

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Stabilitási sávtól távol eső atommagok
szerkezetének vizsgálata

Juhász Marcell

Témavezető: Dr. Elekes Zoltán



DEBRECENI EGYETEM
Fizikai Tudományok Doktori Iskola

Debrecen, 2023

Bevezetés

A stabilitási sávtól távol eső atommagok – amelyeket *egzotikus atommagoknak* hívunk – vizsgálata napjaink magfizikájának egyik lényeges, gyorsan fejlődő kutatási területe. Az utóbbi évtizedekben a kísérleti eszközök és számítási módszerek fejlődése lehetővé tette az egzotikus atommagok nagyobb pontossággal történő vizsgálatát, ami az atommagok szerkezetének és tulajdonságainak, valamint kölcsönhatásaiknak mélyebb megértéséhez vezetett. Az e területen végzett kutatásoknak továbbá nagy jelentősége van az elemek keletkezési mechanizmusaival kapcsolatos ismereteink bővítését illetően, ugyanis az egzotikus atommagok döntő szerepet játszanak az asztrofizikai folyamatok, például a szupernóva-robbanásokban bekövetkező neutronbefogás vizsgálatában. Doktori munkám során két egzotikus atommag (^{51}Ar [1], ^{63}V [2]) kísérleti vizsgálatát végeztem.

Célkitűzések

Az 1970-es években a neutrongazdag nátriumizotópok tömegének [3], mágneses momentumának [4] és β -bomlásának [5] vizsgálata során felmerült, hogy a konvencionális $N=20$ -as héjzáródás nem érvényesül az egzotikus atommagok között. A tapasztalt anomáliákat elméletileg egy úgynevezett *inverziósziget* megjelenésével magyarázták [6],

amelyhez tartozó atommagokban a normál gömbi konfiguráció helyett az alapállapotot a 20-as héjközön átívelő kétrészecske-kétlyuk gerjesztés, deformált konfiguráció dominálja úgy, hogy a 20-as héjzáródás nagysága kicsit csökken, de megmarad. Erre a szigetre eredetileg kilenc atommagot helyeztek, amelynek közepét a ^{32}Na képezte. Azonban kicsit később egy másik, japán elméleti megközelítéssel, Monte-Carlo diagonalizációs technikával [7] arra jutottak, hogy ennek a szigetnek a határai nem olyan élesek, mint ahogyan azt az első értelmezés állította, ugyanis ez a munka az egyrészecske-állapotok átrendeződését, a 20-as héjzáródás megszűnését és egy új, a 16-os mágikus neutronszám megjelenését feltételezte. Ennek következményeként nagy erővel indult meg a héjzáródások átrendeződésének és az inverziósziget tulajdonságainak kísérleti és elméleti vizsgálata, amelynek remek összefoglalását találhatjuk Otsuka és munkatársai által néhány évvel ezelőtt publikált tanulmányában [8].

1. Az ^{51}Ar atommag

A nem-konvencionális 32-es neutronszám mágikusságát az egzotikus atommagok között – amelyet a japán iskola javasolt – számos kísérlet igazolta a króm- [9, 10], a titán- [11, 12], a szkandium- [13], a kalcium- [14–16], a kálium- [17] és az argonizotópok [18] esetén. Ezen túl, a körülbelül 20 évvel ezelőtt megjósolt [19] 34-es neutronszámánál is felfedeztek mágikusságra utaló jeleket a kalcium- [20–22] és az argonizotópok [23] esetén. Azon-

ban ez a héjzáródás a króm- [9, 10], a titán- [11, 24] és a szkandiumizotópoknál [25] nem jelentkezett.

A ^{53}Ca atommagot, amelynek neutronszáma éppen a 32-es és 34-es között helyezkedik el, β -bomlásban [26], multinukleon- [20] és neutronkiütési [22] reakcióban is vizsgálták. A megfigyelt két alacsonyenergiás gerjesztett állapotot ($3/2_1^-$, $5/2_1^-$) rendre a nagy 32-es és 34-es héjközön történő neutrongerjesztéssel sikerült értelmezni. Az ^{53}Ca atommagból két protont eltávolítva az ^{51}Ar atommaghoz jutunk, amely, analóg módon, kiváló terepet nyújt a két héjzáródás vizsgálatára. Ezért célunk ezen atommag alacsonyenergiás nívósémájának a felderítése volt.

2. A ^{63}V atommag

Az elsőként megfigyelt, 20-as konvencionális héjzáródáshoz kapcsolódó inverziósziget után újabb szigeteket fedeztek fel, és ma már inkább inverziós szigetvilágról beszélhetünk, amelynek, úgy tűnik, az elméleti háttérét is értjük [27]. A 40-es alhéjzáródásnál a vasizotópok kísérleti vizsgálata mutatott rá először egy inverziósziget léteire [28]. Majd egy elméleti munka jelölte ki ennek a szigetnek a határait a $Z=22-26$, $N=38-42$ tartományban. Hasonlóan a 20-as konvencionális héjzáródásnál található inverziószigethez, az izotópláncokat nyitott protonhéjak jellemzik, ami

lehetőséget ad kvadrupól deformáció kialakítására. Ahogyan protonokat veszünk el a stabilitásközeli ^{68}Ni atommagból az $f_{7/2}$ pályáról a neutron $f_{5/2}$ és $g_{9/2}$ pályák között a távolság lecsökken így kialakítva a legnagyobb deformációt a ^{64}Cr atommagban. Az elmúlt 10 évben számos kísérletet hajtottak végre a nuklidtérképen a ^{68}Ni alatti tartományban a kobalt- [29, 30], a vas- [31–33], a mangán- [34, 35], a króm- [36–38] és a titánizotópok [39–41] között.

