

dc\_294\_11

AKADÉMIAI DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

# Asztrofizikai jelentőségű befogási reakciók kísérleti vizsgálata

Gyürky György

MTA Atomki

Debrecen

2012

dc\_294\_11

## Bevezetés

A nukleáris asztrofizika a magfizika azon részterülete, mely csillagokban lezajló, vagy az asztrofizikai jelenségek megértése szempontjából közvetett módon fontos magreakciók tanulmányozásával foglalkozik. Az utóbbi években a nukleáris asztrofizika jelentős fejlődésen ment keresztül és bátran kijelenthető, hogy ez az interdiszciplináris tudományág a virágkorát éri. Szinte minden magfizikai célú, épülő vagy tervezett nagyberendezés tudományos motivációi között nagy hangsúllyal szerepel a nukleáris asztrofizika és nem találunk magfizikai tárgyú konferenciát erős nukleáris asztrofizikai szekció nélkül. A jelentős fejlődés ellenére sok még az olyan asztrofizikai folyamat, melynek megértéséhez a magfizikai ismereteinket mind elméleti, mind kísérleti oldalról gyarapítani kell. Ilyen kutatásokról számol be a jelen dolgozat.

A dolgozat alapját a kísérleti nukleáris asztrofizika területén az elmúlt bő tíz évben végzett munkám három legfontosabb részterülete képezi. Ezek azok a területek, ahol szerepem a kísérletek kivitelezésében, illetve az azokból származó eredmények elérésében meghatározó volt. Az alábbiakban ezeket a munkákat, illetve eredményeiket foglalom össze röviden.

A három részterület közül az első a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció kísérleti vizsgálata, amihez az 1. és a 2. tézispont kapcsolódik. Ezeket a kutatásokat a LUNA és ERNA nemzetközi együttműködések keretében külföldi intézetekben végeztem. A második téma az asztrofizikai p-folyamathoz kapcsolódó magreakciók kísérleti vizsgálata, melyhez a 3. (protonindukált reakciók) és a 4. (alfa-indukált reakciók) tézispontok kapcsolódnak. Ezek a kísérletek kizárólag Magyarországon, az Atomki kutatási infrastruktúrájának felhasználásával zajlottak. A harmadik terület, melyhez az 5. tézispont tartozik, radioaktív izotópok felezési idejének nagypontosságú mérése. Ezek a kísérletek szintén az Atomkiban történtek.

## A kutatások előzménye

A  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció a nukleáris asztrofizika két különböző területén is kiemelt fontosságú. Az ősrobbanás után lejátszódott elemszintézis során főként a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció, illetve a  ${}^7\text{Be}$  mag ezt követő  $\beta$ -bomlása felelős a világegyetemben található  ${}^7\text{Li}$  izotóp keletkezéséért. A jelenlegi ősrobbanásmodellek erősen túlbecsülik az univerzumban megfigyelt  ${}^7\text{Li}$  gyakoriságot. Erre az úgynevezett  ${}^7\text{Li}$ -problémára még nincs elfogadott magyarázat. A  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetének ismerete fontos az ősrobbanásmodellek által szolgáltatott gyakoriság értékek megbízható meghatározásához.

A hatáskeresztmetszet esetleges hibás ismerete okozója lehet a  ${}^7\text{Li}$ -problémának.

A Naphoz hasonló fősorozatbeli csillagok hidrogénégési folyamatának egyik kulcsreakciója szintén a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció. Ennek a reakciónak (valamint a  ${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$  folyamatnak) a sebessége határozza meg, hogy az energiatermelésből milyen arányban veszik ki a részüket a pp-I illetve a pp-II és pp-III láncok. Ez utóbbi két láncból származnak azok a nagyenergiájú napneutrínók, melyekre több földi neutrínódetektor kizárólag érzékeny. A neutrínódetektorok ma már nagy pontossággal képesek mérni a különböző forrásokból származó neutrínók fluxusát. Ehhez képest a napmodellek viszonylag nagy pontatlanággal tudják csak megjósolni ezeket a fluxusokat, aminek az oka részben a résztvevő magreakciók hatáskeresztmetszetének nem kellő pontosságú ismeretében keresendő. Különösen nagy bizonytalanság terheli a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetét, így ennek a reakciónak a kísérleti vizsgálata kiemelt fontosságú.

Az asztrofizikai p-folyamat összefoglaló néven azon nehéz, protongazdag izotópok (p-izotópok) keletkezési mechanizmusa, melyek nem keletkezhetnek a neutronbefogási reakciók révén zajló s- és r- (slow és rapid) folyamatok által. Jelenlegi ismereteink szerint a p-izotópok keletkezéséhez a legnagyobb hozzájárulást nehéz magokon lejátszódó  $\gamma$ -indukált reakciók adják ( $\gamma$ -folyamat). A p-magok teljes tömegszám tartományában a  $\gamma$ -folyamat modellezéséhez óriási, több tízezer reakciót tartalmazó reakcióhálózat figyelembe vétele szükséges.

