

# CSILLAGOK ÉS ATOMMAGOK

Gyürky György

PhD, tudományos főmunkatárs  
MTA ATOMKI, Debrecen  
gyurky@namafia.atomki.hu

Kevés olyan tudományág létezik, amely a természet oly távoli objektumait kapcsolná össze, mint a nukleáris asztrofizika, vagy más néven mag-asztrofizika. A mag-asztrofizikai kutatások tárgyát ugyanis csillagok és atommagok képezik, a makro- és mikrokozmosz építőkövei, több millió kilométer átmérőjű gázgömbök és a milliméter milliárdod részénél is kisebb részecskék. Közöttük azonban, mint látni fogjuk, szoros az összefüggés.

## Energiatermelés és elemszintézis a csillagokban

Az emberiséget régóta foglalkoztatja az a kérdés, hogy a Nap, melynek éltető melege a földi élethez nélkülözhetetlen, hogyan termeli azt a hihetetlen mennyiségű energiát, melyet folyamatosan sugároz bolygónkra. Az ókori népek magyarázat hiányában még isteni tulajdonságokkal ruházták fel a fény és meleg égi forrását, később azonban a felvilágosult emberiség természettudományos magyarázatot igyekezett találni. Több elképzelés is született, miszerint például a Nap kémiai égés révén termeli az energiát (a Napot szénből állónak gondolva!), vagy pedig a gravitációs összehúzódás a kisugárzott energia forrása. Miután azonban a darwini evolúciós elmélet általánosan elfogadottá vált, a Nap energiatermelésének fenti lehetőségeit el kellett vetni. Az evolúcióelmélet értelmében ugyanis a fa-

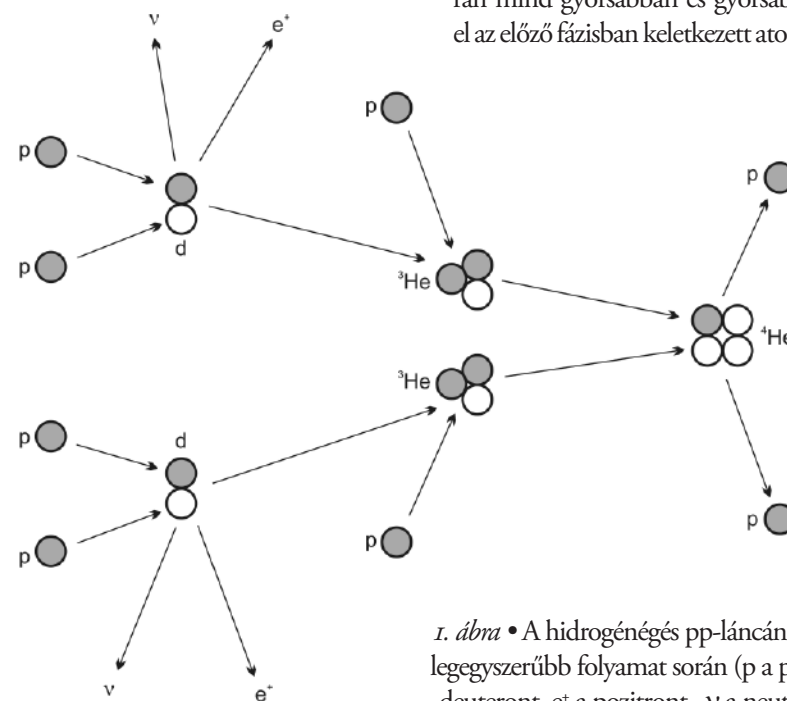
jok kialakulásához milliárd éves nagyságrendű idő szükséges (hasonlóan a Földön található egyes geológiai képződmények kialakulásához), és ilyen hosszú időn keresztül egyik javasolt energiaforrás sem képes fenntartani a Nap működését.

