

Szakmai beszámoló (zárójelentés)

az "A kvantummechanikai forgás egy sajátos formája: a forgó atommag"
című, T046901 nyilvántartási számú OTKA-pályázathoz

A pályázat témája az atommagok forgásával kapcsolatos kutatások jelenleg aktuális három részterületének vizsgálata volt: *az atommagok királis forgásának kimutatása és tanulmányozása; az atommagokban a forgási sávok lezáródásának a tanulmányozása; és a stabilitási sávtól távoli, egzotikus atommagok deformáltságának tanulmányozása.*

Egy mikroszkopikus rendszer elfordulása csak akkor definiálható, ha az "deformált", vagyis nem szimmetrikus a forgástengelyre nézve. Így csak a deformált mikroszkopikus rendszerek képesek forogni. Például a gömbszimmetrikus atom nem foroghat, míg a nem gömbszimmetrikus molekulák igen. Valóban a molekulák forgása volt az első kísérletileg megfigyelt kvantummechanikai forgás.

Az atommag forgása azonban lényegesen különbözik a molekulától. A molekulában az atommagok stabil, időben állandó vázat alkotnak, amit a forgásból eredő inerciaerők nem nagyon befolyásolnak. Az atommagban viszont ilyen váz nincs, a deformációt a mozgó nukleonok átlagos anyageloszlásának nem izotróp jellege hozza létre. Így a forgás az inerciaerőkön keresztül hat a deformációt meghatározó belső mozgásra, aminek megváltozása a deformáció megváltoztatásán keresztül visszahat a forgásra. Ezért az atommag forgása a kvantummechanikai forgás olyan új jelenségeit mutathatja, amiket a molekula forgása nem mutat, tehát tanulmányozása segít alaposabban megérteni, hogy a véges fermion rendszerek milyen körülmények között és hogyan foroghatnak. Az atommagok forgása nemcsak a már ismert deformált magtartományokban jelentkezhet, hanem az egzotikus, a stabilitási sávtól távoli, eddig még fel nem tárt deformált tartományokban is. Ezért az egzotikus atommagok deformációjának vizsgálata fontos eleme az atommag-forgás kutatásának.

A Kutatási megbízási szerződésben szereplő munkaterv kitűzött céljait elértük, bizonyos területeken meg is haladtuk. A pályázat ideje alatt a résztvevők személyében változás nem történt. A költségvetés tervezett globális keretszámait tartottuk. Kétszer kértük a kiemelt jogcímelek közötti átcsoportosítás lehetőségét, valamint kértük a kutatás befejezési határidejének a módosítását. Ezekhez az OTKA Műszaki és Természettudományi Kollégiuma minden esetben hozzájárult.

Az eredményeket széles nemzetközi együttműködésekben értük el, amelyekben az esetek többségében meghatározó szerepünk volt. A célok eléréséhez a jelen pályázat mellett más témaszámú OTKA pályázatok segítségét is igénybe vettük, ezért a megfelelő közleményekben a jelen pályázat témaszáma mellett az eredmény elérésében szintén segítő más OTKA témaszámot is szerepeltettük.

Az egyes részterületeken elért eredményeket az alábbiakban részletezem.

Az atommagok királis forgásával kapcsolatos eredmények:

A háromtengelyűen deformált forgó atommagok esetén a királis szimmetria spontán sérülésének lehetősége a '90-es évek végén merült fel, és hamarosan kísérleti jelölteket is találtak az ezt jellemző királis dublett forgási sávokra az A~130-as magtartomány több atommagjában és a ¹⁰⁴Rh-ban. Kiderült, hogy az A~130-as magtartományban a királis forgást mutató atommagok "királis sziget" alkotnak, melyben a közepén lévő stabilan királis magokat "királis vibrációt" mutató atommagok

veszik körül. A jelen pályázat keretében célul tűztük ki királis dublett sávok keresését a ^{104}Rh -körüli atommagokban annak kiderítésére, hogy egy új királis szigetről van-e szó, és ha igen akkor a királis tulajdonságai milyenek és hogy viszonyulnak az $A\sim 130$ -as magtörmányben észleltekhöz. Ezen vizsgálatokkal a következő eredményeket értük el.

