

A K100835 azonosítójú,

A proton-neutron korreláció változása a nukleon instabilitási vonal közelében

című OTKA projekt zárójelentése

Az atommagot mint kétféle nukleonból: protonokból és neutronokból álló kis egységet képzeljük el. A protonok és a neutronok erős kölcsönhatással vonzzák egymást, ezért a sok nukleonból álló rendszer egyben marad, és egy kis cseppecskét alkot. A két, nagyjából azonos eloszlású folyadékából álló csepp, mint modell jól írja le az atommag számos tulajdonságát. A protonok és a neutronok eloszlása közti különbséget csak nagyon kifinomult módszerek segítségével lehetett kimutatni. A legneutrongazdagabb stabil magokban is csak pár százalék eltérés van az átlagos proton és neutron sugár között. Stabil atommagok esetén ez teljes összhangban van az átlagtér elméletek elvárásaival, melyekben a héjszerkezet miatt kis lokális sűrűség különbségek is előfordulhatnak.

A kétkomponensű folyadékcsepp-modell azonban csak egy egyszerű közelítése a valóságnak. Tudjuk, hogy a neutronok nem stabilak, és 10 perc körüli felezési idővel elbomlanának. A protonok és a neutronok töltött mezoncseréjével folyamatosan egymásba alakulnak. Ezt jelzi – alacsony energiás közelítésben, a héjmodellben – a neutronok effektív töltése. Azt mondhatjuk, hogy a proton – neutron kép nem tökéletes, de effektív elméletként nagyon jól működik. Ugyanakkor a mezonelméleti kép is megerősíti azt az elvárást, hogy a protonok és a neutronok többé-kevésbé azonos eloszlást követnek.

Radioaktív atommagokkal végzett első kísérletek eredménye volt annak a kimutatása, hogy a könnyű, nagyon neutrontöbbletes magokban a protonok és a neutronok eloszlása erősen különbözik: a leggyengébben kötött egy-két neutron messze eltávolodhat a többi nukleontól, az utolsó egy-két neutron lecsatolódik a törzsről. A következő, hasonlóan jelentős megfigyelés az volt, hogy a stabilitási sávtól távol eltűnhetnek a héjzáródások. Először az $N=20$ -as héjzáródás eltűnését regisztrálták, majd az $N=8$ -ét. Kutatásinkkal mi is jelentős mértékben hozzájárultunk az $N=20$ és $N=28$ héjzáródások megszűnésnek, valamint az új $N=14,16$ héjzáródások létrejöttének kimutatásához, és a mögötte meghúzódó effektusok tisztázásához. Kimutattuk azt is, hogy a nehéz szén és bór izotópokban is lecsatolódnak a valencia neutronok a magtörzsről, még ha nem is olyan mértékben, hogy glóriát alkossanak. A megfigyelt jelenségekért egyértelműen a proton – neutron korreláció változása a felelős.

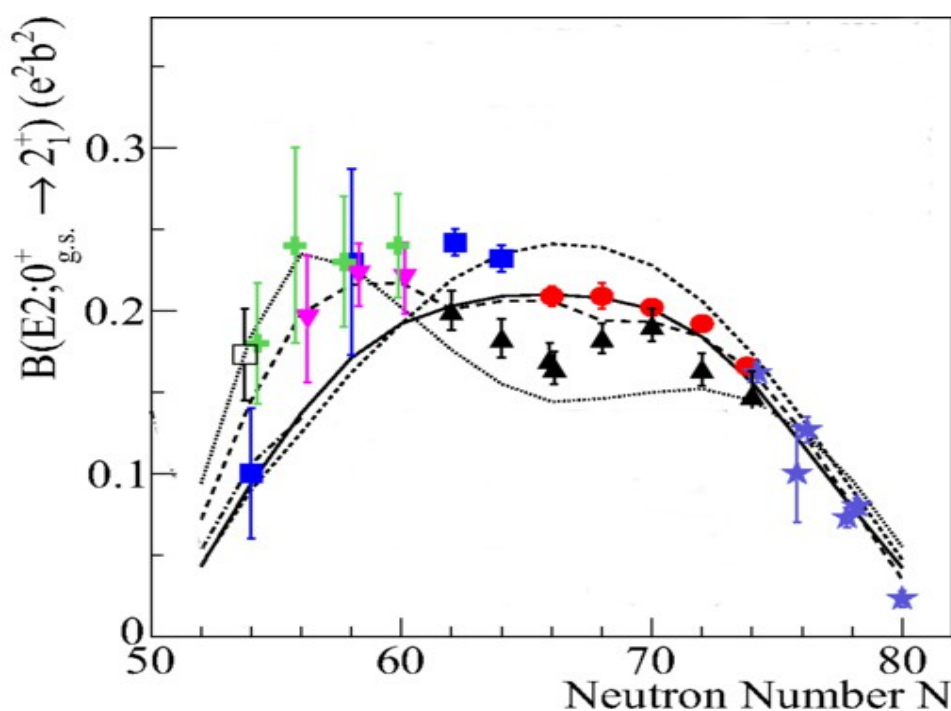
A fenti eredmények a magfizika szemléletmódját jelentősen megváltoztatták, és igen nagy érdeklődés alakult ki az iránt, hogy nehezebb rendszerekben mi történik. A jelen projektben mi is az $N=40, 50, 82$ héjzáródás körüli helyzet feltárását, a proton – neutron kölcsönhatás változását, a proton – neutron párkölcsönhatás vizsgálatát, a valencia nukleonok lecsatolódásának a vizsgálatát tűztük ki elsődleges célul, de vizsgáltuk a nukleonpályák elrendezéséből adódó királis effektusokat, és lezártunk néhány, a könnyű magoknál hátrahagyott problémát is.

