

Neutron-proton korrelációk egzotikus atommagokban

Radioaktív ionnyalábokkal végzett
magszerkezeti vizsgálatok

Akadémiai doktori értekezés tézislevele

Elekes Zoltán

Magyar Tudományos Akadémia
Atommagkutató Intézet

Tartalomjegyzék

1. A kutatások előzménye	5
2. Célkitűzések	9
3. Új tudományos eredmények	11
4. Szerepem az eredmények létrejöttében	17
A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	19
Irodalomjegyzék	23

1. fejezet

A kutatások előzménye

Az atommagok mérete és sűrűsége igen fontos statikus tulajdonságok, melyek alapvetően meghatározzák a magpotenciált és az egyrészecske állapotokat. Már a korai szórási kísérletek segítségével megtanultuk (lásd például [Hofstadter53]), hogy a könnyű és közepesen nehéz ($A < 100$) atommagok többsége csak kissé deformált, alakja közel göbbszimmetrikus és nukleonsűrűsége nagyon hasonló. A stabilitási völgyben lévő vagy ahhoz közeli atommagokban a nukleonok közöttük fellépő erős, vonzó, nukleáris kölcsönhatás miatt a protonjaik és neutronjaik sűrűségeloszlása nagyjából megegyezik. A tömegszám növekedésével egyre több neutronra van szükség a protonok közötti Coulomb-taszítás felhígításához és stabil atommagok kialakításához. Ezek a többletneutronok beépülhetnek egyenletesen elszórva, de az is elképzelhető, hogy egy, kizárólag neutronokat tartalmazó réteget alakítanak ki egyes atommagok felületén. Valóban, ezt kísérletileg is sikerült igazolni; a jelentős neutrontöbbséggel rendelkező, de stabil ^{48}Ca ($\frac{N}{Z} \approx 1,4$) és ^{208}Pb ($\frac{N}{Z} \approx 1,54$) atommagok külsején neutronbőr található, azonban jelenlegi tudásunk szerint ez igen vékony, mindössze körülbelül 0,2 fm vastagságú.

A neutronok protonokhoz viszonyított arányát csak úgy tudjuk növelni ha eltávolodunk a stabilitási sávtól. Amikor a neutronelhullatási vonal közelébe érünk ($\frac{N}{Z} \approx 3$), amin túl már az atommagok alapállapota sem kötött, akkor egy igen furcsa effektust tapasztalhatunk. Nemcsak neutronbőr alakulhat ki, hanem egy-két, nagyon lazán kötött valencianeutron lecsatolódik az atommagtörzsről (a visszamaradó nukleonok által alkotott atommag), attól távol tölti idejének jelentős részét. Így az atommagtörzset egy híg neutronanyag, a neutronglória lengi körül. A neutronglória kiterjedése extrém nagy

1. A kutatások előzménye

lehet, az elsőként felfedezett ^{11}Li -é például összemérhető az ^{208}Pb atommag sugarával [Tanihata85].

Kutatásaink kezdetén, a kétezres évek elején még meglehetősen kevés volt azon atommagok száma, melyekben a neutronok és protonok eloszlásának jelentős aszimmetriáját sikerült egyértelműen kimutatni. Különböző céltárgyakon történő átbocsátási (transzmissziós) kísérletekben, az említett ^{11}Li -en kívül a ^6He -ban, a ^8He -ban [Tanihata92] és a neutrongazdag nátriumizotópokban [Suzuki95] sikerült a jelenséget igazolni. Hasonló mérések utaltak arra, hogy számos másik atommag, például a ^{17}B , a ^{19}C , a ^{23}N és az ^{23}O is vastag neutronbőrrel illetve neutronglóriával rendelkezhet [Suzuki99, Ozawa01].

A statikus tulajdonságokon túl az atommagok dinamikus jellemzőinek méréséből is lehet a neutronok és protonok eltérő eloszlására következtetni. Valóban, a ^{11}Be első gerjesztett állapotának és alapállapotának egyszerű héjmodellből következő spin/paritás értékeinek felcserélődését és a közöttük történő átmenet különösen erős voltát csak úgy lehetett megmagyarázni, ha azt feltételezték, hogy a valencianeutron hullámfüggvénye igen kiterjedt [Millener83]. Már ez a kísérlet is a 80-as évek másik nagy felfedezésének – az instabil atommagok között jelentkező anomális héjeffektusok megjelenésének – irányába és ezen jelenségek lehetséges összefüggése felé mutatott, hisz a nagy neutrontöbbség az átlagtér megváltozását okozhatja, aminek egyenes következménye lehet a héjzáródások átrendeződése. Mégis a kétezres évekig kellett várni, hogy a ^{12}Be alapállapotában feltárják, hogy az $s_{1/2}$ egyrészecske állapot be van töltve, amiből az $N=8$ mágikus szám eltűnésére következtettek [Navin00]. Az $N=20$ -as mágikus szám körüli problémákra hamarabb fény derült. Már a hetvenes években kimutatták, hogy a neutrongazdag $^{31,32}\text{Na}$ atommagok erősebben kötöttek, mint az várható volt a héjmodell alapján [Thibault75]. Majd a ^{32}Mg igen alacsony energián megtalált első gerjesztett állapota [Détraz79] újabb jelzést adott arra vonatkozóan, hogy az $N=20$ -as héjeffektusok nem a vártak megfelelően alakulnak. Természetesen ezek az anomáliák rögtön kiváltották az elméleti szakemberek érdeklődését. Hamarosan két megközelítés alakult ki. A kísérleti adatokat egyrészt egy úgynevezett "inverziósziget" segítségével sikerült értelmezni, melyet a $Z=10-12$, $N=20-22$ tartományban elhelyezkedőnek jósoltak, ahol a deformált 2-részecske-2-lyuk állapot $((sd)^{-2}(fp)^{+2})$ a gömbi, normál konfiguráció alá süllyed [Warburton90], ami ugyan kicsit csökkenti a héjközt, de megőrzi a 20-as szám mágikusságát. Azonban mind a 8-as, mind pedig a 20-as neutronsám környékén fel-