A megoldásra egészen a huszadik század elejéig várn kellett, korábban nem volt ismert olyan energiaforrás, amely elegendőnek bizonyult volna központi csillagunk működése számára. A huszadik század elején a fizika robbanásszerű fejlődése során Sir Ernest Rutherford feltárta az atomok szerkezetét, felfedezve az atommagot. A felfedezés után hamar kiderült az is, hogy az atommag hatalmas, a kémiai reakciókra jellemző energiáknál több nagyságrenddel nagyobb energiát tárol. Ez az energia magátalakulásokkal járó folyamatokban, magreakciókban fel is szabadítható, ebből adódik az a következtetés, hogy a Nap energiatermeléséért is magreakciók lehetnek a felelősek. A Nap színképeinek elemzésével megismerhetjük csillagunk kémiai összetételét. Ez alapján tudjuk, hogy a Napban legnagyobb arányban a periódusos rendszer két legkönnyebb eleme, hidrogén és hélium található. A hélium atommagja (az  $\alpha$ -részecske) nagy kötési energiájú atommag, összetevőiből (két protonból és két neutronból) történő felépítése során jelentős energia szabadul fel. Kézenfekvő tehát, hogy a Nap belsejében

hidrogénatommagok (protonok)  $\alpha$ -részecskévé történő egyesülése, fúziója termeli az energiát. Ebben a folyamatban azonban két protonnak neutronná kell alakulnia, ami a fizika egyik alapvető kölcsönhatása, a gyenge kölcsönhatás révén lehetséges. Mint nevéből is látszik, ez a kölcsönhatás csak kis valószínűséggel zajlik le, ennek (valamint a viszonylag alacsony hőmérsékletnek, lásd alább) köszönhető, hogy a Nap nem égeti el pillanatszerűen hidrogén üzemanyagát (óriási hidrogénbombaként felrobbanva), hanem évmilliárdokig tart a folyamat. Négy proton  $\alpha$ -részecskévé való egyesülése egy többlépcsős folyamat eredménye, amelyben különböző magreakciók játszanak fontos szerepet. A folyamatot összefoglaló néven pp-láncnak nevezzük, s ma már több közvetett és közvetlen kísérleti bizonyítékunk van arra, hogy a Nap valóban e folyamat során termeli az energiát. Az 1. ábra

a pp-lánc legegyszerűbb és a Nap esetében legnagyobb jelentőségű folyamatát mutatja.

Napunk csak egyike a Tejútrendszer felépítő mintegy százmilliárd csillagnak, és a Tejútrendszer is csak egy a hasonló számú galaxisok közül. Kezdetben minden csillag a Naphoz hasonlóan a hidrogénégés révén termeli az energiát, ez a folyamat azonban csak addig folyhat, amíg elegendő hidrogén áll rendelkezésre a fúziós reakciókhoz. Ami ezután következik, azt a csillag tömege határozza meg. A legkisebb tömegű csillagok élete a hidrogénégés lezárultával véget ér, fokozatosan kihűlnék, és elhalványulnak. Napunk és a hozzá hasonló tömegű csillagok még a korábban megtermelt hélium fúziója révén újabb energiaforráshoz jutnak, mielőtt végleg befejezik működésüket. Nagyobb tömegű csillagok a fúziós energiatermelő reakciók egész láncolatán mennek végig, melynek során mind gyorsabban és gyorsabban égetik el az előző fázisban keletkezett atommagokat,



1. ábra • A hidrogénégés pp-láncának lépései a legegyszerűbb folyamat során (p a proton, d a deuteron,  $e^+$  a pozitron,  $\nu$  a neutrínót jelöli)

míg végül eljutnak a legstabilabb atommagok tartományába, a vas csoport elemeihez, ahonnan már nincs további lehetőség energiatermelésre. A fúziós reakciók e láncolata meghatározza a csillag észlelhető tulajdonságait is. A hidrogént égető, ún. fősorozati csillagokból a héliumégés során vörös óriás lesz, majd a megfelelően nagy tömegű csillag eljuthat a csillag életének a végét jelentő szupernóva-robbanásig. Jelen cikk keretein belül lehetetlen áttekinteni mindezeket a folyamatokat. Azt azonban fontos hangsúlyozni, hogy a csillagfejlődés minden egyes szakaszában magreakciók biztosítják az energiatermelést, s határozzák meg a fejlődés lehetséges további útját.

