

## „A ritka nemesgáz izotópokon lejátszódó nukleáris asztrofizikai reakciók vizsgálata” c. OTKA (T 49245) szakmai zárójelentése (részletes).

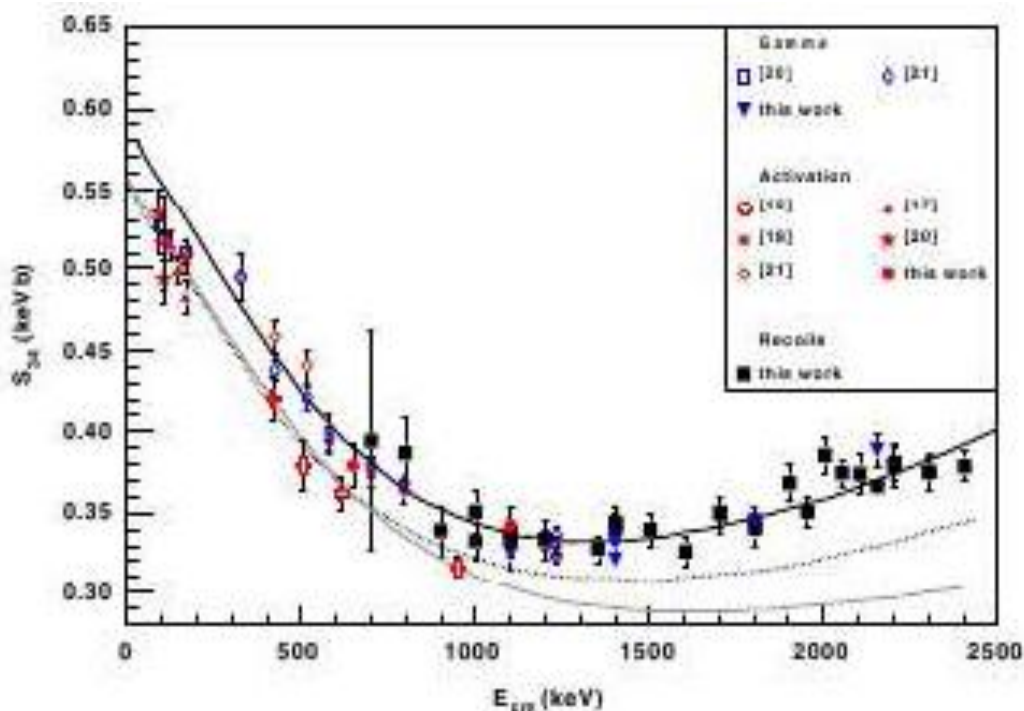
A Nap-neutrínó fluxus elméleti számításában a legnagyobb magfizikai bizonytalanságot a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszete képviseli, amit az ún. neutrínó probléma (neutrínó puzzle) egy lehetséges megoldásának hittek. Az utóbbi évek sikeres kísérletei (SNO, Kamland) azonban bizonyították a neutrínó oszcillációk létezését és magyarázatot adtak a neutrínó detektorokkal tapasztalt Nap-neutrínó hiányra. Ezzel egy új korszak vette kezdetét, nevezetesen a neutrínó-spektroszkópia, ahol a Nap-neutrínó fluxus a részecske fizika standard modelljének ellenőrzésére szolgálhat. Továbbá, a különböző neutrínó fluxusok pontos ismerete hozzásegíthet a Nap fizikai és kémiai tulajdonságainak megértéséhez. Ehhez azonban szükség van a megfelelő magreakciók hatáskeresztmetszetének megfelelő pontosságú ismeretére. Amennyiben a hatáskeresztmetszet, a neutrínó megfigyelések, valamint az oszcilláció paraméterek hibái jelentősen csökkenthetők, a CNO-ciklus és a pp-lánc neutrínói lehetővé tennék a Nap magjában az ősröbbanásból származó szén és nitrogén mennyiségének meghatározását. Ehhez a jelenleg mért  ${}^7\text{Be}$ -neutrínók fluxusát meghatározó  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakció  $\sigma(E)$  hatáskeresztmetszetét legalább 3% pontossággal kell ismerni.