lépő különleges jelenségek úgy is értelmezhetők voltak, hogy az egyrészezske állapotok eltolódnak, ami a héjzáródás megszűnésével jár. Ezzel a megközelítéssel az ezredfordulón Monte Carlo diagonalizációs technika alkalmazásával sikerült megmagyarázni a kísérleti adatokat [Utsuno99]. Sőt rámutattak arra is, hogy az inverziósziget határai valószínűleg nem ott vannak és nem olyan élesek, mint azt Warburton és kollégái eredetileg [Warburton90] gondolták. Ezen túl a számolások azt is jelezték, hogy máshol ($N=6, 14, 16, 34, \dots$) viszont várhatók héjzáródások a neutrongazdag atommagok tartományában [Otsuka01]. Erre utaló kísérleti jel volt az ^{22}O atommag igen nagy energián megtalált első gerjesztett állapota és az alapállapotba történő átmenet gyengesége [Thirolf00]. Természetesen az inverziószigeten mért jelentős deformációval kapcsolatban hamar felmerült, hogy annak kialakítása során vajon megjelenik-e a neutronok és a protonok eloszlásának aszimmetriája [Stevenson02, Terasaki97]. Egy kísérletet végre is hajtottak ezzel kapcsolatban, melyben azonban a $^{30,32}\text{Mg}$ atommagok neutron- és protoneloszlása megegyezőnek mutatkozott [Chisté01]. Felvetődött annak a lehetősége is, hogy a héjzáródások megváltozása mögött a lazán csatolt neutronokat kell keresni, azaz a neutronglória kialakulása és a héjeffektusok változása együtt kezelendő és értelmezhető [Tanihata01]. Már ebben a munkában felmerült, hogy a 20-as mágikus neutrons szám helyett a 16-os lesz az új héjzáródási pont a neutrongazdag atommagok között.

2. fejezet

Célkitűzések

A vázolt meglehetősen bizonytalan, kissé zavaros és bonyolult kísérleti és elméleti háttér ismeretében csoportunk azt a célt tűzte maga elé, hogy szisztematikus kísérleti adatok szolgáltatása révén közelebb kerüljünk a bemutatott jelenségek megértéséhez. Tisztázni kívántuk, hogy vajon tényleg csökkennek-e a héjközök; az eltűnő konvencionális mágikus számok helyett hol jelennek meg újak, és ezeknek mi köze a neutronok és protonok rendhagyó eloszlásához; hol vannak az inverziósziget határai és a benne lévő atommagoknak vajon eltérő-e a neutron- és protoneloszlása. Két irányba indultunk el: (a) az egzotikus atommagok alacsonyan fekvő gerjesztett állapotainak feltérképezése, illetve (b) a neutron/proton aszimmetria feltárása felé. Az első irányban tett erőfeszítéseinket Dombrádi Zsolt kollégám dolgozta fel kitűnően akadémiai doktori értekezésében [Dombrádi09]. Jelen értekezés pedig a második irányba tett lépéseinket foglalja össze. A vizsgálataink alá vont atommagok két nagy csoportra bonthatók: egy részük a 14-es héjzáródás környéki, míg a másik pedig az inverziósziget közelében lévő atommagokat foglalja magába.

Ezek a kísérletek rendkívül műszerigényesek, mert az alkalmazott radioaktív ionnyalábok intenzitása és a jel/zaj viszony igen kicsi. Ezért a felvetett kérdéseket gyakran csak úgy lehet megválaszolni, ha komoly detektorfejlesztéseket hajtunk végre, amit a területen dolgozó kutatók természetes feladatuknak tekintenek. Ebből a munkából csoportunk (különösen én magam) is kivette a részét, azaz a jelentkező, új igényeknek megfelelő detektáló készülékek fejlesztésébe és alapvető paramétereik meghatározásába is belefogtunk, ahogy azt az alábbi listában felsoroltam.

(a) Az inverz kinematikával végrehajtott $X(x, y)Y$ részecskeátadási reakciónál (X :

2. Célkitűzések

nehéz ionokból álló nyaláb, x : céltárgy, Y : nehézion, y : könnyű részecske) a visszalökődő könnyű töltött részecskék (y) megfigyelésével jelentősen tisztítható a gerjesztett energia spektrum, amihez egy jól szegmentált, kitűnő energiafeloldású és nagy hatásfokú detektorrendszerre volt szükség.

