

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LX. évfolyam

2. szám

2010. február

AZ ASZTROFIZIKAI P-FOLYAMAT

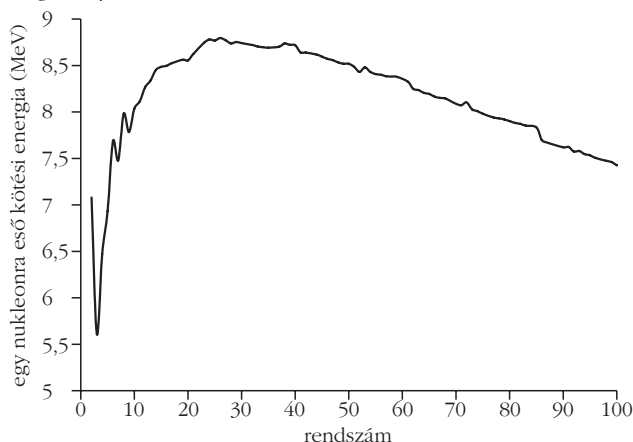
– A nehéz elemek protongazdag izotópjainak keletkezése

Gyürky György
MTA ATOMKI, Debrecen

A nehéz elemek szintézise

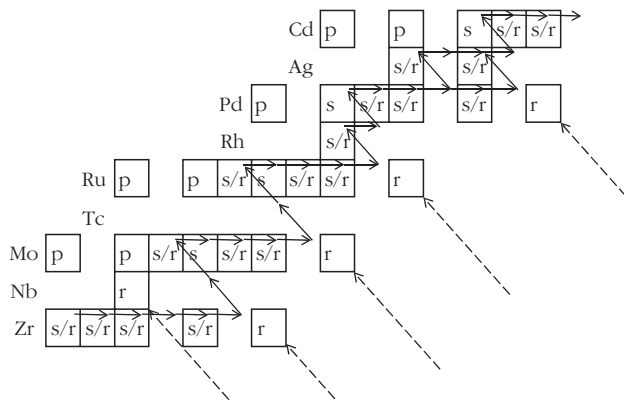
A Világegyetemet felépítő kémiai elemek – a legkönnyebbeket kivéve – csillagok belsejében keletkeznek a csillagfejlődés különböző szakaszaiban [1]. A kémiai elemek mintegy kétharmada, a vasnál nehezebb elemek, az elemszintézis szempontjából külön kategóriát képviselnek, keletkezésük ugyanis nem mehet végbe a könnyű elemekre jellemző, töltött részecskék részvételével zajló fúziós reakciókban. Az 1. ábra mutatja a rendszám függvényében az adott elem legstabilabb izotópja magjában az egy nukleonra eső kötési energiát. Jól látható, hogy a rendszám növekedésével a kötési energia erősen növekszik, majd a vas környékén ($Z = 26$) eléri maximumát és lassan csökkenni kezd. Ennek következtében a könnyű elemek fúziós reakciói során energia szabadul fel, biztosítva a csilla-

1. ábra. Az atommagok egy nukleonra eső kötési energiája a rendszám függvényében. A függvény a maximumát a legstabilabb atommag környékén, a vas közelében éri el.



gok számára az energiaforrást, miközben – egy nagy tömegű csillag esetén – lépésről lépésre benépesül a periódusos rendszer a vas környéki elemekig.