Kísérleti adatok hiányában a reakcióhálózatokban elméleti úton (Hauser-Feshbach statisztikus modell segítségével) nyert hatáskeresztmetszeteket használnak. A p-folyamatot leíró jelenlegi modellek nem képesek kellő pontossággal visszaadni a természetben megfigyelt p-izotóp gyakoriságokat. Ennek egyik oka lehet a magfizikai bemenő paraméterek, tehát például a reakciók hatáskeresztmetszeteinek nem kellően pontos ismerete.

## Célkitűzések

A jelen dolgozatban tárgyalt mérések elvégzése előtt a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetére rendelkezésre álló kísérleti adatok nem voltak kellően pontosak, általában csak az asztrofizikai energiatartománynál jóval magasabb energián álltak rendelkezésre, valamint ellentmondás mutatkozott a reakciónak két különböző módszerrel mért hatáskeresztmetszete között. Ezért a LUNA (Laboratory for Underground Nuclear Astrophysics) együttműködés célul tűzte ki a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetének mérését minden eddignél alacsonyabb energián mind aktivációs, mind on-line módszerrel.

Magasabb energiatartományban (mintegy 1,2 MeV tömegközépponti ener-

gia fölött) csak egyetlen kísérleti adatsor állt rendelkezésre a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakcióra. Ezért az elméleti modellek, melyek segítségével a hatáskeresztmetszetet az asztrofizikai energiatartományra extrapolálják, ebben a tartományban ezt az egy adatsort próbálták reprodukálni. Fontos feladat volt tehát a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció vizsgálata ebben a magasabb energiatartományban is.

Az asztrofizikai p-folyamat szempontjából fontos, töltött részecskék részvételével zajló, azaz leginkább  $(\gamma, \alpha)$  és  $(\gamma, p)$  reakciókra a kevés rendelkezésre álló kísérleti adat azt mutatja, hogy a statisztikus modellek nem képesek kellő pontossággal leírni a kísérleti értékeket. Mindenképpen fontos tehát ezeknek a reakcióknak a kísérleti vizsgálata a p-folyamat szempontjából lényeges tömegszám és energiatartományban, hogy a p-folyamat modellek egyik jelentős hibaforrását csökkenthessük.

A  $\gamma$ -indukált reakciók közvetlen kísérleti vizsgálata technikailag nehéz, ezért célszerűbb az inverz, töltöttrészecske-befogási reakciókat vizsgálni és ezek mért hatáskeresztmetszetéből származtatni a fotobomlási reakciók sebességét. Jelen dolgozat egyik témáját a p-folyamat szempontjából fontos proton- és  $\alpha$ -befogási reakciók hatáskeresztmetszeteinek mérése adja.

Az aktivációs mérések során több esetben tapasztaltuk, hogy a keletkező mag bomlásának felezési ideje az irodalomban csak nagy hibával ismert. Ennek oka, hogy még a stabilitási sávhoz közeli izotópok esetén is gyakran előfordul, hogy a felezési idő kevés (esetenként csak egyetlen) sok évtizeddel ezelőtt elvégzett mérésen alapul. Hogy kiküszöböljük a hatáskeresztmetszet mért értékeinek egy jelentős szisztematikus hibaforrását, nagy pontosságú felezésiidő-méréseket hajtottunk végre több izotóp esetén.

## Vizsgálati módszerek

A  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció alacsony energiás vizsgálatához a kísérleteket az olaszországi Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) kutatóintézetben a LUNA együttműködés által üzemeltetett 400 kV-os gyorsítóval végeztük. A gyorsító által szolgáltatott nagy intenzitású, 220 és 400 keV közötti energiájú  $\alpha$ -nyalábbal bombáztunk egy ablak nélküli, gázvisszaforgató rendszerrel üzemelő  ${}^3\text{He}$  gázcéltárgyat. A nyaláb intenzitását kalibrált kaloriméterrel mértük. A céltárgy vastagságának meghatározásához a céltárgyakamra több pontján mértük a gáz nyomását és hőmérsékletét. Egy kettős rugalmas szóráson alapuló módszert fejlesztettünk ki a lokális gázmelegedési effektus mérésére.

Az aktivációs módszerhez a reakcióban keletkező  ${}^7\text{Be}$  izotópokat összegyűj-

töttük és mértük a bomlásból származó  $\gamma$ -sugárzást. Szimulációkkal és külön erre a célra elvégzett mérésekkel ellenőriztük az esetleges  ${}^7\text{Be}$  veszteségeket, valamint a parazita reakciók által létrehozott  ${}^7\text{Be}$  aktivitás nagyságát. A  $\gamma$ -méréseket az LNGS alacsony háttérű laboratóriumában végeztük két ultra alacsony háttérrel biztosító HPGe detektor felhasználásával. A detektorok abszolút hatásfokát az Atomkiban készített és hitelesített  ${}^7\text{Be}$  kalibráló forrásokkal mértük.

Az in-beam  $\gamma$ -detektáláson alapuló méréseket egy, a gázcéltárgykamra mellé telepített HPGe detektorral végeztük. A laboratóriumi háttérsugárzás leszorítása érdekében a teljes mérési elrendezést vastag ólomárnyékolással vettük körbe. Kalibrált radioaktív forrásokkal mértük a detektor abszolút hatásfokát és szimulációk segítségével is vizsgáltuk a hatásfok helyfüggését a nyalábtengely mentén.