- (b) Egzotikus atommagok gerjesztése során sokszor kell egy vagy több neutronot detektálni, amihez egy nagy hatásfokú, rendkívül jó időfeloldású detektorrendszert kellett megtervezni és megalkotni, mely képes a többneutronos események azonosítására is.
- (c) Az egyik legalapvetőbb technika a neutrongazdag atommagok gerjesztésekor keletkező γ -sugárzás detektálása. Mivel a sugárzást nagy sebességgel mozgó atommagok bocsátják ki, a Doppler-korrekciónak jelentős, ezért gyakran használnak összetett detektorokat, mint például az úgynevezett Clover detektor. Az eszköz válasza nagy energiájú γ -sugárzásra nem volt ismert, melyet meg kellett határozni.

Ez az eszközfejlesztés nemcsak a kutatásaink idején már rendelkezésre álló radioaktív ionnyalábos infrastruktúra (mellyel a fenti kérdéseket megválaszolni kívántuk) szempontjából volt fontos, hanem azért is, mert vizsgálataink alatt elkezdődött az újgenerációs gyorsítókomplexumok tervezése (Németország, Franciaország, Egyesült Államok) és építése (Japán), ami újabb kihívások elé állította a kutatói közösségünket.

3. fejezet

Új tudományos eredmények

1. Szisztematikus vizsgálataink segítségével a stabilitási völgy neutrongazdag oldalán először mutattuk ki, hogy az első gerjesztett állapotból az alapállapotba történő átmenetet mind a bór-, mind pedig a szénizotópokban a magtörzsről lecsatolódtott valencianeutronok uralják; az eredményeket csak csökkentett e_n effektív töltés használatával lehet megmagyarázni. Az anomális e_n értékek alkalmazása korábban csak a neutrongazdag bórizotópok kísérletileg meghatározott alapállapot kvadrupól-momentumának értelmezésekor merült fel [Izumi96, Ogawa03].

A fenti általános megállapításokat alátámasztó és ahhoz kapcsolódó konkrét eredményeinket az alábbi pontokban soroltam föl a megfelelő publikációinkra történő hivatkozásokkal együtt.

- (a) A korábbi kísérletektől [Jewell99, Khan00] független megközelítést, az izospin szimmetriát felhasználva, a protongazdag, 20-as tömegszámú magnéziumizotóp tanulmányozásával megerősítettük a neutronok és protonok nagymértékű ($\frac{N}{Z}$ aránytól jelentősen eltérő) aszimmetrikus viselkedését az ^{20}O atommagban [EZ-15]. Egy másik munkával [Becheva06] párhuzamosan először határoztuk meg az ^{22}O atommagra az első gerjesztett állapothoz tartozó M_n értéket és $\frac{M_n}{M_p}$ arányt, melyekből arra következtettünk, hogy a 14-es neutronszámnál a héj lezáródik [EZ-09]. Erre utaló jelként értelmezték korábban az állapot nagy energiáját és a kis $B(E2)$ értéket [Thirolf00]. Az oxigénizotópoknál tapasztalt kísérleti eredményeket a tömegtartományban

3. Új tudományos eredmények

- mérvadó, neutronokra és protonokra vonatkozó effektív töltések ($e_p=1,3e$, $e_n=0,5e$) [Brown88] és az *USD* effektív kölcsönhatás [Brown06] alkalmazásával a héjmodell keretein belül értelmezni tudtuk [EZ-16].
- (b) A ^{17}B atommag folyékony hidrogén céltárgyon elsőként kivitelezett rugalmatlan szórásának segítségével és az ismert elektromos kvadrupól-momentum felhasználásával megerősítettük, hogy az eredmények értelmezése csak a már kísérletileg korábban is javasolt [Ogawa03], csökkentett e_n effektív töltéssel lehetséges, ami a valencianeutronok magtörzsről történő lecsatolódását igazolja ezen atommag esetén [EZ-05].
- (c) A ^{16}C és ^{20}C atommagok rugalmatlan szórásának analízisével [EZ-03, EZ-12, EZ-14, EZ-16] és élettartam méréssel [EZ-04] elsőként mutattuk ki, hogy a 8-as neutronszámon túl a neutronok és a protonok az első gerjesztett állapotból alapállapotba történő átmenethez anomálisan ($\frac{N}{Z}$ arányt is figyelembe véve) járulnak hozzá, és a mátrixelemek jelentősen eltérnek a Grodzinszabály [Grodzins62] által várttól. A szénizotópokra kapott eredményeket az oxigénizotópokkal ellentétben, és a ^{17}B atommagnál tapasztalttal összhangban csak úgy tudtuk értelmezni, hogy a héjmodellben használt e_n effektív töltést lényegesen lecsökkentettük, amiből itt is a valencianeutronoknak a magtörzsről történő lecsatolódására következtettünk [EZ-16]. A ^{20}C atommagban a $2_1^+ \rightarrow 0_1^+$ átmenet erősségének elsőként kivitelezett mérésével megerősítettük, hogy a szénizotópoknál a valencianeutronok lecsatolódásával párhuzamosan nincs héjzáródás a 14-es neutronszámnál [EZ-16], amire korábban az első gerjesztett állapot alacsony energiája utalt csak [Stanoiu08].
- (d) Először határoztuk meg a ^{21}N atommagban M_n és M_p átmeneti mátrixelemeket, melyek segítségével megerősítettük ezen atommag átmeneti jellegét, azt, hogy a 14-es neutronsám fölött a héjköz fokozatosan csökken a neutronelhullatási vonal felé közeledve a ^{22}O -tól a ^{20}C -ig [EZ-17], amire kizárólag az első gerjesztett állapot energiája utalt korábban [Sohler08].
- (e) Először hajtottunk végre rugalmatlan szórási [EZ-06, EZ-07] és neutronkilökeési reakciót [EZ-23] a nagy érdeklődést kiváltó, kutatásaink kezdetén legnehezebbnek ismert, neutronglóriás ^{19}C atommag szerkezetének megismerése érdekében, és egy ≈ 200 keV-es gerjesztett állapot létét igazoltuk, melyet

