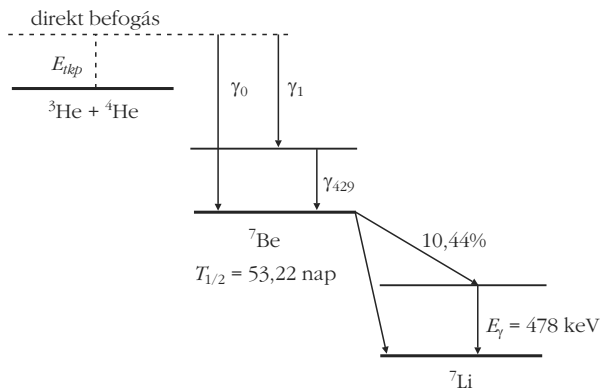
Egész más a helyzet a ^7Li izotóp esetén, aminek a gyakoriságát – mint az ábrából is látható – mintegy hármas faktossal túlbecsüli az elmélet. A problémára jelenleg nincs általánosan elfogadott magyarázat, az egyik legvalószínűbb lehetőség valamilyen ismeretlen hiba a kezdeti ^7Li gyakoriság mérésében. Jelen írás szempontjából azonban egy másik lehetőség az érdekes. A ^7Li gyakorisággörbe jellegzetes, határozott minimumot mutató alakja annak köszönhető, hogy alacsony baryon-foton arány esetén főként a $^3\text{H}(\alpha,\gamma)^7\text{Li}$, míg magas arány esetén a $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakció és a ^7Be ezt követő β -bomlása vezet ^7Li termeléshez. A WMAP kísérlet eredménye szerint ez utóbbi eset áll fenn, tehát a $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakció a meghatározó ^7Li termelésben. Az Ősrobbanás utáni percek hőmérsékleti viszonyai esetén a $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakció lejátszódási sebességének ismerete természetesen szükséges a ^7Li izotóp gyakoriságának kiszámításához. Ez a reakciósebesség a reakció lejátszódási valószínűségéből, azaz hatáskeresztmetszetéből számítható ki. Amennyiben nem ismerjük jól a $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszetét (ha az például csak harmadannyi lenne, mint hisszük), akkor meg tudnánk magyarázni a ^7Li gyakoriságában talált ellentmondást. A kérdéses hatáskeresztmetszet kísérleti meghatározásáról a következő fejezetekben lesz szó, előbb azonban tekintsük át a csillagok hidrogénégési folyamatait, ahol a $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakció szintén kulcsszerepet játszik.

Napunk – a Világegyetemben található csillagok túlnyomó többségéhez hasonlóan – fősorozatbeli csillag, amelyek közös jellemzője, hogy energiatermelésük hidrogénfúzió segítségével történik, amely során négy protonból egy α -részecske keletkezik [3]. Ez a folyamat nem egy lépésben, hanem több fúziós reakción keresztül, három különböző módon megy végbe, amint ezt a 3. ábra is mutatja.

A három pp-lánc [4] közül leggyakrabban az 1. lánc játszódik le, az azt lezáró $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow \alpha + 2p$ folyamat pedig verseng a $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakcióval, ami a Nap esetén mintegy 15%-os valószínűséggel a 2. és 3. lánc

3. ábra. A hidrogénégés pp-láncainak reakciói. A $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ reakcióval induló 2. és 3. lánc felelős a nagyenergiás ^7Be és ^8B neutrínók kibocsátásáért.





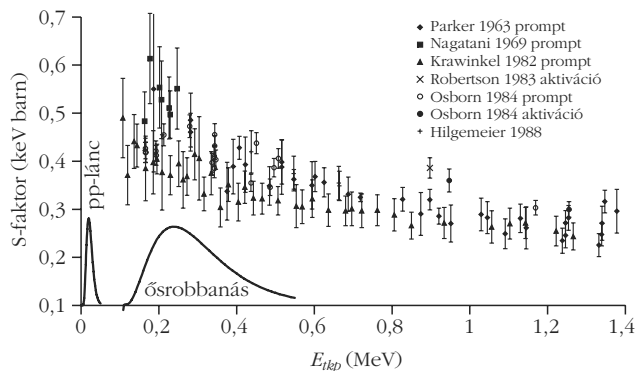
4. ábra. A ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció mechanizmusa. E_{tkp} jelöli a reakcióba lépő magok tömegközépponti rendszerben mért összenergiáját.

irányába tereli a folyamatot. Ez a két ág azért jelentős, mert belőlük származnak a ${}^7\text{Be}$, illetve ${}^8\text{B}$ béta-bomlása során kibocsátott nagyenergiás neutrínók (az ábrán bekarikázva). Neutrínók legnagyobb számban a legelső $p+p \rightarrow d+e^++\nu_e$ reakcióban keletkeznek, ám ezek maximális energiája viszonylag alacsony, mintegy 400 keV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Ezzel szemben a 2. ágban keletkező ${}^7\text{Be}$ neutrínók energiája 384 és 861 keV (monoenergiás neutrínók), míg a 3. ágból a ${}^8\text{B}$ neutrínók folytonos energiaspektruma egészen 16 MeV-ig terjed. A legtöbb földi neutrínódetektor nem érzékeny az 1. lánc alacsonyenergiás neutrínóira, így csak a 2. és 3. (vagy esetenként csak a 3.) lánc neutrínóinak a detektálására van lehetőség [5].

