

# Az elemek nukleoszintézise lassú és robbanásos folyamatokban

## Zárójelentés

A pályázat során a nukleoszintézis magfizikai aspektusait tanulmányoztuk. Mivel az elemek keletkezése egymástól jelentősen eltérő égi objektumokban, időskálán és hőmérsékleten játszódik le, a megfelelő atommagfizikai háttér is széles spektrumú, mind a vizsgálandó jelenségeket, mind pedig a vizsgálati technikát tekintve.

A pályázat négy alapvető jelenségcsoport, illetve az azoknak megfelelő technikai fejlesztések köré épült fel.

1. A csillagfejlődés stacionárius szakaszában az állandóságot a rendkívül kis hatáskeresztmetszetű reakciók biztosítják. Ezek vizsgálata csak a kozmikus háttér jelentős csökkentése mellett lehetséges. Erre ad lehetőséget az olaszországi LNGS földalatti laboratórium, ahol csoportunk a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) kollaboráció teljes jogú tagja. Itt két reakció, a  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  és a  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  hatáskeresztmetszetének nagy pontosságú mérése volt a cél. Méréseinket elősegítette, hogy sikeresen pályáztunk saját nyalábidőre az EU FP6 mobilitási programjain.

### Eredményeink:

- Nitrogéntartalmú céltárgyak stabilitását és céltárgyhátlapok protonbesugárzás által indukált háttérsugárzását vizsgáltuk, majd a kezdeti sikerek után átfogóan tanulmányoztuk a LUNA földalatti laboratóriumban a nyalábindukált gamma-sugárzási háttérrel. (2 közlemény)
- A hidrogén-égés CNO ciklusában kulcsszerepet játszó  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  reakció hatáskeresztmetszetének extrém alacsony energián, szilárd céltárgyon történő meghatározása új adatokat szolgáltatott a világegyetem gömbhalmazainak életkorára és a Napból származó CNO eredetű neutrínófluxus nagyságára. Elért eredményeinkről a Science folyóirat is recenziót közölt. (2 közlemény)
- A  $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$  reakció még alacsonyabb energián történő tanulmányozására korábbi méréseink szilárd céltárgya helyett gázcéltárgyat, és az azt körülvevő közel  $4\pi$  térszögű nagy hatásfokú BGO detektort helyeztünk üzembe, mellyel a korábbi méréseknél jelentősen alacsonyabb, 70keV bombázóenergián is tudtunk hatáskeresztmetszetet mérni. (3 közlemény)
- A pp-lánc  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  reakcióját két módszerrel párhuzamosan tanulmányoztuk. Egyrészt a  $^7\text{Be}$  végmag véges felezési idejét kihasználva aktivációs módszert

dolgoztunk ki. Az aktivációs módszer eredményeit saját, ugyanazon mérésorozatban detektált prompt gamma-sugárzásból meghatározott hatáskeresztmetszetekkel hasonlítottuk össze, és ezzel a reakcióhozam szisztematikus hibáját jelentősen csökkentettük. (3 közlemény)

- Mivel a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakciója a németországi ERNA tömegszeparátor segítségével is tanulmányozható, az ATOMKI elektrosztatikus gyorsítóján abszolút rezonancia-erősségeket határoztunk meg a  ${}^{6,7}\text{Li}(\alpha,\gamma){}^{10,11}\text{B}$  reakciókban. E rezonanciák segítségével az ERNA tömegszeparátor akceptanciájának precíz ismerete vált lehetővé, megteremtve a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakció újabb mérésének feltételét. (1 közlemény)

2. A vasnál nehezebb stabil izotópok zöme neutronbefogások és béta-bomlások sorozatával keletkezik az asztrofizikai s- és r-folyamat révén. Van azonban néhány olyan protongazdag izotóp, melyek nem épülhetnek fel e folyamatok során. Ezen ritka izotópokat p-magoknak nevezzük. A p-magok nukleoszintézisét leíró reakcióháló — kísérleti adatok hiányában — statisztikus modellel számolt hatáskeresztmetszeteket használnak, tehát a jellemző magreakciók tanulmányozása közvetlenül teszteli a statisztikus modellt a p-folyamatnak megfelelő tömeg- és hőmérséklettartományban. Célunk egy szisztematikus mérésorozat elindítása volt alacsony energiájú protongazdag magokon lejátszódó (p, $\gamma$ ) és ( $\alpha,\gamma$ ) reakciókra.