A vas, illetve a nehezebb elemek fúziója azonban nem termel, hanem felemészt energiát, így a nehezebb elemek szintézise nem lehet a csillag működését fenntartó folyamat, eredetüket valamely mellékfolyamatban kell keresnünk. Nem meglepő tehát, hogy például a Naprendszer anyagának felépítésében ezek az elemek csak csekély mértékben veszik ki a részüket. Hozzávetőlegesen minden húszmillió atomból csak egy tartozik ebbe a kategóriába. Kialakulásukért azért sem lehetnek felelősek töltött részecskék közötti magreakciók, mert a magasabb rendszámú elemek irányába haladva a magok nagy pozitív töltése miatt megnövekvő Coulomb-gát megakadályozza az ilyen reakciók lezajlását. A csillagfejlődés különböző szakaszaiban azonban nagy mennyiségben keletkeznek neutronok, amelyekre nem hat a Coulomb-taszítás, így könnyen befogódhatnak a nehezebb magokon is. A nehéz elemek stabil izotópjainak döntő többségét valóban neutronbefogási reakciók hozzák létre, két elkülönülő folyamat révén. Az úgynevezett s-folyamatban (slow, lassú) egymást követő neutronbefogások zajlanak le, de olyan lassú időskálán, hogy az esetlegesen keletkező radioaktív magnak mindig van ideje β -bomlással elbomlani, mielőtt a következő neutronbefogás bekövetkezne. Az r-folyamatban (rapid, gyors) ezzel szemben a neutronbefogások olyan gyorsan követik egymást, hogy a β -bomlásokra „nincs idő”, így ez a folyamat az erősen neutrongazdag radioaktív magok tartományában, a neutronelhullatási vonal közelében zajlik. Miután a neutronfluxus megszűnik, a keletkezett magok sorozatos β -bomlásokkal jutnak el a stabilitási sávba. A két folyamatot a nehéz



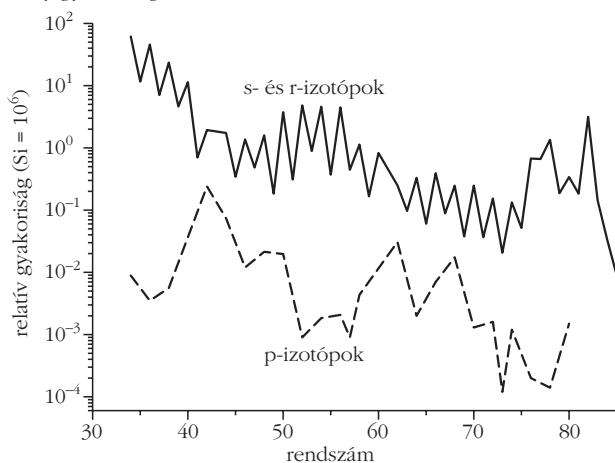
2. ábra. Az s- és r-folyamat útja a nehéz elemek egy szűk tartományában. Folytonos nyílak jelzik az s-folyamat útját, míg szaggatott nyíl mutatja az r-folyamatban keletkező, erősen neutrongazdag magok bomlását a stabil magok irányába. A stabil magokat jelölő négyzetekbe írt betűjel az őket létrehozó folyamatra utal.

elemek egy szűk tartományában a 2. ábra szemlélteti. Folytonos nyíl jelzi az s-folyamat útját, míg a szaggatott nyíl azt mutatja, hogy az r-folyamat erősen neutrongazdag izotópjai hogyan bomlanak vissza stabil atommagokba. A stabil izotópokba írt betű jelzi, hogy az adott izotópot mely folyamat (vagy folyamatok) hozzák létre.

A 2. ábra bal oldalán a protongazdag magok tartományában található néhány, p betűvel jelzett izotóp, amelyeket sem az s-, sem az r-folyamat nem érint, tehát nem jöhetnek létre neutronbefogási reakciók révén. Ezek az úgynevezett p-izotópok, amelyek keletkezési mechanizmusa – összefoglaló néven az asztrofizikai p-folyamat – a tárgy a e cikknek.

A nehéz elemek teljes tartományában összesen 35 p-izotóp található a legkönnyebb ^{74}Se -től egészen a ^{196}Hg -ig. Az 1. táblázat tartalmazza az összes p-izotópot, valamint az adott kémiai elemre vonatkoztatott természetbeni gyakoriságukat (százalékos előfordulásukat). Mint látható, kevés kivételtől eltekintve páros-páros (azaz páros proton és neutronszámú) magokról van szó, továbbá szembevetendő, hogy gyakoriságuk

3. ábra. A nehéz elemek Naprendszerben megfigyelt relatív gyakorisága külön a p-, illetve az s+r folyamat által létrehozott izotópokra. A konvencionálnak megfelelően a függőleges tengely úgy lett skálázva, hogy a szilícium gyakorisága 10^6 . Jól látható a p-izotópok alacsony gyakorisága.