A neutrínódetektálás óriási fejlődésen ment át az elmúlt években, és ez a fejlődés töretlenül halad tovább. Mára már a neutrínók észlelése jelenti a Nap magjában lejároló folyamatok közvetlen vizsgálatának, és így a napmodellek ellenőrzésének egyik legpontosabb módszerét, ugyanis a nagyenergiás neutrínók fluxusa néhány százalékos pontossággal mérhető (illetve hamarosan mérhető lesz). Ugyanakkor a nagyenergiás neutrínófluxus kiszámításához ismernünk kell a versengő ${}^3\text{He}+{}^3\text{He} \rightarrow \alpha+2p$ és ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakciók sebességének arányát, amihez a két reakció hatáskeresztmetszetének ismerete szükséges alacsony energián. A két reakció közül a jelen cikk témáját adó ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatáskeresztmetszete a kevésbé ismert, ezért jelentős a járuléka a nagyenergiás neutrínók számított fluxusának bizonytalanságához. A továbbiakban e reakció kísérleti vizsgálatának módszereiről, a rendelkezésre álló eredményekről és a reakció vizsgálatának jelenlegi állásáról lesz szó.

A ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció kísérleti vizsgálata

A ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció mechanizmusát a 4. ábra szemlélteti. A két héliummag fúziója alacsony (asztrofizikailag jelentős) energián a magfizikában direkt befogás néven ismert folyamaton keresztül zajlik gamma-sugárzás kibocsátása kíséretében, miközben a keletkező ${}^7\text{Be}$ atommag vagy alapállapotban, vagy a 429 keV-es első gerjesztett állapotban jön létre. Utóbbi esetben a ${}^7\text{Be}$ egy újabb gamma-foton kisugárzása



5. ábra. A ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció mért asztrofizikai S-faktora a tömegközépponti energia függvényében (kísérleti eredmények 1988-ig bezárólag). Az ábra bal alsó sarkában a két görbe azt mutatja, hogy a pp-lánc, illetve az Ósrobbanás esetén a reakció milyen energiatartományban játszódik le. A jelmagyarázatban felsorolt kísérletek pontos bibliográfiai adatait lásd például a [6] hivatkozásban.

révén jut alapállapotba. A ${}^7\text{Be}$ mag radioaktív, 53 napos felezési idővel elektronbefogás révén bomlik ${}^7\text{Li}$ izotóppá. A bomlás során leggyakrabban a ${}^7\text{Li}$ alapállapotban keletkezik, de az esetek mintegy 10%-ában az első gerjesztett állapot jön létre, ami 478 keV-es gamma-sugárzás kibocsátásával jut alapállapotba.

A reakciómechanizmus két lehetőséget kínál a hatáskeresztmetszet mérésére. Az első, prompt gamma detektálásos módszerben a direkt befogás során keletkező gamma-sugárzást (az ábra γ_1 , γ_0 és γ_{429} átmeneteit) kell detektálni a reakció lezajlásával egy időben, tehát amikor egy alkalmas gyorsítóval ${}^3\text{He}$ magokat bombázunk ${}^4\text{He}$ magokkal (vagy fordítva). A másik lehetőség az aktivációs technika, amikor valamilyen módszerrel összegyűjtjük a reakcióban keletkező ${}^7\text{Be}$ magokat, majd a radioaktív ${}^7\text{Be}$ aktivitásának mérésével következtetünk a reakció hatáskeresztmetszetére. Ez legkönnyebben a ${}^7\text{Be}$ bomlások mintegy 10%-át követő 478 keV-es gamma-sugárzás detektálásával lehetséges. A hatáskeresztmetszet meghatározásához ez esetben természetesen tudnunk kell a ${}^7\text{Be}$ izotóp pontos felezési idejét és a 478 keV-es gamma-sugárzás kibocsátási valószínűségét.