Ez a reakció ugyanakkor szintén meghatározó szerepet játszik a „Nagy Bumm” során keletkező atommagok (BBN) gyakoriságában. A csillagászati megfigyelések és a kozmológiai modellek eredményei jó egyezést mutatnak a D,  ${}^3\text{He}$  és  ${}^4\text{He}$  magok gyakoriságaira, de a  ${}^7\text{Li}$  gyakoriságára a modellek jóval nagyobb értéket (2-3-szoros) jósolnak. Egy lehetséges megoldásnak a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakció  $\sigma(E)$  hatáskeresztmetszetének pontos ismerete kínálkozott. A BBN-ben a reakció végmagjából elektron-befogással keletkező  ${}^7\text{Li}$  gyorsan megsemmisül a  ${}^7\text{Li}(p,\alpha)\alpha$  reakció nagy hatáskeresztmetszete miatt. Ugyanakkor, a  ${}^7\text{Be}$  bomlásának felezési ideje elegendően hosszú ahhoz, hogy megmaradjon addig, amíg a proton-sűrűség és energia elegendően alacsony lesz, a megsemmisítő reakció befagy. Tehát a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetének pontos ismerete a  ${}^7\text{Li}$  probléma egyik lehetséges megoldásaként is szolgálhat.

A fentiek miatt az elmúlt évek során számos erőfeszítés történt annak érdekében, hogy különböző mérési módszerekkel a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetét [ill. a vele arányos  $S(E)$ -t] pontosan meghatározzák a BBN-nek és a hidrogén-égésnek megfelelő energiákon. (Az  $S$ -faktor a hatáskeresztmetszettel arányos asztrofizikában szokásosan használt mennyiség). A mérések lefedték a BBN energiatartományát ( $E_{\text{cm}} \approx 180 - 400$  keV), ugyanakkor a Napban a hidrogén-égés Gamow-energia tartományáig ( $E_0 = 22$  keV) nem sikerült lemenni és extrapolációra volt szükség ( $E_{\text{cm}}$  a tömegközépponti energia). Az extrapolációhoz modellek használatára van szükség, ezért a pontosság érdekében törekedni kell a méréseket minél alacsonyabb energiákon elvégezni, csökkentve így módon az extrapoláció okozta bizonytalanságot. Ennek határt szab az energiával csökkenő, egyre kisebb  $\sigma(E)$  hatáskeresztmetszet. A különböző mérések eredményei a  $\sigma(E)$  energiatartományát illetően elég jól egyeznek, de az abszolút értékekben jelentősen eltérnek.

Méréseinket 3 független módszerrel végeztük: prompt- $\gamma$ , aktivációs és végmag-visszalökés („recoil separator”) módszerekkel. Mindhárom módszerben ablak nélküli gáz-céltárgyak használatára került sor. A prompt- $\gamma$  és az aktivációs mérések az alacsony háttérű földalatti laboratórium (Gran Sasso, Olaszország) 400 keV-es, nagyáramú gyorsítójával történtek a Luna nemzetközi projekt keretében. A végmag aktivitásának meghatározása off-line méréssel történt. Hosszú és pontos

próbamérésekre volt szükség a lehetséges szennyező reakciók azonosításához és a meglökött végmagot befogadó megfelelő anyag (catcher) kiválasztásához annak érdekében, hogy minél kisebb hatáskeresztmetszeteket lehessen mérni. A prompt- $\gamma$  mérésekhez nagy feloldású Ge(Li) detektorok szolgálták. Az aktivációs módszerrel (nagy tisztaságú rézbe löködött  $^7\text{Be}$  végmag aktivitásának mérése) sikerült az eddigi legalacsonyabb energiánál ( $E_{\text{cm}} = 93 \text{ keV}$ ) megmérni a hatáskeresztmetszetet. Ez az energia már közel van a Nap Gamow-energia tartományához. A bochumi Ruhr Egyetem (Németország) ERNA (European Recoil separator for Nuclear Astrophysics) berendezése szolgált a 3. módszer, a meglökött  $^7\text{Be}$  végmagok közvetlen detektálására. Ebben az esetben is először pontos próbamérésekre került sor annak bizonyítására, hogy a rendkívül kis számú meglökött  $^7\text{Be}$  mag mindegyike energiától és töltésállapottól függően eléri a detektort ( $\cong 100\%$  acceptance). A mérések energiatarományja  $E_{\text{cm}} = 700 - 3200 \text{ keV}$  volt. A biztosabb azonosítás érdekében néhány energiánál a meglökött magokkal koincidenzában a reakcióból kilépő  $\gamma$ -sugárzás mérésére is sor került. A szeparátortól függetlenül, de az ERNA gáz céltárggyal végzett aktivációs kísérletre is sor került. A céltárgy mögött, de a szeparátor előtt egy réz catcher-el összegyűjtött  $^7\text{Be}$  magok aktivitás mérése a besugárzást követően a fent említett földalatti laboratóriumban történt. A 3 módszerrel kapott eredményeinket néhány, a közelmúltban kapott eredménnyel együtt az **1. ábra** foglalja össze. (Az ábrában a referencia számok a Phys. Rev. Letters **102**, 232502 (2009) közlemény számozásának felelnek meg. A „this work” jelölés az ERNA, a [20,17,18] referenciák a fent leírt méréseinkre utalnak.)