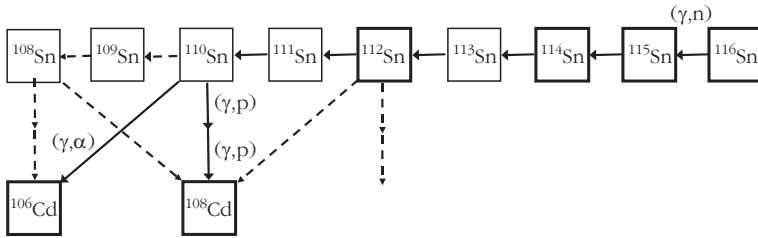
| | | |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ^{74}Se 0,89% | ^{114}Sn 0,66% | ^{156}Dy 0,06% |
| ^{78}Kr 0,35% | ^{115}Sn 0,34% | ^{158}Dy 0,10% |
| ^{84}Sr 0,56% | ^{120}Te 0,09% | ^{162}Er 0,139% |
| ^{92}Mo 14,84% | ^{124}Xe 0,095% | ^{164}Er 1,601% |
| ^{94}Mo 9,25% | ^{126}Xe 0,089% | ^{186}Yb 0,13% |
| ^{96}Ru 5,54% | ^{130}Ba 0,106% | ^{174}Hf 0,16% |
| ^{98}Ru 1,87% | ^{132}Ba 0,101% | ^{180}Ta 0,012% |
| ^{102}Pd 1,02% | ^{138}La 0,09% | ^{180}W 0,12% |
| ^{106}Cd 1,25% | ^{136}Ce 0,185% | ^{184}Os 0,02% |
| ^{108}Cd 0,89% | ^{138}Ce 0,251% | ^{190}Pt 0,014% |
| ^{113}In 4,29% | ^{144}Sm 3,07% | ^{196}Hg 0,15% |
| ^{112}Sn 0,97% | ^{152}Gd 0,20% | |

általában igen alacsony. Előfordulási arányuk gyakran nem éri el az adott elem nehezebb izotópjainak az 1 vagy akár csak 0,1%-át sem. Ezt szemlélteti a 3. ábra is, ahol a nehéz elemek relatív gyakorisága látható külön az s+r, illetve a p-izotópokra. Az alacsony gyakoriság azt sugallja, hogy a p-izotópok szintéziséért valamilyen másodlagos folyamat a felelős. A p-izotópok alacsony gyakorisága miatt létezésüket mindaddig csak a Naprendszerből származó mintákon sikerült kimutatni, más csillagok spektrumában egyelőre nem bukkantak nyomukra.

Az asztrofizikai p-folyamat

Talán a p-izotópok igen alacsony gyakorisága az oka annak, hogy a stabil izotópok e csoportjának szintézise a nukleáris asztrofizika egyfajta mostohagyermeké. 1957-ben jelent meg *E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, Fowler és Hoyle* korszakalkotó cikke [2], amelyben sorra veszik és részletesen tárgyalják – az akkori ismereteknek megfelelően – az elemszintézis összes folyamatát. A nehéz elemek szintézisének tárgyalásakor megemlítik a p-izotópok problémáját, de az őket létrehozó lehetséges folyamatokkal nem foglalkoznak kellő részletességgel. Egészen 1978-ig kellett várni az első olyan, a p-izotópok szintézisével foglalkozó átfogó elméleti munkára [3], amely legalább nagyságrendileg képes volt reprodukálni a legtöbb p-izotóp természetben megfigyelt gyakoriságát. Az abban a munkában javasolt folyamatot ma is a p-magok szintéziséért felelős fő mechanizmusnak tartjuk, és az alábbiakban ennek részleteit tárgyaljuk.

