

## Alacsony háttérű nukleáris asztrofizikai mérések

### OTKA K101328 zárójelentés

#### 1. Főbb célok és eredmények

Az elemek keletkezése magreakciók sorozatán keresztül zajlik. Pályázatunk során a kísérleti atommagfizika kutatási módszereivel a nukleoszintézis megértéséhez fontos folyamatokat vizsgáltunk az MTA Atomki asztrofizikai kutatócsoporttal. A mérendő reakciók egy része olyan kis hatáskeresztmetszetű az asztrofizikai energiatartományban, hogy azok tanulmányozása a földfelszíni laboratóriumokban nem lehetséges. Ezeket a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics: <http://luna.lngs.infn.it/>) olasz földalatti laboratóriumban működő 400kV-os részecskegyorsítón mértük. Erre az adott lehetőséget, hogy a LUNA nemzetközi együttműködés tagja 2000 óta az Atomki asztrofizikai csoportja. Méréseink másik felét az MTA Atomki gyorsítóparkján végeztük.

Eredményeinket mintegy 30 folyóiratcikkben jelentettük meg, kb. 130-as összimpakt faktorral. A publikációk közül 2 összefoglaló jellegű cikk, 5 pedig letter típusú. A két összefoglaló cikk közül az egyik a rugalmas szórás méréseink szisztematikus elemzése az „Atomic Data and Nuclear Data Tables” folyóiratban. E cikk elnyerte az Elsevier „Highly Cited Research” díját, amelyet egy adott újság cikkei közül a megjelenést követő két évben legtöbbet hivatkozott cikk kaphat meg. A másik publikáció az újság szerkesztőinek meghívására készült, az asztrofizikai p-folyamatot áttekintő „review” cikk, a 13-as impakt faktorú „Reports on Progress in Physics” folyóiratban.

A téma fontosságát és a kutatói közösség érdeklődését mutatja, hogy publikációink közül 2 ú.n. „Editor’s suggestion” lett, egy harmadik cikkünk az EPJA újság címlapjára került, a Journal of Physics G pedig egy ú.n. „labtalk” promóciós cikket is közölt a nagyközönség számára méréseinkről:

<http://iopscience.iop.org/0954-3899/labtalk-article/60445>

Eredményeinket több nemzetközi konferencián mutattuk be, mely előadásokból és poszterekből kb. 40 proceedings jellegű közlemény jött létre, ezeket nem tüntettük fel a cikklistában, mert a témából önálló cikk is született. Az EUNPC (European Nuclear Physics Conference, <http://www.eunpc2015.org/>) 2015-ös eseményen a nukleáris asztrofizika egyetlen plenáris előadójaként számolhattunk be eredményeinkről. 2014. július 7-11 között az Atomki nukleáris asztrofizika csoportja rendezte meg Debrecenben a téma legnagyobb nemzetközi konferenciáját „Nuclei in the Cosmos” címmel: <http://www.nic2014.org/>

Méréseink ötvözték az MTA Atomki és a külföldi partnerek részecskegyorsítóinak előnyeit, ezzel egy különleges lehetőséget adtak arra, hogy több eddig megoldatlan asztrofizikai problémára választ találjunk. A jelentés további részében bemutatjuk a kis hatáskeresztmetszetű reakciók mérésénél elengedhetetlen háttérvizsgálatokat, technológiai fejlesztéseket, és az ezekre alapuló asztrofizikai eredményeket.

## 2. Háttérvizsgálatok a föld alatt

A nem robbanásos asztrofizikai környezetben lejátszódó töltött részecske-reakciók sebességének becsléséhez a reakció hatáskeresztmetszetét mélyen a Coulomb gát alatt kell mérni. Ezekon az energiákon a hatáskeresztmetszet nagyon alacsony, így a kísérleti beütésszám ráta nagy részét földfelszínen a kozmikus sugárzás okozta háttér adja. A probléma megoldását mély földalatti laborokban való kísérletezés jelenti (> 1000 m sziklaréteg alatt). Vizsgálataink során egy olyan kombinált lehetőséget tanulmányoztunk, amely egy sekély földalatti labor és a még jelen lévő kozmikus müonok ellen egy aktív árnyékolás egyidejű alkalmazását mutatja be. Ez a mély földalatti laborban tapasztalat háttérszinthez hasonló eredményez.