korábban csak kétlépéses fragmentációban észleltek [Stanoiu04]. Az állapothoz $3/2^+$ spin/paritás értéket rendeltünk, illetve kizártuk a héjmodell által várt $5/2^+$ izomer állapot kötött létét.

2. A neutrongazdag atommagok között a 20-as neutronszám környékén felfedezett inverziósziget, és az így megjelenő 16-os mágikus neutronszám közelében széleskörű méréseket végeztünk, melyek segítségével először mutattuk meg általánosan, hogy a szigeten tapasztalt nagy deformáció az alacsony energiájú gerjesztések kialakítása során nem jár együtt a neutronok és protonok hozzájárulásának jelentős mértékű eltéréssel. Vizsgálataink segítségével a ^{30}Na atommagot elsőként soroltuk az inverziószigethez, míg a ^{36}Mg atommag esetén az először megmért nukleáris deformációs hossz felhasználásával megerősítettük, hogy az inverziósziget neutrongazdag határa legalább az 24-es neutronszámig terjed, mely megállapítást előttünk csak az első gerjesztett állapot energiájára alapozták [Doornenbal13].

A következtetések alapjául szolgáló és azokhoz kapcsolódó eredményeket az alábbi pontokban foglaltam össze, melyeknél a hozzájuk kötődő cikkeinket is feltüntettem.

- (a) A ^{26}Ne [EZ-13], a ^{28}Ne [EZ-10, EZ-21] és a ^{30}Ne [EZ-21] atommagok vizsgálata során megerősítettük a kísérleteink előtt bizonytalanná vált $N=16$ -os héjzáródás meglétét a neonizotópok között. A ^{26}Ne második gerjesztett állapotának spin/paritására 2^+ javaslattal éltünk a korábban hozzárendelt 0^+ -al szemben a hatáskeresztmetszet analízisének segítségével [EZ-13].
- (b) Elsőként mutattuk ki, hogy a ^{30}Na és a ^{31}Na atommagokban a neutronok és protonok jól korreláltak, az átmeneti mátrixelemek az inverziószigeten vártak megfelelőek [EZ-10]. Ezzel a ^{30}Na atommagot is az inverziószigetre helyeztük, ami korábban az első gerjesztett állapot energiájára alapozva nem volt egyértelmű [Pritychenko02]. A $^{31}\text{Na} \rightarrow ^{30}\text{Na}$ neutronkilökési csatornában egy új átmenetet fedeztünk fel 360 keV energiánál, melyből a ^{31}Na és a ^{30}Na atommagok alapállapotú protonkonfigurációjának eltérésére mutattunk rá [EZ-10].
- (c) Méréseink alapján először bizonyosodott be, hogy a ^{33}Mg és ^{34}Mg atommagokban a protonok és a neutronok szintén jól korreláltak [EZ-10]. A 36-os

3. Új tudományos eredmények

tömegszámú magnéziumizotóp esetén általunk elsőként meghatározott nukleáris deformációs hossz [EZ-21] megerősíti azt az első gerjesztett állapot energiája alapján tett következtetést [Doornenbal13], hogy ez az atommag is az inverziósziget tagja.

3. A kutatási profilunk fontos részét képező eszközfejlesztés terén, mely a radioaktív ionnyalábokat előállító gyorsítópark új generációjának minden jelentős centrumban (RIKEN, GSI, GANIL, NSCL-MSU) jelentkező aktuális igényeinek kielégítést célozza a következő eredményeket értük el.