Protongazdag izotópok létrehozásának egy természetes adódó módja lenne protonok befogása nehéz, az s- és r-folyamatok által korábban létrehozott atommagokon. Azonban még magas hőmérsékleten is, ahol a részecskék termikus energiája elég nagy – a nehéz magok felé haladva a proton és a mag között fellépő



4. ábra. A p-folyamat menete az Sn izotóplánc esetében. Folytonos vonal mutatja a fő reakciósorozatát, míg szaggatott vonal a kevésbé jelentős elágazásokat. A vastag négyzetek a stabil magokat jelölik.

Coulomb-gát miatt – a protonbefogási reakciók csak igen kis hatáskeresztmetszettel tudnak lejátszódni. A számítások azt mutatják, hogy a nagyobb tömegszámú p-magok szintéziséért semmiképpen sem lehetnek protonbefogási reakciók a felelősek. Ráadásul nehéz olyan csillagkörnyezetet találni, ahol magas hőmérsékleten elegendően nagy számban állnának rendelkezésre szabad protonok. Így tehát a p-izotópok protonbefogási reakcióiban való keletkezését (legalábbis mint fő folyamatot) el kell vetni. Protongazdag magokat úgy is létre lehet hozni, ha nehéz magokból neutronokat távolítunk el. Ha a csillagbelső plazmában elegendően nagy energiájú γ -fotonok állnak rendelkezésre, akkor ezek kiválthatnak neutronkibocsátással járó reakciót, miáltal a mag protonban viszonylag gazdagabbá válik. Sorozatos ilyen (γ, n) reakciókkal létrejöhetnek a p-izotópok. Mai ismereteink szerint főként ez a γ -folyamat néven is emlegetett mechanizmus felelős a p-magok szintéziséért [4]. A folyamatot egy kiválasztott izotóplánc esetén a 4. ábra szemlélteti. Tételezzük fel, hogy a csillag anyagában jelen van az s-folyamat által korábban előállított ^{116}Sn izotóp. Az ezen az izotópon lejátszódó (γ, n) reakció a ^{115}Sn magot eredményezi, ami egy p-izotóp. Természetesen, ha a megfelelő energiájú γ -fotonok elég hosszú ideig rendelkezésre állnak, további (γ, n) reakciók lejátszódására is lehetőség van, amelyek részben radioaktív izotópokon keresztül létrehozhatják az ön izotóplánc másik két p-izotópját, a ^{114}Sn -t és a ^{112}Sn -t. A sorozatos (γ, n) reakciók hatására azonban az atommag neutronban egyre inkább szegényebbé válik, aminek következtében neutronszerparációs energiája megnő, így a további (γ, n) reakciók valószínűsége – azaz hogy egy már viszonylag neutronszegény mag újabb neutronot bocsásson ki – lecsökken. Ekkor a folyamat lelassul, és lehetővé válnak töltött részecskék kibocsátásával járó (γ, α) és (γ, p) reakciók. Az ábrán látható izotóplánc esetén e reakciók létrehozhatják egy másik elem, a kadmium p-izotópjait.

A p-folyamat lehetséges helyszínei és körülményei

A nehéz elemek tartományában, a stabilitási völgy közelében a magok jellemző neutronszerparációs energiája általában az 5 és 10 MeV közötti tartományba esik. Minimum ennyi energiával kell rendelkeznie tehát egy γ -fotónak, hogy kiszakíthasson egy neutron az atommagból. A csillagplazmában a fotonok ener-

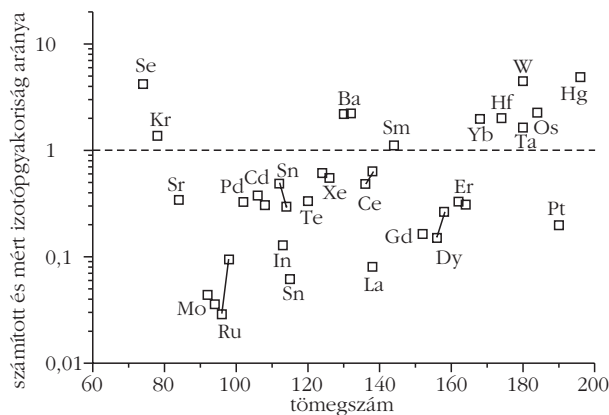
giaeloszlása a Planck-eloszlást követi, ami a hőmérséklet függvénye. A fenti tartományba eső energiájú fotonok csak akkor vannak jelen jelentős arányban a Planck-spektrumban, ha a plazma hőmérséklete igen magas, eléri a milliárd kelvin nagyságrendet. Ilyen hőmérsékletek nagy tömegű csillagokban fordulnak elő a csillagfejlődés igen előrehaladott állapotában, például szupernóva-robbanás folyamán. A szupernóva-robbanás mechanizmusa egyike a