**1. ábra.** A  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  reakció  $S(E)$  értékére vonatkozó újabb mérési adatok (ld. még szöveges rész). A görbék az adatokhoz illesztett egyes modell-számolások eredményei.

A prompt- $\gamma$ , az aktivációs és a végmag-visszalökés méréseink eredményei jól egyeznek egymással, az  $S$ -faktor értékek átlagértékére kapott  $S(0) = 0,57 \pm 0,04$

kev.b jobb, mint a korábban elfogadott érték, hibája lényegesen kisebb, de még mindig nem éri el a Nap-modellek igényelte pontosságot. A kisebb hiba érték ugyanakkor nagyon fontos, mert jelentősen csökkenti a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakcióból származó  ${}^8\text{B}$  ( ${}^7\text{Be}+p$ ) és  ${}^7\text{Be}$  neutrínó-fluxusok bizonytalanságát. Ennek, valamint a  ${}^8\text{B}$  neutrínó-fluxus pontos mérésének köszönhetően a Borexino és SNO kísérletekkel meg lehet határozni a Nap magjában a C és N gyakoriságokat. A Nap belső és felszíni összetételének összehasonlításával pedig a standard Nap-modell alapvető feltevései válnak ellenőrizhetővé.

Az a feltételezés viszont, hogy a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakció pontosabb ismerete megoldhatja a BBN  ${}^7\text{Li}$  problémáját, nem állja meg a helyét. A kapott új  $S(0)$  értékkel végzett BBN standard modell számolásokból a  ${}^7\text{Li}$  gyakoriságára kapott  ${}^7\text{Li}/\text{H} = (5,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-10}$  érték több mint 3-szorosa a megfigyeltnek.

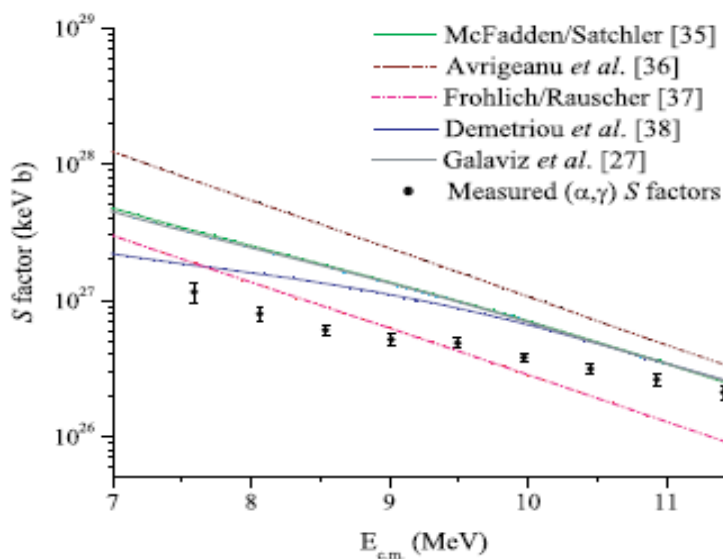
A hidrogén-égés  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakciója mellett más, a folyamat szempontjából fontos reakciókat is vizsgáltunk melyek főleg az égés CNO ciklusában játszanak főszerepet. Ezen kísérletekre is a Luna projekt keretében a Gran Sasso-i földalatti gyorsító mellett került sor. A  ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$  befogási reakció a CNO ciklus leglassúbb folyamata, más szóval meghatározza a teljes ciklus sebességét. Asztrofizikai jelentősége ezen kívül az, hogy a reakció sebességének pontos ismerete erősen befolyásolja az Univerzum legöregebb képződményei, a gömbhalmazok korának meghatározását. Nem utolsó sorban, a reakció neutrínókat szolgáltat a Nap neutrínó spektrumához. A reakció hatáskeresztmetszetének meghatározása két mérésben történt, az egyik szilárd, a másik ablak nélküli gáz-céltárgyak használatával. Szilárd céltárgyon végzett mérésekhez a jó feloldású Ge(Li) detektor szolgált, biztosítva az egyes  $\gamma$ -átmenetek pontos azonosítását. A mérés során az elért legalacsonyabb energia  $E_p = 140$  keV volt. Gáz céltárgyon végzett mérésekhez BGO-gyűrűdetektor szolgált. Energia feloldása a Ge-detektor feloldásánál rosszabb ugyan, de lényegesen nagyobb határfoka tette lehetővé, hogy a reakció hatáskeresztmetszetét az eddigi legalacsonyabb energiánál sikerült megmérni. A vizsgált energia tartomány  $E_p = 80 - 250$  keV volt, amely jócskán belenyúlik a reakció Gamow-ablakába (30–110 keV 20–130 MK hőmérsékletnél), így az extrapoláció (R-mátrix illesztés) tartománya minimálisra csökkent. Ennek eléréséhez alacsony energiáknál hosszú mérésekre volt szükség, ennek jellemzésére álljon itt egy adat, nevezetesen, 80 keV-nél ( $E_{cm} = 70$  keV) a reakcióból származó  $\gamma$ -beütések száma a detektorban 11/nap volt [ $\sigma(E) = 0.24$  picobarn!], a közel  $4\pi$  detektor-térszög ellenére. A kapott  $S(0)$  és hibája lényegesen alacsonyabb a korábbi mérések értékeinél. Az új  $S$ -faktort használva a CNO ciklusban a reakciósebességek 40%-al alacsonyabbak (és lényegesen pontosabbak), mint a korábban elfogadott értékek. Az új reakciósebességeket alkalmazva megállapították, hogy a gömbhalmazok ( $\approx$  Univerzum) mintegy 1 milliárd évvel idősebbek a korábban becsülnél. Ezen reakció pontossága is – a Nap-neutrínókhöz adott járuléka révén – hozzájárul csillagunk belső struktúrájának pontosabb ismeretéhez, hasonlóan a  ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$  reakciónál leírtakhoz.

