

Hidrogénfúziós reakciók csillagokban

Gyürky György

MTA Atommagkutató Intézet
4026 Debrecen, Bem tér 18/c, 52/509-246

Napunk és a hozzá hasonló fősorozatbeli csillagok magfúziós reakciók révén termelik energiájukat, melyek során négy hidrogén atommagból egy hélium atommag képződik. A folyamat nem egy lépésben, hanem számos magreakció részvételével zajlik. Jelen cikkben ezeket a reakciókat, az úgynevezett pp-láncok és CNO ciklusok reakcióit veszem sorra, bemutatva főbb jellemzőiket. A cikk végén röviden kitérek a tárgyalt reakciók kísérleti vizsgálatának lehetőségeire.

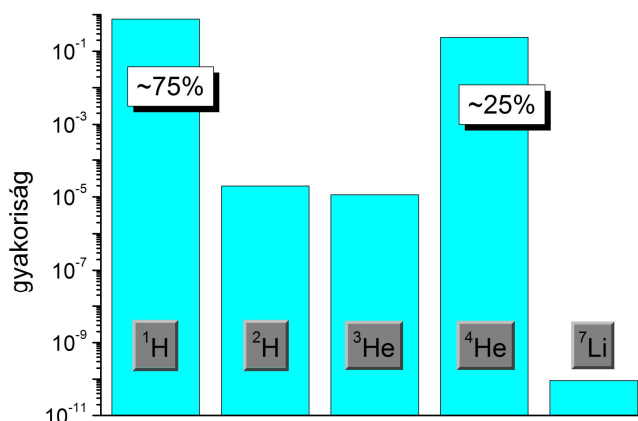
Bevezetés

Egészen a 20. század elejéig az emberiségnek nem sikerült választ találni arra a látszólag egyszerű kérdésre, hogy mi a Nap által folyamatosan a világűrbe sugárzott óriási mennyiségű energia forrása. Sem kémiai égés, sem pedig gravitációs összehúzódás nem tudja fenntartani csillagunk működését kellően hosszú ideig. Mintegy száz évvel ezelőtt azonban az atommag felfedezése, illetve annak felismerése, hogy az atommagok kötési energiája a kémiai folyamatokkal összehasonlítva nagyságrendekkel nagyobb, arra vezetett, hogy a Nap energiaforrása magátalakulásokban keresendő [1,2]. Ráadásul 1917-ben, amikor létrehozták az első mesterséges magátalakítást, az is bebizonyosodott, hogy az atommagokban tárolt energia valóban felszabadítható.

A Nap fényének színképelemzéséből tudjuk, hogy csillagunk döntő részben hidrogénből és héliumból áll. A hélium leggyakoribb, 4-es tömegszámú izotópjának atommagja nagy kötési energiával rendelkezik (mintegy 28 MeV), így hidrogén atommagok (protonok) ${}^4\text{He}$ atommaggá (két protonból és két neutronból álló alfa-részecskévé) való átalakításával jelentős energia felszabadítható. A Napban kis mennyiségben ugyan, de található nehezebb kémiai elemek is. Egy első generációs csillag azonban, mely az univerzum létrejöttét követően az akkor rendelkezésre álló anyagból keletkezett, szinte kizárólag hidrogént és héliumot tartalmaz. Az 1. ábrán látható az ősrobbanás után néhány perccel lezajlott elemszintézis eredménye, azaz azoknak az izotópoknak a tömegaránya, amik ebben a korai időszakban létrejöttek. Mint látható, mindössze öt különböző izotóp jött létre számottevő mennyiségben: a hidrogén két stabil izotópjá (${}^1\text{H}$ és ${}^2\text{H}$), a hélium két stabil izotópjá (${}^3\text{He}$ és ${}^4\text{He}$) valamint a ${}^7\text{Li}$ izotóp. Más elemek csak sok nagyságrenddel kisebb gyakorisággal keletkeztek.

Az öt létrejött izotóp gyakorisága között is óriási különbségeket találunk. A ${}^2\text{H}$ és ${}^3\text{He}$ mennyisége mintegy öt, míg a ${}^7\text{Li}$ gyakorisága tíz nagyságrenddel kevesebb a ${}^1\text{H}$ -hez és ${}^4\text{He}$ -hoz képest. Kijelenthetjük tehát, hogy a korai univerzum anyagát szinte kizárólag hidrogén és hélium, ezeknek is rendre az 1-es és 4-es tömegszámú izotópjai alkották durván 75%-25% tömegarányban. Az elsőként létrejövő csillagok így kizárólag ennek a két elemnek az

atommagjain lejátszódó magreakciók révén nyerhettek energiát. Lássuk, hogy ez hogyan történik [3]!