A 40-es izotónokat tekintve, a ^{68}Ni atommagtól indulva és belőle protonokat elvéve, kísérletileg is sikerült kimutatni a kollektivitás növekedését, ami a maximumát a ^{64}Cr atommagban érte el körülbelül $\beta_2=0,3$ kvadrupól deformációs paraméterrel. A neutronelhullatási vonal felé továbbhaladva a deformáció csökkenését figyelték meg összhangban az elméleti előrejelzésekkel. Azonban a 40-es neutronszám környékén a vanádiumizotópokra igen kevés spektroszkópiai információ állt rendelkezésre: kizárólag az alapállapotok felezési ideje ismert $N \geq 38$ esetén és egy izomer állapot a ^{64}V atommagban [37]. Ezért célul tűztük ki a 40 neutronnal rendelkező ^{63}V atommag alacsonyenergiás gerjesztett állapotainak feltérképezését és deformációjának meghatározását, hogy megállapítsuk vajon az inverziószigethez tartozik-e.

A kísérlet ismertetése

A kísérlet megvalósítása a RIKEN Nishina Center és a To-kiói Egyetem által üzemeltetett Radioactive Isotope Beam Factory létesítményben történt, amely kifejezetten radioaktív izotópokból álló nyalábok előállítására épült. A kísérlet során több részecskegyorsító egymás utáni alkalmazásával ^{70}Zn ionokat gyorsítottak 345 MeV/u energiára, amelyek 10 mm vastagságú ^9Be céltárggyal ütköztek. A nagyenergiájú ütközés következtében a ^{70}Zn atommagokról nukleonok szakadtak le. Ez a fragmentációs reakció sokféleképpen végbe mehet, így számos különböző atommag keletkezett, többek között ^{51}Ar és ^{63}V . Az atommagok elkülönítése és azonosítása a BigRIPS izotópszeparátorban történt a repülési idejüket, pozíciójukat és energiaveszteségüket mérő detektorok segítségével. A protonütközéses magreakciók folyékony hidrogén céltárgyban jöttek létre, amelyet egy időprojekciós kamra vett körül a reakció pontos helyének meghatározásának céljából. Ezt a konstrukciót NaI(Tl) szcintillátor kristályok vették körbe, amelyek a reakciók során keletkezett atommagok kötött gerjesztett állapotaiból származó γ -fotonokat érzékelték. A γ -detektorrendszer hatásfokát és válaszfüggvényét szimulációval határoztam meg. A reakciótermékek fizikai jellemzőinek vizsgálatára a SAMURAI berendezés szolgált, amelyet egy hatalmas dipólus terű mágnes és további detektorok alkotnak. Ilyen detektorok például

a részecskeenergia mérésére alkalmas plasztik szcintillátorok, amelyeket az atommagok nem kötött gerjesztett állapotainak meghatározására használtunk invariáns tömeg módszerrel alkalmazásával.

Tudományos eredmények

A RIKEN kutatóintézetben elvégzett kísérlet analízise és értelmezése során a világon elsőként tártam fel az ^{51}Ar és a ^{63}V atommagok alacsonyenergiás szerkezetét.

1. Az ^{51}Ar atommag esetén két átmenetet fedeztem fel γ -spektroszkópiai módszerrel és hat csúcsot azonosítottam az $^{50}\text{Ar}+n$ rendszer relatívenergia-spektrumában. Ennek megfelelően, a partnereink által szolgáltatott héjmodellszámításokkal felhasználásával, két kötött és hat nem-kötött állapot létezését bizonyítottam. A nem-kötött állapotok közül három energiájára csak javaslatot tudtam tenni, mivel ezek az ^{50}Ar atommag első gerjesztett állapotába bomlanak, amely csatornában alacsony volt a beütésszám. A $^{52}\text{K}(p,2p)^{51}\text{Ar}$ nukleonkiütési reakció az ^{51}Ar két kötött állapotára vezető hatáskeresztmetszete nagyon kicsinek adódott, amit az argonizotópokban a 32-es és a 34-es neutronsámoknál jelentkező jelentős héjzáródással tudtam megmagyarázni. Szintén kimutattam, hogy a két

valenciagyuk miatt nem-kötött kollektív és egyrészecke állapotok is megjelennek az ^{51}Ar atommagban.

2. Az ^{63}V atommag inverz kinematikával felvett γ -spektrumában két új átmenetet azonosítottam. Ezeket az együttműködő elméleti kollégák héjmodell számításaival összevetve két kötött, $9/2^-$ és $11/2^-$ spin/paritás értékekkel rendelkező állapot létét javasoltam. Az inelasztikus szórási csatornában ezen állapotok gerjesztési hatáskeresztmetszeteit csatolt csatornás számolások felhasználásával analizáltam, amely nagy kvadrupól deformációs paramétert eredményezett tisztán kvadrupól deformációt feltételezve. Ugyan a valószínűleg jelenlévő hexadekapól deformáció nagyságát nem tudtam meghatározni, de korábbi mérések közelítő eredményeinek a felhasználása szintén nagy kvadrupól deformációhoz vezetett. Tehát a ^{63}V atommagot nagy valószínűséggel az $N=40$ -es héjzáródánál található inverziószigetre tudtam helyezni.

Irodalom

1. Juhász, M. M. és tsai. First spectroscopic study of ^{51}Ar by the (p,2p) reaction. *Physics Letters B* 814. köt., 136108. old. (2021).
2. Juhász, M. M. és tsai. First spectroscopic study of ^{63}V at the $N = 40$ island of inversion. *Phys. Rev. C* 103. köt., 64308. old. (6 2021).
3. Thibault, C. és tsai. Direct measurement of the masses of ^{11}Li and $^{26-32}\text{Na}$ with an on-line mass spectrometer. *Phys. Rev. C* 12. köt., 644–657. old. (1975).