A fenti problémákat a világ vezető magfizikai laboratóriumaiban elsősorban RIKEN-ben vizsgáltuk in-beam gamma spektroszkópiai módszerekkel vagy β bomlásból, de végeztünk kísérleteket a GANIL-ban, a Legnaro-i Nemzeti Laboratóriumban, az ILL-ben és a michigani Nemzeti Szupravezető Ciklotron Laboratóriumban is. A kísérletekben használt számos nagyberendezés miatt azokat csak egy szélesebb kollaboráció keretében lehetett végrehajtani. A projekt tervezésében, megvédésében a kísérletek előkészítésében, végrehajtásában, az adatok feldolgozásában, az eredmények értelmezésében és publikálásra való elkészítésben egyaránt részt vettünk, bár a különböző kísérletek esetén különböző mértékben. A projektben elért legfontosabb eredményeket az alábbiakban mutatjuk be.

Eredmények

A proton – neutron korreláció gyengülése, a proton- és neutronsűrűség szétszétválódása

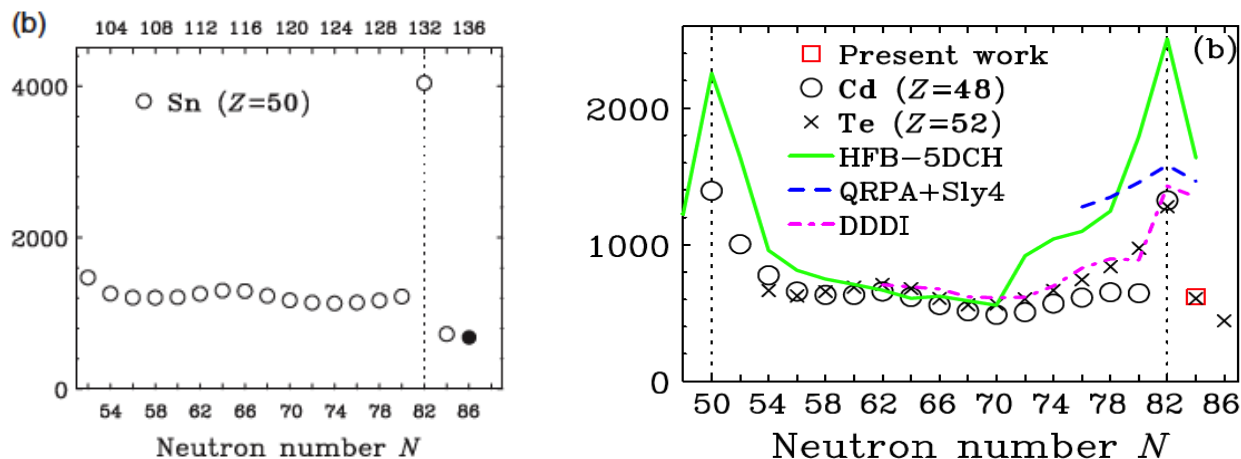
A nukleon – nukleon kölcsönhatás rövid hatótávolságú, ezért a nukleon – nukleon korreláció mértéke erősen függ attól, hogy a nukleonok mennyi időt töltenek egymás közelében., vagyis, hogy milyen mértékben fednek át a nukleon pályák. Szemléletesen attól függ, hogy milyen szöget zárnak be a pályák, illetve a rájuk merőleges impulzusmomentum vektorok egymással, illetve mekkora a radiális átfedésük. Az iránykorrelációt a kiralitás kapcsán vizsgáljuk, a lecsatolódás szempontjából a radiális átfedésnek van jelentősége: ha egy nukleon pályája messze túlér a többiekén, akkor ritkán találkozik a többiekkel, ritkán hat kölcsön velük, mozgása – és egyéb tulajdonságai tekintetében másképp viselkedik, mint a többiek. Töltött részecskék esetén a pályasugár változásának egy indikátora lehet egy gerjesztett állapotból az alapállapotba való átmenet valószínűsége, ami a pályasugár negyedik hatványával arányos (kvadrupólus átmenet esetén). Indokolatlanul nagy átmeneti valószínűség a pályasugár kismértékű növekedésének a jele lehet. Ezt használtuk ki a ^{100}Sn közelében tapasztalt anomália vizsgálatánál: a ^{104}Sn első gerjesztett állapotáról jövő átmenet átmeneti valószínűségének különböző módszerekkel való vizsgálatánál [*Physical Review Letters* 110, 172501, 2013, *Physical Review C* 90, 061302(R), 2014, *Physics Letters B* 743, 451, 2015]. Megmutattuk, hogy a ^{104}Sn esetén is folytatódik a nehezebb magoknál tapasztalt anomália: jelentős az eltérés a a tömegszám függvényében parabolikus viselkedést jósoló elmélet és a kísérlet között, ami az átlagos protonosugár enyhe növekedésének lehet a jele a proton instabilitási vonalhoz közeledve ahogy az az alábbi ábrán is látható.