1. ábra: Az ősrobbanás után keletkezett öt izotóp gyakorisága az univerzum tömegének arányában kifejezve. A sok nagyságrendet átívelő logaritmusos skála jól mutatja, hogy a korai univerzum szinte csak ${}^1\text{H}$ és ${}^4\text{He}$ izotópokból állt.

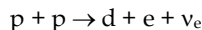
A hidrogénfúzió első lépése

A ${}^4\text{He}$ izotóp magjában két proton és két neutron található, így a hidrogénfúzióhoz, azaz hidrogén atommagok héliummá történő alakulásához az kell, hogy négy proton egyesüljön, miközben kettő közülük neutronná alakul. Elenyészően kicsiny azonban annak az esélye, hogy egy csillag plazmájában négy proton egyidejűleg találkozzon. Így a hidrogénfúzió csak több lépésben, kétrészecske-reakciókon keresztül mehet végbe.

${}^1\text{H}$ és ${}^4\text{He}$ izotópokon a legkézenfekvőbb a következő három kétrészecske-reakció lezajlása:



E három reakció végmagja azonban minden esetben részecske-instabil, azaz létrejötté után igen rövid időn belül elbomlik, mégpedig a keletkezésével azonos módon. Az első folyamat azért nem lehetséges, mert két protonnak nem létezik kötött állapota (ez lenne a ${}^2\text{He}$ izotóp). Kötött rendszert képez azonban egy proton és egy neutron. Ez a hidrogén kettős tömegszámú izotópjának (${}^2\text{H}$), a deutériumnak az atommagja, a deuteron (d). Ennek létrejöttéhez az kell, hogy két proton találkozásakor az egyik neutronná alakuljon. Ekkor a következő folyamat zajlik le:



mely során a deuteronon kívül a proton béta-bomlásának következtében keletkezik egy pozitron és egy elektron-neutrínó, valamint felszabadul mintegy 1,4 MeV energia.

Szabad proton nem alakulhat neutronná, ugyanis a neutron tömege nagyobb, mint a protoné, így energetikailag ez az átalakulás nem lehetséges. Két proton fúziója esetén azonban már lehetséges ez a folyamat, ugyanis a deuteron kötési energiájának következtében két proton együttes tömege nagyobb, mint egy deuteroné. Így energetikailag megengedett a fúzió során a proton béta-bomlása.

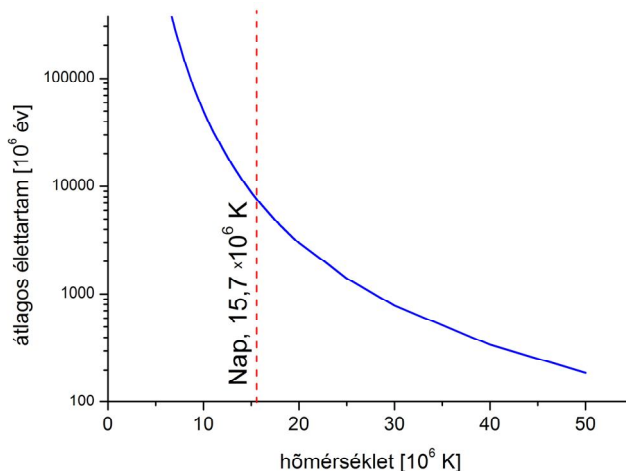
Ez az úgynevezett pp reakció a kiinduló pontja a Naphoz hasonló, viszonylag kisméretű, fősorozatbeli csillagok energiatermelő folyamatának. A pp reakció két okból is csak igen lassan zajlik. Az egyik ilyen ok a proton neutronná alakulásának szükségessége, ami a természet egyik alapvető kölcsönhatása, a gyenge kölcsönhatás révén zajlik. Mint neve is mutatja, a kölcsönhatás kis valószínűségű folyamat, így két proton ütközése esetén csak igen ritkán következik be, az ütközések túlnyomó többségében csak rugalmas szórás történik.