4. Huber, G. *és tsai*. Spins, magnetic moments, and isotope shifts of $^{21-31}\text{Na}$ by high resolution laser spectroscopy of the atomic D_1 line. *Phys. Rev. C* 18. köt., 2342–2354. old. (1978).
5. Détraz, C. *és tsai*. Beta decay of $^{27-32}\text{Na}$ and their descendants. *Phys. Rev. C* 19. köt., 164–176. old. (1979).
6. Warburton, E. K., Becker, J. A. & Brown, B. A. Mass systematics for $A=29-44$ nuclei: The deformed $A\sim 32$ region. *Phys. Rev. C* 41. köt., 1147–1166. old. (1990).
7. Utsuno, Y., Otsuka, T., Mizusaki, T. & Honma, M. Varying shell gap and deformation in $N \sim 20$ unstable nuclei studied by the Monte Carlo shell model. *Phys. Rev. C* 60. köt., 54315. old. (1999).
8. Otsuka, T., Gade, A., Sorlin, O., Suzuki, T. & Utsuno, Y. Evolution of shell structure in exotic nuclei. *Rev. Mod. Phys.* 92. köt., 15002. old. (2020).
9. Bürger, A. *és tsai*. Relativistic Coulomb excitation of neutron-rich $^{54,56,58}\text{Cr}$: On the pathway of magicity from $N=40$ to $N=32$. *Physics Letters B* 622. köt., 29–34. old. (2005).
10. Prisciandaro, J. *és tsai*. New evidence for a subshell gap at $N=32$. *Physics Letters B* 510. köt., 17–23. old. (2001).
11. Dinca, D.-C. *és tsai*. Reduced transition probabilities to the first 2^+ state in $^{52,54,56}\text{Ti}$ and development of shell closures at $N = 32, 34$. *Phys. Rev. C* 71. köt., 41302. old. (2005).
12. Janssens, R. *és tsai*. Structure of $^{52,54}\text{Ti}$ and shell closures in neutron-rich nuclei above 48Ca . *Physics Letters B* 546. köt., 55–62. old. (2002).
13. Xu, X. *és tsai*. Direct mass measurements of neutron-rich ^{86}Kr projectile fragments and the persistence of neutron magic number $N=32$ in Sc isotopes. *Chinese Physics C* 39. köt., 104001. old. (2015).
14. Wienholtz, F. *és tsai*. Masses of exotic calcium isotopes pin down nuclear forces. *Nature* 498. köt., 346–349. old. (2013).
15. Huck, A. *és tsai*. Beta decay of the new isotopes ^{52}K , ^{52}Ca , and ^{52}Sc ; a test of the shell model far from stability. *Phys. Rev. C* 31. köt., 2226–2237. old. (1985).
16. Gade, A. *és tsai*. Cross-shell excitation in two-proton knockout: Structure of ^{52}Ca . *Phys. Rev. C* 74. köt., 21302. old. (2006).
17. Rosenbusch, M. *és tsai*. Probing the $N = 32$ Shell Closure below the Magic Proton Number $Z = 20$: Mass Measurements of the Exotic Isotopes $^{52,53}\text{K}$. *Phys. Rev. Lett.* 114. köt., 202501. old. (2015).
18. Cortés, M. L. *és tsai*. $N = 32$ shell closure below calcium: Low-lying structure of ^{50}Ar . *Phys. Rev. C* 102. köt., 64320. old. (2020).
19. Otsuka, T. *és tsai*. Magic Numbers in Exotic Nuclei and Spin-Isospin Properties of the NN Interaction. *Phys. Rev. Lett.* 87. köt., 82502. old. (2001).
20. Steppenbeck, D. *és tsai*. Evidence for a new nuclear ‘magic number’ from the level structure of ^{54}Ca . *Nature* 502. köt., 207–210. old. (2013).

21. Michimasa, S. *és tsai*. Magic Nature of Neutrons in ^{54}Ca : First Mass Measurements of $^{55-57}\text{Ca}$. *Phys. Rev. Lett.* 121. köt., 22506. old. (2018).
22. Chen, S. *és tsai*. Quasifree Neutron Knockout from ^{54}Ca Corroborates Arising $N = 34$ Neutron Magic Number. *Phys. Rev. Lett.* 123. köt., 142501. old. (2019).
23. Liu, H. N. *és tsai*. How Robust is the $N = 34$ Subshell Closure? First Spectroscopy of ^{52}Ar . *Phys. Rev. Lett.* 122. köt., 72502. old. (2019).
24. Liddick, S. N. *és tsai*. Lowest Excitations in ^{56}Ti and the Predicted $N = 34$ Shell Closure. *Phys. Rev. Lett.* 92. köt., 72502. old. (2004).
25. Steppenbeck, D. *és tsai*. Structure of ^{55}Sc and development of the $N = 34$ subshell closure. *Phys. Rev. C* 96. köt., 64310. old. (2017).
26. Perrot, F. *és tsai*. β -decay studies of neutron-rich K isotopes. *Phys. Rev. C* 74. köt., 14313. old. (2006).
27. Nowacki, F. & Poves, A. Shell Model Far From Stability: Island of Inversion Mergers. *Journal of Physics: Conference Series* 966. köt., 12023. old. (2018).
28. Hannawald, M. *és tsai*. Decay of Neutron-Rich Mn Nuclides and Deformation of Heavy Fe Isotopes. *Phys. Rev. Lett.* 82. köt., 1391–1394. old. (1999).
29. Recchia, F. *és tsai*. Spectroscopy of odd-mass cobalt isotopes toward the $N = 40$ subshell closure and shell-model description of spherical and deformed states. *Phys. Rev. C* 85. köt., 64305. old. (2012).
30. Canete, L. *és tsai*. Precision mass measurements of ^{67}Fe and $^{69,70}\text{Co}$: Nuclear structure toward $N = 40$ and impact on r -process reaction rates. *Phys. Rev. C* 101. köt., 41304. old. (2020).
31. Ljungvall, J. *és tsai*. Onset of collectivity in neutron-rich Fe isotopes: Toward a new island of inversion? *Phys. Rev. C* 81. köt., 61301. old. (2010).
32. Naimi, S. *és tsai*. Surveying the $N = 40$ island of inversion with new manganese masses. *Phys. Rev. C* 86. köt., 14325. old. (2012).
33. Crawford, H. L. *és tsai*. Quadrupole Collectivity in Neutron-Rich Fe and Cr Isotopes. *Phys. Rev. Lett.* 110. köt., 242701. old. (2013).
34. Liddick, S. N. *és tsai*. Shape coexistence along $N = 40$. *Phys. Rev. C* 84. köt., 61305. old. (2011).
35. Liu, X. *és tsai*. Spectroscopy of $^{65,67}\text{Mn}$: Strong coupling in the $N=40$ “island of inversion”. *Physics Letters B* 784. köt., 392–396. old. (2018).
36. Gade, A. *és tsai*. Collectivity at $N = 40$ in neutron-rich ^{64}Cr . *Phys. Rev. C* 81. köt., 51304. old. (2010).
37. Suchyta, S. *és tsai*. β and isomeric decay of ^{64}V . *Phys. Rev. C* 89. köt., 67303. old. (2014).
38. Santamaria, C. *és tsai*. Extension of the $N = 40$ Island of Inversion towards $N = 50$: Spectroscopy of ^{66}Cr , $^{70,72}\text{Fe}$. *Phys. Rev. Lett.* 115. köt., 192501. old. (2015).
39. Gade, A. *és tsai*. Nuclear Structure Towards $N = 40$ ^{60}Ca : In-Beam γ -Ray Spectroscopy of $^{58,60}\text{Ti}$. *Phys. Rev. Lett.* 112. köt., 112503. old. (2014).