természet legösszetettebb jelenségeinek, még leegyszerűsített tárgyalása is túlmutat jelen cikk keretein. A *Fizikai Szemle* olvasói azonban már olvashattak a jelenségről [5]. A számítások azt mutatják, hogy a p-folyamat lejátszódásának egyik legvalószínűbb színtere nagy tömegű csillagok oxigénben és neonban gazdag rétege közvetlenül a szupernóva-robbanást megelőző fázisban, vagy magában a robbanásban. Ilyenkor az anyag mintegy 3 milliárd K hőmérsékletre melegszik fel és ez a nagy hőmérsékletű állapot nagyságrendileg 1 másodperc időtartamig áll fenn.¹ Ha a csillag anyaga tartalmaz korábbi folyamatokból származó nehéz elemeket, akkor ezeken kiindulva lejátszódhat a γ -folyamat. A robbanás során a keletkezett p-magok kijuthatnak a csillagközi térbe, és a később keletkező újabb csillagok – valamint a körülötte keringő bolygók – már tartalmazni fogják a p-izotópokat.

P-folyamat modellszámítások

A p-folyamat modellszámítások célja – mint az elem-szintézis más folyamatai esetén is – a természetben található izotópok mért gyakoriságának reprodukálása. A p-folyamat modellek ehhez hatalmas reakcióhálózatot használnak. A fő szerepet játszó γ -indukált reakciókon kívül β -bomlások, részecskebefogási és egyéb reakciók figyelembevétele is szükséges. Egy korszerű p-folyamat modellszámítás mintegy 2000 magon lejátszódó akár 20 000 reakciót is tartalmazhat. A modellszámításoknak különböző bemenő paraméterekre van szükségük. Egyrészt fontosak az asztrofizikai körülményeket leíró paraméterek. Ilyenek a kezdeti izotópeloszlások, amelyekből a folyamat kiindul, a hőmérséklet- és sűrűségviszonyok, valamint ezek idő- és térbeli változása egy adott csillagkörnyezetben. Másrészt a modellekben szükség van magfizikai bemenő paraméterekre is, mint a hálózatban szereplő atommagok tömegei, a radioaktív magok bomlási tulajdonságai és legfőképpen a sok ezer magreakció adott hőmérsékletre jellemző sebessége. Amennyiben ezek a paraméterek rendelkezésre állnak, a modellekből kiszámítható a folyamatban

¹ Ilyen rövid időskálán a (γ, n) reakciókban keletkező proton-gazdag radioaktív magok stabilnak tekinthetők (felezési idejük általában jóval hosszabb, mint a folyamat időtartama), így a p-folyamat a stabilitási sávól viszonylag távol, radioaktív magok részvételével is zajlik.



5. ábra. Egy tipikus p-folyamatra a modellszámításban kapott és a Naprendszerben mért izotópgyakoriságok aránya. Forrás: W. Rapp et al., *Astrophys. J.* 653 (2006) 474.

keletkező p-izotópok mennyisége, ami utána összehasonlítható a természetben megfigyelttel. Egy ilyen összehasonlítás eredményét mutatja az 5. ábra. Az ábrán a tömegszám függvényében a számított és mért izotópgyakoriságok arányát láthatjuk. Ha a modell tökéletesen leírná a folyamatot, az arány minden izotóp esetén egységnyi lenne. Ezzel szemben jelentős, esetenként több mint egy nagyságrend eltérést tapasztalunk. Az ábra csak egy kiragadott példa a számos rendelkezésre álló p-folyamat modellszámítás eredményei közül, ám az általánosan igaz, hogy a modellek nem tudják az ábrán láthatónál jobban reprodukálni a megfigyelt izotópgyakoriságokat. Ez a tény igazolja azt a kijelentést, hogy az asztrofizikai p-folyamat egyike az elemszintézis legkevésbé ismert folyamatainak.