A folyamat lassúságának másik oka a csillag belsejében uralkodó hőmérséklet magfizikai szempontból alacsony voltában keresendő. Mivel a protonok pozitív töltésű részecskék, ütközésükhöz le kell győzniük a közöttük fennálló elektromos tasztítást. A protonok töltésének és sugarának ismeretében kiszámítható, hogy az ütközési energiának minimum 550 keV-nek kell lennie, hogy legyőzve az elektromos tasztítást ténylegesen lejátszódjon az ütközés. A protonok mozgási energiája, így az ütközések kinetikus energiája a termikus mozgásból származik. A Nap magjára jellemző mintegy 15 millió K hőmérsékleten a protonok átlagos mozgási energiája 1,3 keV. Ez kevesebb, mint 400-ad része a klasszikus képben minimálisan szükséges energiának, azaz a Coulomb-gát magasságának. A folyamat lejátszódását a kvantummechanika teszi lehetővé. A kvantummechanikai alagút-effektus révén a Coulomb-gát magasságánál kisebb energiájú töltött részecskék között is lejátszódhat magreakció. Ennek valószínűsége azonban annál kisebb, minél alacsonyabb a résztvevő részecskék energiája. A pp reakció esetén ez az energia igen alacsony. Ez a másik oka a reakció lassú voltának.

A pp reakció szinte az egyetlen a csillagokban előforduló magreakciók között, melyben közvetlenül a reakció során béta-bomlás is végbemegy. A Coulomb-gát alatti energián, alagút-effektus révén végbemenő reakciók viszont teljesen általánosak a csillagokban zajló folyamatok esetén. A csillagok hőmérséklete ugyanis olyan alacsony, hogy még a legalacsonyabb Coulomb-gáttal jellemezhető pp reakció is

mélyen a gát alatt zajlik. Nagyobb töltésű összetett atommagok esetén (ahol a gát magasabb) ez még inkább igaz.

A pp reakció valószínűségének (azaz hatáskeresztmetszetének) ismeretében ki lehet számítani, hogy egy adott hőmérséklet (valamint sűrűség és anyagi összetétel) mellett mekkora egy proton átlagos élettartama, mielőtt bekövetkezne a reakció. Mivel az alagút-effektus valószínűsége, és így a hatáskeresztmetszet az energiától erősen függ, az energia pedig a csillag hőmérsékletével arányos, így a protonok átlagos élettartama a hőmérsékletnek erősen változó függvénye. A kiszámított élettartamot mutatja a 2. ábra a hőmérséklet függvényében a Nap magjára jellemző sűrűség és anyagi összetétel esetén. Mint látható, a hőmérséklet viszonylag szűk tartományán belül az élettartam sok nagyságrenddel változik, ami a hatáskeresztmetszet exponenciális energiaszámításának köszönhető. A Nap magjának mintegy 15 millió fokos hőmérséklete esetén (az ábrán függőleges vonallal jelölve) a protonok átlagos élettartama majdnem tízmilliárd év. Ez a pp reakció lassúsága az oka annak, hogy a Nap nem robban fel, mint egy óriási hidrogénbomba, hanem a hidrogénfúzió mintegy tízmilliárd évig képes fenntartani a működését.

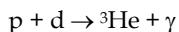


2. ábra: Egy proton átlagos élettartama a pp reakció bekövetkeztéig, a csillag magja hőmérsékletének függvényében.

Az ábra alapján az is érthető, hogy különböző tömegű csillagok esetén miért tart a hidrogénfúzió időszaka gyökeresen eltérő hosszúságú ideig. Minél nagyobb tömegű egy csillag, annál nagyobb a magjában a hőmérséklet, így annál gyorsabban zajlik a pp reakció. Ennek következtében, míg egy Napnál tízszer könnyebb csillag akár hatbillió ($6 \cdot 10^{12}$) évig is folytathatja a hidrogénfúziót, addig egy tíz naptömegnyi óriás pár millió év alatt kimeríti hidrogénüzemanyagát.