A másik vizsgált reakció, a  ${}^{25}\text{Mg}(p,\gamma){}^{26}\text{Al}$ , sebességének pontos meghatározása a világűrben nagy mennyiségben jelenlevő és a műholdakkal feltérképezett  ${}^{26}\text{Al}$  értelmezése és magyarázata szempontjából lényeges. Az  ${}^{26}\text{Al}$  mag főként a  ${}^{25}\text{Mg}(p,\gamma){}^{26}\text{Al}$  befogási reakcióban keletkezik a hidrogén égés Mg-Al alciklusában. Ezen kívül a  ${}^{25}\text{Mg}(p,\gamma){}^{26}\text{Al}$  reakció számos, különböző hőmérsékletű asztrofizikai helyszínen is lejátszódhat (nehéz csillagokban [WR-csillagok], könnyebbekben [AGB], nova robbanásokban, szupernóvákban), de legvalószínűbb helye a WR (Wolf-Rayet) csillag. Ennek tisztázásához is közelebb visz a hőmérséklet-függő

reakciósebesség pontosabb ismerete. A mérést az teszi nehezzé, hogy ez a képződési sebesség elsősorban a jelenlevő alacsony energiájú rezonanciáktól, ezek járulékától függ, melyek erőssége nagyon kicsi. Méréseink a Luna projekt keretében befejeződtek, a kiértékelés folyamatban van. Előzetes eredményeink egyeznek a korábbi mérések eredményeivel, de nagyobb pontosságúak. Ez azt jelenti, hogy az elért kisebb bizonytalanság csak enyhén változtathatja meg a reakció-sebesség értékét.

