

Szakmai beszámoló az F60348 pályázathoz

Elekes Zoltán

MTA Atommagkutató Intézete, Debrecen

AZ ATOMMAGOK HÉJZÁRÓDÁSAI

Az atommagok héjmodellje kiválóan működik a β -stabilitási sávhoz közel, és a spin-pálya kölcsönhatás segítségével helyesen adja a stabil magok tartományában kísérletileg is megfigyelt mágikus számokat és héjzáródásokat. Azonban már a modell születésekor felmerült a kérdés, hogy mi történik az egyrészesecske-állapotokkal és a mágikus számokkal, ha egy atommagban jelentősen megváltozik a neutronok és a protonok aránya.

A radioaktív ionnyalábok felhasználásával az utóbbi 10-15 évben egyre több adat gyűlt össze arra vonatkozóan, hogy ezek a mágikus számok megváltoznak extrém körülmények között távol a stabilitástól. A pályázat során ehhez kapcsolódóan számos kísérletet végeztünk a 8-as, 20-as, 28-as és 50-es konvencionális mágikus neutronszámok környékén.

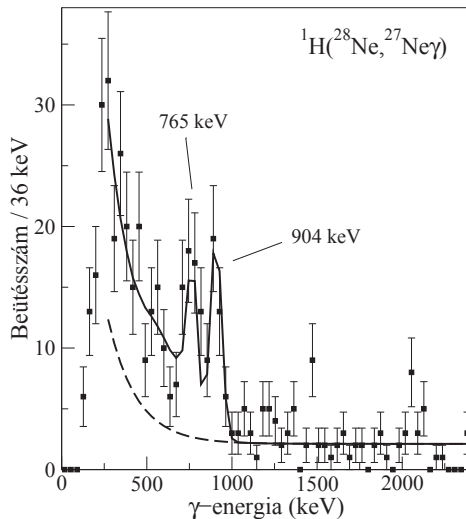
$N=8$

Már a ^{11}Be korai kísérleti vizsgálata során talált $1/2^+$ alapállapotú spin intruder jellege is arra utalt, hogy az $N=8$ -as mágikusság eltűnik a Be izotópoknál [1]. Az általunk végzett kísérletben megmértük az első gerjesztett 2^+ állapot élettartamát, amiből a redukált átmeneti valószínűséget ($B(E2)$) ki lehetett számolni. A $B(E2)$ és az atommag deformációja között a kollektív modellben egyszerű összefüggés áll fenn, melyből a deformációt megkaphatjuk. Mivel a zárt héjaknál a deformációk általában kicsik és a kísérleti érték igen nagyra adódott, az $N=8$ -as héjzáródás megszűnésére következtítettünk a Be izotópoknál [2]. Ezentúl megmértük a 2_1^+ állapotba bomló, második, izomér 0^+ állapot élettartamát és meghatároztuk a hozzá tartozó $B(E2)$ értéket, melynek héjmodell analízise konzisztens a héjzáródás megszűnésével [3].