1.ábra Az Sn atommagokban mért alapállapotú átmenet átmeneti valószínűsége a tömegszám függvényében.

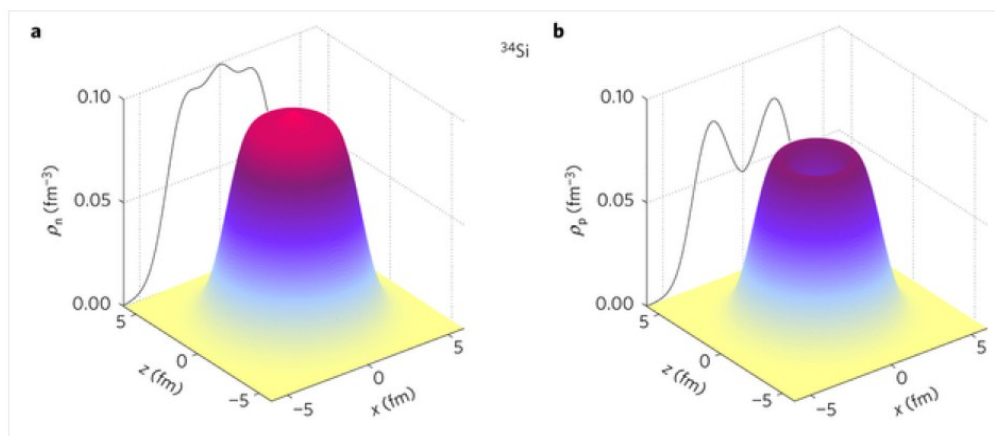
A gerjesztési energiák vizsgálatából is lehet következtetni a lecsatolódás mértékére. A nehéz Sn atommagokban meghatároztuk az első 2^+ állapotok energiáját $A=138$ -ig [*Physical Review Letters* 113, 132502, 2014, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2, 023D02, 2014]. Az $N=82$ héjzáródás után kb. fele akkor energia kell egy neutronpár feltöréséhez, mint előtte, ami a neutron – neutron kölcsönhatás erősségének a csökkenését mutatja. Ez egy jele lehet a neutronoknak a

törzsről való lecsatolódásának. Ezt az elképzelést erősíti meg a ^{136}Te és a ^{132}Cd viselkedése is [Physical Review C 94, 051301(R), 2016]. Mindkét magban az első 2^+ állapot energiája jóval alacsonyabb, mint a félig zárt ^{134}Te , illetve ^{130}Cd atommagokban, ahol ez az energia a protonpár feltöréséhez szükséges energiát mutatja. Állapotkeveredési számítások azt mutatják, hogy az $N=82$ héjzáródás után az első gerjesztett állapot túlnyomóan (85%) neutron gerjesztés szemben az $N=82$ előtti kb. 50-50%-os keveredéssel, azaz a proton és neutron korreláció erőssége jelentősen lecsökkent a stabilitási völgyben megszokotthoz viszonyítva. A fentiek alapján méltán számíthatunk egy vastag neutronbőr kialakulására az $N=82$ héjzáródáson túli könnyű atommagokban.



2.ábra. A páros-páros Sn, illetve Te és Cd atommagok első gerjesztett állapotának energiái a neutronsám függvényében.

A proton és a neutron sűrűség nem csak nagy proton vagy neutron többlet következtében térhet el egymástól tipikusan többletet alkotó nukleon fajta bőrként vagy glóriaként szétterülő eloszlása miatt, hanem lehet eltérés a sűrűségeloszlásban a mag belsejében is főleg könnyebb magok esetén. A ^{34}Si atommagot nukleonkiütési reakcióban vizsgáltuk és megmutattuk, hogy a proton $d_{5/2}$ pálya teljesen betöltött, míg az $s_{1/2}$ teljesen üres [Nature Physics online, 2016]. A nagyobb impulzusmomentumhoz tartozó pályák a magfelszínére húzódnak, a kis impulzusmomentumú $s_{1/2}$ pálya üressége viszont a mag közepében hoz létre egy protonhiányt. Ezt mutatja a 3. ábra.

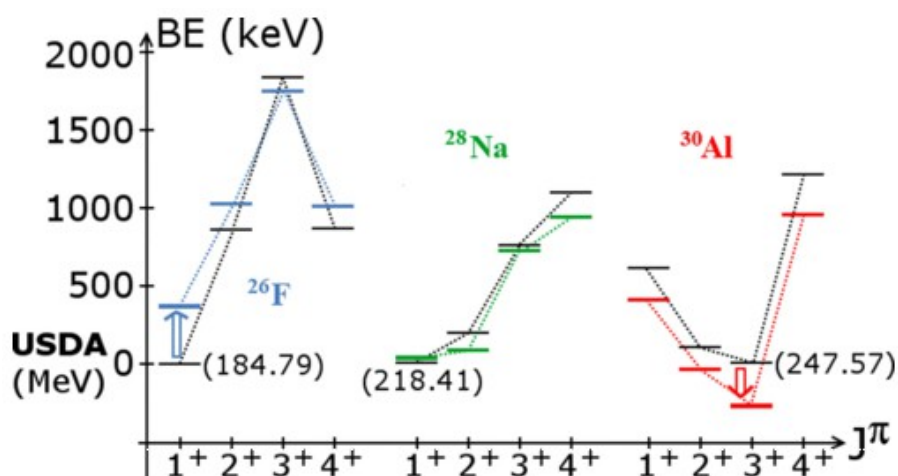


3.ábra A ^{34}Si neutron és proton eloszlása átlagtér számolás alapján.

