

OTKA 43585 tematikus pályázat beszámolója

Neutronban gazdag egzotikus könnyű atommagok reakcióinak vizsgálata

1. A kutatási célok

A pályázatban tervezett kutatási célok a neutronban gazdag könnyű atommagok reakcióinak vizsgálatát tűzték ki célul. A reakciók vizsgálatának fizikai céljai két irányt mutattak. Egyik típusú reakció a Coulomb-szétesés. Ez rövid felezési idejű atommagok neutronbefogási hatáskeresztmetszetének meghatározására alkalmas. A nukleáris asztrofizika területén van ilyen mennyiségeknek fontossága. A másik reakció a rugalmatlan szóródás, ami az eddig még nem vizsgált, radioaktív nyalábban előállított atommagok gerjesztésére alkalmas. A gerjesztéskor keletkező gamma-fotonok detektálása alapján a magszerkezetre lehet következtetni. Ez érdekes újdonságokat szolgálhat a stabilitástól távoli, neutronban gazdag atommagok tanulmányozása során.

1.1 A Coulomb-szétesés

A Coulomb-disszociáció során nagy rendszámú atommagok terében nagy sebességgel elhaladó atommagok egy virtuális fotont vesznek fel az elektromágneses térből, melynek energiája nagyobb a neutron szeparációs energiánál. Ebben az esetben egy neutront lehet „lehasítani” az atommagról. A „Coulomb” elnevezés a reakció elektromágneses természetére utal. A kísérletekben ezt mindig kiegészíti a magerők okozta neutron-leválás, ami a nukleáris-szétesés. A két mechanizmus ütközési paramétertől függően keveredik a kísérletben. A tisztán elektromágneses neutron-leválasztás reakció inverze a neutron befogásnak. Egy magreakció valószínűsége és inverzének valószínűsége a részletes egyensúly elvén keresztül kapcsolatban van egymással, hiszen azonos magmátrix-elemhez tartoznak. Az időtükrözési szimmetria adja a két reakció közötti kapcsolatot. A rövid felezési idejű atommagok neutron befogása hagyományos neutronbefogással nem határozható meg, hiszen a befogó atommagból nem tudunk céltárgyat készíteni. Ezen magok neutronbefogására alkalmas egyik módszer a Coulomb-disszociáció. A nukleáris asztrofizika területén sok ilyen reakció akad. Az ősrobbanás nukleoszintézisen kívül az r-folyamatban is fontosak a neutronbefogási hatáskeresztmetszetek. Kísérleteink során a ${}^7\text{Li}$ és a ${}^8\text{Li}$ neutronbefogását mértük meg az inverz reakció segítségével. Ezek az ősrobbanás nukleoszintézisben az $A=8$ gát átlépésében lehet fontos szerepe.

1.2. Rugalmatlan szórás

A stabilitástól távoli atommagok gyorsítók melletti előállítása az utóbbi évtized technikai eredménye. Számos szupravezető ciklotronban használják a kb. 50-100 MeV/nukleon energiára felgyorsított részecskék fragmentációját új, kísérletben eddig még nem vizsgált atommagok előállítására. Az egyes gyorsítók versenyeznek a minél nagyobb neutrons számú atommagok, minél nagyobb nyalábintenzitásban történő előállítására. Ezzel stabilitási vonaltól távoli, a neutron-leesési vonalhoz közeli izotópok szerkezete vizsgálható. Ezen magok szerkezete számos eltérést mutat a stabilitási zónában megszokottól. A ${}^{11}\text{Li}$ atommagnál fedezték fel először a nukleáris magsugár kirívóan nagy értékét. Más atommagok esetén neutronok pályák sorrendjének felcserélődése tapasztalható sok-neutronos atommagban. A megszokott mágikus számok is másképpen alakulhatnak. Az atommagokat inverz kinematikájú reakciókban vizsgáltuk. A felgyorsítva keletkezett egzotikus atommag

álló proton céltárgynak ütközött, miközben a felgerjesztődött. A proton céltárgy alacsony hőmérsékletre hűtött folyékony H_2 volt, ami szintén egy technikai újdonság.