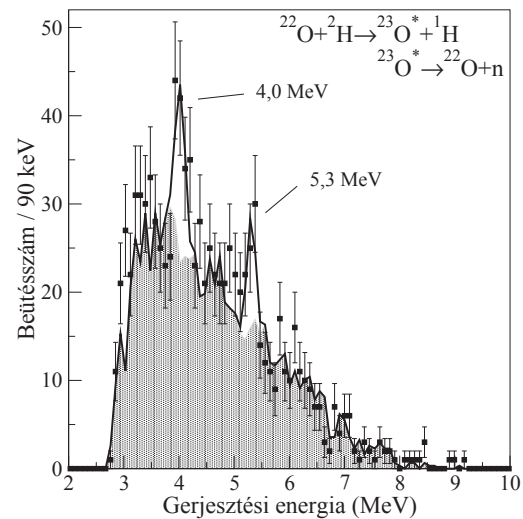
$N=20$

A 20-as a kísérletileg legbehatóbban tanulmányozott mágikus szám a stabilitástól távol. Már direkt tömegmérések során anomáliákat tártak fel a környékén [4], majd később felfedezték az úgynevezett "inverziósziget"-et, ahol az atommagok alapállapotát a deformált, intruder állapotok adják a szférikus, normál állapotok helyett. A kezdeti elméleti számolások azt mutatták [5], hogy csak kilenc atommag viselkedik ilyen furcsán, de ma már egyre több jel utal arra, hogy ez a sziget jóval kiterjedtebb. Jelenleg a jelenséget a legjobban az SDPF-M effektív kölcsönhatást alkalmazó Monte Carlo héjmodell [6] írja le, amiben a 20-as héjzáródás eltűnik.

Ebben a tartományban végzett kísérleteinkben a neon és oxigén izotópokra koncentráltunk. Neutronkilökési reakcióban γ -spektroszkópiai módszerekkel két alacsonyan fekvő, gerjesztett állapotot azonosítottunk (1. ábra), melyeket csak úgy sikerült elméletileg értelmezni, ha a 20-as héjköz kicsi, azaz közvetve a 20-as mágikusság eltűnését állapítottuk meg [7].



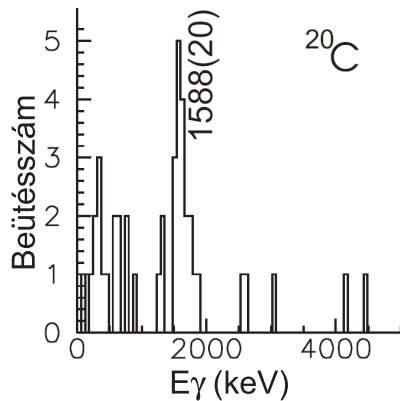
1. ábra. Az ${}^1\text{H}({}^{28}\text{Ne}, {}^{27}\text{Ne})$ reakcióból származó Doppler-korrigált γ -spektrum



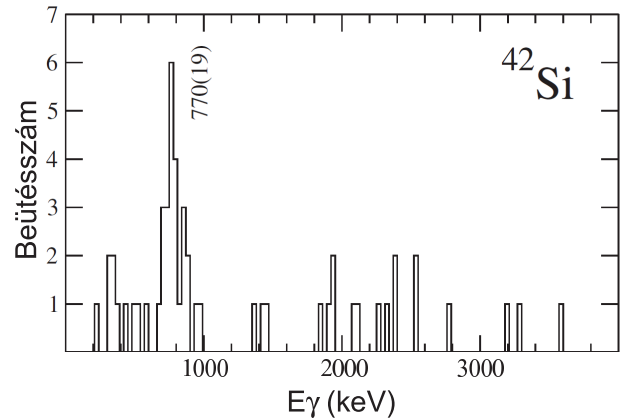
2. ábra. Az ${}^{23}\text{O}$ atommag gerjesztési energia spektruma, melyet a háttérspektrum (szürkén árnyékolt) és Gauss függvények összegével illesztettünk, amit folytonos vonal ábrázol