A laboratóriumi háttérméréseinket a földfelszínen és különböző mélységű földalatti laborokban végeztük. A sekély földalatti (47 m mély) helyszín a drezdai Felsenkeller labor Németországban, míg a mély földalatti (1300 m mély) helyszín a Gran Sasso laboratórium volt Olaszországban. Ugyanazokat a detektorokat szállítottuk egymás után minden helyszínre, hogy elkerüljük a laboratóriummal össze nem függő hatásokat. Két aktív árnyékolással ellátott detektort használtunk. Először az Atomki nagytisztaságú germánium Clover detektorát, a hozzá tartozó bizmut-germanát-oxid (BGO) árnyékolással, ami müon vétóként is funkcionál. A másik detektor egy lantán bromid ( $\text{LaBr}_3$ ) egy nagy BGO antimüon árnyékolásba helyezve.

A beütésszám ráta a sekély földalatti helyszínen csupán 2,4-szeresnek adódott a mély földalattihoz viszonyítva, a vétózott spektrumokat tekintve, a magas energiás tartományban (3-8 MeV). A háttér adatokat figyelembe véve kiszámoltuk néhány asztrofizikai szempontból fontos magreakció mérésének megvalósíthatóságát egy, a Clover detektorral korábban már hasonló in-beam hatáskeresztmetszet méréshez alkalmazott elrendezésben.

Annak köszönhetően, hogy a nukleáris asztrofizikai kísérletek alacsony, de nem extrém alacsony háttérrel igényelnek, bebizonyítottuk, hogy már egy sekély földalatti helyszín is kielégítő háttérrel szolgált számos in-beam  $\gamma$ -spektroszkópiai kísérlethez, ha aktív árnyékolást is használunk. Mivel a sekély földalatti laborok sokkal könnyebben hozzáférhetők, mint a mély földalattiak, ez a felfedezés megadja a lehetőséget a nukleáris asztrofizikai hatáskeresztmetszet mérések intenzívebb kutatásának.

Eredményünk fontosságát mutatja, hogy a fenti összehasonlító mérésünk az „European Physical Journal A” folyóirat címlapjára került, és azóta a drezdai Felsenkeller laboratórium már meg is kezdte egy földalatti részecskegyorsító kiépítését.

### 3. Kutatási eredmények a LUNA együttműködésben

Az olaszországbeli LUNA földalatti gyorsító helyszíne milliószoros elnyomást jelent a kozmikus müonhátterre, és mintegy ezerszeres elnyomást a gamma-hátterre a 4MeV fölötti energiatartományban, ahol a kozmikus sugárzás domináns. A 400kV-os LUNA részecskegyorsítónál végzett kísérletek egyik legfontosabb eleme annak vizsgálata, hogy a jelentősen lecsökkent környezeti háttér mennyiben módosul a gyorsított részecskék által indukált in-beam háttérrel. Ezek a hátterek az egyes mérési elrendezésekre (nyaláb, céltárgy, detektor) jellemzők, tehát külön-külön vizsgálandók. A pályázat során több asztrofizikai szempontból fontos magreakciót vizsgáltunk, ahol a vizsgálat tipikusan három jól elkülöníthető részből áll:

- Céltárgykészítés és háttérvizsgálatok
- Magfizikai mérések és elemzésük
- Asztrofizikai következmények vizsgálata

A publikációs stratégia is ennek megfelelő: egyes esetekben már a háttérvizsgálatok önállóan olyan érdekes eredményt adtak, amely önálló publikációra adnak okot.

