

Az asztrofizikai p-folyamat kísérleti vizsgálata befogási reakciókban

Zárójelentés az F 043408 ifjúsági OTKA 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 γ -indukált reakciókban. A p-folyamat lejátszódásának legvalószínűbb helyszíne a szupernóva robbanások O-Ne rétege, ahol a nagy hőmérséklet miatt kellően nagy energiájú γ -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 (γ, n) reakciókon kívül fontos szerepet játszanak a (γ, α) és (γ, p) reakciók. A nagy számú γ -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 (γ, α) és (γ, 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, γ) és (α, γ) reakciók szisztematikus vizsgálatába kezdett. Célunk azon proton- és α -befogási reakciók hatáskeresztmetszetének mérése, melyek fontos szerepet játszanak a p-folyamat modellszámításokban. A jelenleg lezáruló ifjúsági OTKA pályázat támogatásával ezt a szisztematikus vizsgálatsorozatot folytattuk tovább számos izotóp befogási hatáskeresztmetszetének mérésével.

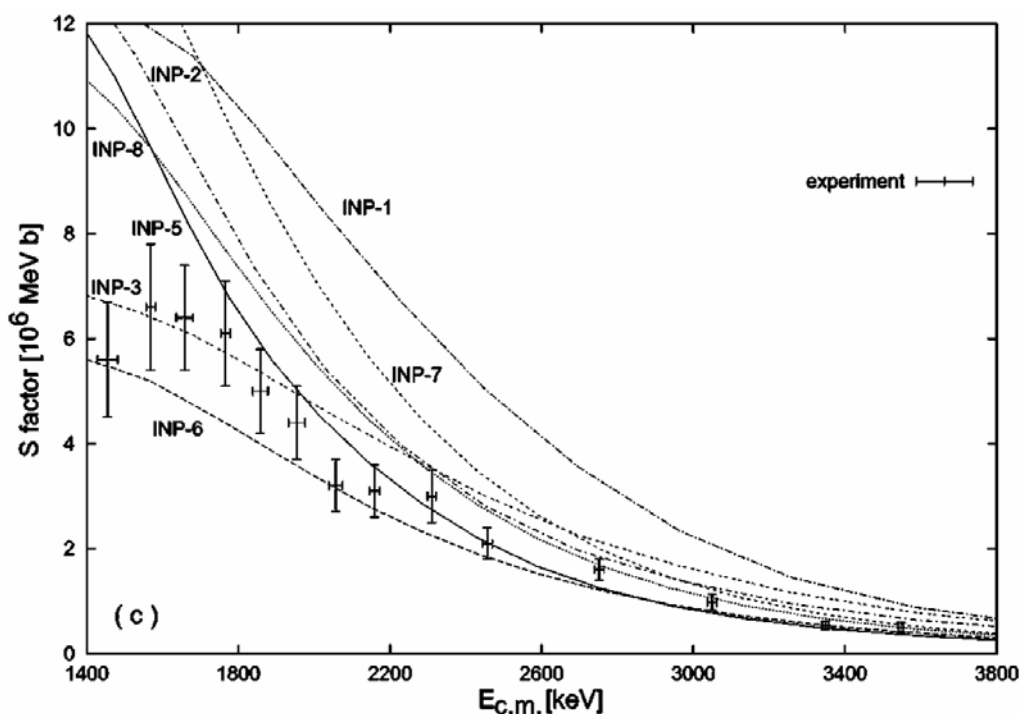
A méréseket a p-folyamat szempontjából fontos, alacsony energiatarományban célszerű elvégezni, ahol a befogási reakciók hatáskeresztmetszete a Coulomb-gát miatt igen alacsony. A mérések hagyományos on-line γ -detektáláson alapuló elvégzését tovább nehezíti, hogy az adott

tömegszám és energiatartományban a befogási reakciók a közbenső mag magasan gerjesztett állapotát eredményezik, ahol a mag nívói már átfednek. Ennek eredményeképpen a közbenső mag γ -bomlása bonyolult sémát követ, ami a mérésekben igen bonyolult befogási γ -spektrumot eredményez. Ennek kiértékelése igen nehéz feladat tekintetbe véve azt is, hogy az egyes γ -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 β -bomlását követő γ -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: $^{74,76}\text{Se}(p,\gamma)^{75,77}\text{Br}$, $^{82}\text{Se}(p,n)^{82}\text{Br}$, $^{106,108}\text{Cd}(p,\gamma)^{107,109}\text{In}$. Az α -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}Cd három α -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 vákuumpárolgatással készültek különböző hátlapokra. A Se izotópok esetén természetes izotópösszetételű céltárgyakat használtunk, míg a Cd izotópok vizsgálatához (energiától függően) mind természetes mind ^{106}Cd -ban dúsított céltárgyanyagra is szükség volt. A proton- illetve α -besugárzás során keletkező radioaktív izotópok γ -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.