Azonban közvetlen bizonyítékot is szeretnénk volna találni az $N=20$ -as héjköz lecsökkenésére, amit például az egyrészeske állapotok pozíciójának mérésével szolgáltatathattunk a ${}^{23}\text{O}$ atommag vizsgálata során. Ezt a ${}^{22}\text{O}(d,p){}^{23}\text{O}$ nukleonátadási reakció felhasználásával végeztük inverz kinematikában [8]. A lazán kötött deuteronban lévő neutron a reakcióban az $1d_{5/2}$ állapot fölött elhelyezkedő valamelyik pályára beépült létrehozva az ${}^{23}\text{O}$ atommag alapállapotát vagy gerjesztett állapotait, egy proton pedig eltávozott. Így közvetlenül letapogatható volt a neutron egyrészeske spektrum és meghatározható az $N=20$ -as és $N=16$ -os héjköz is. Korábbi mérésekből ismert volt, hogy az ${}^{23}\text{O}$ atommagnak kizárólag az alapállapota kötött, ezért a létrejövő gerjesztett állapotok azonnal elbomlottak, így reakciótermékként egy protont, egy neutront és egy ${}^{22}\text{O}$ -t kaptunk, melyeket detektálni kellett. A protonok monitorozásában itt kapott szerepet és élesben először alkalmaztuk az ATOMKI-RIKEN közös fejlesztésű, CsI(Tl) kristályokból épített rendszert [9]. Az ${}^{23}\text{O}$ atommag gerjesztési energia spektrumát, mely a 2. ábrán látható, a ${}^{23}\text{O}$ bomlásakor kirepülő neutron és ${}^{22}\text{O}$ izotóp impulzusvektorából rekonstruáltuk. Két csúcsot figyeltünk meg 4 MeV-nél és 5,3 MeV-nél. Az ${}^{23}\text{O}$ alapállapotát a neutron $s_{1/2}$ pályával azonosították korábban, ezért a kísérleti, alacsonyabb energiás csúcsot nagy biztonsággal a neutron $d_{3/2}$ pályához köthettük. Az 5,3 MeV-es csúcs természetéről ugyan nem tudtunk egyértelműen nyilatkozni, de biztosan az $N=20$ -as héjközön túl található, valamelyik neutronpályához ($f_{7/2}, p_{3/2}$) rendelhető. Ez azt jelenti, hogy kialakult egy nagy, körülbelül 4 MeV-es $N=16$ -os héjköz, míg az $N=20$ -as 1,3 MeV-esre csökkent, azaz a 20-as szám helyett a stabilitási sávtól távol a 16-ost találtuk mágikusnak.

Az $N=16$ -os mágikusságot megvizsgáltuk a ${}^{26}\text{Ne}$ izotóp tanulmányozása során is. γ -spektroszkópai módszerekkel elkészítettük az ólom céltárgyon rugalmatlanul szóródott ${}^{26}\text{Ne}$ atommagok szögeloszlását, melyet csatolt csatornás számítógépes programmal analizáltunk, így a deformációt meg tudtuk határozni [10]. Ennek a deformációnak a mértéke konzisztens



3. ábra. Radioaktív ionnyaláb fragmentációs reakciójából származó Doppler-korrigált ^{20}C γ -spektrum



4. ábra. Radioaktív ionnyaláb fragmentációs reakciójából származó Doppler-korrigált ^{42}Si γ -spektrum

a 16-os neutron héjzáródással.

Az "inverziósziget" néhány atommagjában, $^{30,31}\text{Na}$, $^{33,34}\text{Mg}$, meghatároztuk a neutronok és protonok deformációját inverz (p,p') reakció segítségével és korábbi Coulomb-gerjesztéses kísérletek eredményének felhasználásával [11]. Azt találtuk, hogy ezek az izotópok igen erősen deformáltak, ahogy az a többi inverziószigeten található atommag esetén is fennáll, és a neutronok és protonok eloszlása fázisban van, azaz a kísérleti bizonytalanságon belül deformációjuk azonos.

Kísérletileg nemcsak az 16-os neutronsám mágikus jellegét sikerült kimutatni, hanem ugyanez derült ki például a neutrongazdag oxigén izotópok tanulmányozása során az $N=14$ -ről is [12]. Azonban kísérleteink arra is rámutattak, hogy a helyzet ennél sokkal bonyolultabb, ugyanis a ^{20}C atommag első gerjesztett állapotát igen alacsonyan találtuk meg fragmentációs reakcióban (3. ábra), γ -spektroszkópia felhasználásával, ami arra utal, hogy a 14-es héjzáródást a stabilitástól még távolabb más effektusok is befolyásolják [13].