Néhány kiemelkedő eredmény:

- A 17-es és 18-as oxigén izotóppal dúsított céltárgykészítési eljárást dolgoztunk ki, melyben a szilárd Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tartalmazza a dúsított anyagot. A céltárgy tisztasága és stabilitása megfelelőnek bizonyult, ezért mérési sorozatot indítottunk el a <sup>17</sup>O(p,γ) és a <sup>17</sup>O(p,α) reakciók vizsgálatára. Mérésünk hatáskeresztmetszet-eredményeinek hibája kisebb, mint amit a nóva-modellek megkívánnak.
- Az ősrobbanás során lejátszódó (Big-bang) nukleoszintézisben szerepet játszó D+α reakció hatáskeresztmetszetének meghatározásánál kritikus nyalábindukált hátteret vizsgáltuk, és ismertettük az analízisben alkalmazandó háttérlevonási módszereket. A háttérkorrekciós módszert alkalmaztuk a szóban forgó <sup>2</sup>H(α,γ)<sup>6</sup>Li reakció méréseinkre, és ezzel először sikerült közvetlen hatáskeresztmetszet-adatokat kapni a <sup>6</sup>Li keletkezéséről az ősrobbanásnak megfelelő energiatartományban.
- Háttérvizsgálatokat végeztünk a <sup>22</sup>Ne(p,γ)<sup>23</sup>Na reakció tanulmányozásának megvalósíthatóságára. A korábban ismert laboratóriumi háttérviszonyok mellett elsősorban a nyalábindukált háttér optimalizálására koncentráltunk. A vizsgálat első eredményeként az irodalomban először sikerült direkt mérésben megfigyelnünk a reakció E<sub>p</sub>=186keV-es rezonanciáját. A részletesebb vizsgálatok során még két új rezonanciát találtunk, melyek hatása, hogy a vörös óriásokban lejátszódó nukleoszintézisben szerepet játszó reakció hozama jelentősen nagyobb a korábban vártnál a releváns hőmérséklet-tartományban.

Érdemes megemlíteni, hogy a fenti három kísérlet összesen 8 publikációt eredményezett, és mindhárom esetben a legfontosabb eredményt a mértékadó „Physical Review Letters” újságban közöltük.

#### 4. Asztrofizikai p-folyamat

Jelenlegi ismereteink szerint a természetben található vasnál nehezebb izotópok többsége két különböző, neutronbefogási reakciókon alapuló folyamatban, az úgynevezett asztrofizikai s- és r-folyamatokban jött létre. Az s-folyamat kis és közepes tömegű csillagokban zajlik, míg az r-folyamat valószínűleg csillagrobbanásokban, vagy összeolvadó neutroncsillagokban megy végbe. Pár tucat stabil, protongazdag izotóp azonban nem jöhet létre ezekben a folyamatokban. Ezeket a Se és Hg között található izotópokat nevezzük p-izotópoknak. A kiterjedt asztrofizikai és magfizikai kutatások ellenére a p-izotópok eredete még nem ismert pontosan. A leginkább elfogadott elképzelés szerint nagytömegű csillagokban a már jelenlevő nehéz izotópokon lejátszódó fotobomlási reakciók létrehozhatják a p-izotópokat. Ehhez az úgynevezett gamma-folyamathoz nagy hőmérséklet szükséges, amely robbanásos asztrofizikai eseményekben mehet végbe. Az egyik lehetséges helyszín a mag-összeomlásos szupernóva robbanások O/Ne rétege. Bár a modellek szerint a nagytömegű csillagokban zajló gamma-folyamat valóban vezethet p-izotópok keletkezéséhez, a modellek nem képesek kellő pontossággal reprodukálni a megfigyelt p-izotóp gyakoriságokat. Ezt a problémát részben alternatív asztrofizikai helyszínek figyelembe vételével lehet orvosolni, de a folyamat magfizikai oldala is jelentős bizonytalanságokat rejt. Ennek oka az, hogy a gamma-folyamat reakcióhálózatokban nagyszámú, főként radioaktív magokon lejátszódó reakciót kell figyelembe venni, amiknek a reakciósebessége csak elméleti számításokon alapul.