A pp-láncok

A pp reakció után a hidrogénégés további reakcióit a szóba jöhető reakciók hatáskeresztmetszetei, valamint a reakcióba lépő magok gyakorisága határozza meg. A keletkező deuteron legnagyobb hatáskeresztmetszettel egy másik deuteronnal tudna reakcióba lépni. A csillagban azonban túlnyomó többségben protonok vannak jelen, így a deuteron sokkal nagyobb valószínűséggel lép egy protonnal fúziós reakcióba:

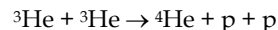


A reakció során ${}^3\text{He}$ (a hélium természetben igen ritkán előforduló könnyű izotópja) keletkezik és gamma-sugárzás formájában 5,5 MeV energia szabadul fel. A pp és a p+d reakciók együttes eredményeképp a csillagban a deuteronok egyensúlyi koncentrációja alakul ki, egységnyi idő alatt ugyanannyi jön létre a pp reakcióban, mint amennyi a p+d fúzióban megsemmisül. A pontos számítások azt mutatják, hogy egyensúlyban a deuteron koncentrációjának protonhoz viszonyított aránya mindössze 10^{-18} körüli. Így nem meglepő, hogy két deuteron találkozásának és fúziójának a valószínűsége elhanyagolható. A Nap magjában a deuteron protonbefogás előtti átlagos élettartama mindössze 1,6 s körüli. Ez mintegy 17 nagyságrenddel rövidebb, mint a proton átlagos élettartama. A következőkben felsorolt reakciók is mind jóval gyorsabban zajlanak, mint a pp reakció, így a hidrogénégés időskáláját, s ezáltal a csillag élettartamát kizárólag a pp reakció sebessége határozza meg.

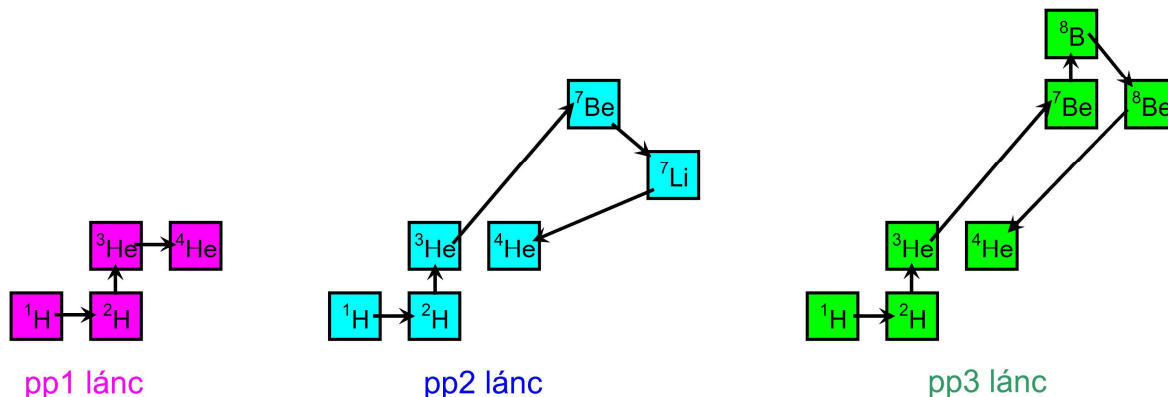
A keletkező ${}^3\text{He}$ magon elvben számos különböző reakció is lejátszódhat. A legnagyobb mennyiségben jelen levő protonok által kiváltott $p + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{Li}$ reakció azonban energetikailag nem lehetséges a csillagban. Ehhez ugyanis legalább 3 MeV ütközési energia kellene, ami a csillagban nem áll rendelkezésre. Ráadásul (éppen az

energiaviszonyokból kifolyólag) a ${}^4\text{Li}$ mag nem is stabil, proton kibocsátásával He maggá alakul vissza. Protonok tehát nem játszhatnak szerepet a He további sorsában. Reakcióba léphetne a He deuteronokkal is, ráadásul ennek a reakciónak elég magas a hatáskeresztmetszete. Mint azonban láthattuk, a deuteronok protonokkal igen rövid idő alatt reakcióba lépnek így a $d + p$ reakció „elfogyasztja” a deuteronokat a $d + {}^3\text{He}$ folyamat elől, így ez utóbbi a hidrogénégésben nem játszik lényeges szerepet.

Mivel hidrogén-izotópok nem játszanak szerepet a ${}^3\text{He}$ további fúziójában, az csak másik hélium izotóppal léphet reakcióba. A lehetséges folyamatok közül messze a legnagyobb hatáskeresztmetszetű két ${}^3\text{He}$ mag alábbi reakciója:



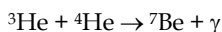
melyben két proton kibocsátása mellett ${}^4\text{He}$ mag keletkezik és jelentős energia (12,9 MeV) szabadul fel a reakciótermékek kinetikus energiájának formájában. Ezzel a reakcióval teljessé válik a hidrogénégés többlépcsős folyamata, mely során négy protonból egy ${}^4\text{He}$ atommag keletkezik jelentős energia felszabadulása mellett. A reakciók fenti sorozatát nevezzük pp 1 láncnak [4]. A 3. ábra bal oldali részén ennek a láncnak a folyamata látható a nuklidtáblázat szokásos ábrázolásában.