A proton – neutron monopol korreláció és hatása a héjzáródásokra

A proton – neutron monopol kölcsönhatás egyszerűen a proton – neutron kölcsönhatás erőssége. Mértéke függ a proton és neutron pályák átfedésétől, így a pályák radiális kiterjedésétől és impulzusmomentum-különbségétől. A kölcsönhatás erőssége vizsgálható a páratlan – páratlan atommagok multipliettjeinek felhasadásából. További információt tudunk nyerni a monopol kölcsönhatás erősségéről az egyrészcseke állapotok energiájának tömegszámfüggéséből. Ha egy maghoz protonokat vagy neutronokat kezdünk adni, akkor a monopol kölcsönhatás miatt a neutronok, illetve protonok effektív egyrészcseke energiái megváltoznak, átrendeződnek, aminek a következtében a mágikus számok eltűnhetnek és új mágikus számok jöhetnek létre. Ezért jelentős minden egyrészcseke energiára, illetve héjstabilitásra vonatkozó információ.

A proton – neutron effektív kölcsönhatás erősségét a $^{24,26}\text{F}$ atommagokban egészen a neutron instabilitási vonal közelében vizsgáltuk [Physical Review Letters 110, 082502, 2013, Physical Review C 85, 017303, 2012, Physical Review C 92, 014327, 2015]. A ^{26}F esetében a monopol kölcsönhatási erősség jelentős csökkenését tapasztaltuk, ami összefüggésbe hozható a gyengén kötött neutron pályasugarának megnövekedésével. Így kapcsolódik a monopol korreláció és geometriai korreláció egymással. A ^{26}F -nál tapasztalt anomáliát tovább vizsgáltuk, kimértük a $d_{5/2}d_{3/2}$ multipliett felhasadását a ^{28}Na -ban is [Spectroscopy of Na28: Shell evolution toward the drip line, Phys. Rev. C 92, 054309, 2015], kiegészítettük a szisztematikát a korábbi kísérleti adatokkal. A héjmodell jól írja le a ^{28}Na -ban a multipliett felhasadását, de a ^{30}Al -ban már kicsit alul becsüli a kötési energiát, megerősítve, hogy a stabilitási völgyből származó héjmodell erősségek túlságosan vonzóak a gyengén kötött neutron $d_{3/2}$ állapot esetén.



4.ábra. A $\pi d_{5/2} \nu d_{3/2}$ multipliett felhasadása. Színes vonalak: kísérlet, szürke vonalak: héjmodell számolás eredménye.

Az N=82 héjzáródás stabilitása

A RIKEN-i radioaktívnyaláb-gyár specialitása a hasadványtermékek előállítására. Különösen figyelemre méltó alap kutatás szempontjából a kiemelkedő ^{132}Sn hozama. Jelentős erőfeszítéseket tettünk a ^{132}Sn körüli magtartomány viselkedésének a feltérképezésére. Új adatokat nyertünk a ^{132}Sn -tól délnyugatra fekvő magokra [β decay of Cd129 and excited states in In129, Physical Review C 91, 054324, 2015, β decay of semi-magic 130Cd: Revision and extension of the level scheme of 130In, Physical Review C 94, 024303, 2016, Identification of a millisecond isomeric state in 129Cd81 via the detection of internal conversion and Compton electrons, Physics Letters B 738, 223, 2014, Collectivity evolution in the neutron-rich Pd isotopes toward the N = 82 shell closure, Physical Review C 88, 054318, 2013, Core-coupled states and split proton-neutron

quasiparticle multiplets in Ag122-126, Physical Review C 87, 034308, 2013]

A magtérképen a ^{132}Sn -tól délre és keletre elhelyezkedő magok a legérdekesebbek. Az S, In és Cd magok esetén sikerült túljutni az $N=82$ vonalon [*Structure of ^{136}Sn and the $Z = 50$ magicity, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2, 023D02, 2014, Yrast $6+$ Seniority Isomers of $^{136,138}\text{Sn}$, Physical Review Letters 113, 132502, 2014, First observation of γ rays emitted from excited states south-east of ^{132}Sn : The $p_{9/2} \otimes v_{f_{7/2}}$ multiplet of $^{132}\text{In}_{83}$, Physical Review C 93, 041301(R), 2016, First spectroscopic information from even-even nuclei in the region “southeast” of ^{132}Sn : Neutron-excitation dominance of the $2+1$ state in ^{132}Cd , Physical Review C 94, 051301(R), 2016]*