A  $p$ -folyamat. A stabil magok neutron-befogási folyamataival ( $s$ - és  $r$ -folyamat) a  $Z > 26$  elemek néhány stabil, protonban gazdag izotópja ( $p$ -magok) nem jöhet létre, mert a befogást követő  $\beta$ -bomlásokkal szemben stabil magok árnyékában helyezkednek el. Az elfogadott képződési mechanizmus szerint az ezeket szintetizáló u.n.  $p$ -folyamat zömében a pre-szupernovában (ennek O-Ne rétegében),  $(\gamma, n)$  és ezt követő  $(\gamma, \alpha)$  vagy  $(\gamma, p)$  reakciókon keresztül zajlik. Az egymás utáni foto-neutron reakciókkal egyre növekvő  $S_n$  kötési energia miatt a folyamat lelassul, egyensúlyba kerül a mindig jelen levő  $(n, \gamma)$  reakcióval és ezen a helyen ("várakozási hely")  $\alpha$  és/vagy proton emisszió léphet fel a folyamat folytatásaként. A várakozási helyek maguk a  $p$ -magok (alsó A-tartomány), vagy ezek  $\beta$ -bomló elődei (magasabb A-k). Más, egyes  $p$ -magokat kisebb valószínűséggel létrehozó folyamatok/helyszínek is léteznek, ezt itt most nem említjük. Az elmondottakból következik, hogy ami a kísérleti vizsgálatokat illeti, legfontosabbak a várakozási helyek ill. ezek környezetének tanulmányozása. Célja a  $p$ -folyamat modell csak elméleti számításokon alapuló magfizikai bemenő adatai helyességének ellenőrzése. A gamma indukált reakciók méréséhez változtatható energiájú, intenzív gamma-sugár forrásra van szükség, ami csak az elmúlt néhány évben és csak egy-két helyen áll rendelkezésre. Jelenleg a direkt  $(\gamma, \alpha)$  és  $(\gamma, p)$  reakciók mérése a magas sugárzási háttér miatt sem megoldott. Ráadásul súlyos problémaként jelentkezik, hogy itt a céltárgy alapállapotban van, míg szupernova környezetben a magok egy része gerjesztett állapotban van. Az első,  $p$ -folyamatra vonatkozó méréseket Debrecenben végeztük (és jelenleg is folytatjuk), amit számos más kísérleti munka követett a világ különböző laboratóriumaiban. Ezekben nem gamma indukált reakciók, hanem az inverz  $(\alpha, \gamma)$  és  $(p, \gamma)$  reakciók hatáskeresztmetszetének mérése történik, amiből a "részletes egyensúly" elve alapján a direkt reakciók sebessége meghatározható. A kísérleti nehézségeket az alacsony hatáskeresztmetszetek jelentik, aminek oka a nehéz magok magas Coulomb gátja, valamint a 10 MeV körüli bombázó energiáknál jelentkező magas háttér. Kísérleteink során számos, a  $p$ -folyamat számára fontos magreakciót vizsgáltunk. A kísérletek fő motivációja a kevés rendelkezésre álló kísérleti adat. A  $p$ -izotópok relatív gyakoriságát ezért elméleti számítások szolgáltatják, amihez óriási reakció hálózatot (mintegy 2000 izotóp, 23000 reakció) vesznek figyelembe. A hálózat reakcióinak hatáskeresztmetszeteit Hauser-Feshbach (HF) statisztikus modell számítások szolgáltatják. Az elméleti hatáskeresztmetszet értékeket mért értékeinkkel hasonlítjuk össze, ezzel egyrészt ellenőrizzük a statisztikus modell alkalmazhatóságát a  $p$ -folyamatokra, másfelől a modellben használt egyes  $\alpha$ -mag ill.  $p$ -mag optikai potenciálokkal kapott eredményeket hasonlítjuk össze kísérleti adatainkkal a legjobb potenciál kiválasztásához. Méréseink zömében a debreceni ciklotronnal történtek aktivációs módszerrel. A tipikusan használt bombázó energiák a céltárgy tömegszámától függően protonokra 2 - 8 MeV,  $\alpha$ -részecskékre 7 - 15 MeV volt. A szilárd céltárgyak vákuum párologtatással készültek. Számos esetben dúsított izotópokat kellett használni egyrészt az alacsony hatáskeresztmetszet, másrészt a  $p$  céltárgy-mag 1 % körüli

relatív gyakorisága miatt. Méréseink új eredményeit külön-külön minden reakcióra nem részletezzük, tekintettel arra, hogy mindegyik mért hatáskeresztmetszet [ $S(E)$  érték] új érték, a reakciók első mérését végeztük. A vizsgálatokban általában külföldi kutatók is részt vettek. Az Otká támogatással vizsgált reakciókat az **I. Táblázat** tartalmazza. A már megmért, de analízis vagy publikáció előkészítés fázisában lévő reakciókat \* jelöli. A  $^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$  és a  $^{112}\text{Sn}(\alpha,p)^{115}\text{Sb}$  reakciók mérése a Notre Dame Egyetemen (Indiana, USA) történt. A  $^{106}\text{Cd}(\alpha,\gamma)^{110}\text{Sn}$ ,  $^{106}\text{Cd}(\alpha,p)^{109}\text{In}$  és a  $^{106}\text{Cd}(\alpha,n)^{109}\text{Sn}$  reakciók mérésére Debrecenben és Notre Dame-ben is sor került. A kapott  $\sigma(E)$  értékek kiváló egyezést mutatnak. A kísérleti és a különböző  $\alpha$ -mag potenciálokkal számított (HF NON SMOKER kód)  $S(E)$  értékek jelentősen eltérnek, kivéve az  $(\alpha,n)$  reakciót, ahol jó az egyezés. Az  $(\alpha,\gamma)$  esetében a számított értékek jelentősen túlbecsülik, míg az  $(\alpha,p)$  esetében alábecsülik  $\sigma(E)$  értékét. Ez az anomália minden  $\alpha$ -indukált reakció esetében hasonló, vagyis az  $\alpha$ -mag potenciálok egyike sem alkalmas a reakció csatornák egyidejű leírására. Ezt mutatja a  $^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$  reakció példáján a **2. ábra**. (Hivatkozások számozását ld. a Phys.Rev. **C75**,25801(2007) publikációnkban). Proton-indukált reakciók esetében viszont azt tapasztaltuk, hogy általában mind a  $(p,\gamma)$ , mind a  $(p,n)$  reakció csatornákra a  $p$ -mag



2. ábra. A  $^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$  reakció  $S(E)$  mért értékeinek összehasonlítása a különböző potenciálokkal végzett számításokkal (HF NON SMOKER kód).