- (a) Kifejlesztettünk és megépítettünk egy 312 darabból álló, 2π térszöget lefedő CsI(Tl) rendszert töltött részecske és γ -sugárzás detektálására [EZ-02, EZ-11]. Kitűnő, 70%-os hatásfokot és 5,5 MeV-es α részecskékre 1,9%-os félértékszélességet értünk el. Az egyes detektorok fénybegyűjtésének eloszlása nagyon kicsi, 4,3%-os félértékszélességet mutat, ami azt jelenti, hogy a gyártást rendkívül kis szórással tudtuk megoldani. 1 MeV-es γ -sugárzásra a félértékszélesség 6% körüli, ami összemérhető az általánosan használt NaI(Tl) detektorokéval. Az ionnyalábtesztek azt mutatták, hogy a részecskediszkriminációt egészen alacsony, 1 MeV körüli értékig el tudjuk végezni. Már éles bevetésben is használtuk a rendszert, amiből tudományos cikkek születtek [Elekes07][EZ-09]. A detektorok hossza (5,5 cm) lehetővé teszi, hogy nagy energiájú könnyű részecskéket is detektáljunk, ezzel az eszköz alkalmazhatósága az új radioaktív ionnyalábot szolgáltató centrumokban is biztosított a jövőben.
- (b) Kifejlesztettünk és megépítettünk egy rezisztív lapú kamrára alapozott gyors-neutron (200 MeV–1000 MeV) repülési idő spektrométert [EZ-18, EZ-19, EZ-20, EZ-22]. Az eszköz különlegessége a rekordméretű hosszában (2 m) rejlik, amire a nagy térszögfedés miatt volt szükség. Elektronnyalábos tesztek azt mutatták, hogy a detektor időfeloldása 100 ps alatt van, ami biztosítja, hogy soha nem látott energiafeloldást érhetünk el az invariánstömeg-spektroszkópia során származtatott gerjesztett energia spektrumában. Neutronnyalábbal végzett mérések azt bizonyították, hogy jó az egyezés a kísérletileg kapott hatásfok és a szimuláció eredménye között. Ez szilárd alapot

adott arra is, hogy a jövőben megépítendő, a már létrehozott detektorelemekből álló, nagyobb rendszer jellemzőinek szimulációját is elvégezzük. Ezek azt mutatták, hogy a detektorrendszer válasza kétneutronos eseményekre is jó, de három- illetve négyneutronos eseményekre is használható kisebb hatásfokkal.

- (c) Megmértük az összetett Clover detektor (melyet például izomerkeresés során használtunk) hatásfokát nagy energián (11 MeV-ig), ami idáig nem volt ismert [EZ-01] (melyet például izomerkeresés során használtunk). Eredményeink azt mutatták, hogy azon eseményeket, melyek az egyes kristályokban a Compton-háttérben jelentkeznek, sokkal hatékonyabban lehet a fotocsúcsba visszaállítani nagy energián, mint amit az addig mért alacsony energiájú detektorválasz alapján vártak. A Clover detektorok nagy energiájú válaszána ismerete nemcsak a magszerkezeti kutatások szempontjából fontos, hanem a nukleáris asztrofizikának is, mivel ezen a területen sok olyan magreakciót kell vizsgálni, amelyben a γ -sugárzás nagy energián jelentkezik.

4. fejezet

Szerepem az eredmények létrejöttében

A kutatások nemzetközi összefogásban jöttek létre, az értekezés alapját adó publikációk sokszerzősek, ezért érdemes szólni arról, hogy melyik mű létrejöttében milyen szerepet töltöttem be.

A radioaktív ionnyalábos kísérletek nagyon drágák, ezért azokban a kutatóintézetekben, ahol ilyen berendezések találhatók, komoly vetélkedés folyik a mérési lehetőségért, a nyalábidőért. A RIKEN kutatóintézetben sem volt ez másként; minden kísérletünket megelőzte egy tervezet benyújtása a programtervező tanácshoz. A tervezetet szakértők bírálták, akiknek a kérdéseire, aggályaira megfelelő választ kellett adni ahhoz, hogy pályázatunk sikeres legyen. A tervezet elkészítésének összehangolását, de az érdemi munka nagy részét is egy szóvivő végzi, aki a tanács előtt ismerteti és megvédi a pályázat állításait. Megnyert nyalábidő esetén, a szóvivőnek a kísérletek alatt és után is meghatározó szerepe van, hisz ő koordinálja a berendezések üzembe helyezését, a kiértékelést felügyeli, és az eredményeket, következtetéseket publikációra előkészíti, az egyeztetések során vezető szerepet vállal.

Az értekezés alapját képező cikkek közül tíz [EZ-05, EZ-06, EZ-07, EZ-08, EZ-09, EZ-10, EZ-14, EZ-16, EZ-17, EZ-23] olyan kísérletből származik, amelyben én voltam a szóvivő. Ezekben nemcsak koordináló szerepet töltöttem be, hanem a munka dandárját is én végeztem a kiértékelés és a publikálás során, kivéve egyet [EZ-23], ahol már inkább csak felügyeltem a kiértékelést, de az eredmények publikálásában és a következtetések

4. Szerepem az eredmények létrejöttében

levonásában is fontos szerepet játszottam.

Egy további cikk [EZ-03] esetében ugyan nem én voltam a szóvivő, hanem Krasznahorkay Attila, de az adatok felvétele után a kiértékelés, az eredmények értelmezése és a publikálás terhe is jórészt az én vállamon nyugodott.

A RIKEN-ben elvégzett többi kísérletben egyrészt egy-egy részfeladatot vállaltam a mérések lebonyolítása során, azaz például felelős voltam egy rendszerkomponens működéséért [EZ-04, EZ-15], én végeztem a szimulációt [EZ-21], vagy a kiértékelés során a csatolt csatornás számolásokat [EZ-12, EZ-15], másrészt pedig részt vettem a cikkekbe került eredmények megvitatásában és a következtetések levonásában.