A nagyenergiás méréseket egy, erre a reakcióra eddig még nem alkalmazott kísérleti technikával, tömegszeparátor segítségével végeztük. A mérésekhez a németországi Ruhr-Egyetemen működő ERNA (European Recoil Separator for Nuclear Astrophysics) tömegszeparátort használtuk. A dynamitron gyorsítóból származó  $\alpha$ -nyaláb egy ablak nélküli  ${}^3\text{He}$  gázcéltárgyat bombázott és a reakcióban keletkező  ${}^7\text{Be}$  magokat a szeparátor által a primer nyalábtól megtisztítva detektáltuk. A gázcéltárgyat  $\gamma$ -detektorokkal körülvéve lehetőség volt részecske-gamma koincidenca alkalmazására, és így a különböző módszerekkel mért hatáskeresztmetszetek összehasonlítására. Az esetleges szisztematikus hibák ellenőrzése érdekében a mérések egy részében a szeparátor használata nélkül a  ${}^7\text{Be}$  magokat a gázcéltárgy után összegyűjtöttük és a felgyűlt aktivitást a Gran Sasso-i alacsony háttérű detektorral mértük.

A dolgozatban tárgyalt mintegy húsz, a p-folyamathoz vizsgálata érdekében tanulmányozott reakció hatáskeresztmetszetének mérését az Atomki Van de Graaff és ciklotron gyorsítóival végeztük. A vizsgálandó energiatartomány által megszabott módon az  $\alpha$ -indukált reakciókat a ciklotron, míg a protonindukált reakciókat főként a Van de Graaff gyorsítóval vizsgáltuk. A méréseket minden esetben aktivációs technikával végeztük.

A kísérletekhez használt céltárgyakat vákuumpárologtatással készítettük különböző hátlapokra. Több módszert is használtunk a céltárgymagok számának, illetve a céltárgyak összetételének és homogenitásának meghatározására.

A besugárzások után a céltárgyak aktivitását  $\gamma$ -mérés alapján határoztuk meg árnyékolt HPGe detektorok használatával. A detektorok abszolút hatásfokát a különböző alkalmazott geometriákban kalibrált radioaktív forrásokkal mértük meg.

A felezési idők mérését a p-folyamat vizsgálatára végzett hatáskeresztmetszet-mérésekhez hasonló kísérleti technikával végeztük. A forrásokat az Atomki ciklotron gyorsítójával állítottuk elő. A felezési időt a bomlást követő  $\gamma$ -sugárzás detektálásával mértük HPGe detektorok felhasználásával. Nagy hangsúlyt fektettünk a szisztematikus hibaforrások csökkentésére, például hitelesítő források alkalmazásával, vagy különböző forráskészítési eljárások, detektorok és adatgyűjtő rendszerek használatával.

## Új tudományos eredmények

1. A LUNA nemzetközi együttműködés keretében a Nap hidrogénégési folyamatai és az ősrobbanásos elemszintézis szempontjából fontos  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetét mértük két különböző kísérleti módszerrel [1,3,4,30].
  - 1.a. Aktivációs módszerrel a hatáskeresztmetszetet az  $E_{tkp.} = 93 - 170$  keV energiatartományban határoztuk meg öt ponton mintegy 5 %-os teljes hibával [2,5,7].
  - 1.b. In-beam  $\gamma$ -detektáláson alapuló módszerrel három ponton mértük a hatáskeresztmetszetet szintén az  $E_{tkp.} = 93 - 170$  keV energiatartományban 5 %-os teljes hibával. A mért energiákon meghatároztuk a  ${}^7\text{Be}$  mag alap- és első gerjesztett állapotára vezető direkt befogás közötti elágazási arányt. Az új elágazási arányok lényegesen pontosabbak, mint a korábbi értékek és jól egyeznek elméleti számítások jóslataival [6,8].

Méréseinket sikerült minden eddigi mérésnél alacsonyabb energiatartományban elvégezni. Az azonos energiákon elvégzett in-beam és aktivációs mérések hibahatáron belül azonos eredményt adtak, így méréseink nem támasztják alá a korábbi vizsgálatokban tapasztalt ellentmondást, ami tehát valószínűleg a korábbi mérések valamilyen rejtett szisztematikus hibájára utal.

Eredményeinkkel bebizonyítottuk, hogy az ősrobbanásos elemszintézis  ${}^7\text{Li}$  problémája nem oldható meg azon az alapon, hogy a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszete nem ismert pontosan. Sikerült ezen kívül a nagyenergiájú napneutrínók számított fluxusának magfizikai eredetű bizonytalanságát lényegesen csökkentenünk. Eredményeink segítségével, valamint a földi neutrínódetektorok által szolgáltatott nagypontosságú

adatok alapján a napmodellek minden eddiginél pontosabb ellenőrzésére nyílt lehetőség.