globális optikai potenciálokkal számolt eredmények a kísérlet értékeket elfogadhatóan jól írják le. A következtetések általánosnak tekinthetők, mivel a vizsgált reakciók száma (ld. táblázat+a táblázatban nem szereplő korábbi méréseink) már szisztematikus vizsgálatot jelent. Külön kell említeni a  $^{85}\text{Rb}(p,n)^{85}\text{Sr}$  reakció hatáskeresztmetszet méréseit. Szokásosan használt az a feltevés, hogy asztrofizikai mérésekre a pozitív  $Q$  értékkel bíró reakciók alkalmasak azért, hogy a laboratóriumi és csillagbéli reakciósebességek Coulomb elnyomás okozta különbsége a minimálisra csökkenjen. A  $^{85}\text{Rb}(p,n)^{85}\text{Sr}$  reakció vizsgálata során bebizonyítottuk, hogy negatív  $Q$ -értékű reakciók is jó reakció sebesség értékeket szolgáltatnak. Tekintettel arra, hogy az  $\alpha$ -mag optikai potenciálokkal nem sikerült reprodukálni az  $(\alpha,\gamma)$  reakciók mérési eredményeit, rendkívül pontos és részletes rugalmas  $\alpha$ -szórás

méréseket végeztünk, azért, hogy a Rutherford-szórástól való eltérés analízisével kísérleti potenciál-paramétereket határozzunk meg. Ezen a szórási méréseinket az **I. táblázat** utolsó oszlopában tüntettük fel. A kapott paraméterek használata sem oldotta meg az  $\alpha$ -mag potenciállal kapcsolatos problémát.

**I. Táblázat.** Az asztrofizikai p-folyamat vizsgálataink során mért  $\alpha$ - és p-indukált magreakciók reakciók.

proton-indukált reakciók	alfa-indukált reakciók	alfa rugalmas szórás
$^{106}\text{Cd}(p,\gamma)^{107}\text{In}$	$^{113}\text{In}(\alpha,\gamma)^{117}\text{Sb}$	$^{89}\text{Y}(\alpha,\alpha)^{89}\text{Y}$
$^{108}\text{Cd}(p,\gamma)^{109}\text{In}$	$^{113}\text{In}(\alpha,n)^{116}\text{Sb}$	$^{92}\text{Mo}(\alpha,\alpha)^{92}\text{Mo}$
$^{70}\text{Ge}(p,\gamma)^{71}\text{As}$	$^{169}\text{Tm}(\alpha,\gamma)^{173}\text{Lu}^*$	$^{106}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{106}\text{Cd}$
$^{76}\text{Ge}(p,n)^{76}\text{As}$	$^{169}\text{Tm}(\alpha,n)^{172}\text{Lu}^*$	$^{110}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{110}\text{Cd}^*$
$^{85}\text{Rb}(p,n)^{85}\text{Sr}$	$^{151}\text{Eu}(\alpha,\gamma)^{155}\text{Tb}^*$	$^{116}\text{Cd}(\alpha,\alpha)^{116}\text{Cd}^*$
$^{120}\text{Te}(p,\gamma)^{121}\text{I}$	$^{151}\text{Eu}(\alpha,n)^{154}\text{Tb}^*$	$^{112}\text{Sn}(\alpha,\alpha)^{112}\text{Sn}$
	$^{112}\text{Sn}(\alpha,\gamma)^{116}\text{Te}$	*folyamatban
	$^{112}\text{Sn}(\alpha,p)^{115}\text{Sb}$	
	$^{106}\text{Cd}(\alpha,\gamma)^{110}\text{Sn}$	
	$^{106}\text{Cd}(\alpha,n)^{109}\text{Sn}$	
	$^{106}\text{Cd}(\alpha,p)^{109}\text{In}$	