A csillagok nemcsak oly módon járulnak hozzá a földi élethez, hogy megtermelik az éltető energiát. A Világegyetemünket felépítő kémiai elemek, így a csontjainkban található kalcium, vagy a vérünk hemoglobinjában lévő vas, mind a természet vegykonyháiban, csillagok belsejében jött létre. Az Univerzum születésekor, az ősrobbanásban csak a legkönnyebb elemek, hidrogén, hélium és némi lítium keletkezett. Minden nehezebb elem a berilliumtól egészen az uránig fúziós reakciók során, csillagokban alakult ki. A csillagfejlődés fent említett folyamataiban a kémiai elemek újabb és újabb csoportjai jönnek létre, mígnem a teljes periódusos rendszer benépesül (beleértve a vasnál nehezebb elemeket is, melyek keletkezése ugyan nem járul hozzá a csillag energiatermeléséhez, ám főként neutronbefogási reakciók során ezek szintézise is lejajlik). Egy, az életet szupernóvaként befejező csillag ezután szétszórja a térbe a létrehozott kémiai elemeket (2. ábra). A csillagközi tér ezáltal dúsul fel nehéz elemekben, lehetővé téve többek között az élet kialakulását a később keletkező csillagok körül keringő, nehéz elemekből felépülő bolygókon.



2. ábra • A G292.0+1.8 jelű szupernóva-maradvány a Chandra-röntgenobszervatórium felvételén. A köd közepén felrobbant csillag belsejében korábban fúziós reakciók során kialakult kémiai elemek hatalmas sebességgel terjednek szét a csillagközi térbe a köd tágulása során. (A NASA/CXC/PennState/S. Park et al. és a Palomar Observatory DSS szíves hozzájárulásával)

#### A nukleáris asztrofizika tudománya

A nukleáris asztrofizika tudománya a fent vázolt folyamatokkal, az energiatermelés, a csillagfejlődés és az elemszintézis részleteinek megértésével foglalkozik a magfizika szemszögéből. A 20. század derekára összegyűlt magfizikai és csillagászati ismeretekre alapozva 1957-ben E. Margaret Burbidge, Geoffrey R. Burbidge, William A. Fowler és Fred Hoyle (és tőlük függetlenül Alastair G. W. Cameron) úttörő jellegű cikkükben felvázolták a csillagok elemszintézisének alapvető folyamatait. Némi egyszerűsítéssel ezektől a munkáktól eredeztethetjük a modern nukleáris asztrofizika kezdetét. Az elemszintézis részleteinek kidolgozásáért William A. Fowler 1983-ban elnyerte a fizikai Nobel-díjat.

A nukleáris asztrofizika azonban a magfizikán belül különleges helyet foglal el. A csillagok belsejében uralkodó hőmérséklet (15 millió kelvin a Nap magjában vagy néhány milliárd kelvin szupernóvák esetén) magfizikai szempontból alacsonynak tekinthető, ugyanis ezeken a hőmérsékleteken az atommagok mozgási energiája jóval kisebb, mint a magfizikai kutatásokban megszokott energiák. Az asztrofizikai szempontból lényeges magreakciókat tehát alacsony, a csillagokra jellemző energián kell vizsgálni. Ilyen energiákon a magreakciók valószínűsége a pozitív töltésű atommagok között fellépő taszító erő hatására igen kicsi (a gyenge kölcsönhatás szerepén kívül ez a másik ok, amiért a csillagok évmilliárdokig képesek fenntartani a működésüket). Ezeknek az alacsony valószínűségű magreakcióknak a tanulmányozása nagy kihívást jelent a kísérleti fizikus számára.