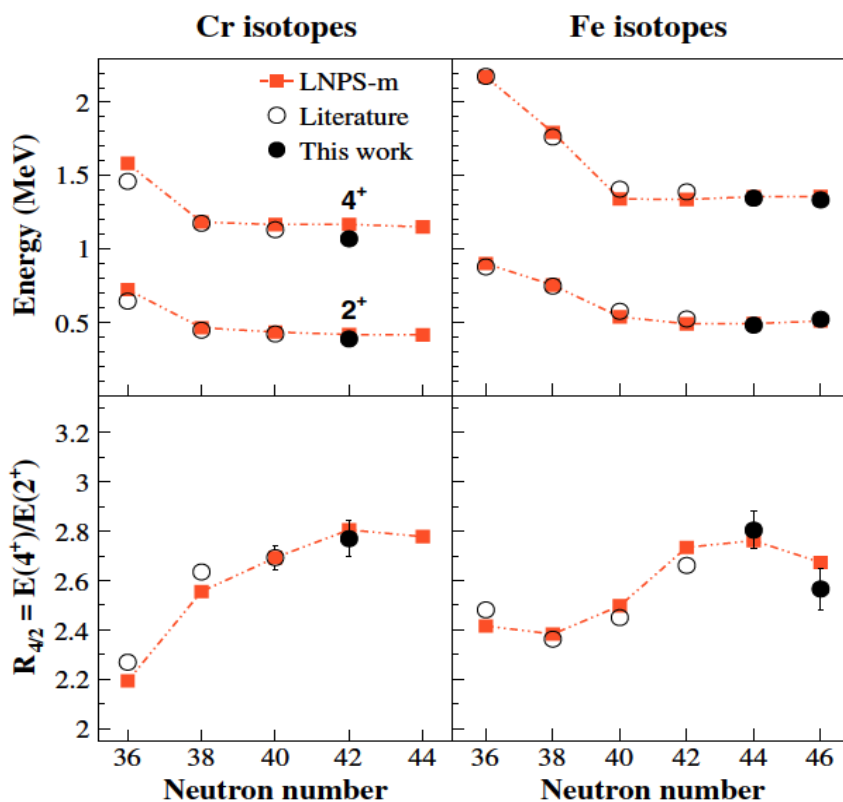
A nagy kérdés az $N=82$ héjzáródás stabilitása. A Pd a legkönnyebb $N=82$ mag, melyre még közvetlen kísérleti információt sikerült kapnunk [*Isomers in Pd-128 and Pd-126: Evidence for a Robust Shell Closure at the Neutron Magic Number 82 in Exotic Palladium Isotopes, Physical Review Letters 111, 152501, 2013*]. $Z=46$ -nál még erős $N=82$ héjzáródást tapasztaltunk.

A ^{126}Pd izotópban talált negatív paritású izomer állapotok energiáját, illetve a ^{131}In $3/2^-$ állapotának energiáját figyelembe véve, és felhasználva a fentebb említett kísérleti adatokat héjmodell számításokkal extrapolálni lehetett az $N=82$ héjzáródás erősségét [*Monopole-Driven Shell Evolution below the Doubly Magic Nucleus Sn_{132} Explored with the Long-Lived Isomer in Pd126, Physical Review Letters 113, 042502, 2014, $1p_{3/2}$ Proton-Hole State in Sn_{132} and the Shell Structure Along $N=82$, Physical Review Letters 112, 132501, 2014*]. A jóslatok alapján a ^{122}Zr nem lesz kétszer mágikus atommag.

A tartományra nyert felezési idő adatokat az asztrofizikai r -folyamat számításokhoz felhasználva pontosítani lehetett a ritka föld izotópok hozamát ami már összhangban van egy univerzális r processz mechanizmussal [*β -Decay Half-Lives of 110 Neutron-Rich Nuclei across the $N=82$ Shell Gap: Implications for the Mechanism and Universality of the Astrophysical r Process, Physical Review Letters 114, 192501, 2015*].