40. Cortés, M. *és tsai*. Shell evolution of N=40 isotones towards ^{60}Ca : First spectroscopy of ^{62}Ti . *Physics Letters B* 800. köt., 135071. old. (2020).
41. Michimasa, S. *és tsai*. Mapping of a New Deformation Region around ^{62}Ti . *Phys. Rev. Lett.* 125. köt., 122501. old. (2020).



Nyilvántartási szám: DEENK/375/2023.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Juhász Marcell

Doktori Iskola: Fizikai Tudományok Doktori Iskola

MTMT azonosító: 10079005

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

1. **Juhász, M.**, Elekes, Z., Sohler, D., Utsuno, Y., Yoshida, K., Otsuka, T., Ogata, K., Doornenbal, P., Obertelli, A., Baba, H., Browne, F., Calvet, D., Château, F., Chen, S., Chiga, N., Corsi, A., Cortés, M. L., Delbart, A., Gheller, J. M., Giganon, A., Gillibert, A., Hilaire, C., Isobe, T., Kobayashi, T., Kubota, Y., Lapoux, V., Motobayashi, T., Murray, I., Otsu, H., Panin, V., Paul, N., Rodriguez, W., Sakurai, H., Sasano, M., Steppenbeck, D., Stuhl, L., Sun, Y. L., Togano, Y., Uesaka, T., Wimmer, K., Yoneda, K., Achouri, N. L., Aktas, O., Aumann, T., Chung, L. X., Dombrádi, Z., Flavigny, F., Franchoo, S., Gasparic, I., Gerst, R. B., Gibelin, J., Hahn, K. I., Kim, D., Koiwai, T., Kondo, Y., Koseoglou, P., Lee, J., Lehr, C., Linh, B. D., Liu, H. N., Lokotko, T., MacCormick, M., Moschner, K., Nakamura, T., Park, S. Y., Rossi, D., Şahin, E., Söderström, P. A., Takeuchi, S., Törnqvist, H., Vaquero, V., Wagner, V., Wang, S., Werner, V., Xu, X., Yamada, H., Yan, D., Yang, Z., Yasuda, M., Zanetti, L.: First spectroscopic study of 51Ar by the (p,2p) reaction.
Phys. Lett. B. 814, 1-8, 2021. ISSN: 0370-2693.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136108>
IF: 4.95





2. **Juhász, M.**, Elekes, Z., Sohler, D., Sieja, K., Yoshida, K., Ogata, K., Doornenbal, P., Obertelli, A., Baba, H., Browne, F., Calvet, D., Château, F., Chen, S., Chiga, N., Corsi, A., Cortés, M. L., Delbart, A., Gheller, J. M., Giganon, A., Gillibert, A., Hilaire, C., Isobe, T., Kobayashi, T., Kubota, Y., Lapoux, V., Motobayashi, T., Murray, I., Otsu, H., Panin, V., Paul, N., Rodriguez, W., Sakurai, H., Sasano, M., Steppenbeck, D., Stuhl, L., Sun, Y. L., Togano, Y., Uesaka, T., Wimmer, K., Yoneda, K., Achouri, N. L., Aktas, O., Aumann, T., Chung, L. X., Dombárdi, Z., Flavigny, F., Franchoo, S., Gasparic, I., Gerst, R. B., Gibelin, J., Hahn, K. I., Kim, D., Koiwai, T., Kondo, Y., Koseoglou, P., Lee, J., Lehr, C., Linh, B. D., Liu, H. N., Lokotko, T., MacCormick, M., Moschner, K., Nakamura, T., Park, S. Y., Rossi, D., Şahin, E., Söderström, P. A., Takeuchi, S., Törnqvist, H., Vaquero, V., Wagner, V., Wang, S., Werner, V., Xu, X., Yamada, H., Yan, D., Yang, Z., Yasuda, M., Zanetti, L.: First spectroscopic study of V63 at the N = 40 island of inversion.

Phys. Rev. C. 103 (6), 1-9, 2021. ISSN: 2469-9985.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.103.064308>

IF: 3.199

További közlemények

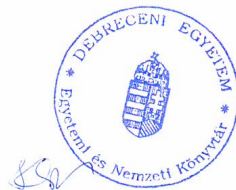
Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (2)

3. Elekes, Z., Dósa, C., Halász, Z., **Juhász, M.**: Shape coexistence in 66Se.

Phys. Lett. B. 844, 1-6, 2023. ISSN: 0370-2693.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2023.138072>

IF: 4.4 (2022)