##### a. Vizsgálatok az $^{64}\text{Zn}$ atommagon

Az elemszintézis több folyamatában, például a nehéz, protongazdag izotópokat előállító asztrofizikai gamma-folyamatban fontos szerepet játszanak az  $\alpha$  részecskék részvételével zajló magreakciók. Ezek elméleti leírásához, azaz például a hatáskeresztmetszetek kiszámításához, a részecske és az atommag között ható  $\alpha$ -mag optikai potenciál, mint bemenő paraméter ismerete elengedhetetlen. Az utóbbi évek gamma-folyamatot vizsgáló kísérletei azt mutatták, hogy az asztrofizikai modellekben használt optikai potenciálok nem alkalmasak az alacsonyenergiás folyamatok leírására. Az eddigi kísérletek azonban ezt csak közvetetten tudták megállapítani, mivel az asztrofizikailag lényeges energiáknál magasabb energián végezték a vizsgálatokat, valamint az eredményekből sok esetben nem lehetett egyértelműen következtetni erre a paraméterre.

Az  $\alpha$ -mag optikai potenciált asztrofizikai szempontból eddig csak olyan reakcióban vizsgálták, ahol az  $\alpha$ -részecske a reakció bemenő csatornájában volt. Méréseink során egy  $(p,\alpha)$  reakciót használtunk, tehát egy olyan folyamatot, melyben az  $\alpha$ -részecske a kimenő csatornában van. Konkrétan a  $^{64}\text{Zn}(p,\alpha)^{61}\text{Cu}$  reakció hatáskeresztmetszetét mértük olyan energiatarományban, ahol az  $\alpha$ -mag optikai potenciál közvetlenül asztrofizikai energiákon vizsgálható. Ráadásul a reakció hatáskeresztmetszete kizárólag erre a bemenő paraméterre érzékeny, tehát a modellekkel való összehasonlításból közvetlen következtetéseket tudunk levonni a potenciálra. A kísérleteket aktivációs technikával az Atomki ciklotron gyorsítójával végeztük a 3.5-8 MeV protonenergia-tartományban. Az eredményeket összehasonlítottuk statisztikusmodell-számítások jóslataival különböző optikai potenciálok felhasználásával. Az eredmények megerősítik azt a korábbi közvetett tapasztalatot, hogy az asztrofizikai modellekben használt globális optikai potenciál nem írja le jól az alacsonyenergiás

folyamatokat Ez az első közvetlen bizonyíték arra tehát, hogy a használt potenciál jelentős módosításra szorul alacsony energiákon. Megfelelően módosított potenciállal számított hatáskeresztmetszetek a tapasztalattal jobban egyező izotópgyakoriságokra vezethetnek gamma-folyamatra végzett modellszámításokban.

A kvantummechanika alapvető összefüggései alapján egyértelmű kapcsolat áll fenn egy magreakció teljes (nem rugalmas szórás) hatáskeresztmetszete és a rugalmas szórás szögeloszlásának méréséből nyerhető komplex szórás mátrix  $S_L = \eta_L \exp(2i\delta_L)$  paramétereinek között:

$$\sigma_{\text{reac.}} = \frac{\pi}{k^2} \sum_L (2L+1)(1 - \eta_L^2)$$

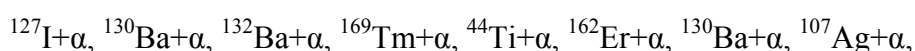
ahol  $k$  a hullámszám,  $\eta_L$  és  $\delta_L$  pedig a reflexiók együtthatói és a fázistolások. Meglepő módon alacsonyenergiás  $\alpha$ -indukált reakciók esetén a fenti összefüggést nem sikerült még kísérletileg igazolni, sőt egyes vizsgálatok jelentős eltérést találtak a két módszerrel meghatározott teljes hatáskeresztmetszet között.

