

# Az asztrofizikai p-folyamat kísérleti vizsgálata

## Zárójelentés az D048283 OTKA posztdoktori pályázatról

### Témavezető: Gyürky György

A vasnál nehezebb elemek izotópjai a csillagfejlődés előrehaladott szakaszaiban neutronbefogási reakciók (s- és r-folyamat) révén keletkeznek. Található azonban a magtáblázat protongazdag oldalán 32 olyan izotóp, melyek nem jöhetnek létre neutronbefogási folyamatok segítségével. Ezen izotópok (az úgy nevezett p-magok) az asztrofizikai p-folyamat révén szintetizálódnak főként nehéz izotópokon lejátszódó  $\gamma$ -indukált reakciókban. A p-folyamat lejátszódásának legvalószínűbb helyszíne a szupernóva robbanások O-Ne rétege, ahol a nagy hőmérséklet miatt kellően nagy energiájú  $\gamma$ -fotonok állnak rendelkezésre.

Az elmúlt évek kiterjedt kísérleti és elméleti vizsgálatai ellenére az asztrofizikai p-folyamat még mindig a nukeloszintézis legkevésbé tanulmányozott folyamatainak egyike. Ahhoz, hogy a természetben található p-izotóp gyakoriságokat értelmezni tudjunk, a p-folyamat modellszámításokhoz hatalmas reakcióhálózat figyelembe vétele szükséges, melyben a domináns  $(\gamma, n)$  reakciókon kívül fontos szerepet játszanak a  $(\gamma, \alpha)$  és  $(\gamma, p)$  reakciók. A nagy számú  $\gamma$ -indukált reakció sebességét statisztikusmodell-számításokból nyerik, melyek megbízhatóságát töltött részecske-reakciók esetén nem támasztják alá kísérleti adatok. A reakciósebességek innen származó bizonytalansága közvetlen hatással van a p-izotópok számított gyakoriságára.

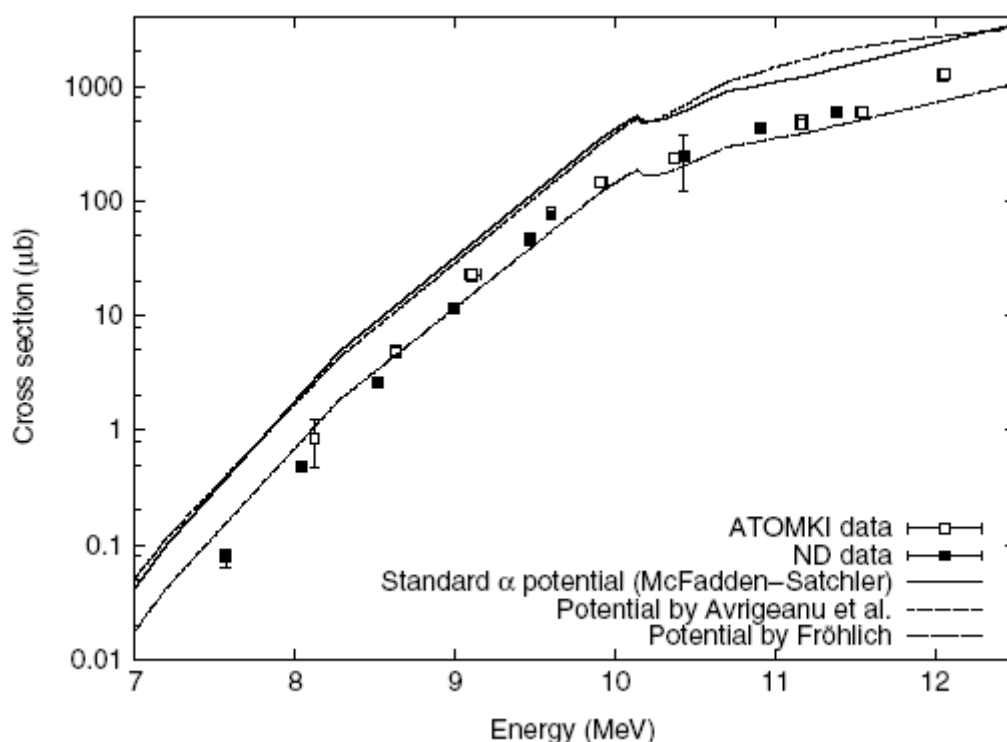
A p-folyamat számítások megbízhatóbbá tétele érdekében szükséges tehát a  $(\gamma, \alpha)$  és  $(\gamma, p)$  reakciók sebességének kísérleti meghatározása, ami az inverz befogási reakciók hatáskeresztmetszeteinek mérésével lehetséges. Egy az ATOMKI-ban végzett úttörő jellegű mérés után csoportunk a  $(p, \gamma)$  és  $(\alpha, \gamma)$  reakciók szisztematikus vizsgálatába kezdett. Célunk azon proton- és  $\alpha$ -befogási reakciók hatáskeresztmetszetének mérése, melyek fontos szerepet játszanak a p-folyamat modellszámításokban. A jelenleg lezáruló OTKA posztdoktori pályázat támogatásával ezt a szisztematikus vizsgálatsorozatot folytattuk tovább számos izotóp befogási hatáskeresztmetszetének mérésével.