### Eredményeink:

- Az ATOMKI ciklotronjára telepített nagy precizitású szórókamránál proton- és neutrongazdag ón izotópokon vizsgáltuk alacsony energiájú alfa részecskék rugalmas szóródását. A  ${}^{112,124}\text{Sn}$  izotópokra vonatkozó rugalmas alfa-szórás eredményeinkből optikai potenciálokat határoztunk meg. (3 közlemény)
- A Notre Dame Egyetemmel (USA) együttműködésben a  ${}^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)$  reakció hatáskeresztmetszetét határoztuk meg a p-folyamatra jellemző hőmérséklettartományban, mellyel közvetlenül teszteltük az optikai potenciál jelentőségét a hatáskeresztmetszet számításokban. (1 közlemény)
- Az asztrofizikai p-folyamat leírásának szempontjából fontos szelén izotópokon határoztunk meg (p, $\gamma$ ) hatáskeresztmetszeteket az ATOMKI elektrosztatikus gyorsítóján, és eredményeinket összevetettük két különböző statisztikus modellt alkalmazó számítás jóslataival, Vizsgálataink kiterjedtek a statisztikus modell bemenő paraméterkészletének hatásaira is. (2 közlemény)
- Az ATOMKI gyorsítóin kiépített mérőrendszerünkkel elvégeztük az asztrofizikai p-folyamat szempontjából meghatározó proton- és alfaindukált reakciók

vizsgálatát a protongazdag  $^{106}\text{Cd}$  izotópra. Szisztematikus méréseink során tanulmányoztuk a  $(p,\gamma)$ ,  $(\alpha,\gamma)$ ,  $(\alpha,p)$ ,  $(\alpha,n)$  és  $(\alpha,\alpha)$  reakciókat. Az  $(\alpha,\gamma)$  reakció esetében a szisztematikus hiba csökkentése végett párhuzamos mérések történtek a Notre Dame Egyetemmel. (4 közlemény)

- A szupernóvákban lejátszódó gamma-indukált folyamatok közvetlen kísérleti tanulmányozására javasoltunk mérési módszereket, és fontos reakciókat. A gamma indukált nukleosintézis kísérleti problémáiról összefoglaló cikket jelentettünk meg. (1 közlemény)
- A p-folyamat kísérleti vizsgálatának tapasztalatait foglaltuk össze, javaslatokat téve további szisztematikus vizsgálatokra. (2 közlemény)

**3.** Az elektronárnyékolás hatását az alacsony bombázó energiájú nukleáris asztrofizikai mérésekben már több, mint egy évtizede ismerik. Az effektus magyarázata, hogy az atommagokat körülvevő elektronfelhő miatt a bombázó részecske a csupasz maghoz képest alacsonyabb Coulomb-gátat érez, és ez a hatáskeresztmetszet növekedését jelenti a csupasz atommagokra vonatkozó értékekkel összevetve.

Az elektronárnyékolás az  $U_e$  elektronárnyékolási potenciállal jellemezhető. A pályázat során szisztematikus vizsgáltuk az elektronárnyékolást különböző fémes közegekben.

A szisztematikus vizsgálat kiterjedt egyrészt az effektus hőmérsékletfüggésének meghatározására, és közegek széles skálájának vizsgálatára. A fémes közeg szabadelektron-koncentrációja vizsgálható elektronbefogással bomló radioaktív izotóp felezési idejének mérésével. Egy ilyen izotóp a  $^7\text{Be}$ , melynek felezési ideje ( $T_{1/2}=53$  nap) nagy pontossággal határozható meg.