A modellszámítások kudarcának oka leginkább a modellekben használt bemenő paraméterek nem megfelelő voltában keresendő. Nem ismerjük még kellő részletességgel azokat az asztrofizikai körülményeket, amelyek között a p-folyamat lezajlik. Más kiinduló izotópösszetételen, más hőmérséklet- és időskálán eltérő végeredményt szolgáltatnak a modellek. Fontos tehát a csillagfejlődés további vizsgálata a p-folyamat modellek pontosabbá tétele érdekében. Az is valószínűnek tűnik, hogy az eddig tárgyalt γ -folyamat nem az egyetlen lehetséges mechanizmus, amely p-izotópok szintéziséhez vezet. Elképzelhető, hogy a Naprendszer felépítésében részt vevő p-izotópok több különböző folyamat révén jöttek létre, s a megfigyelt gyakoriságok e folyamatok eredőjeként adódnak. Néhány könnyű p-izotóp (például a Mo és Ru izotópok) szokatlanul nagy gyakorisága valószínűleg nem magyarázható egyedül a γ -folyamattal. Több különböző, a γ -folyamatot kiegészítő folyamatot javasolnak a problémák orvoslására. Ezek közül a legfontosabbak a gyors protonbefogási rp-folyamat, vagy a neutrínók által indukált magreakciók. E folyamatok tárgyalása túlmutat e cikk keretein.

A p-folyamat modellszámítások kudarcának egy, eddig nem említett lehetséges oka a modellekben használt magfizikai bemenő paraméterek nem megfelelő volta lehet. Ha például a reakcióhálózatban szereplő

magreakciók sebessége nem helyes, akkor a modellek hibás izotópgyakoriságokat eredményezhetnek. Az írás hátralévő részében a reakciósebességek pontosítására irányuló kísérleti vizsgálatokról lesz szó.

Magfizikai kísérletek a p-folyamat jobb leírása érdekében

A p-folyamat reakcióhálózatban a döntő szerepet a γ -indukált reakciók játsszák. Mivel sok ezer reakcióról van szó, amelyek döntő többsége radioaktív magok részvételével zajlik a protongazdag magok tartományában, a reakciósebességek mindegyikének kísérleti meghatározására nincs esély. A modellekben ezért elméleti úton nyert reakciósebességeket használnak. A p-folyamatra jellemző tömegszám- és energiatarományban a reakciók hatáskeresztmetszeteit (amelyekből a reakciósebességek származtathatók) legtöbbször Hauser–Feshbach-típusú statisztikus modellekből nyerik [6]. A p-folyamat modellek egy lehetséges hibaforrásának kiküszöbölése érdekében fontos a statisztikusmodell-számítások kísérleti ellenőrzése. A γ -indukált reakciók közvetlen kísérleti vizsgálata azonban technikailag igen nehéz. Csak az utóbbi néhány évben váltak elérhetővé olyan nagy intenzitású, változtatható energiájú γ -források, amelyekkel jó eséllyel lehet a p-folyamat szempontjából lényeges reakciók hatáskeresztmetszeteit mérni. Bár a közeljövőben jelentős fejlődés várható ezen a területen, arra azonban nem számíthatunk, hogy γ -indukált reakciók hatáskeresztmetszetének rutinszerű mérésére nyílna lehetőség. Megoldást jelenthet a γ -indukált reakciók mérését akadályozó kísérleti nehézségek elkerülésére az inverz, befogási reakciók hatáskeresztmetszetének mérése és az így kapott eredményekből a γ -indukált reakciók sebességének meghatározása elméleti megfontolások alapján. Neutronbefogási reakciók hatáskeresztmetszeteire viszonylag sok kísérleti adat áll rendelkezésre az irodalomban. Ezzel szemben töltött-részecske-befogási reakciók esetén a p-folyamatra jellemző tömegszám- és energiatarományban alig található kísérleti adat, így a p-folyamat reakcióhálózatokban használt és elméleti úton nyert reakciósebességek ellenőrzésére csak nagyon szűkös a lehetőség.