A csillagokban lejátszódó magreakciók földi körülmények között részecskegyorsítókkal vizsgálhatók. Általában nincs szükség nagy gyorsítóberendezésekre, hiszen az alacsony energiás folyamatok kis energiájú gyorsítókkal is tanulmányozhatók. A magreakciókban keletkező részecskék és sugárzások detektálásával a vizsgált magreakció lezajlása megérthető. A kis valószínűséggel lejátszódó folyamatokban azonban alacsony intenzitású sugárzások detektálására van szükség, ami modern detektálási technikák alkalmazását és körültekintő kísérleti megvalósítást igényel.

#### Hazai mag-asztrofizikai kutatások

Az MTA debreceni Atommagkutató Intézetében (ATOMKI) dolgozik egy kis létszámú nukleáris asztrofizikai munkacsoport, melynek jelen cikk szerzője is tagja. Hazánkban jelenleg ez az egyetlen kutatócsoport, amely kísérleti mag-asztrofizikai vizsgálatokat végez.

A csoport a nukleáris asztrofizikán belül több különböző témával foglalkozik; alábbiakban két kutatási területről írok részletesebben.

A vasnál nagyobb rendszámú elemek szintézise a csillagfejlődés előrehaladottabb szakaszaiban, sorozatos neutronbefogási reakciók révén zajlik. Neutronbefogási reakciókkal azonban nem állítható elő a nehéz elemek valamennyi stabil, a természetben létező izotópja. A 3. ábrán a különböző atommagok ábrázolására használatos, ún. nuklidtáblázat egy részlete látható az elemek arzéntől cirkóniumig terjedő tartományában. A vízszintes tengelyen a neutronszám, a függőlegesen a protonszám van feltüntetve, és a tartomány minden stabil izotópjának megfelel egy négyzet az ábrán. A legtöbb stabil izotóp a neutronbefogási reakciók két különböző folyamata, az s-, illetve r-folyamatokon keresztül jön létre (az s és r betű a neutronbefogás gyorsaságára utaló slow [lassú], illetve rapid [gyors] szavak kezdőbetűje). Található azonban a nuklidtáblázat bal felső, protongazdag oldalán összesen 34 olyan izotóp (az ábrán 3 látható, sötét háttérrel és p betűvel jelölve), melyek nem keletkezhetnek neutronbefogási reakciók során. Ezen ún. p-izotópok (vagy p-magok) keletkezési mechanizmusa az asztrofizikai p-folyamat (Arnould – Goriely, 2003). A p-folyamatban, amelynek a kísérleti vizsgálata az ATOMKI nukleáris asztrofizikai csoportjának egyik fő feladata, protonokban gazdag atommagok jönnek létre.

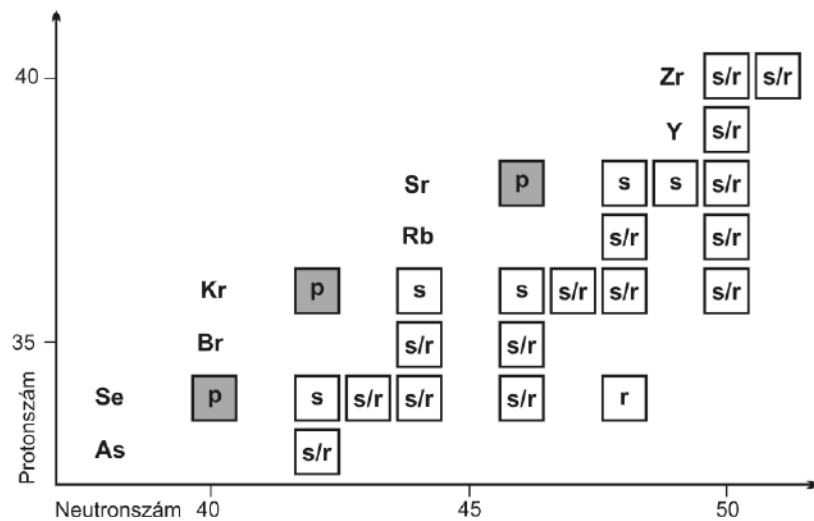
Egészen a legutóbbi évtizedekig nem volt tisztázott, hogy pontosan milyen folyamatok vezetnek a p-magok szintéziséhez. A ma elfogadott elmélet szerint a p-izotópok szupernóva-robbanásban keletkeznek főként gamma-fotonok által indukált reakciók révén. A robbanás során a csillagban olyan magas hőmérséklet uralkodik, hogy a hőmérsékleti