2. Az ERNA együttműködés keretében tömegszeparátorral megmértük a  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetét széles energiatartományban ( $E_{tkp.} = 700 - 2500 \text{ keV}$ ) több, mint 30 ponton. A méréseket kiegészítettük in-beam  $\gamma$ -detektáláson alapuló és aktivációs mérésekkel is, amik eredménye jó egyezést mutatott a tömegszeparátoros mérésekével. A vizsgált energiatartományban jelentős eltérést tapasztaltunk az egyetlen korábbi mérés eredményeihez képest mind a hatáskeresztmetszet abszolút értékét mind annak energiafüggését illetően. Ez az eltérés komoly hatással van a hatáskeresztmetszet asztrofizikai energiatartományra való extrapolációjára és ezért eredményeink további intenzív kísérleti és elméleti kutatómunkát váltottak ki [9,29].
3. Számos izotóp protonbefogási hatáskeresztmetszetét mértük meg közvetlenül a p-folyamat szempontjából fontos alacsony energiatartományban, ahol korábban egyik izotóp esetén sem állt rendelkezésre kísérleti adat. A mért hatáskeresztmetszeteket összehasonlítottuk statisztikusmodell-számítások eredményeivel és kiválasztottuk azokat a bemenő paramétereket, melyekkel a modellek a kísérleti eredmények legjobb leírását adják. A mérési adatainkból minden esetben asztrofizikai reakciósebességeket származtattunk. Eredményeink hatására a p-folyamat modellszámítások főként az alacsony tömegszám-tartományban megbízhatóbbá váltak.
  - 3.a. A stroncium három stabil izotópjának ( ${}^{84}\text{Sr}$ ,  ${}^{86}\text{Sr}$ ,  ${}^{87}\text{Sr}$ ) protonbefogási hatáskeresztmetszetét határoztuk meg mintegy 15 ponton az  $E_{tkp.} = 1,5 - 3 \text{ MeV}$  energiatartományban. A  ${}^{84}\text{Sr}$  és  ${}^{86}\text{Sr}$  magok esetén parciális hatáskeresztmetszeteket adtunk meg a végmag alap- illetve izomer állapotára. A statisztikus modellekkel való összehasonlítás azt mutatja, hogy a Sr izotóplánc mentén a neutrons szám növekedésével romlik a modellek és a mérések eredményei közötti egyezés [10,11].
  - 3.b. A szelén két protongazdag izotópján ( ${}^{74}\text{Se}$ ,  ${}^{76}\text{Se}$ ) ( $p, \gamma$ ), míg a neutronban leggazdagabb  ${}^{82}\text{Se}$  stabil izotópján ( $p, n$ ) reakció-hatáskeresztmetszetet határoztunk meg 14 ponton az  $E_{tkp.} = 1,5 - 3,5 \text{ MeV}$  energiatartományban. Megvizsgáltuk, mely optikai potenciál és nívósűrűség alkalmazása esetén írják le a modellek legjobban a kísérleti adatokat és ezeknek a paramétereknek az alkalmazását javasoltuk a

reakciósebesség-számításokhoz. Rámutattunk, hogy deformált magok esetén a közelítő gömbszimmetrikus potenciál alkalmazása bizonyos izotópok esetén nem kielégítő [12,13].

- 3.c. A kadmium két p-izotópjának, a  $^{106}\text{Cd}$  és  $^{108}\text{Cd}$  magoknak a protonbefogási hatáskeresztmetszetét határoztuk meg 15 ponton az  $E_{tkp.} = 2,4 - 4,7$  MeV energiatartományban. Azt találtuk, hogy e két reakció esetén a sztenderd bemenő adatokat használva a statisztikus modellek megfelelően reprodukálják a kísérleti adatokat, s így az ezekkel származtatott reakciósebességek jól alkalmazhatók a p-folyamat modellekben [16,17].
4. Több izotópon mértük  $\alpha$ -indukált reakciók hatáskeresztmetszetét. A sugárzásos befogáson kívül az  $(\alpha, n)$  és/vagy  $(\alpha, p)$  reakciócsatornákat is vizsgáltuk. A reakciókat első ízben tanulmányoztuk az adott energiatartományban. A mért hatáskeresztmetszeteket e reakciók esetén is összehasonlítottuk statisztikusmodell-számítások eredményeivel valamint a mérési adatainkból asztrofizikai reakciósebességeket származtattunk. Szisztematikus vizsgálatainkból kitűnik, hogy p-folyamat modellekben használt elméleti  $(\gamma, \alpha)$  hatáskeresztmetszetek erősen túlbecsültek, s így a p-folyamatban a  $(\gamma, \alpha)$  reakciók szerepe kisebb, illetve az elágazási pontok általában alacsonyabb neutronszámánál találhatóak. A különböző reakciócsatornák vizsgálatából megállapítottuk, hogy statisztikus modell által adott túl nagy hatáskeresztmetszet oka az alacsony energiás  $\alpha$ -mag optikai potenciál nem kellően pontos leírásából adódik. Ezzel rámutattunk az alacsony energiás  $\alpha$ -mag optikai potenciál további kísérleti és elméleti vizsgálatának szükségességére.
- 4.a. A  $^{64}\text{Zn}$  magon  $\alpha$ -indukált reakciók hatáskeresztmetszetének mérésével elsőként sikerült igazolni, hogy alacsony energiás  $\alpha$ -indukált reakciók esetén a rugalmas szórásból és a mért reakciócsatornák alapján számított teljes hatáskeresztmetszet megegyezik [22,23].
- 4.b. A  $^{106}\text{Cd}$  mag  $\alpha$ -befogási hatáskeresztmetszetét határoztuk meg tíz ponton  $E_{tkp.} = 8,1$  és  $12,1$  MeV között. A neutronküszöb alatt az  $(\alpha, p)$ , míg fölötté az  $(\alpha, n)$  reakció hatáskeresztmetszetét is mértük. Eredményeink alapján az Sn izotóplánc esetén a p-folyamat új elágazási pontját adtuk meg, mely jelentősen befolyásolja a számított izotópgyakoriságokat [14,15,28].
- 4.c. A p-izotópok között ritkán előforduló páratlan rendszámú  $^{113}\text{In}$  magon mértünk  $(\alpha, \gamma)$  és  $(\alpha, n)$  hatáskeresztmetszeteket 13 illetve 10