3. ábra: A hidrogénégés három pp láncának reakciói

Igaz, hogy a ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ reakciónak viszonylag nagy a hatáskeresztmetszete, de a ${}^3\text{He}$ izotóp protonokhoz viszonyított gyakorisága a csillagokban kicsi, a nap esetében 10^{-5} körüli. ${}^4\text{He}$ izotóp viszont részben az ősrobbanásból, részben a hidrogénégés eredményeképp, nagy gyakorisággal van jelen. (A Nap esetén jelenleg a mag fele részben protonokból, fele részben ${}^4\text{He}$ izotópokból áll.) Egy ${}^3\text{He}$ magnak tehát sokkal nagyobb esélye van arra, hogy egy ${}^4\text{He}$ maggal találkozzon, mint hogy egy másik ${}^3\text{He}$ -mal. Így még ha a ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ reakció hatáskeresztmetszete jóval kisebb is, eséllyel veszi fel a versenyt a ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$ folyamattal.

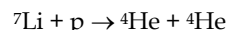
A reakció, mely megnyitja a hidrogénégés 2. és 3. pp láncát tehát így zajlik le:



azaz a gamma-foton által elvitt 1,6 MeV energia felszabadulása mellett ${}^7\text{Be}$ mag keletkezik. A ${}^7\text{Be}$ mag nem stabil, elektronbefogással ${}^7\text{Li}$ izotóppá alakul pozitron és neutrínó kibocsátása mellett:

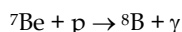


A keletkező ${}^7\text{Li}$ mag egy protonnal reakcióba lépve két ${}^4\text{He}$ mag keletkezik és 13,8 MeV energia szabadul fel:



Így válik teljessé a pp2 lánc, ami a 3. ábra közepén látható. Összességében itt is négy proton alakul át egy ${}^4\text{He}$ maggá, ám vegyük észre, hogy itt egy összetett mag belsejében, béta-bomlással történik a második proton neutronná alakulása, nem pedig egy magreakció során, mint a pp reakció esetén.

Földi körülmények között a ${}^7\text{Be}$ mag felezési ideje körülbelül 53 nap. A bomlás során a mag a saját atomi elektronjai közül fog be egyet. A csillagban uralkodó több millió fokban hőmérsékleten azonban az atomok ionizált állapotban, elektronjaiktól megfosztva vannak jelen. Így a ${}^7\text{Be}$ mag csak a plazma szabad elektronjait (vagy a rövid időre atomi pályákra kerülő elektronokat) tudja befogni. A felezési ideje ezért meghosszabbodik, számítások szerint a Nap esetén majdnem kétszeresére. Ennyi idő alatt nem elhanyagolható annak az esélye, hogy a ${}^7\text{Be}$ mag még elbomlása előtt egy protonnal fúziós reakcióra lépjen 0,14 MeV energia felszabadulásával:

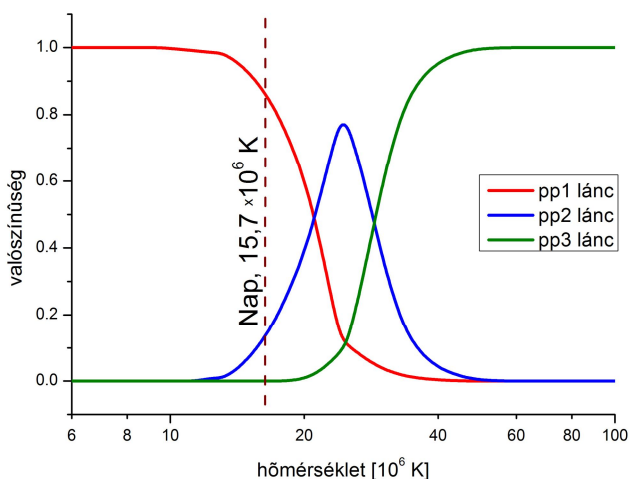


A keletkező ${}^8\text{B}$ mag kevesebb, mint egy másodperces felezési idővel béta bomlás révén ${}^8\text{Be}$ maggá alakul, mely spontán módon széthasad két ${}^4\text{He}$ magra:



Ezzel válik teljessé a hidrogénégés pp3 lánc, melyet a 3. ábra jobb oldala mutat.