A fizikusok már évtizedekkel ezelőtt felismerték a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció jelentőségét, így mindkét fent vázolt módszerrel számos kísérletet végeztek a reakció-hatáskeresztmetszet meghatározására. Ezek eredményeit foglalja össze az 5. ábra. Az ábra a fúziós reakció tömegközépponti energiájának függvényében mutatja a reakció asztrofizikai S-faktorát, ami a hatáskeresztmetszeteiből származtatható mennyiség.¹

Az ábra bal alsó sarkában a két görbe azt mutatja, hogy a pp-láncre, illetve az Ósrobbanásra jellemző hőmérsékleteken a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció milyen ener-

¹ Az S-faktor az asztrofizikában gyakorta használt mennyiség töltött részecskék között lejátszódó magreakciók jellemzésére. Előnye, hogy energiafüggése sokkal kisebb, mint magáé a hatáskeresztmetszeté, így ábrázolása is egyszerűbb. Ha az 5. ábra pontjait hatáskeresztmetszet formájában ábrázoltuk volna, akkor az értékek sok nagyságrendet fogtak volna át, így még logaritmikus skála alkalmazásával is nehéz lett volna különbséget tenni a különböző pontok között.

giákon játszódik le, azaz mi a reakció lényeges energiatarományja, ahol a hatás keresztmetszetet ismerünk kell. Mint látható, az Ősrobbanás energiatarományában vannak kísérleti adatok, ám azok szórása igen nagy és a pontok jelentős hibával terhelték. A pp-lánc esetén azonban nincsenek kísérleti adatok, erre az alacsony energiatarományra elméleti modellek segítségével a magasabb energiás mérésekből tudunk extrapolálni. (Az S-faktor alkalmazása miatt a hatás keresztmetszetek különbsége nem érzékelhető az ábrán. A pp-lánc energiatarományában a hatás keresztmetszet mintegy 8 nagyságrenddel kisebb, mint a legalacsonyabb energiás kísérleti pontra jellemző érték. Ezért nem lehetséges a kísérleteket a pp-lánc energiatarományában elvégezni.) Az extrapolációt természetesen itt is megnehezíti, hogy a magasabb energiájú pontok jelentősen szórnak és hibájuk is nagy. Ráadásul, ha külön kezeljük a prompt és az aktivációs méréseket, az tapasztaljuk, hogy az aktivációs mérések átlaga mintegy 15%-kal magasabb extrapolált S-faktor értéket eredményez, mint a prompt mérések átlaga. Ez utóbbi probléma felvetette annak a lehetőségét is, hogy a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció mechanizmusát nem értjük pontosan: lehetséges esetleg ${}^7\text{Be}$ keletkezés prompt gamma-kibocsátás nélkül is.

Mindezen problémák eredményeképpen a Napból származó nagyenergiás neutrínók számított fluxusában messze a legnagyobb magfizikai eredetű bizonytalanság a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció hatás keresztmetszetéből adódik, valamint az Ősrobbanásos elemszintézis ${}^7\text{Li}$ problémájának megoldásában sem lehet kizárni a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció szerepét. Természetes tehát, hogy a kísérleti vizsgálatok sora nem állt meg a 80-as évek végén (az 5. ábra eredményeivel), hanem több új mérés eredményei is napvilágot láttak azóta. Az új mérések egyikében a debreceni Atommagkutató Intézet (ATOMKI) nukleáris asztrofizika csoportjának tagjai [7], köztük e cikk szerzője is részt vett, így most e mérés rövid ismertetése következik.

A ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció vizsgálata a LUNA együttműködés keretében

Egy új kísérlet eredményeképp jelentősen javítani kell az 5. ábra által mutatott képen. Ez többféleképpen is elérhető. Célszerű csökkenteni a mért értékek hibáját, a könnyebb extrapoláció érdekében a méréseket a lehető legalacsonyabb energián kell elvégezni, és meg kell vizsgálni a prompt és aktivációs mérések közötti látszólagos ellentmondást. Ez utóbbi úgy érhető el, ha a méréseket mindkét módszerrel, párhuzamosan végezzük, és az eredményeket összehasonlítjuk. Az alábbiakban röviden bemutatott LUNA együttműködés mindhárom cél elérését tervbe vette.

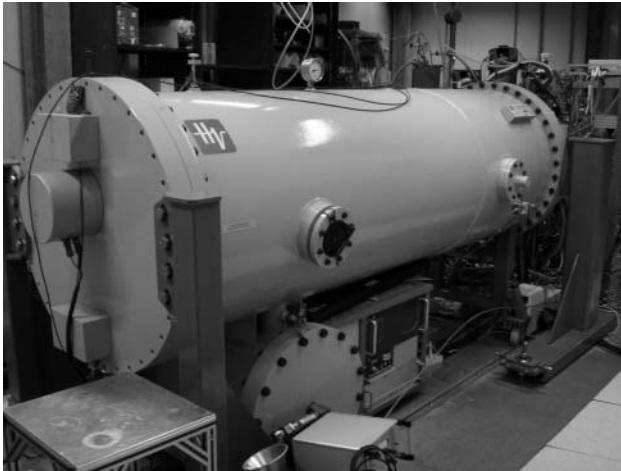
A Nap hidrogénégésében szerepet játszó reakciók általános jellemzője, hogy a magfizikában megszo-
kotthoz képest jóval alacsonyabb energián játszódnak le, ami extrém alacsony hatás keresztmetszeteket je-