ponton az  $E_{tkp.} = 8,7 - 13,6$  MeV energiatartományban. Az  $(\alpha, n)$  reakció esetén parciális hatáskeresztmetszeteket határoztunk meg a végmag alap- illetve izomer állapotára. Eredményeink azt mutatják, hogy az optikai potenciál energiafüggésének tapasztalt módosulása miatt a p-folyamat modellekben használt reakciósebességek túl nagyok [18,31,32].

- 4.d. A  $^{130}\text{Ba}(\alpha, \gamma)^{134}\text{Ce}$ ,  $^{130}\text{Ba}(\alpha, n)^{133}\text{Ce}$  és  $^{132}\text{Ba}(\alpha, n)^{135}\text{Ce}$  reakciók hatáskeresztmetszetét tíz ponton mértük az  $E_{tkp.} = 11,6 - 16$  MeV energiatartományban. Megállapítottuk többek között, hogy a  $^{130}\text{Ba}$  p-izotóp keletkezéséhez nem járul hozzá jelentősen a Ce izotóplánc [21,33].
- 4.e. A  $^{151}\text{Eu}$  magon  $(\alpha, \gamma)$  és  $(\alpha, n)$  reakciók hatáskeresztmetszetét mértük 11 ponton az  $E_{tkp.} = 12,2 - 17$  MeV energiatartományban. Az  $(\alpha, n)$  reakció esetén parciális hatáskeresztmetszeteket határoztunk meg a végmag alap- illetve mindkét izomer állapotára. Eredményeink alapján a sztenderd reakciósebesség egy kettes faktorral történő csökkentését javasoltuk [19,20].
5. Nagy pontossággal meghatároztuk a következő magok felezési idejét:  $^{66}\text{Ga}$ ,  $^{109}\text{In}$ ,  $^{110}\text{Sn}$ ,  $^{133}\text{Ce}^m$  és  $^{154}\text{Tb}^{m1}$ .
  - 5.a. A detektorok nagyenergiás hatásfokmérésében is fontos szerepet játszó  $^{66}\text{Ga}$  izotóp mért felezési ideje  $9,312 \pm 0,032$  h. A  $^{66}\text{Ga}$  mag felezési idejére mért két legutóbbi, egymásnak súlyosan ellentmondó érték közül egyiket a mi mérésünk alátámasztja, míg a másikkal ellentmondásban van [27].
  - 5.b. Az  $^{109}\text{In}$  izotóp mért felezési ideje  $4,167 \pm 0,018$  h. Ez az érték mintegy ötször pontosabb, mint az irodalmi adat [24].
  - 5.c. Az  $^{110}\text{Sn}$  izotóp mért felezési ideje  $4,173 \pm 0,023$  h. Ez az érték mintegy négyszer pontosabb, mint az irodalmi adat [24].
  - 5.d. A  $^{133}\text{Ce}$  izotóp izomer állapotának mért felezési ideje  $5,326 \pm 0,011$  h. Ez az érték majdnem 10 %-kal nagyobb és negyvenszer pontosabb, mint az egyetlen mérés eredményén alapuló irodalmi adat [26].
  - 5.e. A  $^{154}\text{Tb}$  izotóp első izomer állapotának mért felezési ideje  $9,994 \pm 0,039$  h. Ez az érték egy nagyságrenddel pontosabb, mint az egymásnak jelentősen ellentmondó kísérleti eredményeken alapuló irodalmi adat [25].