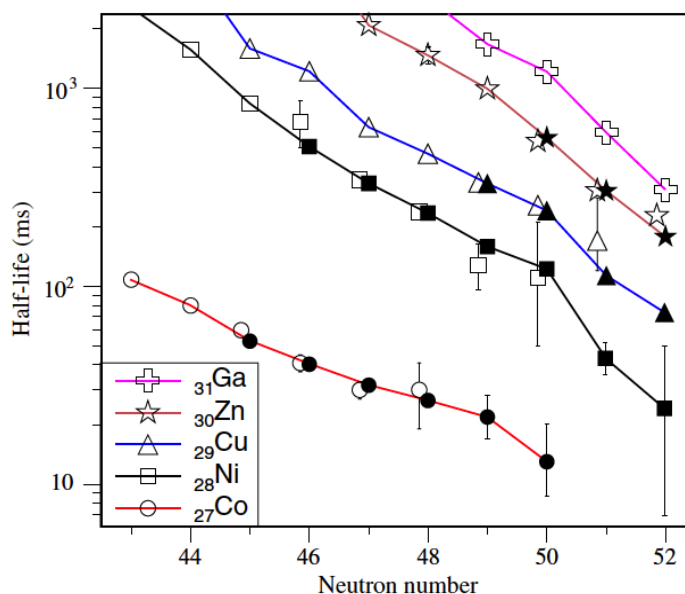
Az $N=50$ héjzáródás stabilitása

A másik, már-már elérhetőnek látszó magtartomány a ^{78}Ni környéke, ahol az $N=50$ héjzáródás tartóssága a kérdés. A 40 neutronnal rendelkező ^{68}Ni kétszer mágikus jelleget mutat, de ez az $N=40$ héjzáródás oszcillátor héjzáródás jellegének, nem pedig a héjköz nagyságának köszönhető. Emiatt az $N=40$ alhéjzáródás hatása csak egy szűk magtartományon érvényesül. Már az $N=42$ Zn magok is deformálódnak a proton – neutron kvadrupól korreláció miatt [*First direct lifetime measurement of the $2+$ state in $^{72,74}\text{Zn}$: New evidence for a shape transition between $N=40$ and $N=42$ close to $Z=28$, Physical Review C 85, 054321(10), 2012*]. A $Z=28$ feletti proton egyrészecske energiák nem változnak jelentősen a neutron $g_{9/2}$ állapotok betöltésének növelésével [*Evolution of single-particle strength in neutron-rich ^{71}Cu , Physics Letters B 751, 306, 2015*]. Részletesen tanulmányoztuk a ^{72}Ni szerkezetét β -bomlásból [*Low-lying excitations in ^{72}Ni , Physical Review C 93, 034328, 2016*] valamint a neutrongazdag Fe és Cr izotópok szerkezetét mind in-beam gamma spektroszkópiai módszerekkel [*Extension of the $N=40$ Island of Inversion towards $N=50$: Spectroscopy of Cr_{66} , $\text{Fe}_{70,72}$, Physical Review Letters 115, 192501, 2015*], mind β -bomlásból [*Decay properties of $^{68,69,70}\text{Mn}$: Probing collectivity up to $N = 44$ in Fe isotopic chain, Physics Letters B 751, 107, 2015*]. A 2^+ és 4^+ állapotok energia arányából a 4. ábrán azt lehet látni, hogy a $g_{9/2}$ alhéj közepéig nő a deformáció utána picit csökken, ami legalább a vas esetén az $N=50$ héjzáródás megmaradására utal.



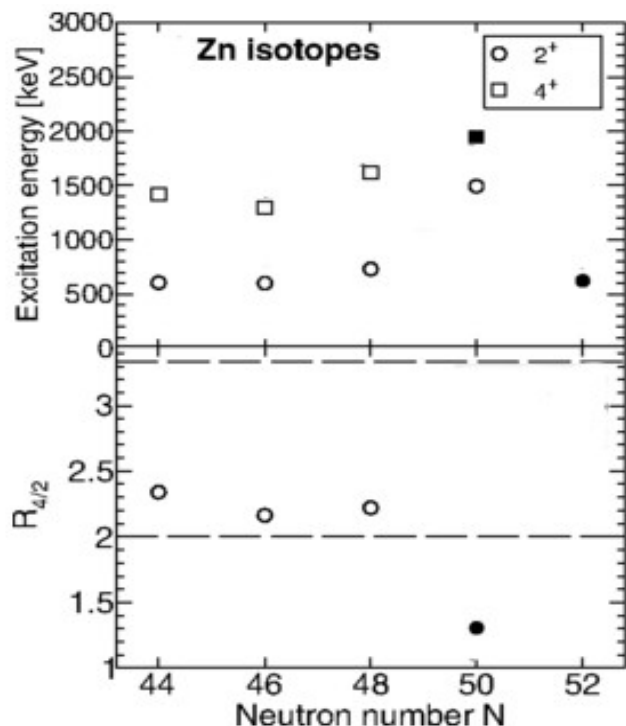
4. ábra. A neutrongazdag vas és króm izotópok 2+ és 4+ állapotainak és energia-arányuknak a szisztematikus viselkedése a neutrons szám függvényében.

Magának a ^{78}Ni -nek nem sikerült a gerjesztett állapotait vizsgálni, de az $N=50$ -en túli atommagok felezési idejét már meg lehetett mérni [β -Decay Half-Lives of $\text{Co}76,77$, $\text{Ni}79,80$, and $\text{Cu}81$: Experimental Indication of a Doubly Magic $\text{Ni}78$, *Physical Review Letters* 113, 032505, 2014], amelyek szisztematikus viselkedéséből (az 5. ábrán $N=50$ -nél látható törés) a ^{78}Ni kétszer mágikus jellegre lehet következtetni.



6. ábra. A neutrongazdag Ga, Zn, Cu Ni és Co izotópok felezési idejének szisztematikus viselkedése a neutrons szám függvényében

A ^{80}Zn gerjesztett állapotainak vizsgálata során sikerült azonosítani az első $2+$ és $4+$ állapotot [Investigating nuclear shell structure in the vicinity of ^{78}Ni : Low-lying excited states in the neutron-rich isotopes $^{80,82}\text{Zn}$, *Physical Review C* 93, 024320, 2016]. Ezek energiaaránya 2 alatti, ahogy az a 7. ábrán látszik, ami tipikusan egy 2 -proton gerjesztés. Ez a megfigyelés is arra utal, hogy a ^{78}Ni kétszer mágikus jelleggel rendelkezik.

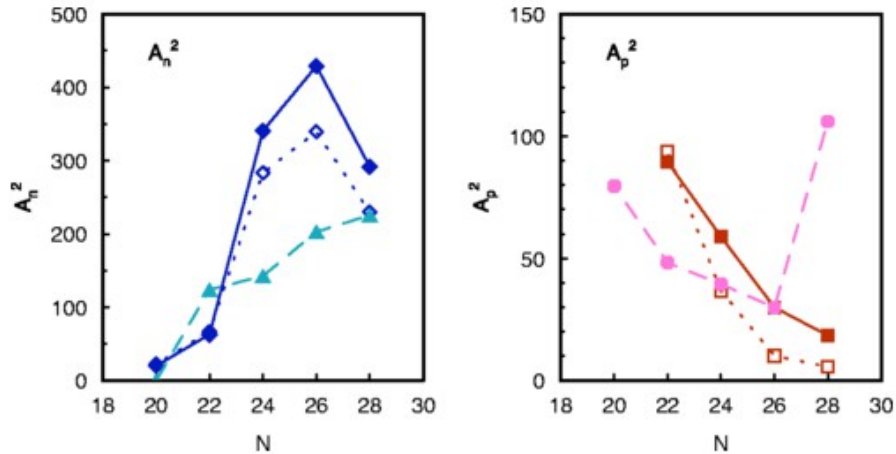


7. ábra. A neutrongazdag cink izotópok $2+$ és $4+$ állapotainak és energia-arányuknak a szisztematikus viselkedése a neutronsám függvényében.