A pp láncok mindegyikében számos töltött részecske-reakció zajlik, melyek hatáskeresztmetszetét nagyrészt az alagúteffektus valószínűsége határozza meg. A hőmérséklet növekedésével így mindhárom lánc sebessége nő. Nem egyforma azonban a láncok sebességének hőmérsékletfüggése, így különböző hőmérsékleteken a három lánc hozzájárulása a hidrogénégés teljes folyamatához eltérő. A 4. ábra mutatja a három ág relatív valószínűségét a hőmérséklet függvényében a Nap sűrűségében és anyagi összetétele esetén. Alacsony hőmérsékleten a pp1 lánc, míg magas hőmérsékleten a pp3 lánc a domináns. A pp2 lánc közepes hőmérsékleteken jut szerephez.



4. ábra: A három pp-lánc relatív hozzájárulása a hidrogénégésből származó energiatermeléshez a hőmérséklet függvényében

Az ábrán függőleges vonal mutatja a Nap magjának hőmérsékletét. Mint látható, a Nap esetén a pp1 lánc a domináns, a teljes energiatermelés mintegy 85%-a származik ebből az ágból. A maradék 15% a pp2 lánc hozzájárulása, míg a pp3 lánc mindössze körülbelül 0,1%-ért felelős.

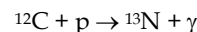
CNO ciklusok: katalitikus hidrogénégés

Mint láttuk, a pp láncok időskáláját a leglassúbb pp-reakció szabja meg, mert a béta bomlás szükségessége miatt ennek a reakciónak van magasan a legkisebb hatáskeresztmetszete. A pp2 és pp3 láncok tanulsága alapján azonban a szükséges béta-bomlás összetett magokban is végbemehet. Egy, az ősrobbanás után keletkezett első generációs csillagnak a pp-láncokon kívül nincs más lehetősége a hidrogénfúzióra, így a kezdeti pp reakció elkerülhetetlen.

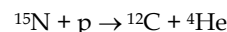
Második, vagy későbbi generációs csillagok anyagában azonban már jelen vannak az előző csillaggenerációk által megtermelt nehezebb kémiai elemek. Jelen cikk keretein túlmutat a héliumnál nehezebb elemek szintézisének tárgyalása, így most a részletek bemutatása nélkül csak a tényt rögzítsük: univerzumunk hidrogén és hélium utáni leggyakoribb elemei az oxigén, szén és nitrogén. Ha ezek az elemek jelen vannak a csillag magjában, akkor a rajtuk lezajló magreakciók hozzájárulhatnak a hidrogénégés folyamatához, s így az energiatermeléshez.

A csillag hőmérsékletétől és anyagi összetételétől függően számos különböző, nehezebb elemek részvételével zajló hidrogénégési folyamat lehetséges. Itt csak a Nap szempontjából is érdekes CNO ciklusokat tekintem át röviden.

Induljunk ki a viszonylag gyakori ${}^{12}\text{C}$ izotópból! A csillagban gyakori protonokkal reakcióba lépve lezajlik rajta a következő reakció:

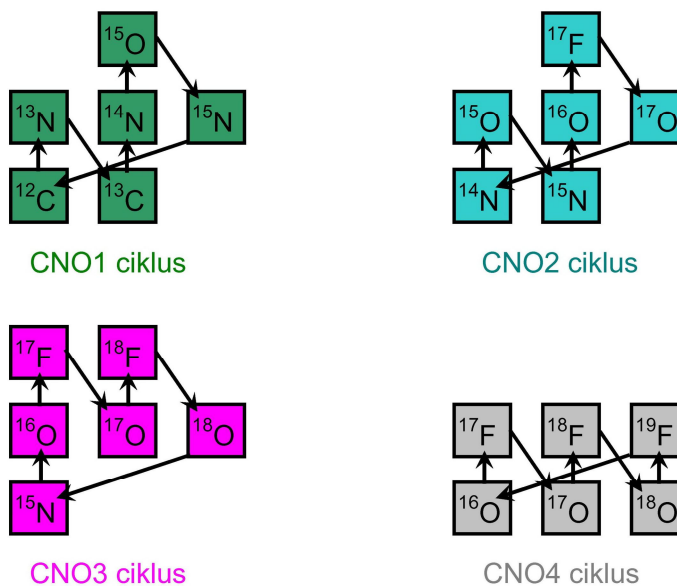


melyben radioaktív ${}^{13}\text{N}$ keletkezik, ami béta-bomlással ${}^{13}\text{C}$ -má alakul. Ezen a magon újra protonbefogás megy végbe és ${}^{14}\text{N}$ keletkezik, ami újabb protont befogva ${}^{15}\text{O}$ izotóppá alakul. Mivel ez az izotóp is radioaktív, ${}^{15}\text{N}$ izotópot eredményező béta-bomlás következik be. A ${}^{15}\text{N}$ protonnal való reakciója legvalószínűbben a következőképpen zajlik:



vagyis egy ${}^4\text{He}$ atommag kibocsátásával jár. Ebben a reakcióban visszakaptuk a ${}^{12}\text{C}$ magot, amiből az egész reakciólánc kiindult, vagyis egy körfolyamattal van dolgunk. A körfolyamat során négy proton egy ${}^4\text{He}$ maggá alakul, ugyanúgy, mint a pp-láncok esetén. A nehezebb elemek csak a katalizátor szerepét játsszák, összmenységük a ciklus során nem változik. Két proton neutronná alakulása összetett magokban, a ${}^{13}\text{N}$ és ${}^{15}\text{O}$ magok béta-bomlása során történik, így nincs szükség a lassú pp reakcióra.

Az itt leírt körfolyamat a CNO1 ciklus [5], amit az 5. ábra bal felső része mutat. További CNO ciklusok is léteznek amiatt, hogy a fent leírt legutolsó reakciónak nem ez az egyetlen lehetséges kimenetele. Előfordulhat, hogy a ${}^{15}\text{N}$ magon gamma-kibocsátással zajlik a protonbefogás, így nem keletkezik ${}^{12}\text{C}$ mag, tehát a folyamat továbbmegy. Így alakul ki a CNO2 ciklus. Hasonló elágazó reakciók játszódnak le a ${}^{17}\text{O}$ és ${}^{18}\text{O}$ magokon, ami a CNO3 és CNO4 ciklusokhoz vezet. Ezek is láthatók az 5. ábrán.



5. ábra: A hidrogénégés CNO ciklusainak reakciói

Bár a CNO ciklusok elkerülhetővé teszik a lassú pp reakciót, a Nap esetén mégsem ezek jelentik a hidrogénégés fő mechanizmusát. Ennek az az oka, hogy a nehezebb izotópokon történő protonbefogás a nagyobb töltésű magokat jellemző magas Coulomb-gát miatt lassú folyamat. A CNO1 ciklusban például a ^{14}N mag protonbefogási reakciója a leglassúbb. Számítások szerint a Nap energiatermelésében a CNO1 ciklus mintegy 1,5%-os szerepet játszik, az energia maradék 98,5%-a a pp-láncokból származik. A többi CNO ciklus pedig teljesen elhanyagolható járulékot ad.

A CNO ciklusok sebessége azonban igen erősen függ a hőmérséklettől, jóval erősebben, mint a pp láncok sebessége. Így nagytömegű (azaz magas hőmérsékleten üzemelő) csillagok esetében a CNO ciklusok jelentik a hidrogénfúzió, s így az energiatermelés meghatározó folyamatát. Olyan nagytömegű csillagokban, melyek magjában a hőmérséklet a 100 millió fokot is meghaladja, nehezebb elemek részvételével zajló, a CNO ciklushoz hasonló folyamatok is hozzájárulnak a hidrogénégéshez.

A hidrogénégés reakcióinak kísérleti vizsgálata

Ahhoz, hogy pontosan megértsük a csillagokban zajló eseményeket, így a hidrogénégés folyamatát is, a résztvevő magreakciók tulajdonságainak ismerete szükséges. A plazmában zajló magreakciók földi körülmények között részecskegyorsítókkal vizsgálhatók: alkalmasan kiválasztott céltárgyakat bombázva például protonnyalábbal és mérve a kibocsátott részecskéket vagy a keletkező sugárzást, a reakciók hatáskeresztmetszete meghatározható.