## A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

### Referált közlemények<sup>1</sup>

#### Az 1. és 2. tézispont témakörében

1. M. Marta, F. Confortola, D. Bemmerer, C. Boiano, R. Bonetti, C. Brogini, M. Casanova, P. Corvisiero, H. Costantini, Z. Elekes, A. Formicola, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, **Gy. Gyürky**, G. Imbriani, M. Junker, A. Lemut, B. Limata, R. Menegazzo, P. Prati, V. Roca, C. Rolfs, M. Romano, C. Rossi Alvarez, E. Somorjai, F. Strieder, F. Terrasi, H.P. Trautvetter,  
*Study of beam heating effect in a gas target through Rutherford scattering.*  
Nucl. Instr. Meth. **A 569**, (2006) 727.
2. D. Bemmerer, F. Confortola, H. Costantini, A. Formicola, **Gy. Gyürky**, R. Bonetti, C. Brogini, P. Corvisiero, Z. Elekes, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Imbriani, M. Junker, M. Laubenstein, A. Lemut, B. Limata, V. Lozza, M. Marta, R. Menegazzo, P. Prati, V. Roca, C. Rolfs, C. Rossi Alvarez, E. Somorjai, O. Straniero, F. Strieder, F. Terrasi, H. P. Trautvetter  
*Activation measurement of the  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  cross section at low energy.*  
Phys. Rev. Lett. **97**, (2006) 122502., arxiv:nucl-ex/0609013
3. F. Confortola for the LUNA collaboration,  
*The  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  underground experiment at LUNA.*  
J. Phys.: Conf. Ser. **39**, (2006) 359c.
4. H. Costantini, D. Bemmerer, P. Bezzon, R. Bonetti, C. Brogini, M.L. Casanova, F. Confortola, P. Corvisiero, J. Cruz, Z. Elekes, A. Formicola, Zs. Fülöp, G. Gervino, C. Gustavino, A. Guglielmetti, **Gy. Gyürky**, G. Imbriani, A.P. Jesus, M. Junker, A. Lemut, M. Marta, R. Menegazzo, P. Prati, E. Roca, C. Rolfs, M. Romano, C. Rossi Alvarez, F. Schümann, E. Somorjai, O. Straniero, F. Strieder, F. Terrasi, H.P. Trautvetter,  
*Towards a high-precision measurement of the  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  cross section*

---

<sup>1</sup> Azokat a közleményeket, melyek konferenciához kapcsolódnak, az oldalszám utáni c betű jelöli.

at LUNA.

Eur. Phys. J. **A 27**, s01, (2006) 177c.

5. **Gy. Gyürky**, F. Confortola, H. Costantini, A. Formicola, D. Bemmerer, R. Bonetti, C. Brogini, P. Corvisiero, Z. Elekes, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Imbriani, M. Junker, M. Laubenstein, A. Lemut, B. Limata, V. Lozza, M. Marta, R. Menegazzo, P. Prati, V. Roca, C. Rolfs, C. Rossi Alvarez, E. Somorjai, O. Straniero, F. Strieder, F. Terrasi, H.P. Trautvetter,  
 *$^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  cross section at low energies.*  
Phys. Rev. **C 75**, (2007) 035805., arXiv:nucl-ex/0702003
6. F. Confortola, D. Bemmerer, H. Costantini, A. Formicola, **Gy. Gyürky**, P. Bezzon, R. Bonetti, C. Brogini, P. Corvisiero, Z. Elekes, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Imbriani, M. Junker, M. Laubenstein, A. Lemut, B. Limata, V. Lozza, M. Marta, R. Menegazzo, P. Prati, V. Roca, C. Rolfs, C. Rossi Alvarez, E. Somorjai, O. Straniero, F. Strieder, F. Terrasi, H. P. Trautvetter,  
*Astrophysical  $S$  factor of the  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  reaction measured at low energy via detection of prompt and delayed  $\gamma$  rays.*  
Phys. Rev. **C 75**, (2007) 065803., arXiv:0705.2151
7. **Gy. Gyürky**, D. Bemmerer, F. Confortola, H. Costantini, A. Formicola, R. Bonetti, C. Brogini, P. Corvisiero, Z. Elekes, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Imbriani, M. Junker, M. Laubenstein, A. Lemut, B. Limata, V. Lozza, M. Marta, R. Menegazzo, P. Prati, V. Roca, C. Rolfs, C. Rossi Alvarez, E. Somorjai, O. Straniero, F. Strieder, F. Terrasi, H.P. Trautvetter,  
*Comparison of the LUNA  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  activation results with earlier measurements and model calculations.*  
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **35**, (2008) 014002c., arXiv:0707.4548
8. H. Costantini, D. Bemmerer, F. Confortola, A. Formicola, **Gy. Gyürky**, P. Bezzon, R. Bonetti, C. Brogini, P. Corvisiero, Z. Elekes, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, C. Gustavino, G. Imbriani, M. Junker, M. Laubenstein, A. Lemut, B. Limata, V. Lozza, M. Marta, R. Menegazzo, P. Prati, V. Roca, C. Rolfs, C. Rossi Alvarez, E. Somorjai, O. Straniero, F. Strieder, F. Terrasi, H.P. Trautvetter,  
*The  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$   $S$ -factor at solar energies: The prompt  $\gamma$  experiment at LUNA.*  
Nucl. Phys. **A 814**, (2008) 144., arXiv:0809.5269

9. A. Di Leva, L. Gialanella, R. Kunz, D. Rogalla, D. Schürmann, F. Strieder, M. De Cesare, N. De Cesare, A. D'Onofrio, Z. Fülöp, **Gy. Gyürky**, G. Imbriani, G. Mangano, A. Ordine, V. Roca, C. Rolfs, M. Romano, E. Somorjai, F. Terrasi,  
*Stellar and Primordial Nucleosynthesis of  ${}^7\text{Be}$ : Measurement of  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$*   
Phys. Rev. Lett. **102**, (2009) 232502.