4. Elekes, Z., **Juhász, M.**, Sohler, D., Sieja, K., Yoshida, K., Ogata, K., Doornenbal, P., Obertelli, A., Achouri, N. L., Baba, H., Browne, F., Calvet, D., Château, F., Chen, S., Chiga, N., Corsi, A., Cortés, M. L., Delbart, A., Gheller, J. M., Giganon, A., Gillibert, A., Hilaire, C., Isobe, T., Kobayashi, T., Kubota, Y., Lapoux, V., Liu, H. N., Motobayashi, T., Murray, I., Otsu, H., Panin, V., Paul, N., Rodriguez, W., Sakurai, H., Sasano, M., Steppenbeck, D., Stuhl, L., Sun, Y. L., Togano, Y., Uesaka, T., Wimmer, K., Yoneda, K., Aktas, O., Aumann, T., Chung, L. X., Dombrádi, Z., Flavigny, F., Franchoo, S., Gasparic, I., Gerst, R. B., Gibelin, J., Hahn, K. I., Kim, D., Koiwai, T., Kondo, Y., Koseoglou, P., Lee, J., Lehr, C., Linh, B. D., Lokotko, T., MacCormick, M., Moschner, K., Nakamura, T., Park, S. Y., Rossi, D., Şahin, E., Söderström, P. A., Takeuchi, S., Törnqvist, H., Vaquero, V., Wagner, V., Wang, S., Werner, V., Xu, X., Yamada, H., Yan, D., Yang, Z., Yasuda, M., Zanetti, L.: "Southwestern" boundary of the N = 40 island of inversion: First study of low-lying bound excited states in V59 and V61.

Phys. Rev. C. 106 (6), 1-10, 2022. ISSN: 2469-9985.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.106.064321>

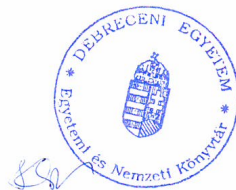
IF: 3.1

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 15,649

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
8,149**

A DEENK a Jelölt által az IDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudománymetriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2023.08.17.



Short thesis for the degree of doctor of
philosophy (PhD)

**Investigation of the structure of nuclei
far from the valley of stability**

by Marcell Juhász

Supervisor: Dr. Zoltán Elekes



UNIVERSITY OF DEBRECEN
Doctoral School of Physics

Debrecen, 2023

Introduction

The examination of nuclei far from the valley of stability – they are called exotic nuclei – is one of the most fertile fields of today’s nuclear physics. The evolution of experimental equipment and computing methods allowed more accurate measurements of exotic nuclei that lead to a better understanding of the nuclear structure, the properties of the nuclei, and their interaction with each other. Research in this area also has great importance in extending our knowledge about the mechanism of the synthesis of the elements, because exotic nuclei play a key role in astrophysical processes such as neutron capture in supernova explosions. During my doctoral work, I carried out an experimental study of two exotic nuclei (^{51}Ar [1], ^{63}V [2]).

Objectives

In the 1970s, during the investigation of the mass [3], magnetic moment [4] and β -decay [5] of neutron-rich sodium isotopes, it emerged that the conventional $N=20$ shell closure does not apply between exotic nuclei. The observed anomalies were theoretically explained by the appearance of a so-called *inversion island* [6], in which, instead of the normal spherical configuration, the ground state is dominated by a two-particle-two-hole excited, deformed configuration spanning the $N=20$ shell gap, so that the size of the $N=20$ shell closure decreases slightly,

but remains. Nine nuclei were originally placed on this island, the center of which was ^{32}Na . However, soon, with another Japanese theoretical approach, the Monte-Carlo diagonalization technique [7], they found that the boundaries of this island are not as sharp as the first interpretation claimed because this work assumed the rearrangement of single-particle states, the termination of shell closure 20 and the appearance of a new magic neutron number 16. As a consequence of this, the experimental and theoretical investigation of the rearrangement of the shell closures and the properties of the inversion island began with great effort, an excellent summary of which can be found in the study published by Otsuka et al. a few years ago [8].

1. The ^{51}Ar nucleus

The magic of the non-conventional neutron number 32 among exotic nuclei – proposed by the Japanese school – has been confirmed by numerous experiments with chromium [9, 10], titanium [11, 12], scandium [13], calcium [14–16], potassium [17] and argon isotopes [18]. In addition, signs of magic have been discovered for the calcium [20–22] and argon isotopes [23] at the neutron number 34 predicted [19] about twenty years ago. However, this shell closure did not occur for chromium [9, 10], titanium [11, 24] and scandium isotopes [25].

The ^{53}Ca nucleus, whose neutron number is just bet-

ween 32 and 34, was investigated in β -decay [26], multinucleon [20] and neutron knockout [22] reaction. The observed two low-energy excited states ($3/2_1^-$, $5/2_1^-$) were interpreted by neutron excitation in the large shell gap 32 and 34, respectively. By removing two protons from the ^{53}Ca nucleus, we arrive at the ^{51}Ar nucleus, which, analogously, provides an excellent field for studying the two-shell closure. Therefore, our goal was to explore the low-energy level scheme of this nucleus.

2. The ^{63}V nucleus

After the first observed inversion island connected to conventional shell closure 20, more islands were discovered, and today we can speak of an archipelago of inversion, the theoretical background of which seems to be understood [27]. Experimental investigation of iron isotopes at subshell closure 40 first pointed to the existence of an inversion island [28]. Then a theoretical work marked the boundaries of this island in the range $Z=22-26$, $N=38-42$. Similar to the inversion island found at the conventional shell closure of 20, the isotope planes are characterized by open proton shells, which gives the possibility of quadrupole deformation. As protons are removed from the ^{68}Ni nucleus, which is close to stability, from the $f_{7/2}$ orbit, the distance between the neutron $f_{5/2}$ and $g_{9/2}$ orbits decreases. the largest

deformation in the ^{64}Cr nucleus. In the last 10 years, many experiments have been carried out on the nuclide map in the region below ^{68}Ni for cobalt [29, 30], iron [31–33], manganese [34, 35], chromium [36–38] and titanium isotopes [39–41].