$N=28$

A 28-as az első mágikus szám, melynek jelentkezéséért a spin-pálya kölcsönhatás a felelős. Ennek a kölcsönhatásnak a csökkenését állapították meg részecske-átadásos (d,p) reakcióban az argon izotópok tanulmányozása során [14]. Azonban egy indirekt, proton kilökési hatáskeresztmetszet mérésből [15] úgy tűnt, hogy a szilícium izotópoknál nem ez a helyzet, és a 28-as héjzáródás stabil, a vizsgált ^{42}Si nem deformált, gömb alakú. Azonban az általunk végzett fragmentációs reakcióból származó γ -spektrumban az első gerjesztett állapot nagyon alacsony energián jelent meg (4. ábra) a ^{20}C izotóphoz hasonlóan, és ebből megint erőteljes deformációra és a 28-as héjzáródás megszűnésére következtethetünk [16].

$N=50$

Már megkezdődtek az első lépések az 50-es mágikusság sorsának felderítésére, de mindaddig a kísérleti berendezések korlátozták a lehetőségeket. Az általunk végzett mérésben

a ^{80}Ge izotóp első és második 2^+ gerjesztett állapotához tartozó redukált átmeneti valószínűséget határoztuk meg rugalmatlan szórás kísérletben ólom céltárgyat felhasználva és γ -spektroszkópiai módszereket alkalmazva [17]. Mivel a $B(E2)$ értékeket sikerült konvencionális héjmodell számolásokkal értelmezni, ami normál héjzáródást feltételez 50-nél, közvetve az 50-es mágikusság megmaradására következtettünk a germánium izotópoknál.

A PROTONOK ÉS NEUTRONOK SZABADSÁGI FOKA AZ ATOMMAGOKBAN

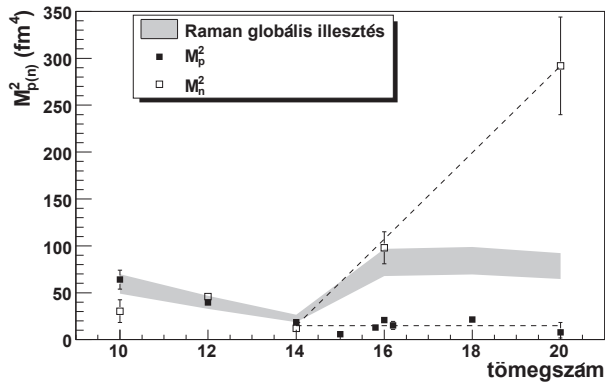
A héjszerkezet drámai változásain túl, a stabilitástól távol más, anomális jelenségek is felbukkannak. Ilyenek például neutronglória [18] vagy az erős, alacsonyenergiás, elektromos dipólus gerjesztések megjelenése [19]. Ez a néhány neutrongazdag izotópra jellemző $E1$ erősségek eloszlás jelentősen eltér a normál atommagoktól, ahol a dipólus óriásrezonancia a domináns 10-20 MeV gerjesztési energiánál. Ezeket az alacsony energián megjelenő rezonanciákat sokan a neutronglória vagy a neutronbőr magtörzsszel szembeni rezgésével magyarázzák és pygmy rezonanciának hívják. Kísérletünkben a ^{26}Ne atommag $B(E1)$ értékét mértük meg, úgy, hogy ólom céltárgyat bombáztunk ^{26}Ne ionnyalábbal [20]. Azaz a $^{26}\text{Ne} \rightarrow ^{25}\text{Ne} + n$ csatornát használtuk arra, hogy invariáns tömeg módszerrel rekonstruáljuk az $E1$ erősséget. A populált pygmy állapotok ^{25}Ne leánymagba történő bomlásának mintázatát is meghatároztuk először egy neutrongazdag atommagban.