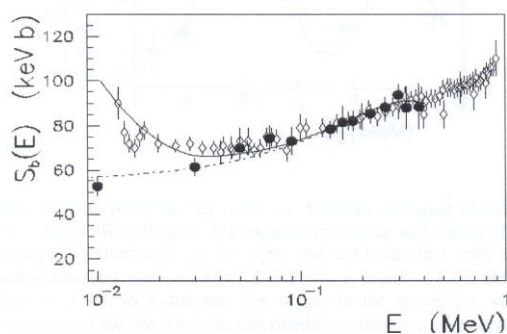
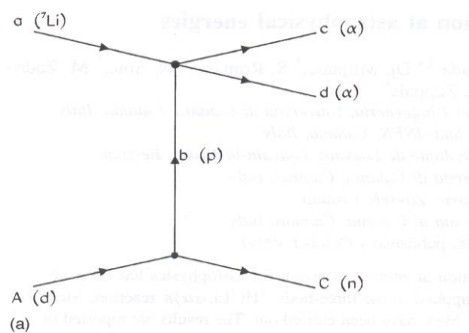
Terveinkben szerepelt a  $^{124}\text{Xe}(\alpha,\gamma)^{128}\text{Ba}$  vizsgálata gáz-céltárgy használatával. A  $^{124}\text{Xe}$  (0,1%) p-mag rendkívül drága, ablak nélküli gáz céltárgy nem jöhet szóba, ezért kisméretű zárt cellát fejlesztettünk ki. Ebben az egyes energiáknál történt besugárzás után a gáz könnyen cserélhető és visszanyerhető, hasonlóan a  $^{128}\text{Ba}$  végmagokat összegyűjtő „catcher” fólia is. Ez utóbbi aktivitás mérése off-line történik. A mérőberendezés elkészült, tesztelése folyamatban van, a valódi mérések hamarosan elkezdődnek. A következő nemesgáz izotópon tervezett ( $\alpha,\gamma$ ) mérés céltárgya a  $^{78}\text{Kr}$  (0,35%) p-mag lesz.

A  $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$  és a p-folyamatban vizsgált reakciók hatáskeresztmetszet mérése aktivációs módszerrel történt, ezért a felezési időt esetleg befolyásoló tényezőket is kísérleti úton ellenőriztük. Egy a fémekre alkalmazott (módosított) Debye-modell jóslata szerint a fémekbe implantált aktív magok felezési idejét megváltoztatja az elektronárnyékolási hatás, amit a fémek szabad elektronjai okoznak. A változás mértéke a jóslat szerint függ a befogadó anyagtól és a hőmérséklettől. Ez utóbbira  $T^{1/3}$  hőmérsékletfüggést prognosztizál. Méréseink szerint a 4 vizsgált befogadó anyagba (Pd, W, Zr és Ta) implantált  $e^-$ -befogással bomló  $^7\text{Be}$  mag felezési ideje hibahatáron belül nem változott, ami az anyagfüggést cáfolja. Alacsony hőmérsékleten ( $T=12^\circ\text{K}$ ) a Pd-ba és In-ba implantált  $^7\text{Be}$  felezési ideje kevesebb, mint 1%-al csökkent. A modell érvényessége szempontjából perdöntő mérést végeztünk Ta-ba és Ge-ba implantált  $^{74}\text{As}$  maggal. Ez a mag  $\beta^-$ -al és  $\beta^+$ -al is bomlik, így a modell szerint az elektronárnyékolás hatására az egyik bomlás felezési ideje



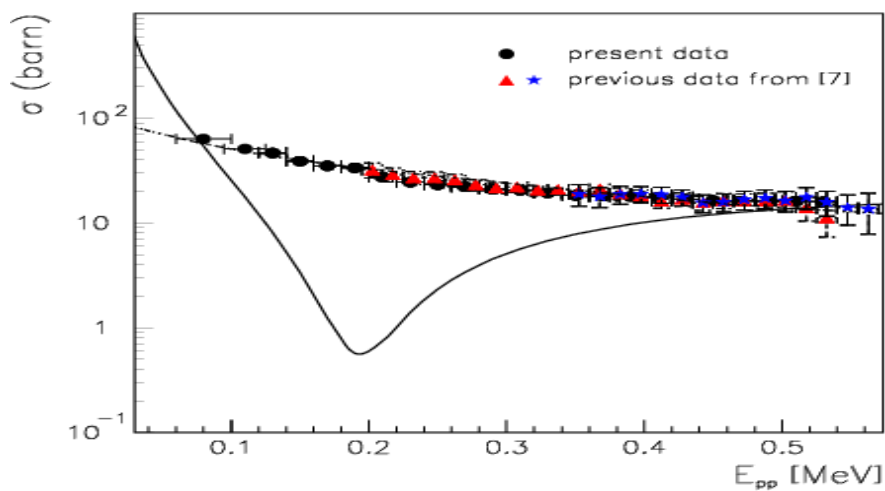
nő, másiké csökken, tehát a változásnak még markánsabban kell jelentkezni. A Ta (fém) és a Ge (félvezető) közegtől függést itt sem találtunk. Speciális berendezéssel a mintákat 250 mK (!) és szobahőmérséklet között több ponton mérve, a felezési idő nem változott, hőmérséklet-függést. Mivel sem közeg-, sem hőmérséklet-függést nem találtunk, megállapítottuk, hogy az említett módosított Debye-modell az elektronárnyékolási hatás leírására nem alkalmas. A felezési idő vizsgálatokhoz tartozik még a  $^{154}\text{Tb}$  pontos felezési idejének meghatározása. P-folyamat vizsgálataink során mértük a  $^{150}\text{Eu}(\alpha,\gamma)^{154}\text{Tb}$  befogási reakciót aktivációs módszerrel. A hatáskeresztmetszet hibáját a  $^{154}\text{Tb}$  végmag izomér állapotának pontatlanul ismert felezési ideje jelentősen növeli. Ezért pontosabban megmértük a felezési időt, az új érték  $T_{1/2} = 9,994 \pm 0,039$  óra, szemben az irodalomban eddig használt  $T_{1/2} = 9,4 \pm 0,4$  óra értékkel.

