



Protonindukált reakciók és  
az asztrofizikai  $p$  folyamat

Doktori (PhD) értekezés tézisei  
Kiss Gábor Gyula

Témavezető  
Dr. Somorjai Endre

Konzulens  
Dr. Gyürky György

Debreceni Egyetem  
és  
Magyar Tudományos Akadémia  
Atommagkutató Intézete  
(ATOMKI)  
Debrecen, 2008

## Bevezetés

A vasnál nehezebb magok lassú és gyors neutronbefogás révén, az ún. asztrofizikai  $s$  és  $r$  folyamatokban keletkeznek. Mindkét folyamatban a neutronbefogás valamint az ezt követő  $\beta$ -bomlás "verseng". Azonban míg az első esetben ( $s$ ) a befogás és a bomlás valószínűsége összemérhető — és így a folyamat a stabilitási völgyben a neutrongazdag oldalon játszódik le — addig az  $r$  folyamat esetében a nagy neutronfluxus hatására a sorozatos neutronbefogás addig tart míg az  $(n,\gamma)$  és  $(\gamma,n)$  reakciósebességek egyensúlyba kerülnek. Ekkor következik be a mag  $\beta$ -bomlása. Ennek következtében az  $r$  folyamat a neutron elhullatási vonal közelében megy végbe. E két folyamat valamelyikében keletkezik a nehéz magok döntő többsége. Azonban a stabilitási völgy protongazdag oldalán található 35, jórészt páros-páros mag nem keletkezhet a fenti folyamatokban mivel azoktól stabil izobárok határolják el. Ezek az ún.  $p$  magok, melyek a ma elfogadott elmélet szerint a nehéz csillagok O-Ne rétegében, a pre-szupernóva állapotban vagy a szupernóva robbanás során keletkeznek  $\gamma$ -indukált reakciók révén. Ekkor a csillag belsejének hőmérséklete néhányszor  $10^9$  K. A nagyenergiájú fotonok és a már jelenlévő  $s$  és  $r$  magok között sorozatos  $(\gamma,n)$  reakciók játszódnak le. Ahogy a fotobomlás hatására keletkező magok egyre neutronszegényebbek, nő a neutronok kötési energiája. Ekkor a  $(\gamma,\alpha)$  vagy  $(\gamma,p)$  reakciók lejátszódásának valószínűsége megnő. Utóbbiak a nehéz, míg előbbiek a könnyebb  $p$  magok létrejöttében játszanak meghatározó szerepet. Továbbá a legújabb elméleti eredmények felhívták a figyelmet arra, hogy neutronbefogás révén keletkezett magokon lejátszódó  $(p,n)$  és  $(n,p)$  reakciók lényegesen befolyásolhatják a könnyű  $p$  magok gyakoriságát. Ehhez a képhez hozzátartozik, hogy különböző másodlagos folyamatok, mint a gyors protonbefogás vagy a neutrínó-indukált  $p$  folyamat is adhat járulékot a keletkező  $p$  magok gyakoriságához.

A  $p$  folyamat modellezése reakcióhálózat számításokkal történik. Ezekben körülbelül 2000 stabil és radioaktív magon lejátszódó 20 000 reakciót vesznek figyelembe. A számításokhoz egyrészt asztrofizikai (csillaghőmérséklet,  $s$  és  $r$  mag gyakoriságok, stb.), másrészt magfizikai (reakciósebesség, felezési idő, stb.) információk szükségesek. Ezen reakciók jeletős része ra-