lent. Emiatt általában nem lehet a magreakciókat laboratóriumi körülmények között a Napra jellemző energiákon tanulmányozni, a magasabb energiákról történő extrapoláció általában elkerülhetetlen. Ez viszont rendszerint annál pontosabb, minél alacsonyabb energián sikerül a méréseket elvégezni. Alacsony energia felé haladva a hatás keresztmetszet csökkenése miatt egyre nehezebbé válik a reakciók vizsgálata. Kis hatás keresztmetszetek esetén igen kis intenzitású sugárzás detektálása a feladat, amit a természetes háttérsugárzás jelentősen megnehezít, vagy lehetetlenné tesz. A háttérsugárzás visszaszorításával tehát esély lehet kisebb hatás keresztmetszetek mérésére, azaz alacsonyabb energiák elérésére is.

A természetes eredetű háttérsugárzás egyik fontos összetevője a kozmikus háttérsugárzás, amit a világűr-
ből érkező nagyenergiájú töltött részecskék, illetve az általuk kiváltott másodlagos, részecske- és gamma-sugárzás alkotnak. A kozmikus háttérsugárzás csökkentésének egyik módja az, ha a kísérleteket mélyen a föld felszíne alatt végezzük, ugyanis a földkéreg alkotó kőzetekben a sugárzás elnyelődik. Az alacsony kozmikus háttér miatt a világ számos pontján működnek föld alatti laboratóriumok, ahol általában olyan ritka eseményeket vizsgálnak, amelyek esetén fontos a minél alacsonyabb háttérsugárzás. Tipikus példája ennek a neutrínó-detektálás, de számos egyéb „ritka esemény” kutatása is föld alatti laboratóriumokban zajlik (példaként említhetnénk a sötét anyag kutatását vagy a kettős béta-bomlás kimutatására tett kísérleteket). Alacsony hatás keresztmetszetű magreakciók vizsgálata esetén is hasznos lehet egy föld alatti laboratórium, de ehhez részecskegyorsítót kell a föld alá telepíteni.

Jelenleg a világon egyedülállóként a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) olasz–
német–magyar együttműködés üzemeltet föld alatti részecskegyorsítót [8]. A gyorsító Olaszországban, Rómától mintegy 100 km-re, az Appenninek hegylánca alatt kialakított LNGS (Laboratori Nazionali de Gran Sasso) föld alatti kutatóintézetben található. A laboratórium fölötti, átlagosan mintegy 1400 méteres szikla-
réteg a nehéz töltött részecskéket teljesen elnyeli, míg a neutron- és müonfluxus több nagyságrenddel csökken. Ez utóbbiak az anyaggal való kölcsönhatás során végső soron gamma-sugárzást váltanak ki, tehát a föld alatti laboratóriumban a gamma-háttér is alacsonyabb, ami egy gamma-detektálás alapuló magfizikai kísérlet (amilyen a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció vizsgálata) számára előnyös.

A LUNA együttműködés által üzemeltetett berendezés egy mindössze 400 kV maximális feszültségű elektrosztatikus gyorsító. A kis feszültség kis részecske-
kenyaláb-energiát jelent, de az alacsony energián lejátszódó asztrofizikai reakciókhoz általában nincs is szükség nagyobb energiára. A kis hatás keresztmetszetek miatt azonban nagy nyalábszűrő szükséges. A LUNA gyorsító esetén az egyszeres töltésű ${}^4\text{He}^+$ ionnyaláb intenzitása 250 μA körüli, ami másodpercenként több mint 10^{15} bombázó részecskét jelent.

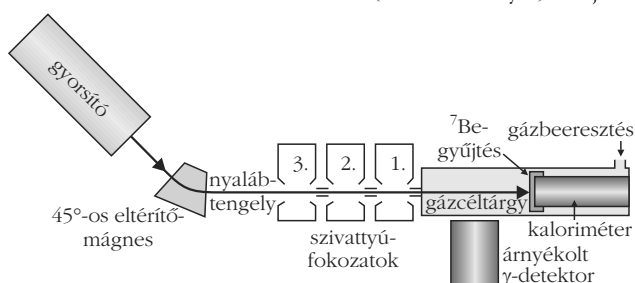


6. ábra. A 400 kV-os LUNA gyorsító fényképe.