Fúzió-párolgás típusú magreakciókban előállítottuk és nemzetközi együttműködésben használt nagydetektor-rendszerekkel (EUROBALL, GAMMASPHERE, stb) kísérletileg tanulmányoztuk a ^{104}Rh körüli ^{102}Rh , ^{103}Rh , ^{104}Rh , ^{105}Rh , ^{106}Rh , ^{102}Ru , ^{105}Ag , ^{109}Ag atommagok, valamint a ^{79}Kr és ^{80}Br atommagok nagyspinű gerjesztett állapotait. Ezeket forgási sávokba rendeztük és modellszámítások eredményeivel összevetve meghatároztuk a tulajdonságaikat.

Számos új forgási sávot találtunk a fenti atommagokban. Az összes fenti Rh atommagban sikerült királis-jelölt dublett forgási sáv szerkezetet kimutatnunk. Ezzel bizonyítottuk, hogy a dublett sáv szerkezet a ^{104}Rh -ban nem elszigetelt jelenség, hanem a körülötte levő atommagokkal egy új királis szigetet alkot, melyben a királis forgás más belső kvázirészecske konfigurációra épül, mint az $A\sim 130$ -as magtörmányben talált királis sávok. A királis-jelölt dublett sávok léte tehát nem korlátozódik egy meghatározott konfigurációra [2,5,12,23].

A ^{105}Rh -ban talált dublett sáv volt az első három-kvázirészecske konfigurációra épülő egyértelműen királis-jelölt dublett sávként azonosított forgási-sáv rendszer ebben a magtörmányban. Ezzel bizonyítottuk, hogy a királis forgás nem korlátozódik a páratlan-páratlan atommagok két-kvázirészecske konfigurációjú állapotaira, hanem három-kvázirészecske konfigurációjú állapotban is jelentkezik, ha a királis geometria (háromtengelyű magtörzs + részecske típusú kvázirészecske + lyuk típusú kvázirészecske) fennáll [5]. Eredményünk közzélése előtt csak egy ilyen dublett sáv volt ismert a ^{135}Nd -ban a mienknél hiányosabb kísérleti eredményekkel.

A ^{102}Rh , ^{103}Rh , ^{104}Rh és ^{105}Rh atommagokban talált dublett sávok összehasonlításával modellfüggetlen módon arra az eredményre jutottunk, hogy a dublett sávok relatív helyzete, és így a kiralitás jellege gyakorlatilag nem függ a kvázirészecske-konfigurációtól, viszont erősen függ a magtörzstől [23].

A ^{104}Rh és ^{105}Rh magtörzsének megfelelő ^{102}Ru forgási sávjai azt mutatják, hogy ezen atommag háromtengelyűségének mértéke kisebb mint a vizsgált Rh atommagoké [15].

A ^{105}Ag [28], ^{109}Ag atommagokban nem találtunk dublett sávokat, ami valószínűleg azt jelzi, hogy az új királis sziget szélén található. Ugyanígy nem tudtuk kimutatni a kiralitás lehetőségét a még újabb $A\sim 80$ -as magtörmányban vizsgált ^{79}Kr és ^{80}Br esetén.

A ^{103}Rh és ^{104}Rh királis-jelölt dublett sávjaihoz tartozó állapotok életidejét mértük plunger módszerrel annak érdekében, hogy bizonyítsuk a királis forgás tényét. A kísérleti adatok feldolgozása még folyik [27].

A forgási sávok lezáródásával kapcsolatos eredmények:

A mérsékelten deformált atommagok egy különleges tulajdonsága, hogy forgásuk során az egyre növekvő forgási frekvenciával a kollektivitás egyre csökken, az állapot egyre inkább egyrészecske gerjesztéssé válik, ami végül a forgás megszűnéséhez vezet; a forgási sáv lezáródik. A növekvő forgási frekvenciával ugyanis egyre nő a valencianukleonokra ható centrifugális és Coriolis erő, ami egyre inkább a forgástengely irányába állítja be impulzusmomentumaik irányát. Ennek következtében megváltozik az átlagtér alakja, egyre szimmetrikusabb lesz a forgástengelyre nézve. Ez a tehetetlenségi nyomaték csökkenéséhez vezet, ami azt eredményezi, hogy az egyrészecske gerjesztéshez tartozó állapotok energetikailag kedvezőbbé válnak mint a kollektívhez tartozók, így a forgási sáv ezekben folytatódik, és az atommag teljes impulzusmomentuma a betöltött egyrészecske állapotokhoz tartozó impulzusmomentumoknak a Pauli elv által megengedett eredője lesz, aminek a

betöltött állapotoktól függő maximuma van. A jelen pályázat keretében célul tűztük ki lezáródó forgási sávok és sávlezáró állapotok keresését és vizsgálatát az $A \sim 100$ és az $A \sim 130$ magtartományokban. Ezekben a következő eredményeket értük el:

Fúzió-párolgás típusú magreakciókban előállítottuk és nemzetközi együttműködésben használt nagydetektor-rendszerekkel kísérletileg tanulmányoztuk a ^{106}Sb , ^{123}Cs , ^{124}Ba , ^{131}Ce és ^{132}Ce atommagok nagyspinű gerjesztett állapotait. A kísérletileg észlelt állapotokban lezáródó forgási sávokat és sávlezáró állapotokat azonosítottunk a kísérleti eredmények és modellszámítások előrejelzéseinek összevetésére alapozva.

Adott konfigurációhoz tartozó maximális impulzusmomentumú (spinű) állapotok nem csak a forgási sávok esetén érdekesek, hanem az egyrészecke jellegű, vagy kvázi-forgási sávoknál is. Ilyen maximális spinű állapotokat azonosítottunk a ^{106}Sb atommag két különböző konfigurációjú sávjában is [14].

A ^{123}Cs és ^{124}Ba atommagok tartományában modellszámítások előrejelzése szerint az $I=30-35$ spin-tartományban a szabályosan változó forgási sávok mellett szabálytalan energia-spin függéssel rendelkező nem-kollektív sávok megjelenése várható, melyek sávlezáró állapotban végződnek. Mindkét atommag esetén sikerült ezt az előrejelzést kísérletileg igazolni, és sávlezáró állapotokat azonosítani [3,16].

A ^{131}Ce és ^{132}Ce atommagok esetén a szuperdeformált forgási sávok lezáródásának lehetőségét vizsgáltuk. A ^{132}Ce yrast szuperdeformált sávját sikerült kiterjeszteni az eddig elért legnagyobb, ~ 70 egység, spintartományig. Az elért spintartomány még mindig kevés a szuperdeformált sávlezáródás eléréséhez, azonban ebben a tartományban a modellszámításokkal egyezően úgy viselkedik a forgási sáv energia-spin függése, ahogy az a sávlezáródás egyik fő típusa, a sima sávlezáródás esetén várható [13].

Az egzotikus atommagok deformáltságával kapcsolatos eredmények:

Az egzotikus, erősen neutrontöbbletes atommagok különleges tulajdonságokkal rendelkeznek: a nagy neutron többlet miatt neutronbőr vagy neutronglória alakulhat ki, ami befolyásolhatja ezen magok kollektív tulajdonságait. Viszonylag nehezen jósolható meg az is, hogy ezek a magok mikor és hogyan válnak deformálttá. Közismert, hogy az egyszer mágikus ^{12}Be és ^{32}Mg körül egy deformált tartomány alakult ki, amit lokális, véletlen jelenségként értelmeztek. Az erősen neutrontöbbletes atommagok kollektív viselkedésének a feltárására végig vizsgáltuk az $A/Z \sim 3$ vonal mentén fekvő atommagokat $Z=5$ -től $Z=14$ ig. Ezek az atommagok hagyományos stabil nyaláb és céltárgy kombinációval nem érhetőek el. Előállításukhoz közepes energiájú nehézion-nyalábot fragmentáltunk és a keletkező törmelékből elektromágneses szeparációval kiválogattuk a legeg egzotikusabb izotópokat. Ezekkel létrehozott másodlagos reakciókkal vizsgáltuk a kiválasztott magok tulajdonságait. A kísérleteket a francia nemzeti nehézion laboratóriumban, a GANIL-ban és a japán nehézion-fizikai központban, a RIKEN Nishina laboratóriumában végeztük.

Megmértük a magtérképen az $N=8$ és $Z=8$ vonalaktól délkeletre fekvő páratlan tömegszámú atommagok kötött gerjesztett állapotainak energiáit [4,8,10,11]. Rámutattunk, hogy az energiaspektrum a vártnál jobban össze van nyomva ezekben a magokban, ami az effektív neutron-neutron kölcsönhatás renormálásával korrigálható. Folyékony hidrogén céltárgyon inverz kinematikában végzett rugalmatlan szórásban megmutattuk, hogy ezekben a magokban a valencia neutronok eloszlása igen deformált ($\sigma_{\text{en}} \sim 0.6$) [7,8,22]. Összevetve ezeket az eredményeket az elektromágneses tulajdonságokra kapott korábbi adatokkal azt is megmutattuk, hogy a neutronok effektív töltése kb. $0.1e$ -re csökken a szokásos $0.5e$ -ről. Ezek az eredmények konzisztensek azzal a feltételezéssel, hogy a valencia neutronok

lecsatolódnak a magtörzsről és önálló kollektív mozgást végeznek. Ez a viselkedési forma ennek a magtartománynak a specifikuma.