Az eszközfejlesztésekkel kapcsolatos cikkek létrejöttében is alapvető szerepem volt.

Kalinka Gábor kollégámmal ketten végeztük a CsI(Tl) detektorok összeszerelését és radioaktív forrásokkal történő tesztelését. Én voltam a felelős a szimulációkért illetve ionnyalábbal végzett tesztelésükért [EZ-02, EZ-11], végül pedig a rendszer magfizikai kísérletben történő éles bevetéséért [Elekes07].

A Clover detektorok nagy energiájú válaszána vizsgálatát budapesti együttműködőinkkel összefogva valósítottuk meg, de a méréseket nagyrészt én koordináltam, hisz azokat az MTA Atomki intézetében működő elektrosztatikus gyorsítókon végeztük. A kiértékelést párhuzamosan hajtottuk végre, a publikáció [EZ-01] is a budapesti kollégáinkkal történő egyeztetések során született.

Németországi tartózkodásom alatt azon dolgoztam, hogy egy olcsó, gáztöltésű, gyorsneutron-detektort (0,2-1 GeV) hozzunk létre a Darmstadt-ban megépülő FAIR komplexum számára, amely az európai radioaktív ionnyalábos kutatások központja lesz. Az ehhez elengedhetetlenül szükséges szimulációkat én végeztem, de alapvető szerepet töltöttem be a detektorok megépítése, elektron- és neutronnyalábos tesztelése során is [EZ-18, EZ-19, EZ-20, EZ-22].

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [EZ-01] Z. Elekes, T. Belgya, G. L. Molnár, Á. Z. Kiss, M. Csatlós, J. Gulyás, A. Krasznahorkay, and Z. Máté. *Nucl. Instr. Meth. A*, 503:580 (2003).
- [EZ-02] Z. Elekes, G. Kalinka, Zs. Fülöp, J. Gál, J. Molnár, G. Hegyesi, D. Novák, J. Végh, T. Motobayashi, A. Saito, et al. *Nucl. Phys. A*, 719:C316 (2003).
- [EZ-03] Z. Elekes, Zs. Dombrádi, A. Krasznahorkay, H. Baba, M. Csatlós, L. Csige, N. Fukuda, Zs. Fülöp, Z. Gácsi, J. Gulyás, et al. *Phys. Lett. B*, 586:34 (2004).
- [EZ-04] N. Imai, H. J. Ong, N. Aoi, H. Sakurai, K. Demichi, H. Kawasaki, H. Baba, Zs. Dombrádi, Z. Elekes, N. Fukuda, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 92:062501 (2004).
- [EZ-05] Zs. Dombrádi, Z. Elekes, R. Kanungo, H. Baba, Zs. Fülöp, J. Gibelin, Á. Horváth, E. Ideguchi, Y. Ichikawa, N. Iwasa, et al. *Phys. Lett. B*, 621:81 (2005).
- [EZ-06] Z. Elekes, Zs. Dombrádi, R. Kanungo, H. Baba, Zs. Fülöp, J. Gibelin, Á. Horváth, E. Ideguchi, Y. Ichikawa, N. Iwasa, et al. *Phys. Lett. B*, 614:174 (2005).
- [EZ-07] R. Kanungo, Z. Elekes, H. Baba, Zs. Dombrádi, Zs. Fülöp, J. Gibelin, Á. Horváth, Y. Ichikawa, E. Ideguchi, N. Iwasa, et al. *Nucl. Phys. A*, 757:315 (2005).
- [EZ-08] R. Kanungo, Z. Elekes, H. Baba, Zs. Dombrádi, Zs. Fülöp, J. Gibelin, Á. Horváth, Y. Ichikawa, E. Ideguchi, N. Iwasa, et al. *Phys. Lett. B*, 608:206 (2005).
- [EZ-09] Z. Elekes, Zs. Dombrádi, N. Aoi, S. Bishop, Zs. Fülöp, J. Gibelin, T. Gomi, Y. Hashimoto, N. Imai, N. Iwasa, et al. *Phys. Rev. C*, 74:017306 (2006).