Looking at the 40 isotones, starting from the ^{68}Ni nucleus and taking protons from it, it was also possible to experimentally demonstrate an increase in collectivity, which reached its maximum in the ^{64}Cr nucleus with a quadrupole deformation parameter of approximately $\beta_2=0.3$. Moving towards the neutron emission line, a decrease in deformation was observed, consistent with theoretical predictions. However, very little spectroscopic information was available for vanadium isotopes around neutron number 40: only the half-life of the ground states is known for $N\geq 38$ and an isomeric state in the ^{64}V nucleus [37]. Therefore, we aimed to map the low-energy excited states of the ^{63}V nucleus with 40 neutrons and determine its deformation in order to determine whether it belongs to the inversion island.

Description of the experiment

The experiment was performed in the Radioactive Isotope Beam Factory facility operated by the RIKEN Nishina Center and the University of Tokyo, which was specially built for the

production of beams consisting of radioactive isotopes. During the experiment, using several particle accelerators connected in sequence, ^{70}Zn ions were accelerated to an energy of 345 MeV/u, which collided with a 10 mm thick ^9Be target object. As a result of the high-energy collision, nucleons were broken off from the ^{70}Zn nuclei. This fragmentation reaction can occur in many ways, resulting in many different nuclei, including ^{51}Ar and ^{63}V . The nuclei were separated and identified in the BigRIPS isotope separator equipped with detectors measuring their flight time, position, and energy loss. Proton collision nuclear reactions took place in a liquid hydrogen target surrounded by a time projection chamber to determine the exact location of the reaction. This construction was surrounded by NaI(Tl) scintillator crystals that detected γ -photons from the bound excited states of the nuclei produced during the reactions. I determined the efficiency and response function of the γ -detector system using a simulation. The SAMURAI equipment, consisting of a huge dipole field magnet and additional detectors, was used to examine the physical characteristics of the reaction products. Such detectors are, for example, plastic scintillators suitable for measuring particle energy, which were used to determine the unbound excited states of atomic nuclei using the invariant mass method.

Scientific results

During the analysis and interpretation of the experiment carried out at the RIKEN research institute, I revealed the low-energy structure of ^{51}Ar and ^{63}V atomic nuclei for the first time in the world.

1. In the case of the ^{51}Ar atomic nucleus, I discovered two transitions using the γ -spectroscopy method and identified six peaks in the relative energy spectrum of the $^{50}\text{Ar}+n$ system. Accordingly, using shell model calculations provided by our partners, I proved the existence of six unbound states of two bound selves. I could only suggest the energies of three of the unbound states, as they decay into the first excited state of the ^{50}Ar nucleus, which channel had low statistics. The cross-section of the $^{52}\text{K}(p,2p)^{51}\text{Ar}$ nucleon discharge reaction leading to the two bound states of ^{51}Ar was found to be very small, which I was able to explain by the significant shell closure occurring in the argon isotopes at neutron numbers of 32 and 34. I also showed that unbound collective and single-particle states appear in the ^{51}Ar nucleus due to the two valence holes.
2. I identified two new transitions in the γ -spectrum of the ^{63}V nucleus recorded with inverse kinematics. Comparing these with the shell model calculations of the coope-

rating theoretical colleagues, I proposed the existence of two bound states with spin/parity values of $9/2^-$ and $11/2^-$. I analyzed the excitation cross-sections of these states in the inelastic scattering channel using coupled channel calculations, which resulted in a large quadrupole deformation parameter assuming pure quadrupole deformation. Although I could not determine the size of the probably present hexadecapole deformation, the use of the approximate results of previous measurements also led to a large quadrupole deformation. So, I could most likely place the ^{63}V nucleus on the inversion island at the $N=40$ shell closure.

Irodalom

1. Juhász, M. M. *és tsai*. First spectroscopic study of ^{51}Ar by the (p,2p) reaction. *Physics Letters B* 814. köt., 136108. old. (2021).
2. Juhász, M. M. *és tsai*. First spectroscopic study of ^{63}V at the $N = 40$ island of inversion. *Phys. Rev. C* 103. köt., 64308. old. (6 2021).
3. Thibault, C. *és tsai*. Direct measurement of the masses of ^{11}Li and $^{26-32}\text{Na}$ with an on-line mass spectrometer. *Phys. Rev. C* 12. köt., 644–657. old. (1975).
4. Huber, G. *és tsai*. Spins, magnetic moments, and isotope shifts of $^{21-31}\text{Na}$ by high resolution laser spectroscopy of the atomic D_1 line. *Phys. Rev. C* 18. köt., 2342–2354. old. (1978).
5. Détraz, C. *és tsai*. Beta decay of $^{27-32}\text{Na}$ and their descendants. *Phys. Rev. C* 19. köt., 164–176. old. (1979).
6. Warburton, E. K., Becker, J. A. & Brown, B. A. Mass systematics for $A=29-44$ nuclei: The deformed $A\sim 32$ region. *Phys. Rev. C* 41. köt., 1147–1166. old. (1990).
7. Utsuno, Y., Otsuka, T., Mizusaki, T. & Honma, M. Varying shell gap and deformation in $N \sim 20$ unstable nuclei studied by the Monte Carlo shell model. *Phys. Rev. C* 60. köt., 54315. old. (1999).
8. Otsuka, T., Gade, A., Sorlin, O., Suzuki, T. & Utsuno, Y. Evolution of shell structure in exotic nuclei. *Rev. Mod. Phys.* 92. köt., 15002. old. (2020).