A ^{32}Mg körül kialakult anomális deformált tartomány feltérképezésére és a jelenség megértésére szisztematikusan vizsgáltuk az $N=20$ vonal közelébe eső könnyű neutrontöbbletes magokat. Meghatároztuk a $^{26,27}\text{F}$, $^{25-29}\text{Ne}$ és a ^{23}O atommagok néhány alacsonyenergiás állapotának az energiáját és rugalmatlan szórási kísérletekben megmértük a ^{22}O , $^{26,28}\text{Ne}$, $^{30,31}\text{Na}$ és $^{33,34}\text{Mg}$ atommagok alapállapotú deformációját. A Na és Mg atommagok tömegdeformációja a várakozásnak megfelelően nagynak bizonyult [20], míg a ^{22}O [18] és a ^{26}Ne [26] deformációja kicsi. A kis deformáció egy $N=14$ -es illetve $N=16$ -os alhéjzáródást jelez. A várakozással ellentétben nagy alapállapotú deformációt kaptunk a ^{27}F -ra is [1], ami azt mutatja, hogy a ^{32}Mg körül kialakult deformált tartomány a vártnál kiterjedtebb. A deformáció kialakulásának az a feltételezett oka, hogy a neutron 2-részecske-2-lyuk gerjesztések annyira lesüllyednek, hogy ők alkotják az alapállapotot. Ennek vagy csak a proton-neutron kvadrupól kölcsönhatás az oka, vagy csökken a héjakat elválasztó köz nagysága is a neutrontöbblettel. Ha az utóbbi feltételezés igaz, akkor az $N=20$ vonaltól távolodva is lehet neutron törzsgerjesztésből származó állapotokat találni. A ^{26}F [1] és a ^{27}Ne [17] atommagok spektroszkópiai vizsgálata során zárt törzs feltételezésével nem értelmezhető alacsonyenergiás állapotokat sikerült kimutatni, ami az első közvetett jele volt az $N=20$ héjköz csökkenésének. A ^{23}O transzferreakció vizsgálatában sikerült meghatározni a neutron $s_{1/2}$, $d_{3/2}$ és $p_{3/2}$ állapotok energiakülönbségét [25], ami közvetlenül adja az $N=16$ és 20 héjzáródások nagyságát. Míg az $N=16$ héjzáródás erőssége több mint 4 MeV -nek adódott, addig az $N=20$ héjköz 1.5 MeV -re csökkent, azaz $Z=8$ -nál a héjzáródás $N=20$ -ról $N=16$ -ra tevődött át. Ez az eredmény megmagyarázza, hogy miért találtunk egy deformált magtartományt az egyszerűmágikusnak várt tartomány helyén.

A következő héjzáródás az $N=28$ -nál van. Az elméleti számolások szerint a ^{40}Mg -nál várható, hogy megszűnnek a héjzáródásra utaló jelek és egy új deformált tartomány alakul ki. Radioaktív nyalábkoktól fragmentációjával vizsgáltuk a tartományba eső atommagok szerkezetét. $5\text{ }\mu\text{A}$ -es ^{48}Ca nyalábbal óránként $1\text{ }^{42}\text{Si}$ atommagot tudtunk előállítani, amelyeknek a fele gerjesztett állapotban volt. A legerjesztődésükből származó gamma sugárzás energiáját megmérve kiderült, hogy már a ^{42}Si atommag is erősen deformált [24], azaz az $N=28$ héjzáródás jelei is eltűnnek elegendően nagy neutrontöbblet esetén. A neutrontöbbletes $^{45,47}\text{Ar}$ atommagok transzferreakció-vizsgálata [9,21] azt sugallja, hogy a neutronszám növelésével csökken az $N=28$ héjköz nagysága is.

Összefoglalva: megmutattuk, hogy mind az $N=20$, mind az $N=28$ vonal mentén a csökkenő protonszám irányába haladva egy deformált magtartomány alakul ki. A deformáció létrejöttének az az oka, hogy a neutron egyrészecske energiák változnak a protonszám változásával és ez a változás a stabilitási sáv közelében megismert héjzáródások megszűnéséhez és új héjzáródások keletkezéséhez vezet.