Néhány éve nemcsak a nagyon lazán, de a mélyebben kötött neutronok anomális viselkedését is megfigyelték: a valencianeutronok lecsatolódását a magtörzsről az oxigén [21], bór [22] és szén [23, 24] izotópok között, ami az effektív töltések standard értékektől való jelentős eltéréseben jelentkezett. Azonban a jelenség létét megkérdőjelezték például a ^{16}C atommag esetén [25]. A ^{16}C atommagon történt korábbi rugalmatlan szórás mérések [24, 26] más módszerrel végzett analíziséből azonban a neutronlecsatolódást megerősítettük [27]. Azonban ennél még tovább mentünk, és a γ -spektroszkópiával elérhető, stabilitástól legtávolabbi ^{20}C atommagot is megvizsgáltuk ebből a szempontból. Ólom és hidrogén céltárgyakon történt rugalmatlan szórás reakciók hatás keresztmetszetének analíziséből a neutronlecsatolódás jelenlétét mutattuk ki [28]. Ez a legjobban 2_1^+ állapothoz tartozó neutron és proton átmeneti valószínűségek (M_n^2 , M_p^2) egymástól és a Raman-féle globális trendtől [29] való jelentős eltéréseiből látszik a 14-es neutronsám fölött (5. ábra). A jelenséget az ^{20}O atommag tükörmagja, a ^{20}Mg izotóp rugalmatlan szórás reakciójának analízise során is kimutattuk [30]. Kijjebb lépve a stabilitástól megvizsgáltuk, hogy ^{22}O -nél is felép-e a neutronlecsatolódás [31]. Ezt $(d,d'\gamma)$ reakció felhasználásával hajtottuk végre az első gerjesztett állapot populálásával és azt mutattuk ki egy korábbi ólom célárgyon történt rugalmatlan szórás reakció eredményével kombinálva, hogy a neutronok és a protonok korreláltak és kicsi az eloszlásuk deformációja. Ez egybevág az $N=14$ -es héjzáródás létevel oxigén izotópoknál.

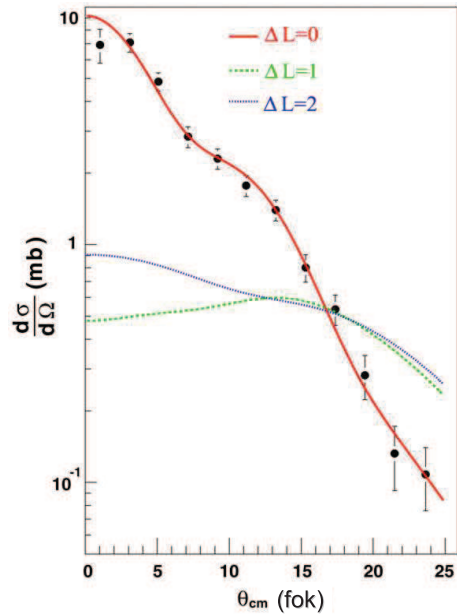
TOVÁBBI EREDMÉNYEK

A ^{13}B egy kevésbé tanulmányozott atommag, melyben a 4,83 MeV-es állapot spinjét és paritását sikerült meghatároznunk proton transzfer reakció DWBA analízisével (6. ábra) [32]. Ezt az $1/2^+$ állapotot intruderként azonosítottuk, mely az atommag deformációjára utal.

Az 1,809 MeV-es γ -csúcsának detektálásával a ^{26}Al eloszlása feltérképezhető a csillagközi térben. Ez az izotóp azért fontos, mert a még folyó nukleoszintézisről ad információt. Ebben a folyamatban a $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ reakció nagyon lényeges, melyet Coulomb disszociációs



5. ábra. Kísérleti M_n^2 és M_p^2 értékek a szénizotópok tömegszámának függvényében. A szürke sáv a Raman-féle globális trendet jelöli



6. ábra. A ^{13}B 4,83 MeV-es állapotába történő gerjesztés szögeloszlása. A vonalak DWBA számolásokat jelölnék 0, 1 és 2 átadott impulzusmomentum feltételezésével

kísérletben vizsgáltunk [33]. Meghatároztuk a ^{27}P első gerjesztett állapota széleségének E2 komponensét, melyből arra következtettünk, hogy a $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ reakció nem elhanyagolható szerepet játszik a nehéz novák és röntgen kitörések nukleoszintézisében.