### A 3. és 4. tézispont témakörében

10. **Gy. Gyürky**, E. Somorjai, Zs. Fülöp, S. Harissopulos, P. Demetriou, T. Rauscher,  
*Proton capture cross section of Sr isotopes and their importance for nucleosynthesis of proton-rich nuclides.*  
Phys. Rev. **C 64**, (2001) 065803., arXiv:nucl-ex/0109001
11. **Gy. Gyürky**, E. Somorjai, T. Rauscher, S. Harissopulos,  
*Proton capture cross section of Sr isotopes.*  
Nucl. Phys. **A 688**, (2001) 90c.
12. **Gy. Gyürky**, Zs. Fülöp, E. Somorjai, M. Kokkoris, S. Galanopoulos, P. Demetriou, S. Harissopulos, T. Rauscher, S. Goriely,  
*Proton induced reaction cross section measurements on Se isotopes for the astrophysical p process.*  
Phys. Rev. **C 68**, (2003) 055803., arXiv:nucl-ex/0310006
13. **Gy. Gyürky**, Zs. Fülöp, E. Somorjai, Z. Elekes, M. Kokkoris, S. Galanopoulos, P. Demetriou, S. Harissopulos, S. Goriely and T. Rauscher,  
*Se( $p, \gamma$ ) cross section measurements for p-process studies.*  
Nucl. Phys. **A 718**, (2003) 599c.
14. **Gy. Gyürky**, Zs. Fülöp, G. Kiss, Z. Máté, E. Somorjai, J. Görres, A. Palumbo, M. Wiescher, D. Galaviz, A. Kretschmer, K. Sonnabend, A. Zilges, T. Rauscher,  
*A comprehensive study of the  ${}^{106}\text{Cd}(\alpha, \gamma){}^{110}\text{Sn}$  reaction at energies relevant to the p-process.*  
Nucl. Phys. **A 758**, (2005) 517c.
15. **Gy. Gyürky**, G.G. Kiss, Z. Elekes, Zs. Fülöp, E. Somorjai, A. Palumbo, J. Görres, H.Y. Lee, W. Rapp, M. Wiescher, N. Özkan, R.T. Güray, G. Efe, T. Rauscher,

*$\alpha$ -induced cross sections of  $^{106}\text{Cd}$  for the astrophysical  $p$  process.*  
Phys. Rev. C **74**, (2006) 025805., arXiv:nucl-ex/0605034

16. **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.*  
Eur. Phys. J. A **27**, s01, (2006) 141.
17. **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.*  
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **34** (2007) 817., arXiv:nucl-ex/0703045
18. C. Yalcin, R.T. Güray, N. Özkan, S. Kutlu, **Gy. Gyürky**, J. Farkas,  
G.G. Kiss, Zs. Fülöp, A. Simon, E. Somorjai, T. Rauscher,  
*Odd  $p$  isotope  $^{113}\text{In}$ : Measurement of  $\alpha$ -induced reactions.*  
Phys. Rev. C **79**, (2009) 065801., arXiv:0906.4041
19. **Gy. Gyürky**, Z. Elekes, J. Farkas, Zs. Fülöp, Z. Halász, G.G. Kiss, E.  
Somorjai, T. Szücs, R.T. Güray, N. Özkan, C. Yalcin, T. Rauscher,  
*Alpha-induced reaction cross section measurements on  $^{151}\text{Eu}$  for the astrophysical  $\gamma$ -process.*  
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **37** (2010) 115201., arXiv:1008.3807
20. **Gy. Gyürky**, Z. Elekes, J. Farkas, Zs. Fülöp, G.G. Kiss, E. Somorjai,  
T. Szücs, R.T. Güray, N. Özkan, C. Yalcin, T. Rauscher,  
*Alpha-induced reactions for the astrophysical  $p$ -process: the case of  $^{151}\text{Eu}$ .*  
J. Phys.: Conf. Ser. **202**, (2010) 012004., arXiv:0910.3496
21. Z. Halász, **Gy. Gyürky**, J. Farkas, Zs. Fülöp, T. Szücs, E. Somorjai,  
T. Rauscher,  
*Investigation of  $\alpha$  induced reactions on  $^{130}\text{Ba}$  and  $^{132}\text{Ba}$  and their importance for the synthesis of heavy  $p$  nuclei*  
Phys. Rev. C **85** (2012) 025804., arXiv:1202.1766
22. **Gy. Gyürky**, J. Farkas, Z. Halász, Zs. Fülöp, E. Somorjai, T. Szücs,  
P. Mohr, A. Wallner,  
*Experimental study of  $\alpha$ -induced reactions on  $^{64}\text{Zn}$  for the astrophysical  $\gamma$ -process*  
J. Phys.: Conf. Ser. **337**, (2012) 012009., arXiv:1111.0549
23. **Gy. Gyürky**, P. Mohr, Zs. Fülöp, Z. Halász, G.G. Kiss, T. Szücs, E.  
Somorjai,