A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [EZ-10] Z. Elekes, Zs. Dombrádi, A. Saito, N. Aoi, H. Baba, K. Demichi, Zs. Fülöp, J. Gibelin, T. Gomi, H. Hasegawa, et al. *Phys. Rev. C*, 73:044314 (2006).
- [EZ-11] Z. Elekes, Zs. Dombrádi, S. Bishop, Zs. Fülöp, J. Gibelin, T. Gomi, Y. Hashimoto, N. Imai, N. Iwasa, H. Iwasaki, et al. *Eur. Phys. J. A*, 27:321 (2006).
- [EZ-12] H. J. Ong, N. Imai, N. Aoi, H. Sakurai, Zs. Dombrádi, A. Saito, Z. Elekes, H. Baba, K. Demichi, Zs. Fülöp, et al. *Phys. Rev. C*, 73:024610 (2006).
- [EZ-13] J. Gibelin, D. Beaumel, T. Motobayashi, N. Aoi, H. Baba, Y. Blumenfeld, Zs. Dombrádi, Z. Elekes, S. Fortier, N. Frascaria, et al. *Phys. Rev. C*, 75:057306 (2007).
- [EZ-14] Z. Elekes, N. Aoi, Zs. Dombrádi, Zs. Fülöp, T. Motobayashi, and H. Sakurai. *Phys. Rev. C*, 78:027301 (2008).
- [EZ-15] N. Iwasa, T. Motobayashi, S. Bishop, Z. Elekes, J. Gibelin, M. Hosoi, K. Ieki, K. Ishikawa, H. Iwasaki, S. Kawai, et al. *Phys. Rev. C*, 78:024306 (2008).
- [EZ-16] Z. Elekes, Zs. Dombrádi, T. Aiba, N. Aoi, H. Baba, D. Bemmerer, B. A. Brown, T. Furumoto, Zs. Fülöp, N. Iwasa, et al. *Phys. Rev. C*, 79:011302 (2009).
- [EZ-17] Z. Elekes, Zs. Vajta, Zs. Dombrádi, T. Aiba, N. Aoi, H. Baba, D. Bemmerer, Zs. Fülöp, N. Iwasa, Á. Kiss, et al. *Phys. Rev. C*, 82:027305 (2010).
- [EZ-18] D. Yakorev, T. Aumann, D. Bemmerer, K. Boretzky, C. Caesar, M. Ciobanu, T. Cowan, Z. Elekes, M. Elvers, D. G. Diaz, et al. *Nucl. Instr. Meth. A*, 654:79 (2011).
- [EZ-19] M. Röder, T. Aumann, D. Bemmerer, K. Boretzky, C. Caesar, T. E. Cowan, J. Hehner, M. Heil, Z. Elekes, M. Kempe, et al. *J. Instr.*, 7:P11030 (2012).
- [EZ-20] Z. Elekes, T. Aumann, D. Bemmerer, K. Boretzky, C. Caesar, T. Cowan, J. Hehner, M. Heil, M. Kempe, D. Rossi, et al. *Nucl. Instr. Meth. A*, 701:86 (2013).
- [EZ-21] S. Michimasa, Y. Yanagisawa, K. Inafuku, N. Aoi, Z. Elekes, Zs. Fülöp, Y. Ichikawa, N. Iwasa, K. Kurita, M. Kurokawa, et al. *Phys. Rev. C*, 89:054307 (2014).

A TÉZISPONTOKHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

- [EZ-22] M. Röder, Z. Elekes, T. Aumann, D. Bemmerer, K. Boretzky, C. Caesar, T. Cowan, J. Hehner, M. Heil, M. Kempe, et al. *Eur. Phys. J. A*, 50:112 (2014).
- [EZ-23] Zs. Vajta, Zs. Dombrádi, Z. Elekes, T. Aiba, N. Aoi, H. Baba, D. Bemmerer, Zs. Fülöp, N. Iwasa, A. Kiss, et al. *Phys. Rev. C*, 91:064315 (2015).

Irodalomjegyzék

- [Becheva06] E. Becheva, Y. Blumenfeld, E. Khan, D. Beaumel, J. M. Daugas, F. Delaunay, Ch-E. Demonchy, A. Drouart, M. Fallot, A. Gillibert, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 96:012501, 2006.
- [Brown88] B. A. Brown and B. H. Wildenthal. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 38:29, 1988.
- [Brown06] B. A. Brown and W. A. Richter. *Phys. Rev. C*, 74:034315, 2006.
- [Chisté01] V. Chisté, A. Gillibert, A. Lépine-Szily, N. Alamanos, F. Auger, J. Barrette, F. Braga, M. D. Cortina-Gil, Z. Dlouhy, V. Lapoux, et al. *Phys. Lett. B*, 514:233, 2001.
- [Dombrádi09] Zs. Dombrádi. Az atommagok héjszerkezetének változása a neutron-instabilitási vonal közelében, 2009. MTA Akadémiai doktori értekezés.
- [Doornenbal13] P. Doornenbal, H. Scheit, S. Takeuchi, N. Aoi, K. Li, M. Matsushita, D. Steppenbeck, H. Wang, H. Baba, H. Crawford, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 111:212502, 2013.
- [Détraz79] C. Détraz, D. Guillemaud, G. Huber, R. Klapisch, M. Langevin, F. Naulin, C. Thibault, L. C. Carraz, and F. Touchard. *Phys. Rev. C*, 19:164, 1979.
- [Elekes07] Z. Elekes, Zs. Dombrádi, N. Aoi, S. Bishop, Zs. Fülöp, J. Gibelin, T. Gomi, Y. Hashimoto, N. Imai, N. Iwasa, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 98:102502, 2007.
- [Grodzins62] L. Grodzins. *Phys. Lett.*, 2:88, 1962.