A méréseket a p-folyamat szempontjából fontos, alacsony energiatartományban célszerű elvégezni, ahol a befogási reakciók hatáskeresztmetszete a Coulomb-gát miatt igen alacsony. A mérések hagyományos on-line  $\gamma$ -detektáláson alapuló elvégzését tovább nehezíti, hogy az adott tömegszám és energiatartományban a befogási reakciók a közbenső mag magasán gerjesztett állapotát eredményezik, ahol a mag nívói már átfednek. Ennek eredményeképpen a közbenső mag  $\gamma$ -bomlása bonyolult sémát követ, ami a mérésekben igen bonyolult befogási  $\gamma$ -spektrumot eredményez. Ennek kiértékelése igen nehéz feladat tekintetbe véve azt is, hogy az egyes  $\gamma$ -átmenetek szögeloszlását is meg kell határozni a hatáskeresztmetszetek abszolút módon való méréséhez. A nehézségeket fokozza, hogy a céltárgyban vagy a környezetében jelenlevő szennyezőkön nagy hatáskeresztmetszettel végbemenő magreakciókból igen magas háttérhozzamok származnak.

A problémára megoldást nyújt az aktivációs technika alkalmazása. Erre akkor van lehetőség, ha a befogási reakció végmagja radioaktív. Ekkor a végmag bomlásakor keletkező sugárzás detektálásával az eredeti reakció hatáskeresztmetszetére következtethetünk. Ezt az esetek többségében a végmag  $\beta$ -bomlását követő  $\gamma$ -sugárzás detektálásával végezhetjük el. Az így keletkező spektrum általában lényegesen egyszerűbb, mint a fent említett befogási spektrum, valamint a nyaláb okozta háttér sincs jelen. Ez lehetőséget ad arra is, hogy egy adott elem több izotópjának vizsgálata egyszerre elvégezhető legyen. Az alább felsorolt reakciók vizsgálatát a fenti előnyök miatt az aktivációs technika segítségével végeztük.

A protonbefogási reakciók esetén a asztrofizikailag lényeges energiatartomány (a tömegszámtól függően) hozzávetőlegesen 1,5 és 5 MeV között van. Ez az energia az ATOMKI Van de Graaff gyorsítójával lefedhető, a tartomány felső részében pedig a ciklotron gyorsító alkalmazására is szükség lehet. A következő proton-indukált reakciók hatáskeresztmetszetét határoztuk meg:  $^{106,108}\text{Cd}(p,\gamma)^{107,109}\text{In}$ ,  $^{70}\text{Ge}(p,\gamma)^{71}\text{As}$ ,  $^{76}\text{Ge}(p,n)^{76}\text{As}$ . Az  $\alpha$ -befogási reakciók esetén a vizsgálandó energiatartomány (a tömegszámtól függően) hozzávetőlegesen 5 és 15 MeV között van, ami az ATOMKI ciklotron gyorsítójával elérhető. Itt a  $^{106}\text{Cd}$  három  $\alpha$ -indukált reakciójának mértük a hatáskeresztmetszetét:  $^{106}\text{Cd}(\alpha,\gamma)^{110}\text{Sn}$ ,  $^{106}\text{Cd}(\alpha,n)^{109}\text{Sn}$  és  $^{106}\text{Cd}(\alpha,p)^{109}\text{In}$ . Nemzetközi együttműködés keretében a Notre Dame egyetem (USA) gyorsítólaboratóriumában a  $^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$  reakció vizsgálatát is elvégeztük. Az ATOMKI-ban végzett mérésekhez szükséges céltárgyak minden esetben vákuumpárológatással készültek különböző hátlapokra. A Ge izotópok esetén természetes izotópösszetételű céltárgyakat használtunk, míg a Cd izotópok vizsgálatához (energiától függően) mind természetes mind  $^{106}\text{Cd}$ -ban dúsított céltárgyanyagra is szükség volt. A proton- illetve  $\alpha$ -besugárzás során keletkező radioaktív izotópok  $\gamma$ -aktivitását kalibrált HPGe detektorral mértük.

A megmért hatáskeresztmetszeteket összehasonlítottuk statisztikusmodell-számítások eredményeivel a NON-SMOKER programcsomag alkalmazásával. Megvizsgáltuk azt is, hogy különböző bemenő adatok alkalmazásával hogyan változik a modellszámítás és a mért értékek közötti egyezés. Ez hozzá segíthet a modellek megfelelő paraméterkészleteinek kiválasztásához.