sugárzás gamma-fotonjai magreakciókat válthatnak ki. A nagyenergiás gamma-fotonok nehéz magokból neutronokat üthetnek ki, és sorozatos ilyen reakciókban létrejöhetnek a neutronszegény p-izotópok. A folyamat részletei igen bonyolultak, a neutronkilökési reakciókon kívül szerepet kapnak más, például proton vagy alfa-részecske kibocsátásával járó reakciók is. Jelenleg a p-folyamatra vonatkozó számítások még nem képesek reprodukálni a természetben található p-magok gyakoriságát, és ennek egyik lehetséges oka a szükséges magfizikai ismeretek hiányában keresendő.

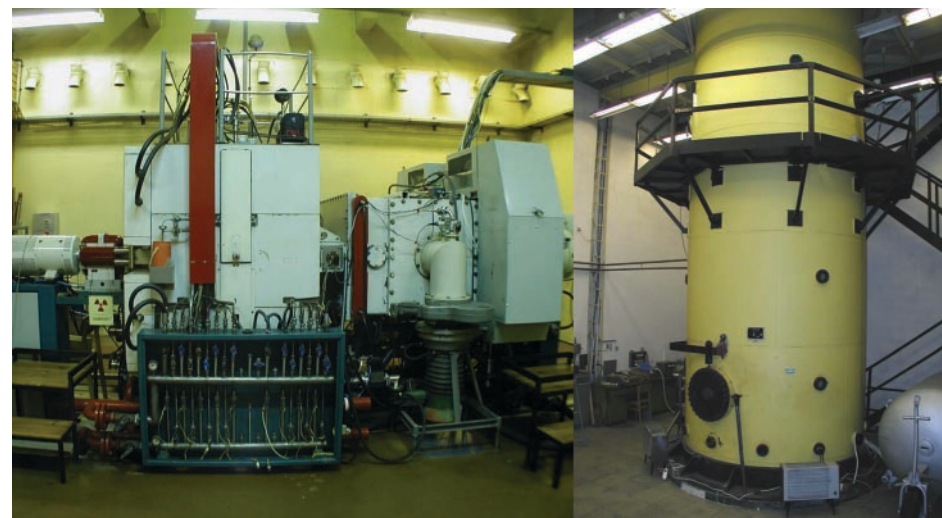
Az ATOMKI-ban a p-folyamat jobb megértése érdekében végzünk kísérleti vizsgálatokat. Mivel a gamma-indukált reakció közvetlen tanulmányozása technikailag igen nehéz, így a reakció időbeli fordítottját, inverzét vizsgáljuk. Gamma-indukált reakció esetén a gamma-foton váltja ki a reakciót, amelynek eredményeképpen részecske lép ki. Ennek az inverze a befogási reakció, ahol egy részecske váltja ki a reakciót, és gamma-sugárzás lép ki.

A befogási reakció tanulmányozásával következtetést vonhatunk le az inverz, gamma-indukált reakció tulajdonságaira is. Vizsgálatainkkal a töltött részecskék (protonok és alfa-részecskék) befogási reakcióira koncentrálnak.