9. Bürger, A. *és tsai*. Relativistic Coulomb excitation of neutron-rich $^{54,56,58}\text{Cr}$: On the pathway of magicity from $N=40$ to $N=32$. *Physics Letters B* 622. köt., 29–34. old. (2005).
10. Prisciandaro, J. *és tsai*. New evidence for a subshell gap at $N=32$. *Physics Letters B* 510. köt., 17–23. old. (2001).
11. Dinca, D.-C. *és tsai*. Reduced transition probabilities to the first 2^+ state in $^{52,54,56}\text{Ti}$ and development of shell closures at $N = 32, 34$. *Phys. Rev. C* 71. köt., 41302. old. (2005).
12. Janssens, R. *és tsai*. Structure of $^{52,54}\text{Ti}$ and shell closures in neutron-rich nuclei above 48Ca . *Physics Letters B* 546. köt., 55–62. old. (2002).
13. Xu, X. *és tsai*. Direct mass measurements of neutron-rich ^{86}Kr projectile fragments and the persistence of neutron magic number $N=32$ in Sc isotopes. *Chinese Physics C* 39. köt., 104001. old. (2015).
14. Wienholtz, F. *és tsai*. Masses of exotic calcium isotopes pin down nuclear forces. *Nature* 498. köt., 346–349. old. (2013).
15. Huck, A. *és tsai*. Beta decay of the new isotopes ^{52}K , ^{52}Ca , and ^{52}Sc ; a test of the shell model far from stability. *Phys. Rev. C* 31. köt., 2226–2237. old. (1985).
16. Gade, A. *és tsai*. Cross-shell excitation in two-proton knockout: Structure of ^{52}Ca . *Phys. Rev. C* 74. köt., 21302. old. (2006).
17. Rosenbusch, M. *és tsai*. Probing the $N = 32$ Shell Closure below the Magic Proton Number $Z = 20$: Mass Measurements of the Exotic Isotopes $^{52,53}\text{K}$. *Phys. Rev. Lett.* 114. köt., 202501. old. (2015).
18. Cortés, M. L. *és tsai*. $N = 32$ shell closure below calcium: Low-lying structure of ^{50}Ar . *Phys. Rev. C* 102. köt., 64320. old. (2020).
19. Otsuka, T. *és tsai*. Magic Numbers in Exotic Nuclei and Spin-Isospin Properties of the NN Interaction. *Phys. Rev. Lett.* 87. köt., 82502. old. (2001).
20. Steppenbeck, D. *és tsai*. Evidence for a new nuclear ‘magic number’ from the level structure of ^{54}Ca . *Nature* 502. köt., 207–210. old. (2013).
21. Michimasa, S. *és tsai*. Magic Nature of Neutrons in ^{54}Ca : First Mass Measurements of $^{55-57}\text{Ca}$. *Phys. Rev. Lett.* 121. köt., 22506. old. (2018).
22. Chen, S. *és tsai*. Quasifree Neutron Knockout from ^{54}Ca Corroborates Arising $N = 34$ Neutron Magic Number. *Phys. Rev. Lett.* 123. köt., 142501. old. (2019).
23. Liu, H. N. *és tsai*. How Robust is the $N = 34$ Subshell Closure? First Spectroscopy of ^{52}Ar . *Phys. Rev. Lett.* 122. köt., 72502. old. (2019).
24. Liddick, S. N. *és tsai*. Lowest Excitations in ^{56}Ti and the Predicted $N = 34$ Shell Closure. *Phys. Rev. Lett.* 92. köt., 72502. old. (2004).
25. Steppenbeck, D. *és tsai*. Structure of ^{55}Sc and development of the $N = 34$ subshell closure. *Phys. Rev. C* 96. köt., 64310. old. (2017).
26. Perrot, F. *és tsai*. β -decay studies of neutron-rich K isotopes. *Phys. Rev. C* 74. köt., 14313. old. (2006).

27. Nowacki, F. & Poves, A. Shell Model Far From Stability: Island of Inversion Mergers. *Journal of Physics: Conference Series* 966. köt., 12023. old. (2018).
28. Hannawald, M. *és tsai*. Decay of Neutron-Rich Mn Nuclides and Deformation of Heavy Fe Isotopes. *Phys. Rev. Lett.* 82. köt., 1391–1394. old. (1999).
29. Recchia, F. *és tsai*. Spectroscopy of odd-mass cobalt isotopes toward the $N = 40$ subshell closure and shell-model description of spherical and deformed states. *Phys. Rev. C* 85. köt., 64305. old. (2012).
30. Canete, L. *és tsai*. Precision mass measurements of ^{67}Fe and $^{69,70}\text{Co}$: Nuclear structure toward $N = 40$ and impact on r -process reaction rates. *Phys. Rev. C* 101. köt., 41304. old. (2020).
31. Ljungvall, J. *és tsai*. Onset of collectivity in neutron-rich Fe isotopes: Toward a new island of inversion? *Phys. Rev. C* 81. köt., 61301. old. (2010).
32. Naimi, S. *és tsai*. Surveying the $N = 40$ island of inversion with new manganese masses. *Phys. Rev. C* 86. köt., 14325. old. (2012).
33. Crawford, H. L. *és tsai*. Quadrupole Collectivity in Neutron-Rich Fe and Cr Isotopes. *Phys. Rev. Lett.* 110. köt., 242701. old. (2013).
34. Liddick, S. N. *és tsai*. Shape coexistence along $N = 40$. *Phys. Rev. C* 84. köt., 61305. old. (2011).
35. Liu, X. *és tsai*. Spectroscopy of $^{65,67}\text{Mn}$: Strong coupling in the $N=40$ “island of inversion”. *Physics Letters B* 784. köt., 392–396. old. (2018).
36. Gade, A. *és tsai*. Collectivity at $N = 40$ in neutron-rich ^{64}Cr . *Phys. Rev. C* 81. köt., 51304. old. (2010).
37. Suchyta, S. *és tsai*. β and isomeric decay of ^{64}V . *Phys. Rev. C* 89. köt., 67303. old. (2014).
38. Santamaria, C. *és tsai*. Extension of the $N = 40$ Island of Inversion towards $N = 50$: Spectroscopy of ^{66}Cr , $^{70,72}\text{Fe}$. *Phys. Rev. Lett.* 115. köt., 192501. old. (2015).
39. Gade, A. *és tsai*. Nuclear Structure Towards $N = 40$ ^{60}Ca : In-Beam γ -Ray Spectroscopy of $^{58,60}\text{Ti}$. *Phys. Rev. Lett.* 112. köt., 112503. old. (2014).
40. Cortés, M. *és tsai*. Shell evolution of $N=40$ isotones towards ^{60}Ca : First spectroscopy of ^{62}Ti . *Physics Letters B* 800. köt., 135071. old. (2020).
41. Michimasa, S. *és tsai*. Mapping of a New Deformation Region around ^{62}Ti . *Phys. Rev. Lett.* 125. köt., 122501. old. (2020).