Hogy a folyamatokról pontos képet kapjunk, a kísérleteket célszerű ugyanabban az energiatarományban elvégezni, ahol a csillagban is lezajlanak. A mélyen Coulomb-gát alatt zajló reakciók azonban olyan alacsony hatáskeresztmetszetűek, hogy kísérleti vizsgálatuk igen nehéz, sok esetben gyakorlatilag lehetetlen. Ha például a pp reakciót akarnánk vizsgálni, akkor egy, a jelenlegi gyorsítóknál ezerszer

nagyobb intenzitású protonnyaláb előállítására képes gyorsítóval is éveket kellene várni, hogy egyetlen p+p fúziós reakció végbemenjen.

A reakciók hatáskeresztmetszeteit ezért általában nagyobb energián mérik, és elméleti megfontolások alapján számítják az asztrofizikailag lényeges, alacsony energiatarományban a hatáskeresztmetszeteket. A számítás eredményei annál megbízhatóbbak, minél alacsonyabb energián sikerül a méréseket kivitelezni. Ezért a kísérleti nukleáris asztrofizikai kutatások alapvető jellemzője az alacsony energián végzett mérés.

Az alacsony energia azt is jelenti, hogy általában nincs szükség nagy gyorsítókra a kutatásokhoz. A kis hatáskeresztmetszetek mérése azonban különleges kísérleti technikát igényel. Fontos követelmény például, hogy a kis valószínűséggel lejátszódó reakciókból származó gyenge sugárzás detektálásához a zavaró háttérsugárzást leszorítsuk. A zavaró sugárzás egyik fő eleme a világrűrből érkező kozmikus sugárzás. Ez ellen például úgy lehet hatékonyan védekezni, hogy a mérést mélyen a föld alá telepítjük, ugyanis a vastag sziklaréteg jelentős részben elnyeli a sugárzást.

Olaszországban, az Appenninek hegylánca alatt kialakított kutatóintézetben [6] működik a világ jelenleg egyetlen mélyen föld alá telepített részecskegyorsítója. A gyorsítót üzemeltető LUNA nemzetközi együttműködés [7] célja asztrofizikai jelentőségű reakciók, főként a hidrogénégés reakcióinak kísérleti vizsgálata. Az együttműködésben a debreceni Atommagkutató Intézet nukleáris asztrofizikai kutatócsoportja [8], így jelen cikk szerzője is részt vesz. Az utóbbi években a LUNA együttműködés számos reakció hatáskeresztmetszetét mérte meg minden korábbinál alacsonyabb energián. Részben ezeknek a méréseknek is köszönhető, hogy ma már viszonylag jól értjük a csillagok, s így a Nap energiatermelő folyamatait.

Zárszó

Hiába tudunk már sok mindent a csillagok hidrogénégési folyamatairól, az emberiségnek még nem sikerül kiaknáznia a természet e bőségesen rendelkezésre álló energiaforrását. Mesterségesen ugyan már képesek vagyunk termonukleáris folyamatot létrehozni, de ezt sajnos még csak kontrollálatlan körülmények között, a hidrogénbombában sikerült megvalósítani. Pedig amennyiben sikerülne elérni, hogy ellenőrzött viszonyok mellett, egy fúziós erőműben a Naphoz hasonlóan hidrogénfúzióval energiát állítsunk elő, az emberiség szinte kifogyhatatlan energiaforráshoz jutna.

Jelenleg nem a fúziós folyamatokban résztvevő magreakciók tulajdonságainak ismerete a legnagyobb akadálya a fúziós erőművek létrehozásának. Ezeket a reakciókat viszonylag jól ismerjük, az erőművi alkalmazásuk azonban még megoldatlan probléma. Mégis, személyesen úgy érzem, hogy a csillagokban zajló reakciók további kísérleti vizsgálata nem csak azért lényeges, hogy még jobban megértsük Napunk működését, hanem azért is, hogy egyszer majd utánozni tudjuk azt itt a Földön is.

Irodalomjegyzék

- [1] Ludwik Marian Celnikier: *Find a Hotter Place!*; World Scientific Publishing Co., 2006.
- [2] Fülöp Zs., Gyürky Gy.: *Az elemek születése, Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2009.
- [3] Cristian Iliadis, *Nuclear Physics of Stars*, WILEY-VCH Verlag GmbH, 2007.
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Proton-proton_chain
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle
- [6] <http://www.Ings.infn.it/>
- [7] <http://luna.Ings.infn.it/>
- [8] <http://www.atomki.hu/atomki/IonBeam/nag/>