dioaktív magokon játszódik le, kísérletileg csak kevés vizsgálható. A felhasznált reakciósebesség adatok Hauser-Feshbach típusú statisztikus-modellszámításokon alapszanak, melyek kísérleti ellenőrzésre szorulnak. A  $\gamma$ -indukált reakciók kísérletileg csak nehezen vagy egyáltalán nem vizsgálhatók, azonban az inverz reakciók mérésével fontos információk nyerhetők. Szemben a szisztematikusan vizsgált  $(n,\gamma)$  reakciók hatáskeresztmetszeteivel, töltött részecske reakciók esetében alig áll rendelkezésre kísérleti adat, a  $p$  folyamatnak megfelelő mag- és energiatartományban. Az ATOMKI-ban végzett úttörő méréseket követően az elmúlt években számos  $(p,\gamma)$  és  $(\alpha,\gamma)$  reakció hatáskeresztmetszetét határozták meg világszerte, azonban a kísérleti adatok mennyisége még mindig nem elégséges a modellszámítások teljeskörű ellenőrzéséhez.

Ph. D. munkám során néhány, az asztrofizikai  $p$  folyamat reakcióhálózat számításokban meghatározó szerepet játszó protonindukált reakció hatáskeresztmetszetét mértem meg, az ATOMKI Van de Graaff és ciklotron gyorsítóival a  $p$  folyamatnak megfelelő energiatartományban. Céltárgyaimat természetes germánium, rubidiumklorid valamint természetes és  $^{106}\text{Cd}$  izotópban dúsított kadmium por vékony alumínium fóliára való párologtatásával készítettem. A céltárgymagok számát mérlegeléssel határoztam meg. Kísérleti eredményeimet elméleti számítások jóslataival hasonlítottam össze.

## Új tudományos eredmények

1. A  $^{70}\text{Ge}(p,\gamma)^{71}\text{As}$  és  $^{76}\text{Ge}(p,n)^{76}\text{As}$  magreakciók hatáskeresztmetszetét mértem meg aktivációs technika használatával 1,6 és 4,4 MeV között 400 keV-es lépésközönként. A keletkezett magok  $\beta$ -bomlását követő  $\gamma$ -sugárzását HPGe  $\gamma$ -detektorral mértem melyet radioaktív források használatával kalibráltam. A mért hatáskeresztmetszeteket összehasonlítottam a statisztikus-modellszámítások jóslataival melyekhez az irodalmi paramétereket (nívósűrűség, optikai potenciál, stb.) használtam fel. A modellszámítás eredményei jól leírták a hatáskeresztmetszet nagyságrendjét, azonban annak energiafüggését nem tudták

visszaadni. Ez a tény az elméleti számításokhoz használt magfizikai paraméterek részletesebb vizsgálatát tette indokolttá [R1, R2, T1].

2. Az elméleti hatáskeresztmetszet számítások eredményei érzékenyen függenek a használt magfizikai adatoktól. Annak érdekében, hogy jobban megértsük a modellszámítások eredményeit a bemenő magparaméterek függvényében, egy ú.n. érzékenységvizsgálatot végeztem el. A számításokban használt átlagos proton-, neutron- és  $\gamma$ -szélességeket szisztematikusan és egymástól függetlenül változtattam. Ezen érzékenységszámítások eredményeként azt találtam, hogy a  $^{70}\text{Ge}(p,\gamma)^{71}\text{As}$  reakció hatáskeresztmetszete jelentősen függ 2,5 MeV proton energiák alatt a protoncsatorna szélességének megválasztásától, míg ezen energia fölött a  $\gamma$ -csatorna szélessége dominál. A  $^{76}\text{Ge}(p,n)^{76}\text{As}$  reakció hatáskeresztmetszete a protonszélesség változtatására reagált érzékenyen (egy keskeny, körülbelül 100 keV széles, a neutronküszöb feletti tartománytól eltekintve, ahol a neutron csatorna szélességének változtatására is érzékenyen reagált a számítás). Összefoglalva, ezen érzékenységszámítások megmutatták, hogy a számolásokban használt protonszélességek az alacsonyabb energiatartományban, míg a  $\gamma$ -szélességek a magasabb energiatartományban helyesek. Mivel a keletkezett magokban a nívósűrűség határozza meg a lehetséges átmenetek számát, a nívósűrűség-paraméterek változtatásának függvényében is elvégeztem az érzékenységszámításokat. Azt találtam, hogy a nívósűrűség-paraméter változtatása nem befolyásolja a számítások eredményét mely azzal indokolható, hogy az alacsonyabb nívók közötti átmenetek határozzák meg az egyes csatornák szélességét [R2, T1].
3. Alacsony tömegközépponti energiák esetén a protonszélesség — melyet a proton-mag optikai potenciálból határozunk meg — döntő fontosságú a hatáskeresztmetszet számításokban. A germánium izotópokon lejátszódó protonindukált reakciók hatáskeresztmetszeteinek legjobb leírását egy olyan statisztikus-modellszámítás adja, melyben a proton szélességét olyan proton-mag optikai potenciálból határozom meg, melynek valós része egyezik a korábban használt