Registry number: DEENK/375/2023.PL
Subject: PhD Publication List

Candidate: Marcell Juhász

Doctoral School: Doctoral School of Physics

MTMT ID: 10079005

List of publications related to the dissertation

Foreign language scientific articles in international journals (2)

1. **Juhász, M.**, Elekes, Z., Sohler, D., Utsuno, Y., Yoshida, K., Otsuka, T., Ogata, K., Doornenbal, P., Obertelli, A., Baba, H., Browne, F., Calvet, D., Château, F., Chen, S., Chiga, N., Corsi, A., Cortés, M. L., Delbart, A., Gheller, J. M., Giganon, A., Gillibert, A., Hilaire, C., Isobe, T., Kobayashi, T., Kubota, Y., Lapoux, V., Motobayashi, T., Murray, I., Otsu, H., Panin, V., Paul, N., Rodríguez, W., Sakurai, H., Sasano, M., Steppenbeck, D., Stuhl, L., Sun, Y. L., Togano, Y., Uesaka, T., Wimmer, K., Yoneda, K., Achouri, N. L., Aktas, O., Aumann, T., Chung, L. X., Dombrádi, Z., Flavigny, F., Franchoo, S., Gasparic, I., Gerst, R. B., Gibelin, J., Hahn, K. I., Kim, D., Koiwai, T., Kondo, Y., Koseoglou, P., Lee, J., Lehr, C., Linh, B. D., Liu, H. N., Lokotko, T., MacCormick, M., Moschner, K., Nakamura, T., Park, S. Y., Rossi, D., Şahin, E., Söderström, P. A., Takeuchi, S., Törnqvist, H., Vaquero, V., Wagner, V., Wang, S., Werner, V., Xu, X., Yamada, H., Yan, D., Yang, Z., Yasuda, M., Zanetti, L.: First spectroscopic study of ^{51}Ar by the (p,2p) reaction.

Phys. Lett. B. 814, 1-8, 2021. ISSN: 0370-2693.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136108>

IF: 4.95





2. **Juhász, M.**, Elekes, Z., Sohler, D., Sieja, K., Yoshida, K., Ogata, K., Doornenbal, P., Obertelli, A., Baba, H., Browne, F., Calvet, D., Château, F., Chen, S., Chiga, N., Corsi, A., Cortés, M. L., Delbart, A., Gheller, J. M., Giganon, A., Gillibert, A., Hilaire, C., Isobe, T., Kobayashi, T., Kubota, Y., Lapoux, V., Motobayashi, T., Murray, I., Otsu, H., Panin, V., Paul, N., Rodriguez, W., Sakurai, H., Sasano, M., Steppenbeck, D., Stuhl, L., Sun, Y. L., Togano, Y., Uesaka, T., Wimmer, K., Yoneda, K., Achouri, N. L., Aktas, O., Aumann, T., Chung, L. X., Dombárdi, Z., Flavigny, F., Franchoo, S., Gasparic, I., Gerst, R. B., Gibelin, J., Hahn, K. I., Kim, D., Koiwai, T., Kondo, Y., Koseoglou, P., Lee, J., Lehr, C., Linh, B. D., Liu, H. N., Lokotko, T., MacCormick, M., Moschner, K., Nakamura, T., Park, S. Y., Rossi, D., Şahin, E., Söderström, P. A., Takeuchi, S., Törnqvist, H., Vaquero, V., Wagner, V., Wang, S., Werner, V., Xu, X., Yamada, H., Yan, D., Yang, Z., Yasuda, M., Zanetti, L.: First spectroscopic study of V63 at the N = 40 island of inversion.

Phys. Rev. C. 103 (6), 1-9, 2021. ISSN: 2469-9985.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.103.064308>

IF: 3.199

List of other publications

Foreign language scientific articles in international journals (2)

3. Elekes, Z., Dósa, C., Halász, Z., **Juhász, M.**: Shape coexistence in 66Se.

Phys. Lett. B. 844, 1-6, 2023. ISSN: 0370-2693.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2023.138072>

IF: 4.4 (2022)





4. Elekes, Z., **Juhász, M.**, Sohler, D., Sieja, K., Yoshida, K., Ogata, K., Doornenbal, P., Obertelli, A., Achouri, N. L., Baba, H., Browne, F., Calvet, D., Château, F., Chen, S., Chiga, N., Corsi, A., Cortés, M. L., Delbart, A., Gheller, J. M., Giganon, A., Gillibert, A., Hilaire, C., Isobe, T., Kobayashi, T., Kubota, Y., Lapoux, V., Liu, H. N., Motobayashi, T., Murray, I., Otsu, H., Panin, V., Paul, N., Rodriguez, W., Sakurai, H., Sasano, M., Steppenbeck, D., Stuhl, L., Sun, Y. L., Togano, Y., Uesaka, T., Wimmer, K., Yoneda, K., Aktas, O., Aumann, T., Chung, L. X., Dombrádi, Z., Flavigny, F., Franchoo, S., Gasparic, I., Gerst, R. B., Gibelin, J., Hahn, K. I., Kim, D., Koiwai, T., Kondo, Y., Koseoglou, P., Lee, J., Lehr, C., Linh, B. D., Lokotko, T., MacCormick, M., Moschner, K., Nakamura, T., Park, S. Y., Rossi, D., Şahin, E., Söderström, P. A., Takeuchi, S., Törnqvist, H., Vaquero, V., Wagner, V., Wang, S., Werner, V., Xu, X., Yamada, H., Yan, D., Yang, Z., Yasuda, M., Zanetti, L.: "Southwestern" boundary of the N = 40 island of inversion: First study of low-lying bound excited states in V59 and V61.

Phys. Rev. C. 106 (6), 1-10, 2022. ISSN: 2469-9985.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.106.064321>

IF: 3.1

Total IF of journals (all publications): 15,649

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 8,149

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of the Journal Citation Report (Impact Factor) database.

17 August, 2023