A méréseket az adott folyamatra jellemző asztrofizikai energiatartománnyal egybeeső energiákon célszerű elvégezni. Az asztrofizikai p-folyamat esetén a jellemző energiatartomány lefedhető az ATOMKI gyorsítóberendezéseivel. Méréseinkhez tehát az ATOMKI Van de Graaff- és ciklotron típusú gyorsítói szolgáltatták a szükséges proton-, illetve alfa-részecske-nyalábokat. Az ATOMKI gyorsítói a 4. ábrán láthatók. Számos, a p-folyamat szempontjából lényeges befogási reakció magfizikai „valószínűségét”, úgynevezett hatáskeresztmetszetét mértük meg az elmúlt években (például Gyürky et al., 2006). Eredményeink felhasználhatók az asztrofizikai p-folyamat modellszámításaiban, így hozzájárulhatunk az elemszintézis e kevéssé ismert folyamatának jobb megértéséhez.



3. ábra • A nuklidtáblázat egy részlete. A négyzetek jelölik a stabil izotópokat a bennük lévő betűk pedig az elemszintézis keletkezésükhöz vezető folyamataira utalnak (s-, r- ill. p-folyamat)



4. ábra • Az ATOMKI nagyberendezései: a ciklotron (balra) és a Van de Graaff-típusú részecskegyorsító (jobbra). Az intézetben végzett nukleáris asztrofizikai kísérletekhez e két gyorsító szolgáltatja a részecskenyalábokat.

#### Asztrofizikai laboratórium a Föld felszíne alatt

Bár az ATOMKI gyorsítói kiválóan alkalmazhatók alacsony energiás magfizikai és mag-asztrofizikai kísérletek elvégzésére, a nukleáris asztrofizika egyes területein lényeges magreakciók vizsgálatához más feltételeknek eleget tevő kísérleti berendezések szükségesek. Ezért asztrofizikai kutatásaink egy részét nemzetközi együttműködés keretein belül, külföldi laboratóriumokban végezzük.

Az 1. ábra a Nap hidrogénégsi reakcióinak csak legvalószínűbb láncolatát mutatja be, emellett több más úton, számos egyéb magreakció részvételével is lejátszódhat négy proton alfa-részecskévé történő fúziója. Mindezen reakciók közös jellemzője, hogy a Nap belsejében igen alacsony energián mennek végbe, és a reakciók lejátszódási valószínűsége – hatáskeresztmetszete – extrém alacsony. Az ilyen reakciók kísérleti vizsgálatát

tehát alacsony energiát biztosító gyorsítókkal lehet elvégezni, a kísérleti technikát pedig az alacsony hatáskeresztmetszetek mérésére kell optimalizálni. A debreceni nukleáris asztrofizikai csoport tagjai részt vesznek a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) nemzetközi együttműködésben. Az együttműködés célja extrém alacsony hatáskeresztmetszetű reakciók, főként a hidrogénégsi reakcióinak a kísérleti vizsgálata.

Olaszországban, a Gran Sasso Nemzeti Laboratóriumban üzemelteti a LUNA-együttműködés azt a 400 kV terminálfeszültségű elektrosztatikus gyorsítót, amit a kísérletekhez használunk. A gyorsító alacsony energiájú és nagy intenzitású részecskenyaláb előállítására alkalmas. A nagy intenzitású nyaláb az egyik feltétele az alacsony hatáskeresztmetszetű reakciók vizsgálatának, ugyanis nagyszámú bombázórészecske biztosítja azt, hogy a kis valószínűségű folyamatok is jó eséllyel észlelhetők legyenek (a LUNA-gyorsító ese-