és az irodalomban részletesen ismertetett optikai potenciállal, míg képzetes része 70%-kal nagyobb. Az irodalomban fellelhető ezen mag- és energiatartományban korábban vizsgált proton-indukált magreakciókra elvégeztem a modellszámításokat mind az irodalmi optikai potenciált mind a fent ismertetett módosított potenciált használva és összehasonlítottam az eredményeket a kísérleti hatáskeresztmetszet adatokkal. Azt találtam, hogy a módosított potenciállal elvégzett számítások eredményei a kísérlet eredményeivel jobb egyezésben vannak [R2, T2].

4. Az asztrofizikai  $p$  folyamat legújabb elméleti vizsgálatainak eredményei szerint a könnyű magok tartományában a  $(p,n)$  reakciók is — ezen belül is a  $^{85}\text{Rb}(p,n)^{85}\text{Sr}$  reakció — kulcsszerepet játszanak. Ezen magreakció hatáskeresztmetszetét 2,2 és 4,0 MeV között 200 keV-es lépésközönként mértem annak érdekében, hogy feltérképezsem azt az energiatartományt ahol a különböző proton-mag optikai potenciálok alkalmazásával számolt elméleti hatáskeresztmetszetek eltérnek. A céltárgymagok számát ebben az esetben egy alternatív módszer, az ú.n. Rutherford visszaszórási spektroszkópia alkalmazásával is meghatároztam. A mért hatáskeresztmetszeteket összehasonlítottam különböző optikai potenciált használó statisztikus-modellszámítások eredményeivel. A legjobb egyezést az általam bevezetett módosított potenciált használó modellszámítással kaptam [R3, T2].
5. Míg asztrofizikai környezetben (a csillagok belsejében) a magok gerjesztett állapotban vannak, addig a laboratóriumban mért reakciók esetén a céltárgymag alapállapotban van. Az asztrofizikai számításokban ezt a különbséget az ú.n. "enhancement factor" alkalmazásával veszik figyelembe, ami a csillaghőmérsékletnek megfelelő és a laboratóriumban mért reakciósebességek hányadosaként definiálható. Ez a tényező jelentősen nagyobbak adódik amennyiben a reakció  $Q$  értéke negatív, mint a pozitív  $Q$  értékű inverz reakció esetén. Ezt a tényt az magyarázza, hogy előbbi esetben kevesebb gerjesztett állapot töltődhet be. Így negatív  $Q$  értékű reakciók kísérleti tanulmányozása

során több asztrofizikai jelentőségű átmenet nincs számításba véve. Ebben a munkámban megmutattam, hogy a negatív  $Q$  érték ellenére — köszönhetően az "enhancement factor" Coulomb elnyomásának — lehetséges a mért (p,n) reakció hatáskeresztmetszetéből reakciósebességet származtatni mind a (p,n) mind az inverz (n,p) reakcióra. Következésképpen az asztrofizikai  $p$  folyamat jobb leírásához számos negatív  $Q$  értékű  $\alpha$ - valamint proton-indukált reakciót is lehetséges és szükséges tanulmányozni [R3, T2].