Kísérleteinkben a ^{17}C , ^{19}C , ^{17}B atommagok gerjesztett állapotait vizsgáltuk, protonon történő inelasztikus szórásban, és a gerjesztett állapotok energiáját határoztuk meg, valamint a gerjesztés erősségét, azaz annak hatáskeresztmetszetét. Héjmodell számítások alapján becslült spin-paritás tulajdonságok figyelembevételével a magok deformáltságára, és a magszerkezetre lehetett következtetni.

1.3. Töltéscicserélő magreakciók vizsgálata neutronban gazdag atommagokon

Az izobár-analóg állapotokra vezető megreakciókban mért szögeloszlások a (p,n) reakcióban részt vevő nukleon hullámfüggvényével van kapcsolatban. Ilyen kísérlettel lehet pl. a 6He atommag valencia-neutronjainak elhelyezkedését vizsgálni. Egyik célunk ez volt, és azt a (p,n) reakcióban keletkezett neutronok szögeloszlásának mérésével kívántuk megvalósítani.

2. A kutatás során megvalósított kísérletek

2.1. Korábbi kísérlet a michigani NSCL gyorsítónál

Ez a pályázat egy korábbi OTKA pályázat folytatása, melynek keretében elvégzett mérések közül egy kiértékelésének befejezése a 2003-2006 évek elejére esett, és ezt nem érintette a korábbi pályázat beszámolója. Az első eredményeket tehát korábban elvégzett kísérletből kaptuk. Ez a kísérlet a $^8Li(n,\gamma)$ neutronbefogás mérése volt, ami 40 MeV/nukleon bombázó energiájú 9Li nyaláb Coulomb-disszociációjának mérését jelentette.

A kísérletet a michigani NSCL nemzeti laboratóriumban végeztük el együttműködésben amerikai, japán kollégákkal. A mérésnél több tagból álló magyar csoport vett részt, akik ebben a laboratóriumban már sikeres méréseket végeztek el Kiss Ádám vezetésével. Ezt a kísérletet a részben a magyar csoport által fejlesztett neutron fal detektorral végeztük. A 8Li -ok a gyorsítóból érkező ^{13}C atommagok fragmentációjakor keletkeztek, és egy fragment szeparátoron keresztülhaladva lettek kiválogatva a keletkező atommagok közül. A nyaláb ólom és szén céltárgyakra esett, és a szétesésben keletkezett fragmentumot egy dipólmágnessel eltérítve egy 16 plasztik szcintillátorból álló megállító-detektor detektálta. Az egyenesen továbbhaladó neutronokat az NSCL Neutron Wall detektor detektálta, repülési idejét és trajektóriáját megadva. A mérésben keletkező neutron széteséseket úgy kerestük, hogy az szcintillátor rudakban detektált 9Li energiájából számolt pozícióban kerestük a 8Li -okat neutronokkal koincidenzában.

2.2. 8Li Coulomb disszociációjának vizsgálata az NSCL-nél

2005-ben végeztük el a $^7Li(n,\gamma)$ neutron-szétesési kísérletet, melynek megpályázása is a kutatási időszakra esett. A nyalábidő pályázat megírásában a jelen pályázatban részt vevők nagy súllyal vettek részt, és a mérés elvégzésénél személyesen jelen voltak. Itt a magyar csoport több tagból állt. Sikerült doktoranduszokat is bevonni a kutatásba, és a tanszék fiatal nagyenergiás fizikával foglalkozó kollégáinak szakértelmét is bevontuk. A kísérlet 40 és 70 MeV/nukleonra gyorsított 8Li atommagok szétesését vizsgálta az új fejlesztésű MoNA (Modular Neutron Array) detektorral. Szén és ólom céltárgyakat alkalmaztunk, hogy a tiszta elektromágneses széteséseket el tudjuk választani a nukleáris széteséstől. Minden esemény teljes kinematikai rekonstrukciója megtörtént. A bejövő 8Li atommagok trajektóriáját két CRDC detektorral határoztuk meg. A céltárgy előtti kvadrupól mágnesek a nyalábot egy pontra fókuszálták. A kifutó neutron a nagy határfokú MoNA detektálta, repülési idejét