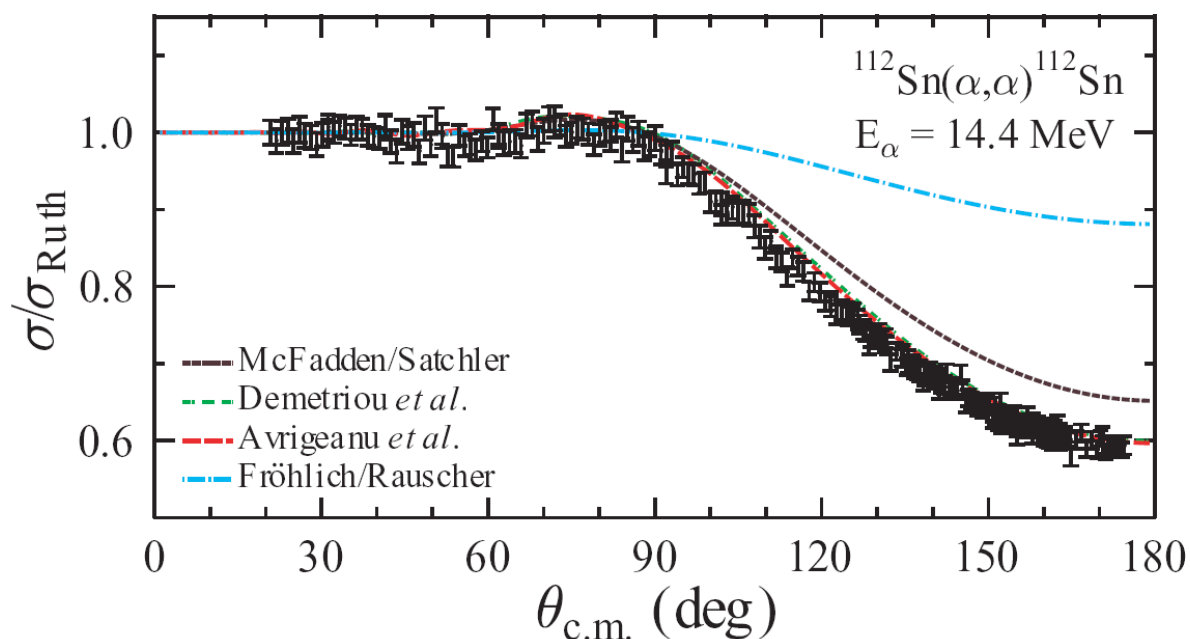


1. ábra  $^{106}\text{Cd}(\alpha,\gamma)^{110}\text{Sn}$  reakció asztrofizikai S faktora. Részletek a szövegben.

Példaként a  $^{106}\text{Cd}(\alpha,\gamma)^{110}\text{Sn}$  reakció hatáskeresztmetszetének energiafüggését mutatja az 1. ábra. A mért értékeken kívül a modellszámítások eredményei is láthatók három különböző  $\alpha$ -mag optikai potenciál felhasználásával. Jól látható, hogy mérési eredményeink alapján eldönthető, mely optikai potenciál, mint bemenő paraméter alkalmazásával képes a modell a reakció leírására.

Az aktivációs technikával végzett mérések esetén az eredmények precíz kiértékeléséhez szükséges a reakcióban keletkező végmagok felezési idejének pontos ismeretére. Mivel az irodalomban az  $^{110}\text{Sn}$  és  $^{109}\text{In}$  magok felezési idejére nem állt rendelkezésre kellően pontos adat, ezért egy nagy pontosságú mérésben meghatároztuk e két mag bomlásának felezési idejét.

Mint azt az 1. ábra is mutatja,  $\alpha$ -befogási reakciók esetén a statisztikus modellel számított hatáskeresztmetszetek értéke igen erősen függ a modellben alkalmazott  $\alpha$ -mag optikai potenciáltól. Célszerű ezért az  $\alpha$ -mag optikai potenciál közvetlen kísérleti meghatározása, ami nagy pontosságú  $(\alpha,\alpha)$  rugalmas szórás mérések segítségével elvégezhető. Az ATOMKI ciklotron gyorsítójára telepített precíziós szórókamra használatával három mag ( $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{112,124}\text{Sn}$ ) rugalmas szórás hatáskeresztmetszetét mértük meg. Az eredményekből lokális, az adott magra jellemző optikai potenciálokat határoztunk meg, valamint mérési eredményeinket összehasonlítottuk globális, magok széles tartományára alkalmazott elméleti optikai potenciálokkal.



2. ábra A  $^{112}\text{Sn}$  mag mért és különböző optikai potenciálokkal számított rugalmas szórási hatáskeresztmetszete.

A 2. ábrán a  $^{112}\text{Sn}$  mag (Rutherford-szórásra normált) rugalmas szórási hatáskeresztmetszete látható a szórési szög függvényében. A mérési eredményeink alapján egyértelműen megállapítható, hogy az ábrán feltüntetett különböző globális optikai potenciálok közül melyik képes visszaadni a mért szórásképet.

A fent felsorolt kutatások mindegyikéről nemzetközi konferenciákon számoltunk be. Az eredményeket a konferenciák proceedings kötetében, majd végső formában rangos nemzetközi folyóiratokban közzétettük. Az OTKA támogatásának feltüntetésével a téma három éves futamideje alatt 4 konferencia-proceedingset és 6 SCI cikket publikáltunk.