A debreceni Atommagkutató Intézet nukleáris asztrofizikai csoportjának egyik legfőbb kutatási területe éppen a p-folyamat szempontjából fontos töltött-részecske-befogási reakciók kísérleti vizsgálata. Az utóbbi években számos proton- és alfa-indukált magreakció hatáskeresztmetszetét mértük meg az ATOMKI ciklotron és Van de Graaff gyorsítóinak a felhasználásával. A 2. táblázatban a vizsgált izotópok láthatók. Méréseink eredményeit minden esetben összehasonlítottuk a p-folyamat modellekben használt statisztikusmodell-számítások jóslataival (lásd például [7]). Eredményeink segítségével ki tudtuk választani a statisztikus modellek azon magfizikai paramétereit, amelyek segítségével a modellek a kísérleti eredmények legjobb leírását adják. Ezek az eredmények hozzásegíthetnek a p-folyamat halózat-számítások pontosabbá tételéhez. A kutatások

2. táblázat

Azon izotópok, amelyeken az ATOMKI-ban proton-, illetve alfa-indukált reakciók hatáskeresztmetszeteit mértük

| proton-indukált reakciók | alfa-indukált reakciók |
|---|---|
| ^{70}Ge , ^{76}Ge , ^{74}Se , ^{76}Se , ^{77}Se , ^{85}Rb , ^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{106}Cd , ^{108}Cd | ^{70}Ge , ^{106}Cd , ^{113}In , ^{144}Sm , ^{151}Eu , ^{169}Tm |

jelentőségét mutatja, hogy az Európai Kutatási Tanács Starting Grant programja a kísérleti nukleáris asztrofizikai kutatások közül Európában jelenleg egyedülként a mi p-folyamattal kapcsolatos munkánkat támogatja (ERC StG No. 203175) [8].

Összefoglalás

A vasnál nehezebb elemek protongazdag izotópjainak szintézise az asztrofizikai p-folyamat, amely egyike az elemszintézis legkevésbé ismert folyamatainak. A p-folyamat modellszámítások nem képesek kellő pontossággal reprodukálni a p-izotópok természetben megfigyelt gyakoriságát, így a modellek jelentős pontosítás-

ra szorulnak. Jobban meg kell értenünk azokat az asztrofizikai körülményeket, amelyek között a folyamat lezajlik, valamint pontosítanunk kell a folyamatban részt vevő magreakciókra vonatkozó ismereteinket. Az ATOMKI kutatói ez utóbbi területen, konkrétan töltött részecskék által kiváltott magreakciók tanulmányozásával próbálnak hozzájárulni a folyamat részleteinek a tisztázásához.

Irodalom

1. Fülöp Zs., Gyürky Gy.: *Az elemek születése. Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2009.
2. E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle: Synthesis of the elements in stars. *Reviews of Modern Physics* 29 (1957) 547.
3. S. E. Woosley, W. M. Howard: The p-process in supernovae. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 36 (1978) 285.
4. M. Arnould, S. Goriely: The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status. *Physics Reports* 384 (2003) 1.
5. Németh J.: Szupernóva-robbanás. *Fizikai Szemle* 47/5 (1997) 167.
6. Fényes T.: *Atommagfizika*. Debreceni Egyetem, Kossuth Egyetemi Kiadó, 2005.
7. G. Gyürky et al.: α -induced cross sections of ^{106}Cd for the astrophysical p-process. *Physical Review C* 74 (2006) 025805.
8. a projekt honlapja: <http://namafia.atomki.hu/~gyurky/ERC/>