A LUNA gyorsító fényképe a 6. ábrán, míg a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció vizsgálatához használt kísérleti elrendezés sematikus ábrája a 7. ábrán látható. Mivel a tanulmányozni kívánt reakció két nemesgáz-izotóp között játszódik le, gázcéltárgy használata szükséges, ami technikai nehézségeket vet fel. A céltárgyázt (esetünkben a ${}^3\text{He}$ izotópot) nem lehet egy gázcélba zárni, mert technikailag nem lehet olyan vékony fóliával (belépő ablakkal) lezárni a cellát, amin a LUNA gyorsító alacsony energiás nyalábjá elnyelődés nélkül képes áthaladni. Így csak ablak nélküli, úgynevezett differenciálisan szívott gázcéltárgy jöhet szóba. Itt a céltárgyázt folyamatosan engedjük be a céltárgykamrába, ami csak egy szűk nyíláson át tud távozni a vákuumszivattyúk irányába. A három egymást követő vákuumszivattyú-fokozattal elérhető, hogy a kamrában stabil legyen a nyomás (esetünkben tipikusan 0,7 mbar), míg a szivattyúk előtt a gyorsító oldalán 10^{-7} mbar nagyságrendű vákuum tartható fenn.

A hatáskeresztmetszet meghatározásához ismerni kell mind a céltárgyat bombázó ${}^4\text{He}$ magok, mind a ${}^3\text{He}$ céltárgymagok számát. Az első mennyiség meghatározása a nyalábintenzitás mérésével lehetséges, amit általában töltésméréssel oldanak meg, hiszen minden ${}^4\text{He}^+$ ion egy elemi töltésnek megfelelő töltést juttat a céltárgyba. Gázcéltárgy esetén azonban ez nem lehetséges, mert a gázban haladó ionok töltéscsere-reakciókban vesznek részt a gáz atomjaival, így a céltárgykamra végét (ahol a töltést mérni lehetne) már meghatározatlan töltésállapotban érik el, tehát a beeső részecskék számát nem lehet a teljes

7. ábra. A ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció vizsgálatához a LUNA gyorsítónál használt kísérleti elrendezés sematikus (nem mérhelyes) ábrája.



töltés mérésével meghatározni. Ilyenkor hívható segítségül a kaloriméteres technika, amit méréseinkben mi is alkalmaztunk. Ekkor a töltés mérése helyett a nyaláb által okozott hőteljesítményt mérjük. A kaloriméter működési elve – kissé leegyszerűsítve – a következő: egy fűtőellenállást szabályozó tápegység állandó hőmérsékleten (esetünkben $+70\text{ }^\circ\text{C}$ -on) tartja a kaloriméter felszínét, ami egyben a gázcéltárgy vége, amibe a nyaláb becsapódik. A kísérlet során a hőmérséklet fenntartásához szükséges teljesítményt mérjük. Amikor a nyaláb bombázza a kalorimétert, a nyaláb okozta melegítés miatt kisebb teljesítménnyel is fenn lehet tartani az állandó hőmérsékletet. A két teljesítmény különbségéből kiszámítható a nyaláb hőteljesítménye, abból pedig a nyalábenergia ismeretében az intenzitása.

A céltárgymagok száma a céltárgygáz nyomásának és hőmérsékletének pontos mérésével, valamint a kamra méreteinek ismeretében egyszerűen kiszámítható. Ezzel kapcsolatban érdemes megemlíteni egy, nagy nyalábintenzitásoknál fellépő problémát, a céltárgygáz nyaláb okozta melegedésének hatását. Ahogy a nagy intenzitású nyaláb áthalad a céltárgygázon, lokálisan, a nyalábtengely mentén felmelegíti azt, aminek hatására a gáz sűrűsége csökken, tehát csökken a nyaláb által „látott” céltárgymagok száma. Ezt az effektust a céltárgymagokon rugalmasan szóródó ${}^4\text{He}$ magok detektálásával sikerült megmérnünk és az eredmények analízisének figyelembe vennünk.

Ahogy a nyaláb áthalad a céltárgygázon, lezajlik a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció, ami a 4. ábrán feltüntetett prompt gamma-sugárzások kibocsátásával jár. Ezeket a gamma-sugarakat a céltárgykamrán kívül, annak közvetlen közelében elhelyezett, nagy hatásfokú germániumdetektorral mértük. A föld alatti laboratóriumban ugyan szinte elhanyagolható a kozmikus eredetű háttérsugárzás, ám a minden anyagban (így például a laboratóriumot körülvevő kőzetekben) megtalálható radioaktív izotópok alacsony energiás gamma-sugárzást bocsátanak ki, ez méréseinkhez zavaró háttérrel ad. Ennek kiküszöbölésére a detektort a teljes 4π térszöget bezáró vastag (több mint 3 tonna) ólomárnyékolással vettük körül.