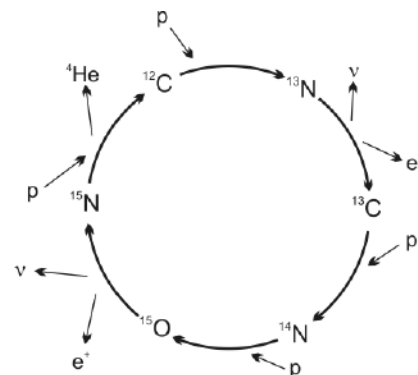
tén például másodpercenként nagyságrendileg  $10^{15}$  részecske bombázza a céltárgyat). Egy reakció hatáskeresztmetszetét a reakcióban keletkező gamma- vagy részecsquesugárzás detektálásával lehet megmérni. Egy kis hatáskeresztmetszettel lejátszódó reakció során ez a sugárzás általában igen kis intenzitású, aminek a detektálása nehéz feladat. A laboratóriumban jelen lévő környezeti radioaktivitásból származó vagy kozmikus eredetű sugárzás intenzitása jelentősen meghaladhatja a mérni kívánt reakcióból származó sugárzást, lehetetlenné téve ily módon a pontos mérést. Fontos követelmény tehát a háttérsugárzás valamilyen módszerrel történő csökkentése. Míg a környezeti radioaktivitásból származó háttér csökkentése viszonylag egyszerűen megoldható alacsony belső aktivitású árnyékolóanyag használatával, addig a nagy áthatolóképeségű kozmikus sugárzás leárnyékolása nehezebb feladat, amely leghatékonyabban a kísérlet föld alá telepítésével oldható meg. Az olaszországi Gran Sasso Nemzeti Laboratórium a világ legnagyobb föld alatti kutatóintézet. A laboratórium fölötti mintegy 1400 méter vastag szikla elegendő arra, hogy a kozmikus sugárzást sok nagyságrenddel csökkentse, kiváló feltételeket teremtve ezzel olyan kutatások számára, ahol a kis valószínűségű események észlelését a kozmikus sugárzás a föld felszínén nem tenné lehetővé. Az itt található LUNA-gyorsító jelenleg a világ egyetlen föld alatti laboratóriumban működő gyorsítója, ami egyedülálló lehetőséget biztosít nukleáris asztrofizikai kutatások számára.

Az utóbbi években több nagy jelentőségű reakció vizsgálatában vettünk részt az együttműködés keretében. Ezek közül két példát említek. A  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$  folyamat a Nap hidrogénégésének egyik kulcsreakciója.

Bár kisebb valószínűségű, mint az 1. ábrán is látható  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p} + \text{p}$  reakció, ám ez a folyamat vezet a Nap belsejében a  ${}^7\text{Be}$  és a  ${}^8\text{B}$  magok termeléséhez, amelyek radioaktív  $\beta$ -bomlásából származnak a földi neutrínódetektorok által észlelt nagyenergiás neutrínók. A neutrínók földi detektálása jelenti a napmodellek egyik legérzékenyebb ellenőrzési lehetőségét, így a neutrínófluxus nagyságát befolyásoló magreakciók pontos ismerete igen lényeges. A LUNA-együttműködés méréseiben sikerült a  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$  reakció hatáskeresztmetszetét minden korábbinál alacsonyabb energián és nagyobb pontossággal megmérni, jelentősen csökkentve ezáltal a napneutrínók számított fluxusának bizonytalanságát (Gyürky et al., 2007).

A pp-láncon kívül a hidrogénégés folyamata lejátszódhat egy másik folyamat, az ún. CNO-ciklus reakcióin keresztül is. Bár a nap esetében a CNO-ciklus csak mintegy 1,5%-át adja a megtermelt energiának, nagyobb tömegű csillagok esetén ez a ciklus a hidrogénégés fő mechanizmusa, és az ebben szereplő magreakciók tulajdonságai szabják meg a csillag fejlődési folyamatát. A ciklus, melynek lépéseit az 5. ábra szemlélteti, legfontosabb tagja a  ${}^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$  reakció, ugyanis ennek a legalacsonyabb a hatáskeresztmetszete, így ez a reakció szabja meg az egész ciklus lezajlásának valószínűségét.