FWHM=1,15 ns pontossággal határozta meg. A fragmentumokat egy nagy mágneses terű sweeper mágnes az ún. Focal Plane detektorba irányította, ahol a trajektóriát ismét két CRDC detektor adataiból számoltuk ki. A reakcióban keletkező részecskék impulzusát a mágneses téren történő követéssel határoztuk meg, ismerve a bemenő és kimenő helyzetüket. Két szcintillációs detektorral sikeresen megvalósítottuk a részecske-azonosítást, ami alapján a ${}^7\text{Li}$ -okat elkülönítettük a ${}^8\text{Li}$ -októl. Az ütközésben történő ütközési paramétert a tisztán elektromos esetben a Rutherford-trajektóriák alapján kiszámoltuk. Ez fontos része a kiértékelésnek, mert a reakciót különböző ütközési számoknál vizsgáltuk. A teljes kinematika mérésével meg tudtuk határozni a tömegközépponti rendszerben a bomlási energiát, és ennek függvényében a gerjesztési spektrumot.

2.3. A RIKEN kutatóintézetben végzett mérés

A kutatási időszakban a debreceni ATOMKI munkatársaival is sikerül együttműködést kialakítani, melynek eredményeképpen Rituparna Kanungo és Elekes Zoltán által elnyert mérési tervben a jelen kutatás vezetője társkutatóként szerepelt. A kísérletet a tokiói RIKEN kutatóintézet Ring ciklotronja mellett felépült RIPS radioaktív nyalábok előállítására alkalmas berendezéssel végeztük. Körülbelül 44 ill. 50 MeV/nukleon energiára gyorsított ${}^{17}\text{C}$, ${}^{17}\text{B}$ ill. ${}^{19}\text{C}$ atommagok nyalábját használtuk. Ezek folyékony hidrogén céltárgyon gerjesztődtek, és a DALI nevű NaI szcintillációs detektorokból álló nagy hatásfokú rendszer detektálta a gamma-fotonokat. A nyalábot szilícium detektorokból álló teleszkóp állította meg, amelyben a nyaláb-részecske azonosítható volt. Így a keverék nyalábbal elvégzett kísérletben minden egyes eseményhez meg tudtuk mondani a nyalábrészecske A, Z értékeit. Ezután 4 HPGe detektor vizsgálta a nyaláb leállása után keletkezett fotonokat. Ennek célja az volt, hogy a ${}^{19}\text{C}$ izomer állapotát kerestük a kísérlet egyik irányú kiértékelése során. Az izomer állapot relatívan hosszú élettartama miatt a HPGe detektor jeleit 1 μs hosszú időkapuban várta az elektronikai rendszer. A DALI rendszer által detektált fotonokat Doppler-korrekciónak után, és a részecskeazonosítás alapján szelektálva rendeztük spektrumokba.

2.4. A ${}^6\text{He}$ izobár analóg állapotának vizsgálata

Ilyen irányú kísérletet végeztük a ${}^6\text{He}$ atommagon a japán Chiba városban elhelyezkedő HIMAC szinkrotronnál 180 MeV/nukleon bombázó energián. A michigani neutron-fal detektorral analóg, de annál kisebb neutrondetektort erre a mérésre fejlesztették ki, és a már 93 MeV/nukleon energián egy spektrográf segítségével megmért reakciót nagyobb bombázó energián tudtuk végrehajtani, de a neutronok detektálása úttörő próbálkozás volt. A szinkrotronból érkező ${}^6\text{He}$ atommagok egy plasztik céltárgyra estek, ennek protonjaival történő reakciókat vizsgáltuk. Ezután egy vékony helyérzékeny szilícium-detektor érzékelt az átmenő részecskéket, és válogatta ki a keletkező lítium magokat. A neutrondetektorok 90° körül lettek elhelyezve a reakció kinematikája miatt.

3. A kutatás személyi vonatkozásai

A michigani mérésben szerepeltek a jelen pályázat résztvevő kutatói, és mindkét mérésben a magyar csoport létszáma jelentős volt. A 2005-ös mérésben a 25 főből 8 magyar volt, melyben 2 doktorandusz és egy ATOMKI-s kolléga is helyet kapott. A kísérletek „spokesmenjei” mindig magyarok voltak. A tokiói RIKEN-ben elvégzett mérést az ATOMKI-s kollégákkal történt együttműködés tette lehetővé.