6. Első alkalommal mértem meg a kadmium két protongazdag izotópjának protonbefogási hatáskeresztmetszetét a  $p$  folyamat hőmérsékletének megfelelő energiákon. A kísérleti eredményeket összehasonlítottam modellszámítások előrejelzéseivel, melyekhez először az irodalmi magadatokat használtam fel, valamint megvizsgáltam ezen elméleti számítások eredményeinek érzékenységét a bemenő magparaméterek változtatására. A modellszámításokat elvégeztem a módosított proton-mag optikai potenciál használatával is és ekkor jobb egyezést találtam a mért és az elméleti hatáskeresztmetszetek között [R4, R5, T1].

Doktori munkámban az asztrofizikai  $p$  folyamat szempontjából lényeges protonindukált magreakciók hatáskeresztmetszetét mértem meg aktivációs technikával. A mért hatáskeresztmetszeteket elméleti számítások jóslataival hasonlítottam össze. Megvizsgáltam az elméleti számítások érzékenységét a használt magparaméterek függvényében. A proton-mag optikai potenciál fejlesztésével lehetővé tettem a kísérleti adatok jobb elméleti leírását. Továbbá megmutattam, hogy az asztrofizikai  $p$  folyamat jobb megértésének érdekében negatív  $Q$  értékű reakciókat is szükséges kísérletileg tanulmányozni.

## Az értekezés alapjául szolgáló közlemények

### Referált folyóiratok

- R1 **G. G. Kiss**, Gy. Gyürky, Z. Elekes, Zs. Fülöp, E. Somorjai, T. Rauscher, M. Wiescher,  
*Investigation of proton-induced reactions on Germanium isotopes*,  
Journal of Physics G. **35**, 4032 (2008).
- R2 **G. G. Kiss**, Gy. Gyürky, Z. Elekes, Zs. Fülöp, E. Somorjai, T. Rauscher, M. Wiescher,  
 $^{70}\text{Ge}(p,\gamma)^{71}\text{As}$  and  $^{76}\text{Ge}(p,n)^{76}\text{As}$  cross sections for the astrophysical  $p$  process: Sensitivity of the optical proton potential at low energies,  
Physical Review C **76**, 505807 (2007).
- R3 **G. G. Kiss**, Gy. Gyürky, A. Simon, Zs. Fülöp, E. Somorjai and T. Rauscher,  
*Coulomb suppression of the stellar enhancement factor*,  
közlésre elfogadva Physical Review Letters (2008).
- R4 Gy. Gyürky, **G. G. Kiss**, Z. Elekes, Zs. Fülöp, E. Somorjai,  
 $^{106,108}\text{Cd}(p,\gamma)^{107,109}\text{In}$  cross sections for the astrophysical  $p$  process,  
European Physical Journal A **27**, 141 (2006).
- R5 Gy. Gyürky, **G. G. Kiss**, Z. Elekes, Zs. Fülöp, E. Somorjai, T. Rauscher,  
*Proton capture cross section of  $^{106,108}\text{Cd}$  for the astrophysical  $p$ -process*,  
Journal of Physics G **34**, 817 (2007).

## Konferencia Előadások

- T1 **G. G. Kiss**, Gy. Gyürky, Zs. Fülöp, Z. Elekes, E. Somorjai,  
T. Rauscher and M. Wiescher,  
*Investigation of proton capture reaction cross sections on light p nuclei*,  
Nuclear Physics in Astrophysics III.,  
Drezda, Németország, 2007 Március 26 - 31.
- T2 **G. G. Kiss**, Gy. Gyürky, A. Simon, Zs. Fülöp, E. Somorjai,  
T. Rauscher,  
*Investigation of proton-induced reactions for the astrophysical p process*,  
Capture Gamma Ray and Related Topics XIII.,  
Köln, Németország, 2008 Augusztus 25 - 29.