Izomer spektroszkópiával sikerült az $N=50$ Co mag gerjesztett állapotait is gerjeszteni. [Two-hole structure outside $\text{Ni}78$: Existence of a μs isomer of $\text{Co}76$ and β decay into $\text{Ni}76$, *Physical Review C* 92, 051305(R), 2015]. Az izomer állapotok élettartamának héjmodell analíziséből sikerült azonosítani az állapotokat, melyekből a neutron $g_{9/2} - p_{1/2}$ állapotok energiakülönbségét lehet meghatározni. Ez viszont csak a $N=40$ héjköz nagyságára jellemző.

Az $N=16, 20, 28$ héjzáródásokra kapott eredmények

Az $N=28$ héjzáródás erősségét vizsgáltuk az Ar atommagokban, ahol az elméleti leírások már csak egy gyenge héjzáródásról tudnak, holott kísérletileg az még elég határozottnak látszik. Kísérletileg pontosabb technikával és feldolgozási módszerrel újramértük a ^{46}Ar alapállapotú deformációját, és megállapítottuk, hogy lényegesen kisebb az elméletileg jószolt értéknél [Coulomb excitation of ^{44}Ca and ^{46}Ar , *Physical Review C* 93, 044333, 2016]. Figyelembe véve a korábbi kísérleti adatokat is a teljes Ar izotópláncra származtattuk a protonok és a neutronok járulékát a deformáció kialakulásához. Azt találtuk, hogy a protonok járuléka folyamatosan csökken a neutron szám növelésével, míg a neutronok járulékában megvan a héjzáródásra emlékeztető trend. Az elméletek $N=28$ -nál jól írják le a neutron járulékot, de a protonokét erősen felülbecslik. A valóságban a protonok nem csatlakoznak a neutronok kvadrupól vibrációjához, arról lecsatolódva csak szemlélik az eseményeket.



8.ábra. A neutronok (A_n) és protonok (A_p) hozzájárulása az Ar izotópok kvadrupól nyomatékához. A sötétkék és piros jelek a különböző feldolgozási módszerrel kapott kísérleti értékek, a világos kék és a rózsaszín jelek az elméleti jóslatot mutatják.

Az $N=20$ és $N=28$ héjzáródások közelében a kutatások a két mágikus szám által meghatározott vonal mentén folytak. A fentihez hasonló szisztematikus vizsgálatok elvégzéséhez információra lenne szükség a két mágikus szám közti tartományra is. Ennek a hiánynak a pótlására vizsgáltuk a nehéz P és S magokat mélyen rugalmatlan szórásban [*Spectroscopy of neutron-rich $P_{34,35,36,37,38}$ populated in binary grazing reactions, Physical Review C 92, 044308, 2015, Particle-core coupling in ^{37}S , Physical Review C 93, 044318, 2016, First in-beam γ -ray study of the level structure of neutron-rich ^{39}S , Physical Review C 94, 024325, 2016*].

Az $N=20$ héjzáródás megszűnését az általánosan elfogadott nézet szerint a 2-részecske-2-lyuk gerjesztésekre ható erős proton-neutron kvadrupól korreláció okozza, ami a héj közepén a legerősebb. Az elméletre a koronát az tenné fel, ha sikerülne megtalálni a deformált alapállapotú magban a gömbölyű $0+$ állapotot, illetve a gömbölyűben a deformáltat. Ez utóbbit sikerült megtalálnunk, azonosítottuk a ^{34}Si -ban a 2-részecske-2-lyuk $0+$ állapotot [*Unveiling the intruder deformed $0+2$ state in ^{34}Si , Physical Review Letters 109, 092503(5), 2012*].

A $N=14, 16$ alhéjzáródások közelében vizsgáltuk a gerjesztett állapotok energiáját a ^{25}F -ban [*Study of neutron rich nucleus ^{25}F via single step fragmentation, Acta Physica Polonica B 44, 553, 2013, Excited states in the neutron-rich nucleus F_{25} , Physical Review C 89, 054323, 2014*] és a ^{19}C -ben [*γ -ray spectroscopy of C_{19} via the single-neutron knock-out reaction, Physical Review C 91, 064315, 2015*]. Mindkét magban meghatároztuk a páratlan nukleon egyrészecskeenergiáit.

$N=100$: héjzáródás deformált potenciál völgyben $Z=64$ körül

Kihasználva, hogy a RIKEN-i radioaktív nyalábglyár meglehetősen egzotikus hasadványtermékeket is elő tud állítani, a ritka földfémek tartományában át lehtett lépni az $N=100$ neutronszámot is és izomer spektroszkópiával vizsgálni lehtett az $N=102$ magokat is [*Isomer Decay Spectroscopy of Sm_{164} and Gd_{166} : Midshell Collectivity Around $N=100$, Physical Review Letters 113, 262502, 2014*], és áttekintve a Sm, Gd, Dy magok $2+$ és $4+$ állapotainak szisztematikáját, ki lehtett mutatni az $N=100$ deformált héjzáródást.