A reakcióban keletkező ${}^7\text{Be}$ magok a reakciókinematika által meghatározott szűk nyílásszögű kúpon belül, a nyalábbal megegyező irányban repülnek tovább. A ritka gázban elérik a kaloriméter felszínét, amibe meghatározott mélységig behatolnak. Egy adott energiájú besugárzás után a kaloriméter felszínéről eltávolítottuk az azt fedő rézsapkát és a benne összegyűjtött ${}^7\text{Be}$ magokkal együtt egy másik, szintén árnyékolt Ge detektor elé helyeztük, hogy a ${}^7\text{Be}$ bomlásból származó gamma-sugárzást detektálhassuk. Így egy adott besugárzás során mindkét módszerrel megtudtuk határozni a hatáskeresztmetszetet.

Azt, hogy milyen bombázó energiatarományban végeztük el a kísérleteket a gyorsító maximális energiája és a legkisebb mérhető hatáskeresztmetszet szabta meg. A legnagyobb elérhető 400 keV-es energiáról indulva fokozatosan csökkentettük az energiát,

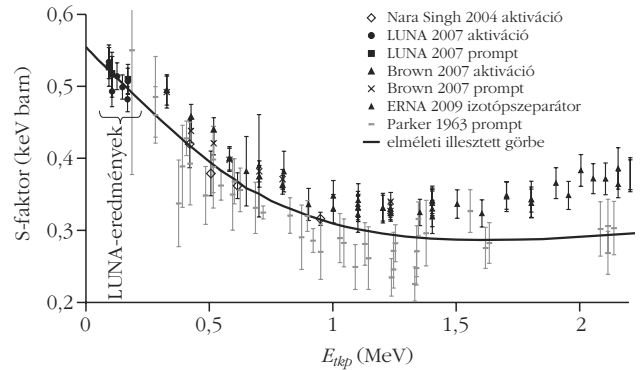
és végül 220 keV volt az a legalacsonyabb energia, ahol még kiértékelhető eredményt kaptunk. Érdemes megjegyezni, hogy a legalacsonyabb energián a besugárzás 40 napig tartott, ezalatt a céltárgyat mintegy $4 \cdot 10^{21}$ darab ^4He atom bombázta, mégis csak mindössze $5 \cdot 10^5$ reakció játszódott le. Ez is jelzi, milyen alacsony hatáskeresztmetszetek mérése volt a feladat.

Eredmények és további fejlemények

Eredményeinket – az 5. ábrán már használt formátumban – a 8. ábra mutatja (több más, újabb mérés eredményeivel együtt, amelyekre még kitérek). Az ábra bal felső részén látható LUNA eredmények azt mutatják, hogy sikerült elérnünk mindhárom kitűzött célt [6, 9]. Egyrészt a föld alatti laboratóriumban végzett mérésekkel alacsonyabb energiákat sikerült elérnünk, mint korábban bármikor. Másrészt méréseink pontossága is jobb, mint az 5. ábrán bemutatott mérések esetén, az egyedi pontok hibája az igen alacsony hatáskeresztmetszet ellenére sem haladja meg az 5%-ot. Harmadrészt a prompt és aktivációs módszerrel végzett mérések eredményei hibahatáron belül megegyeznek, tehát méréseink nem erősítik meg a korábbi eredmények által mutatott különbséget.

Az ábrán folytonos vonallal egy elméleti számítás eredménye látható, amely a LUNA kísérleti adatokra lett normálva. Ilyen elméleti számítások segítségével lehet az S-faktor értékeket a kísérletileg elérhetetlen, Napra jellemző energiákra extrapolálni. Az alacsony energiás és nagy pontosságú LUNA méréseknek köszönhetően ez az extrapoláció elvben sokkal megbízhatóbbá vált. A LUNA mérésekhez rögzített elméleti görbe ráadásul kiválóan illeszkedik a lényegesen magasabb energián, *Nara Singh* és munkatársai által 2004-ben publikált értékekhez (lásd az ábrán). Éppen ezért a LUNA adatok 2007-es publikációjában például azt írtuk, hogy „méréseink hatására a Napból érkező ^8B neutrínók számított fluxusának $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ reakcióból eredő bizonytalansága 7,5%-ról 2,4%-ra csökkent” [9]. Az azóta eltelt három év fejleményei azonban sajnos megkérdőjelezték ezen állítás igazát.