A kutatási időszakban sikerült több diákot is bevonni a közepes energiájú magfizikai kutatásokba. 2004-ben Izsák Rudolf ELTE fizikushallgató írta meg szakdolgozatát a ${}^6\text{He}(p,n)$ reakció kiértékeléséből, majd ezután felvételt nyert az ELTE Fizika Doktori Iskola finanszírozott hallgatói közé, és a doktori dolgozatában a ${}^8\text{Li}$ szétesését célzó kísérlet kiértékelését írta le.

A RIKEN-ben végzett kísérlet adathalmazának egyik részét feldolgozva Endrődi Gergely diákkörös hallgatóként ismerkedett meg a magfizikával. Ő a megállított ${}^{19}\text{C}$ atommagok bomlása során keletkező gamma-fotonokat kereste meg, melyek az említett HPGe detektorban detektálódtak. Munkájából országos diákköri konferencián kiemelt dicséretet kapott. Ő később a hadronanyag fázisátalakulását vizsgáló kutatásokba kapcsolódott be, és felvételt nyert az ELTE Fizika Doktori Iskolába.

Annak ellenére, hogy ez a két kutatási eredmény nem lett nemzetközi folyóiratban publikálva, ezen eredmények révén kutatásaink új fiatal szakemberek képzéséhez is hozzájárultak.

A kutatási időszak alatt az ELTE-s kollégák és az ATOMKI ezen területen dolgozó kollégái között erősödött az együttműködés. A japán mérésekkel erősödött a japán kollégákkal történő együttműködés, ami egy későbbi TÉT pályázatot eredményezett.

4. A megvalósított kutatások eredményeinek összefoglalása

4.1. A ${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Li}$ neutronbefogása

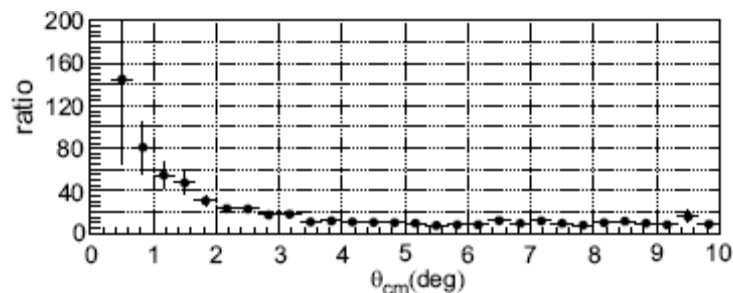
A ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ reakció hatáskeresztmetszetére egy felső korlátot adtunk, ami 10-szer alacsonyabb, mint a korábbi kísérleti felső korlát: $\sigma(n,\gamma) < 930 \mu\text{b} \cdot \text{eV}^{1/2} / E^{1/2}$. Ebből adódik, hogy a direkt reakció reakciósebességére $R = N_A \langle \sigma v \rangle$ is felső korlátot kaptunk, ami a neutronbefogás $1/v$ jellege miatt energiatól független: $790 \text{ cm}^3/\text{mol} \cdot \text{s}$. Ez kisebb, mint a publikációinkban említett 4 elméleti számolás eredményei közül mind. A nukleáris asztrofizikai következménye az, hogy az egymással versenyző ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$, ${}^8\text{Li}(\beta){}^8\text{Be}$ és ${}^8\text{Li}(\alpha,n){}^{11}\text{Be}$ reakciók közül csillagokban a neutronsűrűségtől függően a neutronbefogás nem tudja áthidalni az $A=8$ -as gátat, és a béta-bomlással alfa részecskék keletkeznek. Az inhomogén Big Bang nukleoszintézis modellekben a ${}^8\text{Li}(n,\gamma){}^9\text{Li}$ reakción keresztül keletkeznek a ${}^{12}\text{C}$ atommagok. Ez a kis hatáskeresztmetszet ellenére a valószínűbb folyamat, és nem a nagy Coulomb-gáttal rendelkező ${}^8\text{Li}(\alpha,n){}^{11}\text{Be}$. Ezért eredményünk ebben a modellben a keletkező ${}^{12}\text{C}$ -k számát csökkenti le az eddig számolt értékekhez képest.