A KUTATÁSOK FOLYTATÁSA

A RIKEN kutatóintézetben, Japánban a radioaktív ionnyalábgvár elkészült és már kijött az első publikált eredmény is [34]. Óriási sikerként könyvelhetjük el, hogy a mi csoportunknak is sikerült már két pályázatra is nyalábidót kapni. Az egyikben a ^{78}Ni -hez közeli páratlan Cu és Ni izotópokat fogjuk vizsgálni és választ keresni arra, hogy mi lesz az $N=50$ -es és $Z=28$ -as héjzáródások sorsa a stabilitástól távol [35]. A másik pályázatban pedig arra szeretnénk választ kapni, hogy a neutron lecsatolódás jelensége fellép-e nehéz atommagoknál is, ezért a neutrongazdag Te izotópokat fogjuk vizsgálat alá venni rugalmatlan szórás reakciókban [36]. Ezenkívül a legutolsó programtervező tanácsülésre is benyújtottunk egy pályázatot, amiben a neutrongazdag fluor izotópok intruder állapotait szeretnénk feltérképezni, melyre nagyon kedvező bírálatokat kaptunk.

-
- [1] I. Talmi and I. Unna, Phys. Rev. Lett. **4**, 469 (1960).
 - [2] N. Imai et al., Phys. Lett. B **673**, 179 (2009).
 - [3] S. Shimoura et al., Phys. Lett. B **654**, 87 (2007).
 - [4] C. Thibault et al., Phys. Rev. C **12**, 644 (1975).

- [5] E. K. Warburton et al., Phys. Rev. C **41**, 1147 (1990).
- [6] Y. Utsuno et al., Phys. Rev. C **60**, 054315 (1999).
- [7] Z. Dombrádi et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 182501 (2006).
- [8] Z. Elekes et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 102502 (2007).
- [9] Z. Elekes et al., Eur. Phys. J. A **27**, 321 (2006).
- [10] J. Gibelin et al., Phys. Rev. C **75**, 057306 (2007).
- [11] Z. Elekes et al., Phys. Rev. C **73**, 044314 (2006).
- [12] M. Stanoiu et al., Phys. Rev. C **69**, 034312 (2004).
- [13] M. Stanoiu et al., Phys. Rev. C **78**, 034315 (2008).
- [14] L. Gaudefroy et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 092501 (2006).
- [15] J. Fridmann et al., Nature **435**, 922 (2005).
- [16] B. Bastin et al., Phys. Rev. Lett. **99**, 022503 (2007).
- [17] H. Iwasaki et al., Phys. Rev. C **78**, 021304(R) (2008).
- [18] I. Tanihata et al., Phys. Rev. Lett. **55**, 2676 (1985).
- [19] T. Nakamura et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 252502 (2006).
- [20] J. Gibelin et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 212503 (2008).
- [21] E. Khan et al., Phys. Lett. B **490**, 45 (2000).
- [22] H. Ogawa et al., Phys. Rev. C **67**, 064308 (2003).
- [23] N. Imai et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 062501 (2004).
- [24] Z. Elekes et al., Phys. Lett. B **586**, 34 (2004).
- [25] M. Wiedeking et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 152501 (2008).
- [26] H. J. Ong et al., Phys. Rev. C **73**, 024610 (2006).
- [27] Z. Elekes et al., Phys. Rev. C **78**, 027301 (2008).
- [28] Z. Elekes et al., Phys. Rev. C **79**, 011302(R) (2009).
- [29] S. Raman et al., At. Data Nucl. Data Tables **78**, 1 (2001).
- [30] N. Iwasa et al., Phys. Rev. C **78**, 024306 (2008).
- [31] Z. Elekes et al., Phys. Rev. C **74**, 017306 (2006).
- [32] S. Ota et al., Phys. Lett. B **666**, 311 (2008).
- [33] Y. Togano et al., Eur. Phys. J. A **27**, 233 (2006).
- [34] P. Doornenball et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 032501 (2009).
- [35] www.nishina.riken.jp/UsersGuide/NP-PAC/3rdPAC.html.
- [36] www.nishina.riken.jp/UsersGuide/NP-PAC/5thPAC.html.