Az elméletileg számított S-faktor görbe alakja (energiafüggése) többé-kevésbé általánosan elfogadott volt a legutóbbi időkig, mindössze abszolút értékét illesztették a kísérleti adatokhoz (mint a 8. ábrán a LUNA adatokhoz), bár e normálás jogossága elméletileg megkérdőjelezhető. Természetesen más görbealakot jósoló elméleti modellek is napvilágot láttak, de a régi kísérleti adatok nagy pontatlansága és szórása miatt kísérleti alapon nem lehetett dönteni közöttük. A 2000-es évek új eredményei azonban átalakították ezt a képet. A LUNA eredmények publikálását követően hamarosan napvilágot láttak a *Brown* és munkatársai által mindkét módszerrel végzett mérés eredményei (lásd a 8. ábrán). A mért pontok láthatóan fölül esnek a LUNA adatokra illesztett görbének, de a pontok hibáját tekintve az egyezés akár még elfogadható



8. ábra. A $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ reakció mért asztrofizikai S-faktora a tömegközépponti energia függvényében. Az új kísérleti eredményeken kívül csak *Parker* és munkatársai által 1963-ban publikált mérés eredményei láthatók, mivel ez az adatsor terjed ki magas energiáig. Folytonos vonallal a LUNA adatokra illesztett elméleti görbe látható. Az új eredmények pontos bibliográfiai adatait lásd az ERNA eredményeket bemutató [10] hivatkozásban.

is lehetne. 2009-re azonban megszületett egy újabb kísérleti eredmény. A németországi bochumi egyetemen működő ERNA izotópszeparátorral egy új módszerrel vizsgálták a $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ reakciót. Az ATOMKI kutatói ebben a mérésben is részt vettek, de a részletek bemutatásától most eltekintek. A mérés lényege az volt, hogy a reakcióban keletkező ^7Be magokat közvetlenül (tehát nem a bomlásukon keresztül) detektálják oly módon, hogy a reakciótermékeket egy izotópszeparátoron vezetik keresztül. Ezzel a módszerrel csak nagyobb energián volt vizsgálható a reakció, de itt az eredmények meglepőnek bizonyultak [10]. Magas (körülbelül 1,3 MeV fölötti) energiákon korábban csak *Parker* és munkatársai vizsgálták ezt a reakciót, így az elméleti görbék ezt az adatsort próbálták reprodukálni. Most az ERNA mérések eredményei jóval magasabb S-faktor értékeket mutatnak, valamint jelentősen eltérő energiafüggést. Mivel magas energián csak a két említett, egymásnak ellentmondó adatsor létezik, mindenképpen szükséges új, független kísérleteket végezni ebben az energiatartományban. Ilyen mérést tervezünk az ATOMKI-ban is aktivációs technikával. Ezen kívül a reakció elméleti leírásában is szükséges a fejlődés, hogy az új kísérleti eredményeket értelmezni tudjuk és segítsük az alacsony energiákra történő extrapolációt.

Összegzés

A $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$ reakció a nukleáris asztrofizika egyik legfontosabb reakciója. Fontos szerepet játszik mind az Ósrobbanást követő elemszintézisben, mind a Nap és a hozzá hasonló csillagok hidrogénégési folyamataiban, és ezen keresztül a nagyenergiás neutrínók kibocsátásában. A 20. század második felében számos kísérletben mérték a reakció hatáskeresztmetszetét, de a mérések pontossága elmaradt a kívánatostól. Az utóbbi évtizedben ezért számos új mérést végeztek az adatok pontosításának érdekében. Ezek közül egyik legfontosabb a LUNA együttműködés által föld alatti

laboratóriumban elvégzett mérés, amiben minden ediginél alacsonyabb energiákat sikerült elérni. Az Ősrobbanásra jellemző energiatarományban új, pontos kísérleti értékek állnak rendelkezésre, így kijelenthetjük, hogy a ${}^7\text{Li}$ probléma a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció alapján nem oldható meg. A legújabb, nagyenergiás mérések azonban a reakcióval kapcsolatban új problémákat vetettek fel, ami kérdéssé teszi a Nap hidrogénégésére jellemző energiákra való extrapoláció megbízhatóságát. Ezért a ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ reakció vizsgálata mind kísérleti, mind elméleti szempontból valószínűleg még hosszú ideig nem tekinthető lezártnak.

Irodalom

1. Patkós A., Frei Zs.: *Inflációs kozmológia*. Typotex, Budapest, 2005.
2. Csabai I., Purger N., Dobos L.: Az Univerzum szerkezete. *Fizikai Szemle* 57/12 (2007) 385.
3. Fülöp Zs., Gyürky Gy.: *Az elemek születése. Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2009.
4. http://en.wikipedia.org/wiki/Proton-proton_chain_reaction
5. http://hu.wikipedia.org/wiki/Neutrínódetektorok_listája
6. Gy. Gyürky et al., *Phys. Rev. C* 75 (2007) 035805.
7. a csoport honlapja: <http://www.atomki.hu/atomki/IonBeam/nag>
8. a LUNA együttműködés honlapja: <http://luna.lngs.infn.it>
9. F. Confortola et al., *Phys. Rev. C* 75 (2007) 065803.
10. A. di Leva et al., *Phys. Rev. Lett.* 102 (2009) 232502.