A ${}^7\text{Li}(n,\gamma){}^8\text{Li}$ neutronbefogás szintén az neutronban gazdag környezetben végbemenő nukleoszintéziseknél fontos. Ilyen az említettekén kívül a szupernóva robbanásban zajló nukleoszintézis is. Ez a reakció azonban más oldalról is érdekes. Az inverz reakciók alapján meghatározott neutronbefogások módszerét ellenőrizni lehet ezzel, mert a ${}^7\text{Li}$ neutronbefogása már meg van mérve, lévén, hogy a ${}^7\text{Li}$ stabil elem. A módszerben a nukleáris komponens levonása az egyik legbizonytalanabb pont, ennek a részletes vizsgálatára ad lehetőséget a kísérlet. A kutatási időszak alatt csak az első eredményeket értük el, a teljes kiértékelés később készült el.

A kiértékelés során több nehéz technikai problémát kellett legyőzni a detektorok kalibrációjakor. A neutrontetektor időfelbontásának javítása érdekében a 144 szcintillációs rúd 288 fotoelektron-sokszorozójának időbeli eltolását függőlegesen érkező kozmikus müonok segítségével illesztettük össze egymáshoz. Ezzel az időfelbontás és a helyfelbontás is

megjavult. Az egyik legnagyobb kihívás a keletkező ${}^7\text{Li}$ atommagoknak a mágneses téren történő követése volt. Ennek során nagy pontossággal lehetett megállapítani a fragmentum sebességét. A pozíciókat meghatározó CRDC detektorok finom geometriai paramétereinek kimérése is az elvégzett feladatok közé tartozott.

Az első eredmények során a 40 MeV/nukleon bombázó energiához tartozó szögeloszlások eredményeit értékeltük ki. A kísérlet eredménye az ólom és szén céltárgyon mért szögeloszlás hányadosát mutatja be. Ez nagy szögeknél konstans 6,5 körüli arány, ami a két tömegszám $2/3$ -dik hatványainak aránya. Ez mutatja, hogy nagy szögeknél (kis ütközési paraméternél) a nukleáris komponens dominál, és ez a tömegszám $2/3$ hatványával skálázódik, nem a korábban gyakran használt $A^{1/3}$ módon. Kis szögeknél, ahol a bombázó részecske messze megy el a céltárgy mellett, a tisztán elektromágneses szétesés dominál, a szögeloszlások aránya Z^2 -ek arányával egyezik meg.



1.ábra A mért szögeloszlások aránya az ólom és a szén céltárgyat használó mérések eseteire.

Az eredményként kapott arány-eloszlás azt is mutatja, hogy 2° szóródási szög felett a nukleáris tag dominál. A nukleáris tag csökkenthető, ha a szóródási szögre feltételeket szabunk ki, ezen eredmény alapján. Az analízis a kutatási időszak vége után fejeződhet csak be.

4.2. A ${}^{17}\text{C}$, ${}^{17}\text{B}$ és ${}^{19}\text{C}$ magszerkezetének vizsgálata

A RIKEN gyorsítónál a debreceni ATOMKI munkatársaival közösen elvégzett kísérlet során, Elekes Zoltán és Dombrádi Zsolt vezetésével kiértékelt mérésekben a ${}^{19}\text{C}$, ${}^{17}\text{B}$, ${}^{17}\text{C}$ neutronban gazdag atommagok gerjesztési energiáinak vizsgálata, a ${}^{19}\text{C}$ izomer állapotának keresése mellett az ezen magok bomlása után keletkező béta+neutron bomlások során kibocsátott gamma-sugárzás intenzitásvizonyainak tisztázásában vettünk részt.