### **Eredményeink:**

- Az elektronárnyékolás jelenségének szisztematikus vizsgálatát folytattuk a  $d(d,p)t$  reakcióban különböző fémekbe implantált deutérium céltárgyakon a bochumi Ruhr-Egyetem kisenergiájú gyorsítóján. Eredményeink szerint korreláció fedezhető fel az elektronárnyékolási potenciál mértéke és az adott fém Hall-együtthatója között. (2 közlemény)
- A bochumi Ruhr-Egyetemmel együttműködésben nagyszámú szilárd anyagban meghatároztuk a  $d(d,p)t$  reakcióban fellépő anomálishan magas elektronárnyékolási potenciál nagyságát. Az effektusra lehetséges magyarázatot találtunk a plazmafizika Debye elmélete segítségével. (1 közlemény)
- Platina és hafnium fémekben meghatároztuk a  $d(d,p)t$  reakcióban fellépő anomálishan magas elektronárnyékolási potenciál hőmérsékletfüggését. A kapott eredmények a plazmafizika Debye elmélete segítségével értelmezhetők. (2 közlemény)

- Különböző fémes közegekben határoztuk meg a  $^7\text{Be}$  elektronbefogással bomló izotóp felezési idejét, és ezzel felső korlátot adtunk fémes közegek hatására radioaktív bomlásban. Az ATOMKI ciklotronjával előállított  $^7\text{Be}$  izotópot a Nápolyi Egyetem Gyorsítólaboratóriumának gyorsítójával radioaktív nyalábként különböző, elektronárnyékolás szempontjából tanulmányozott fémekbe implantálva korrelációt kerestünk a  $^7\text{Be}$  felezési idejének változása és az elektronárnyékolás növekedése között. (2 közlemény)
- További szisztematikus vizsgálat részeként különböző típusú Li-tartalmú anyagokban ( $\text{Li}_2\text{WO}_4$ , PdLi, fémes Li) az elektronárnyékolási potenciál függését vizsgáltuk a  $^{6,7}\text{Li}(p,\alpha)$  reakciókban. (1 közlemény)
- Befejeztük a  $^{148}\text{Gd}$  izotóp felezési idejének mérését az ATOMKI-ban kiépített automatizált mérőrendszerünkön. Eredményeink szerint a mért felezési idő hibahatáron belül megegyezik az irodalmi értékkel. (1 közlemény)
- Az asztrofizikai p-folyamatot érintő aktivációs méréseink pontosságának növelése érdekében kiterjesztettük felezési idő méréseinket a  $^{110}\text{Sn}$  és  $^{109}\text{In}$  izotópokra. (1 közlemény)
- Az ATOMKI ciklotronján olasz-magyar együttműködésben elvégzett mérésben a p-p kisenergiájú szórás magasabb energián a  $p+d \rightarrow p+p+n$  reakcióban indirekt módon vizsgáltuk. Megállapítottuk, hogy ez a módszer alkalmas lehet az elektronárnyékolás zavaró hatásainak kiküszöbölésére. (2 közlemény)

4. A stabil és a stabilitás völgyéhez közel fekvő instabil izotópok alapvető tulajdonságai megegyeznek: közel azonos a neutronok és a protonok aránya, állandó az atommag sűrűsége, és homogén a proton- és a neutroneloszlás. A fenti tulajdonságok azonban az elvileg előállítható kb. hatezer atommagból csak az ismert kb. kétezerre igazak. Napjaink új magfizikájának, az egzotikus magfizikának célja a stabilitás völgyétől távoli, új típusú atommagok általános tulajdonságainak meghatározása, új tendenciák feltérképezése, ezzel a magmodellek érvényességi körének bővítése. Ez a feladat csak nagyléptékű szisztematikus adatgyűjtéssel oldható meg. Méréseink zömét a japán RIKEN kutatóintézet radioaktív nyalábot biztosító gyorsítórendszerén végeztük az ATOMKI-RIKEN együttműködési szerződés támogatásával. Egyes kiegészítő méréseket a francia GANIL kutatóintézetben folytattunk.