Vizsgálatainkhoz a  $^{64}\text{Zn} + \alpha$  reakciót választottuk, egyrészt mert az irodalomban rendelkezésre állnak alacsonyenergiás rugalmas szórás adatok, másrészt pedig a reakció három legerősebb csatornájának hatáskeresztmetszete aktivációs módszerrel mérhető. A méréseket az Atomki ciklotron gyorsítójával végeztük és az  $(\alpha, \gamma)$ ,  $(\alpha, n)$  valamint  $(\alpha, p)$  reakciók hatáskeresztmetszetét a végmag radioaktív bomlását követő  $\gamma$ -sugárzás detektálásával határoztuk meg.

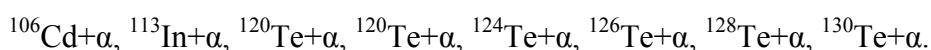
12,4 MeV-es tömegközépponti energián a mért adatainkból meghatároztuk a teljes hatáskeresztmetszetet és összehasonlítottuk az azonos energián mért rugalmas szórásból kapott értékkel. A kísérletek összesített 17%-os bizonytalanságán belül azonos eredményt kaptunk így elsőként sikerült alacsonyenergiás  $\alpha$ -indukált reakciók esetén igazolni a fenti kvantummechanikai összefüggést. Az eredmények pontosítása érdekében új, nagy pontosságú rugalmas szórás méréseket is végeztünk  $^{64}\text{Zn}$  magon, hogy a fenti 17%-os hibát leszoríthassuk.

## b. Alfa-indukált reakciók vizsgálata

Tekintettel a jelenleg még hiányos kísérleti adatokra a nehéz magokon lejátszódó alfa indukált reakciók esetében, tovább folytattuk szisztematikus méréseinket az asztrofizikai folyamatra jellemző nehéz magok tömegtartományában, megközelítve a p-folyamat domináns hőmérsékletét. Alfa-indukált reakciókat vizsgáltunk az alábbi izotópokon:



Rugalmas alfa szórási szögeloszlásokat határoztunk meg az alábbi izotópokon:



Ezzel pontosítottuk az asztrofizikai modelleket és következtetéseket vontunk le a statisztikus modell bemenő paraméterkészletének pontosítása érdekében, eredményeinket különböző globális potenciálok jóslataival vetettük össze. Eredményeink a  $^{40}\text{Ca}(\alpha,\gamma)^{44}\text{Ti}$  reakció rezonanciáinak erősségét pontosították a 4497, 4510, és 4523 keV bombázó alfa-energián.

A p-folyamatról szóló összefoglaló cikkben áttekintettük a gamma-folyamat leírására használt jelenlegi asztrofizikai modelleket, a szükséges magfizikai bemenő adatok jellemzőit illetve a meteoritok izotóparány-méréseiből a gamma-folyamatra nyerhető információkat. A jelenleg használt modellek áttekintése után a modellek lehetséges fejlesztésének módjaira helyezük a hangsúlyt. A meteoritok elemzéséből származó adatok nem csak a p-izotópok gyakoriságára szolgáltatnak információt, hanem megszorítást adnak a p-izotópok más folyamatokban (például protonbefogási reakciókban) való keletkezésének lehetséges hozzájárulására is. A cikk legnagyobb részében a gamma-folyamat magfizikai bizonytalanságát elemeztük, melyek legfőképpen a reakcióhálózatban résztvevő reakciók sebességeit érintik. A reakciósebességek pontosabbá tétele érdekében végzendő kísérletek módszereit is áttekintjük és tárgyaljuk az elméleti modellekkel való összehasonlításból levonható következtetéseket. Néhány új eredmény bemutatásával a modellek további fejlesztésének lehetséges irányaira mutattunk rá.