A ${}^{17}\text{C}$ nyalábrészecskéket kiválogatva a Doppler-korrigált gamma-spektrumokban meghatároztunk két gamma-csúcsot. Ezekhez tartozó gerjesztett állapotok gerjesztési energiáit a következőkben határoztuk meg: 210 keV és 331 keV. A ${}^{19}\text{C}$ nyalábrészecskék esetén is két csúcsot tapasztaltunk, 72 keV és 197 keV energiáknál. A 331 keV-es csúcsot nemcsak a ${}^{17}\text{C}$ gerjesztésénél tapasztaltuk, hanem amikor a ${}^{19}\text{C}$ nyalábban a céltárgy a részecskeazonosítás szerint 2 neutront kilök, és ${}^{17}\text{C}$ keletkezik, akkor is. Ez megbízhatóbbá teszi a gerjesztett állapotenergiájának meghatározását. Az egyszerű (p,p') reakciókban tapasztalt csúcsok területéből meghatároztuk a gerjesztés hatáskeresztmetszetét is. A 331 keV-es csúcs gerjesztésének hatáskeresztmetszete a geometriai akceptancia figyelembe vételével kb. 14 mb-nak adódott. Ezt az értéket reprodukálni lehet torzított hullámú Born-közelítéssel, ha az atommag spinjét és deformációs paraméterét ismerjük. A héjmodellekből egybehangzóan becsült spin értékeket figyelembe véve a deformációs paraméter értékére a ${}^{19}\text{C}$ atommag esetére $\beta_2 \sim 0,3$, és a ${}^{17}\text{C}$ mag esetére $\beta_2 \sim 0,57$. Ezek alapján megállapítottuk,

hogy a ^{17}C deformált mag, tengelyeinek aránya megközelítőleg 2:1, hasonlóan a ^{16}C és ^{17}B deformációjához, amit már korábbi mérésekben felismertek.

A ^{19}C izomer állapotának keresése során először becslést adtunk arra, hogy egy adott felezési időhöz tartozó, adott energiájú izomer állapotot milyen valószínűséggel kellene detektálni a detektorrendszerünkben. 80 keV és 380 keV közötti tartományban, 0,1 és 100 μs tartományban 3-10% detektálási hatásfok adódott. Ennek megfelelően az adott tartományban kialakuló csúcsot nem tapasztaltunk. A vizsgált energiatartomány 330 keV körüli tartományára kapuzva a beütések időfüggését is vizsgáltuk, és exponenciális csökkenést nem tapasztaltunk. Az adatok alapján felső becslést adtunk az izomer állapot létezésére a nyalábban, amit elhanyagolható mennyiségűnek értékeltünk.

4.3 A ^6He neutronjainak vizsgálata

^6He izobár analóg állapotára vezető (p,n) reakció vizsgálatát célzó kísérlet adatait kiértékeltek, melyet a Tokyo melletti HIMAC gyorsítónál végeztünk. A kísérlet kimutatta, hogy 180 MeV/nukleon bombázó energiánál is gerjesztődik az izobár-analóg állapot, és az elméleti várakozásoknak megfelelően kisebb hatáskeresztmetszettel, mint 93 MeV/nukleon bombázó energiánál, melyen a más technikájú, de ugyanezen fizikát célzó kísérleteket eddig végeztek. A neutronok szögeloszlását nem sikerül megfelelő hibával megmérni, az adatok statisztikája csak a neutronok inkluzív vizsgálatára volt elegendő.

Összefoglalás

A kutatási időszakban sikerült több mérést elvégezni radioaktív nyalábok használatával a michigani NSCL, a tokiói RIKEN és a chibai HIMAC gyorsítók mellett. A kutatások során diákokat vontunk be a magfizikai kutatásokba és együttműködések erősödtek.

Meghatároztuk a $^8\text{Li}(n,\gamma)$ neutronbefogási hatáskeresztmetszet energiafüggő felső korlátját, a neutronbefogás reakciósebességének felső korlátját.

Meghatároztuk a $^7\text{Li}(n,\gamma)$ inverz reakciójának, a neutron leválásnak, ólom és szén céltárgyon a hatáskeresztmetszeteinek arányát a szög függvényében. Ebből arra következtettünk, hogy a nukleáris járuléka a tömegszám 2/3-dik, az elektromágneses járuléka a rendszám közel 2-dik hatványával arányos. Meghatároztuk a kísérletben azt a szögtartományt (ütközési paraméter tartomány), ahol a nukleáris járuléka a domináns.

Meghatároztuk a $^{17,19}\text{C}$ atommagok első két gerjesztett állapotának energiáját, és a magok deformáltságát. A ^{19}C kicsi deformációs paramétere alapján arra következtettünk, hogy az utolsó neutron különálló pályán mozog a központi rész (^{18}C) átlagterében.

Megállapítottuk, hogy a ^{19}C izomer állapotának létezésének valószínűsége elhanyagolható 300 keV-nél alacsonyabb energiatartományban.