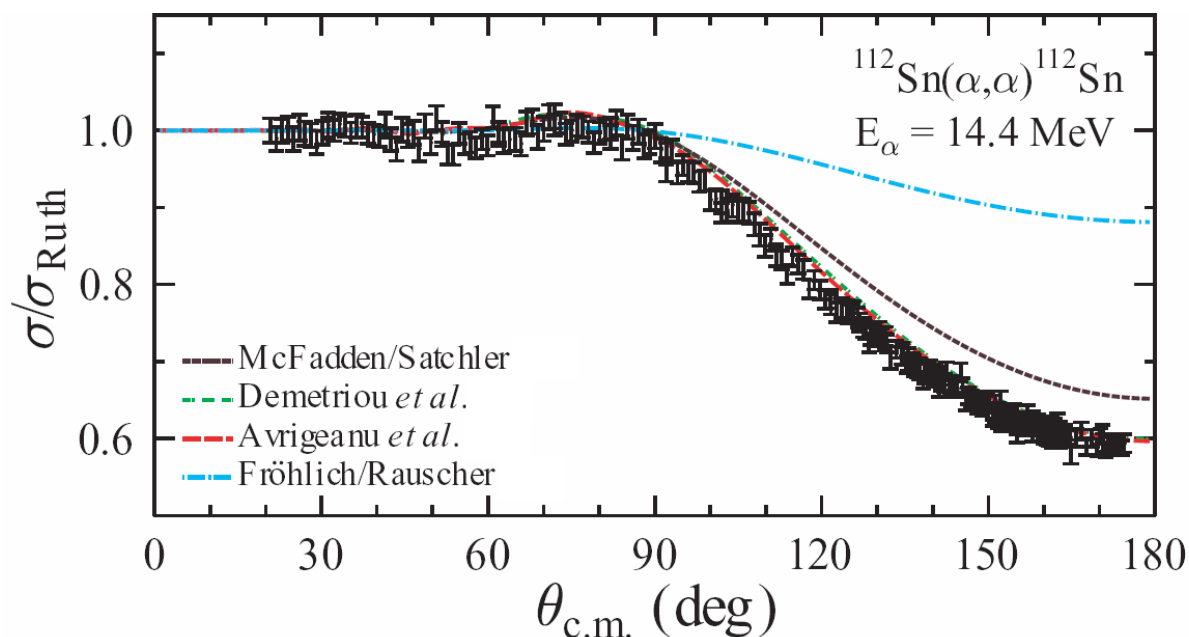


1. ábra $^{74}\text{Se}(p,\gamma)^{75}\text{Br}$ reakció asztrofizikai S faktora. Részletek a szövegben.

Példaként a $^{74}\text{Se}(p,\gamma)^{75}\text{Br}$ reakció hatáskeresztmetszetéből származtatott asztrofizikai S faktor energiafüggését mutatja az 1. ábra. A mért értékeken kívül a modellszámítások eredményei is láthatók hét különböző bemeneti paraméterkészlet felhasználásával. Jól látható, hogy mérési eredményeink alapján eldönthető, mely paraméterkészlet alkalmazásával képes a modell ezen 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}Sn és ^{109}In magok felezési idejére nem állt rendelkezésre kellően pontos adat, ezért egy nagy pontosságú mérésben meghatároztuk e két mag bomlásának felezési idejét.

Az α -befogási reakciók esetén a statisztikus modellel számított hatáskeresztmetszetek értéke igen erősen függ a modellben alkalmazott α -mag optikai potenciáltól. Célszerű ezért az α -mag optikai potenciál közvetlen kísérleti meghatározása, ami nagy pontosságú (α,α) rugalmas szórás mérések segítségével elvégezhető. Az ATOMKI ciklotron gyorsítójára telepített precíziós szórókamra használatával három mag (^{106}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}Sn mag mért és különböző optikai potenciálokkal számított rugalmas szórási hatáskeresztmetszete.

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

A jelenleg lezáruló ifjúsági OTKA pályázat támogatásával egyéb, az asztrofizikai p-folyamathoz szorosan nem kapcsolódó kutatásokat is végeztünk. A nehéz elemek - köztük a p-folyamatban keletkező izotópok gyakorisága is - függ a csillagfejlődés korábbi szakasziban lejátszódó $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ reakció sebességétől. Ezen reakció hatáskeresztmetszete kísérletileg nem ismert a kellő pontossággal. A németországi Bochumban működő ERNA tömegszeparátorral a $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ reakció hatáskeresztmetszetének új módszerrel határozható meg. A pontos mérés elengedhetetlen feltétele azonban a szeparátor akceptanciájának ismerete, ami magreakciók ismert erősségű rezonanciáinak segítségével mérhető. Ezért abszolút rezonanciaerősség méréseket végeztünk a $^{6,7}\text{Li}(\alpha,\gamma)^{10,11}\text{B}$ reakciókban.

Az alacsony energiás asztrofizikai folyamatokban nagy jelentősége van az elektronárnyékolás jelenségének. Nemzetközi együttműködés keretében a Bochumi Egyetem gyorsító laboratóriumában a $d(d,p)t$ reakcióval vizsgáltuk a jelenségét. Különböző fémekbe implantált deutérium céltárgyon mértük az elektronárnyékolás nagyságát, és a fémek egy csoportjára anomálisan nagy értéket tapasztaltunk, ami akár egy nagyságrenddel is meghaladja mind az elméletileg várható, mind a gázcéltárgyas mérésekben tapasztalt értéket. A jelenségre egy lehetséges magyarázatát adtunk a plazmafizika Debye elméletes segítségével.

A fent felsorolt kutatások mindegyikéről nemzetközi konferenciákon számoltunk be. Az eredményeket a konferenciák proceedings kötetekben, majd végső formában rangos nemzetközi folyóiratokban közzétettük. Az OTKA támogatásának feltüntetésével a téma négy éves futamideje alatt 10 konferencia-proceedinget és 7 SCI cikket publikáltunk.