---

*Relation between total cross sections from elastic scattering and  $\alpha$ -induced reactions: the example of  $^{64}\text{Zn}$*

Phys. Rev. C Rapid Comm., megjelenés alatt

#### Az 5. tézispont témakörében

24. **Gy. Gyürky**, Z. Elekes, Zs. Fülöp, G.G. Kiss, E. Somorjai, A. Palumbo, M. Wiescher,  
*Precise half-life measurement of  $^{110}\text{Sn}$  and  $^{109}\text{In}$  isotopes.*  
Phys. Rev. **C 71**, (2005) 057302., arXiv:nucl-ex/0503012
25. **Gy. Gyürky**, G. Rastrepina, Z. Elekes, J. Farkas, Zs. Fülöp, G.G. Kiss, E. Somorjai, T. Szücs,  
*Precise half-life measurement of the 10 h isomer in  $^{154}\text{Tb}$ .*  
Nucl. Phys. **A 828** (2009) 1., arXiv:0906.3618
26. J. Farkas, **Gy. Gyürky**, Z. Halász, T. Szücs, Zs. Fülöp, E. Somorjai,  
*Half-life measurement of  $^{133\text{m}}\text{Ce}$  with  $\gamma$ -spectrometry*  
Eur. Phys. J. **A 47** (2011) 7.
27. **Gy. Gyürky**, J. Farkas, Z. Halász, T. Szücs,  
*Half-life measurement of  $^{66}\text{Ga}$  with  $\gamma$ -spectroscopy.*  
Applied Radiation and Isotopes **70** (2012) 278., arXiv:1108.1686

#### Nem referált konferenciakiadványok

28. **Gy. Gyürky**, Z. Elekes, G.G. Kiss, Zs. Fülöp, E. Somorjai, Z. Máté, J. Görres, A. Palumbo, M. Wiescher, H.Y. Lee, N. Özkan, R.T. Güray, G. Efe, D. Galaviz, A. Kretschmer, K. Sonnabend, A. Zilges, T. Rauscher,  
*Radiative capture reactions and  $\alpha$ -elastic scattering on  $^{106}\text{Cd}$  for the astrophysical  $p$ -process*  
AIP Conference Proceedings **819**, (2006) 201.
29. A. di Leva, L. Gialanella, D. Schürmann, F. Strieder, D. Rogalla, M. De Cesare, N. De Cesare, A. D'Onofrio, Zs. Fülöp, **Gy. Gyürky**, G. Imbriani, R. Kunz, C. Lubritto, A. Ordine, V. Roca, C. Rolfs, M. Romano, F. Schümann, E. Somorjai, F. Terrasi, H.P. Trautvetter,  
*Measurement of  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  with ERNA recoil separator*  
AIP Conference Proceedings **831**, (2006) 378.

30. P. Prati, D. Bemmerer, R. Bonetti, C. Broggini, P. Corvisiero, F. Confortola, E. Conti, H. Costantini, Z. Elekes, A. Formicola, Zs. Fülöp, G. Gervino, A. Guglielmetti, **Gy. Gyürky**, C. Gustavino, G. Imbriani, M. Junker, A. Lemut, B. Limata, M. Marta, C. Mazzocchi, R. Menegazzo, V. Roca, C. Rolfs, C. Rossi Alvarez, E. Somojai, O. Straniero, F. Strieder, F. Terrasi, H.P Trautvetter,  
*Astrophysical S-factor of the  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  reaction measured at low energy via prompt and delayed gamma emission*  
23rd International Nuclear Physics Conference. INPC 2007. Tokyo, Japan, 3-8 June, 2007. Proceedings. Szerk.: S. Nagamiya *et al.* Amsterdam, Elsevier 2 (2008) 543.
31. R.T. Güray, C. Yalcin, N. Özkan, S. Kutlu, **Gy. Gyürky**, J. Farkas, G.G. Kiss, Zs. Fülöp, E. Somorjai,  
*Measurements of alpha induced reaction cross sections on  $^{113}\text{In}$  relevant to the astrophysical p-process*  
Proceeding of Science (2009) PoS(NIC X) 092.
32. C. Yalcin, R.T. Güray, N. Özkan, S. Kutlu, **Gy. Gyürky**, J. Farkas, G.G. Kiss, Zs. Fülöp, T. Rauscher, E. Somorjai,  
*Astrophysical S-factor for  $\alpha$ -capture of  $^{113}\text{In}$  in the p-process energy range.*  
AIP Conference Proceedings **1090** (2009) 931.
33. **Gy. Gyürky**, Z. Halász, J. Farkas, Zs. Fülöp, E. Somorjai, T. Szücs,  
*Target characterization for the  $^{130}\text{Ba}(\alpha, \gamma)^{134}\text{Ce}$   $\gamma$ -process experiment.*  
Proceeding of Science (2011) PoS(NIC XI) 238., arXiv:1103.0369