A NEUTRÍNÓ ÚJABB MEGLEPETÉSE

Manno István
MTA KFKI RMKI

A neutrínó már számos esetben meglepte a kutatókat. A neutrínó-hipotézis születése sem volt kivétel ezek közül a meglepetések közül. *Wolfgang Pauli* a neutrínó-hipotézist akkor vezette be, amikor egy „kétségbeesett kísérletet” tett arra, hogy a β -bomlásban sérülőnek látszó energiamegmaradás törvényét megmentse (1930. december 4.).

A Gran Sasso-i föld alatti laboratóriumban (LNGS) ν_τ tau-neutrínót észlelt az OPERA kísérlet a CERN-ből érkező ν_μ müon-neutrínó nyalábban (2010. május 31.). A kísérlet első alkalommal figyelte meg direkt módon egy olyan eseményt, amelyet tau-neutrínó okozott. Ez pedig annyit jelent, hogy a ν_μ müon-neutrínó a CERN-ből a LNGS-ig megtett útján átalakul ν_τ tau-neutrínóvá. Ebből az is következik, hogy megvalósul a neutrínó-oszcilláció és legalább egy neutrínónak zérustól eltérő tömege van. Ez pedig túlmutat a részecskék és alapvető kölcsönhatások Standard modelljén (SM), mivel az SM-ben a neutrínóknak nincs tömegük.

A részecskék és kölcsönhatások Standard modellje¹

Jelenlegi tudásunk szerint a Világmindenségről és a benne végbemenő jelenségekről a legjobb leírást a részecskék és alapvető kölcsönhatások Standard modellje (Standard Model of Particles and Fundamental Interactions – SM) adja (lásd az 1. és 2. táblázatot). Az SM az anyag néhány építőelemének (hat kvark és hat lepton, valamint ezek antirészecskéi) és a köztük létrejövő négy alapvető kölcsönhatás (erős, elektromágneses, gyenge és gravitációs) segítségével írja le a Világmindenséget, amelyben élünk. Az SM leírja azt, ahogy a részecskék egymással kölcsönhatnak és ahogy egymásba átalakulnak. Ezek a kölcsönhatások és építőelemek elegendőek valamennyi eddig felfedezett jelenség leírására.

¹ Lásd *Horváth Dezső* cikkét és a hozzá tartozó mellékletet a *Fizikai Szemle* 2008. július–augusztusi számában.

A Világmindenség eddig feltérképezett valamennyi részén ezeket az építőelemeket és ezeket a kölcsönhatásokat találjuk.

Az SM jó leírást ad a fiatal és nagyon forró Univerzumból kiindulva, amely az Ősrobbanásban keletkezett, az Univerzum jelenlegi állapotáig. Az SM jó leírást ad a parányi méretektől, a részecskék mikrovilágától, amelyet nagy részecskegyorsítókval lehet tanulmányozni a hatalmas méreteig a legjobb távcsövekkel vizsgálható égitestek világáig.

A *gravitáció* tart bennünket a Földön és a bolygókat a pályáikon. A gravitációs vonzás bármely két részecske között létezik. A gravitáció olyan kis távolságokon, mint az atom mérete a többi kölcsönhatáshoz képest

1. táblázat		
A Standard modell építőelemei		
részecskék		
I. család	II. család	III. család
kvarkok		
up u $q = +2/3$ $m = 3 \text{ MeV}/c^2$	charm c $q = +2/3$ $m = 1500 \text{ MeV}/c^2$	top t $q = +2/3$ $m = 175000 \text{ MeV}/c^2$
down d $q = -1/3$ $m = 6 \text{ MeV}/c^2$	strange s $q = -1/3$ $m = 170 \text{ MeV}/c^2$	bottom b $q = -1/3$ $m = 4500 \text{ MeV}/c^2$
leptonok		
elektron e^- $q = -1$ $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$	müon μ^- $q = -1$ $m = 105 \text{ MeV}/c^2$	tau τ^- $q = -1$ $m = 1782 \text{ MeV}/c^2$
elektron-neutrínó ν_e $q = 0$ $m < 15 \text{ eV}/c^2$	müon-neutrínó ν_μ $q = 0$ $m < 0,17 \text{ MeV}/c^2$	tau-neutrínó ν_τ $q = 0$ $m < 18,2 \text{ MeV}/c^2$
antirészecskék		
\bar{u} \bar{d} e^+ $\bar{\nu}_e$	\bar{c} \bar{s} μ^+ $\bar{\nu}_\mu$	\bar{l} \bar{b} τ^+ $\bar{\nu}_\tau$