### **Eredményeink:**

- Összeállítottuk, forrásokkal és az ATOMKI ciklotronjával teszteltük a japán RIKEN kutatóintézet radioaktív ionnyalábjára tervezett CsI(Tl) detektorrendszerünket. Új eljárást dolgoztunk ki a szcintillátor fénybegyűjtési hatásfokának növelésére. (2 közlemény)

- A japán RIKEN kutatóintézet gyorsítóján megvalósított mérésorozatunk eredményeként felfedeztük, hogy a  $^{27}\text{F}$  neutrongazdag atommagnak léteznek kötött gerjesztett állapotai. E gerjesztett állapotok létének teljeskörű magyarázata kihívást jelent az elméleti magfizika számára, hiszen jelenleg nem ismert olyan számolás, amely több kötött gerjesztett állapotot jósol erre az atommagra. (1 közlemény)
- Japán-magyar együttműködésben a  $^{16}\text{C}$  atommag szerkezetét vizsgáltuk, és a deformációs paraméterre vonatkozó két független mérésünk eredménye szerint is a  $^{16}\text{C}$  első gerjesztett állapotában a neutronok és protonok a várakozásokkal ellentétben nem mutatnak korrelációt: a gerjesztett állapot szinte kizárólag neutrongerjesztéssel jön létre. (3 közlemény)
- Neutrongazdag oxigénizotópok szerkezetét vizsgáltuk. Az  $^{21,22}\text{O}$  izotópok esetén új nívósémákat adtunk meg. Az  $^{23,24}\text{O}$  izotópok esetén bebizonyítottuk, hogy nincs kötött gerjesztett állapotok. Az  $^{23}\text{O}$ -ban egyrészeecske-energiákat határoztunk meg nukleontranszfer reakcióval. Bebizonyítottuk, hogy a  $^{22}\text{O}$  atommag esetében a  $^{16}\text{C}$  magban korábban felfedezett neutron-lecsatolóadás nem tapasztalható. (3 közlemény)
- Japán-magyar együttműködésben neutrongazdag szén atommagok szerkezetét vizsgáltuk radioaktív nyalábokkal. Ezek során a  $^{17,19}\text{C}$  izotópok alacsony energiájú nívóit tanulmányoztuk (p,p') reakcióval, valamint felső korlátot adtunk a  $^{19}\text{C}$  egy feltételezett izomér állapotának léteire. (2 közlemény)
- Bórizotópok szerkezetét vizsgáltuk szisztematikusan az atommagok héjmodelljének kiterjesztése érdekében. Méréseink a bór izotópok első gerjesztett állapotai energiájának jelentős csökkenését mutatják az  $N>8$  tartományban. A  $^{17}\text{B}$  izotóp esetében eredményeink arra utalnak, hogy a valencianeutronok a magtörzsről lecsatolódnak. (3 közlemény)
- A  $^{27,28}\text{Ne}$  atommagok vizsgálata során bizonyítékot szolgáltatunk arra nézve, hogy az  $N=20$  héjlezárádás megszűnik a  $Z=10$  tartományban. Ez a 20-as mágikus szám eltűnését jelenti ebben a tartományban A héjlezárádás anomális viselkedésére találtunk bizonyítékot a  $^{42}\text{Si}$  esetében is. (2 közlemény)

Az eredményeinket összefoglaló 54 angol nyelvű publikáció (többek között 8 Phys.Rev.Lett. és 6 Phys.Lett.B cikk) nemzetközi sikerét mutatja a pályázat futamideje alatt e közleményekre kapott több, mint 200 hivatkozás.

Az érintett témák fontosságát jelzi, hogy az Európai Tudományos Alap Magfizikai Bizottsága (ESF NuPECC) által 2004-ben publikált, a magfizika hosszú távú terveit áttekintő mintegy 200 oldalas munkában a jövőben is kiemelt szerepet szánnak mind a föld alatti laboratóriumoknak, mind az asztrofizikai p-folyamat további vizsgálatának, mind pedig az egzotikus magok radioaktív nyalábokkal történő tanulmányozásának.