A nemzetközi együttműködések segítségével elnyert kiegészítő Otkának (IN64269) köszönhetően méréseket végeztünk a „Trójai Ló” módszerrel (Trojan Horse Method: THM) olasz (Catania) kutatókkal együtt. Az indirekt módszer lényege, hogy 3 test reakciókat használ a kívánt 2 test reakciók hatáskeresztmetszet meghatározásához. A módszer előnye, hogy mivel a 2 test reakció a mag belsejében (Coulomb-gát „mögött”) megy végbe, közel nulla bombázó energiánál - a reakció Gamow-ablakában - határozható meg a hatáskeresztmetszet, vagyis elektronárnyékolási hatás (Coulomb) és extrapoláció nélkül. Vegyük az  $a + A \rightarrow C + c + d$  3-test reakciót, ahol az  $A = (b + C)$  szerkezetű, összetett atommag („trójai ló”). A kívánt 2-test reakció pedig  $a + b = c + d$ . A Coulomb gátnál magasabb energiájú  $a$  bombázó részecske akadálytalanul áthalad a gáton és kölcsönhat a felhasadó  $A$  mag  $b$  összetevőjével,  $C$  fragmentje pedig tovább repül és elviszi a felesleges kinetikus energiát. A módszer szigorúan csak akkor alkalmazható, ha a felhasadás kváziszabad kinematikája biztosított. Ez kísérleti megszorításokkal, nevezetesen a megfelelő bombázó energia és detektálási szögek megválasztásával biztosítható, aminek teljesülését kísérletileg természetesen ellenőrizni kell. A THM módszerrel a  $^7\text{Li}(p,\alpha)^4\text{He}$  reakció hatáskeresztmetszetét mértük extrém alacsony energiákon. Ehhez a  $\text{D}(^7\text{Li},\alpha)^4\text{He}$  és a  $^3\text{He}(^7\text{Li},\alpha\text{d})^4\text{He}$  3 test reakciókat alkalmaztuk, ahol a D ill. a  $^3\text{He}$  magok hasadnak fel. Ez a mérés szolgált a módszer alkalmazhatósági tesztjeként. A THM eredményeknek a  $^7\text{Li}(p,\alpha)^4\text{He}$  reakció direkt mérési adataival történő összehasonlítása a módszer egyértelmű alkalmazhatóságát bizonyította. A folyamat gráfját és az összehasonlítást a **3. ábra** mutatja. Jól látható, hogy a THM



**3. ábra.** A THM módszer gráfja (balra) és a THM eredmények (vastag pontok) összehasonlítása a  $^7\text{Li}(p,\alpha)^4\text{He}$  reakció (elektronárnyékolással bíró) direkt mérésével (jobbra).

módszerrel kapott asztrofizikai S-faktor valóban mentes a direkt mérésben jelentkező elektronárnyékolástól. Egy másik kísérletben a rugalmas proton-szórás vizsgáltuk THM módszerrel. A p-p szórási adatokat a  $p+d \rightarrow p+p+n$  reakció méréséből vontuk ki. A magerőkre vonatkozó számolások p-p szórási adatait kísérletileg közvetlenül igazolni korábban nem lehetett a Coulomb - mag kölcsönhatás interferenciájának (destruktív) megjelenése miatt. A THM módszerben a Coulomb-gát hatása, tehát a zavaró interferencia nem jelentkezik, a kapott p-p szórási értékek kiválóan egyeznek az elméleti görbével. Ezt mutatja a **4. ábra**, ahol méréseinket a tele pontok és a háromszögek jelzik, a csillagozott adatok egy előzetes THM mérés eredményei.



**4. ábra.** A p-p szórás hatáskeresztmetszete az interferenciával (kihúzott vonal), az elméleti értékek (pont-vonal) és a THM mérési adatok (korábbiak:  $\Delta$  és  $*$ ).

A klasszikus novákban lejátszódó mag szintézis egyik fontos folyamatát, a  $^{17,18}\text{O}(p,\alpha)^{14,15}\text{N}$  magreakció hatáskeresztmetszetét is meghatároztuk a THM módszerrel a korábban nem elérhető extrém alacsony (0-200 keV) energiáknál. A mérést  $^{17,18}\text{O}$  nyalábbal bombázott D céltárgyon végeztük.