A fent tárgyalt  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$  reakcióhoz hasonlóan a  ${}^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$  reakció kísérleti vizsgálata is nehéz feladat az alacsony hatáskeresztmetszet miatt. Egy föld alatti alacsony energiás és nagy intenzitású nyalábot biztosító gyorsító e reakció tanulmányozásában is komoly előnyt jelent. A LUNA-együttműködés keretében tehát – kihasználva a föld alatti gyorsító által kínált egyedülálló lehetőségeket – a  ${}^{14}\text{N} + \text{p} \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$  reak-



5. ábra • A hidrogénégés CNO-ciklusában szerepet játszó magreakciók sematikus ábrázolása

ció vizsgálatát is elvégeztük. E reakció esetén is sikerült a hatáskeresztmetszetet minden eddiginél alacsonyabb energián meghatározni (Formicola et al., 2004). Méréseink eredménye a CNO-ciklus jobb megértésén túl áttételesen hozzájárult többek között a gömbhalmazok, a Tejútrendszer jellegzetes, gömbszerű csillagsoportosulásai életkorának pontosabb meghatározásához (Imbriani et al., 2004). Szép példája ez annak, hogy mag-

fizikai mérésből következtetni lehet csillagászati objektumok tulajdonságaira.

A magfizika fejlődésével párhuzamosan a 20. század második felében a nukleáris asztrofizika is jelentős fejlődésen ment keresztül. Ma már értelmezni tudjuk a legtöbb csillagászati észlelés mögött megbúvó magfizikai folyamatokat, értjük a csillagfejlődés és az elemszintézis főbb részleteit. Számos kérdés vár még azonban megválaszolásra, és sok esetben a válaszok megtalálásához a magfizikai ismeretek bővítése szükséges. A harmadik évezred elején a világ több pontján épülnek nagyszabású, új generációs berendezések magfizikai kutatások céljára (pl. GSI, Németország; Ganil, Franciaország; RIKEN, Japán). E projektek mindegyikében nagy hangsúlyt kapnak a nukleáris asztrofizikai kutatások, így a következő években további jelentős előrelépés várható a csillagokat és atommagokat összekapcsoló, izgalmas tudományágban.

Kulcsszavak: csillag, csillagfejlődés, elemszintézis, kísérleti magfizika, magreakció, nukleáris asztrofizika

#### IRODALOM

- Arnould, Marcel – Goriely, Stephane (2003): The P-process of Stellar Nucleosynthesis: Astrophysics and Nuclear Physics Status. *Physics Reports*. 384, 1–84.
- Burbidge, E. Margaret – Burbidge, G. R. – Fowler, W. A. – Hoyle, F. (1957): Synthesis of Elements in Stars. *Reviews of Modern Physics*. 29, 547–654.
- Cameron, Alistair G. W. (1957): *Stellar Evolution, Nuclear Astrophysics and Nucleogenesis*. Chalk River Report. CRL-41.
- Formicola, Alba et al. (2004): Astrophysical S-factor of  ${}^{14}\text{N}(\text{p},\gamma){}^{15}\text{O}$ . *Physics Letter B*. 591, 61–68.
- Gyürky György et al. (2006):  $\alpha$ -induced Cross Sections of  ${}^{106}\text{Cd}$  for the Astrophysical P process. *Physical Review C*. 74, 025805.
- Gyürky György et al. (2007):  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  Cross Sec-

tion at Low Energies. *Physical Review C*. 75, 035805.

Imbriani, Gianluca et al. (2004): The Bottleneck of CNO Burning and the Age of Globular Clusters. *Astronomy and Astrophysics*. 420, 625–629.

Néhány hasznos (angol nyelvű) weboldal a cikk témájával kapcsolatban: [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/articles/fusion/index.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/articles/fusion/index.html) • <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/astro/procyc.html> • <http://www.astrophysicsspectator.com/topics/stars/>

Az ATOMKI nukleáris asztrofizikai csoportjának honlapja: [http://www.atomki.hu/atomki/VdG/start\\_h.html](http://www.atomki.hu/atomki/VdG/start_h.html)

A LUNA-együttműködés honlapja: <http://npgroup.pd.infn.it/luna/index.html>