IRODALOMJEGYZÉK

- [Hofstadter53] R. Hofstadter, H. R. Fechter, and J. A. McIntyre. *Phys. Rev.*, 92:978, 1953.
- [Izumi96] H. Izumi, K. Asahi, H. Ueno, H. Okuno, H. Sato, K. Nagata, Y. Hori, M. Adachi, N. Aoi, A. Yoshida, et al. *Phys. Lett. B*, 366:51, 1996.
- [Jewell99] J. K. Jewell, L. A. Riley, P. D. Cottle, K. W. Kemper, T. Glasmacher, R. W. Ibbotson, H. Scheit, M. Chromik, Y. Blumenfeld, S. E. Hirzebruch, et al. *Phys. Lett. B*, 454:181, 1999.
- [Khan00] E. Khan, Y. Blumenfeld, Nguyen Van Giai, T. Suomijärvi, N. Alamanos, F. Auger, G. Colò, N. Frascaria, A. Gillibert, T. Glasmacher, et al. *Phys. Lett. B*, 490:45, 2000.
- [Millener83] D. J. Millener, J. W. Olness, E. K. Warburton, and S. S. Hanna. *Phys. Rev. C*, 28:497, 1983.
- [Navin00] A. Navin, D. W. Anthony, T. Aumann, T. Baumann, D. Bazin, Y. Blumenfeld, B. A. Brown, T. Glasmacher, P. G. Hansen, R. W. Ibbotson, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 85:266, 2000.
- [Ogawa03] H. Ogawa, K. Asahi, K. Sakai, T. Suzuki, H. Izumi, H. Miyoshi, M. Nagakura, K. Yogo, A. Goto, T. Suga, et al. *Phys. Rev. C*, 67:064308, 2003.
- [Otsuka01] T. Otsuka, R. Fujimoto, Y. Utsuno, B. A. Brown, M. Honma, and T. Mizusaki. *Phys. Rev. Lett.*, 87:082502, 2001.
- [Ozawa01] A. Ozawa, O. Bochkarev, L. Chulkov, D. Cortina, H. Geissel, M. Hellstroem, M. Ivanov, R. Janik, K. Kimura, T. Kobayashi, et al. *Nucl. Phys. A*, 691:599, 2001.
- [Pritychenko02] B. V. Pritychenko, T. Glasmacher, P. D. Cottle, R. W. Ibbotson, K. W. Kemper, K. L. Miller, L. A. Riley, and H. Scheit. *Phys. Rev. C*, 66:024325, 2002.

-
- [Sohler08] D. Sohler, M. Stanoiu, Zs Dombrádi, F. Azaiez, B. A. Brown, M. G. Saint-Laurent, O. Sorlin, Yu.-E. Penionzhkevich, N. L. Achouri, J. C. Angélique, et al. *Phys. Rev. C*, 77:044303, 2008.
- [Stanoiu04] M. Stanoiu, F. Azaiez, F. Becker, M. Belleguic, C. Borcea, C. Bourgeois, B. A. Brown, Z. Dlouhý, Zs Dombrádi, Zs Fülöp, et al. *Eur. Phys. J. A*, 20:95, 2004.
- [Stanoiu08] M. Stanoiu, D. Sohler, O. Sorlin, F. Azaiez, Zs Dombrádi, B. A. Brown, M. Belleguic, C. Borcea, C. Bourgeois, Z. Dlouhy, et al. *Phys. Rev. C*, 78:034315, 2008.
- [Stevenson02] P. D. Stevenson, J. Rikowska Stone, and M. R. Strayer. *Phys. Lett. B*, 545:291, 2002.
- [Suzuki95] T. Suzuki, H. Geissel, O. Bochkarev, L. Chulkov, M. Golovkov, D. Hirata, H. Irnich, Z. Janas, H. Keller, T. Kobayashi, et al. *Phys. Rev. Lett.*, 75:3241, 1995.
- [Suzuki99] T. Suzuki, R. Kanungo, O. Bochkarev, L. Chulkov, D. Cortina, M. Fukuda, H. Geissel, M. Hellström, M. Ivanov, R. Janik, et al. *Nucl. Phys. A*, 658:313, 1999.
- [Tanihata85] I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, Y. Shida, N. Yoshikawa, K. Sugimoto, O. Yamakawa, T. Kobayashi, and N. Takahashi. *Phys. Rev. Lett.*, 55:2676, 1985.
- [Tanihata92] I. Tanihata, D. Hirata, T. Kobayashi, S. Shimoura, K. Sugimoto, and H. Toki. *Phys. Lett. B*, 289:261, 1992.
- [Tanihata01] I. Tanihata. *Nucl. Phys. A*, 682:114, 2001.
- [Terasaki97] J. Terasaki, H. Flocard, P.-H. Heenen, and P. Bonche. *Nucl. Phys. A*, 621:706, 1997.
- [Thibault75] C. Thibault, R. Klapisch, C. Rigaud, A. M. Poskanzer, R. Prieels, L. Lesard, and W. Reisdorf. *Phys. Rev. C*, 12:644, 1975.

IRODALOMJEGYZÉK

- [Thirolf00] P. G. Thirolf, B. V. Pritychenko, B. A. Brown, P. D. Cottle, M. Chromik, T. Glasmacher, G. Hackman, R. W. Ibbotson, K. W. Kemper, T. Otsuka, et al. *Phys. Lett. B*, 485:16, 2000.
- [Utsuno99] Y. Utsuno, T. Otsuka, T. Mizusaki, and M. Honma. *Phys. Rev. C*, 60:054315, 1999.
- [Warburton90] E. K. Warburton, J. A. Becker, and B. A. Brown. *Phys. Rev. C*, 41:1147, 1990.