Közepes-spinű magállapotok a ^{78}Ni környékén

Az alacsonyenergiás magfizikai kutatások egyik aktuális területe a stabilitási völgytől igen távol fekvő, kétszer mágikusnak várt ^{78}Ni körüli atommagtartomány tulajdonságainak a feltárása, a jelentős neutrontöbblet hatásainak a vizsgálata.

Az Institut Laue-Langevin-ben (ILL, Grenoble) EXOGAM, GASP és LOHENGRIN detektorokból felépített EXILL Ge-detektorrendszert használva az ^{235}U hideg-neutronok által indukált hasadásában keletkező neutron-gazdag Br és Rb atommagok szerkezetét tanulmányoztuk. Elsőként azonosítottunk közepes spinű gerjesztett állapotokat a ^{87}Br , ^{88}Br , ^{89}Br és a ^{90}Rb atommagokban. A ^{89}Br atommagban elsőként azonosítottunk gerjesztett állapotot, ugyanis korábban csak az alapállapot volt ismert.

Az egyszer páratlan ^{87}Br és ^{89}Br atommagokban meghatároztuk az alapállapotú spin-paritást, ami a ^{87}Br esetén az irodalomban ellentmondásos volt, a ^{89}Br esetén pedig nem volt ismert. Mindkét atommag esetén azt találtuk, hogy a közepes spinű állapotok sávokba rendeződnek, melyek $3/2^-$, $5/2^-$ és $9/2^+$ spin-paritású sávfejre épülnek. Az eredményeket „large-scale” héjmodell-számítások eredményeivel összevetve azt találtuk, hogy az észlelt sávok $\pi p_{3/2}$, $\pi f_{5/2}$ és $\pi g_{9/2}$ egyrézecske-állapotokra épülő sávokként értelmezhetők. A $\pi g_{9/2}$ sáv esetén a kísérleti és az elméleti energiák eltérnek, ami megnövekedett kollektivitásra utal. Ezen sávok tulajdonságait a szomszédos páros-páros atommagok alapállapotú sávjaival összevetve a kollektivitás a ^{87}Br esetén inkább vibrációs, míg a ^{89}Br esetén inkább rotációs jelleget mutat [*Medium-spin states of the neutron-rich $^{87,89}\text{Br}$ isotopes: Configurations and shapes, Journal of Physics: Conference Series 724 (2016)2051*].

A páratlan-páratlan ^{88}Br és ^{90}Rb atommagok észlelt közepes-spinű gerjesztett állapotai szintén értelmezhetők a héjmodell eredmények alapján. Az állapotok multiplettekbe rendeződnek, melyek a $\pi p_{3/2}$, $\pi f_{5/2}$ és $\pi g_{9/2}$ proton állapotoknak a $\nu(d_{5/2})^3$ 3-as szenioritású multipletthez való csatolódásával állnak elő. Ez szintén alátámasztja a kollektív effektusok jelenlétét a ^{88}Br és ^{90}Rb atommagokban [*Neutron-proton multiplets in the nucleus ^{88}Br , Physical Review C 92, 014328 (2015); Neutron-proton multiplets in the odd-odd nucleus ^{90}Rb , Physical Review C 93, 034318 (2016)*]. Az észlelt gerjesztett állapotok alapján meghatároztuk a $g_{9/2}$ proton intruder nívó helyzetét a ^{78}Ni magtörzsben, ami 5.7 MeV-nek adódott az $f_{5/2}$ proton-nívó felett.

A háromtengelyűen deformált atommagok királis forgása

Az atommagokban a spontán szimmetriasértés egy újonnan felismert formája a királis szimmetria sérülése háromtengelyűen deformált, speciális valencia-nukleon konfigurációval rendelkező forgó atommagok esetén a maggal együtt forgó vonatkoztatási rendszerben. A jelenség lényege szemléletesen az, hogy három impulzusmomentum vektor, (a magtörzs forgásához, a nagy impulzusmomentumú protonpályához, illetve a nagy impulzusmomentumú neutronpályához tartozók) egymásra merőlegesen állnak be, így jobb, illetve balsodrású rendszert alkothatnak. Ez a jelenség az atommagban az időtükrözési szimmetria sérülésével kapcsolatos, és a kísérletekben látható jele az azonos paritású és közelítőleg azonos energiájú állapotokat tartalmazó forgási sávpárok megjelenése. Az ilyen atommagok feltérképezése és a jelenség sajátosságainak a tanulmányozása a magszerkezet-kutatás egyik aktuális területe. A királis szimmetriasértést tanulmányoztuk két magtartományban, a ^{103}Rh és a ^{132}La atommagokban.

Az atommagokban a királis szimmetriasértés általában egy speciális konfiguráció esetén lép fel. Az utóbbi években elméleti előrejelzések születtek arra vonatkozóan, hogy egy atommagban több konfiguráció is királis lehet. Ezt „többszörös kiralitásnak” nevezzük. Ennek az első kísérleti megfigyelése a ^{133}Ce atommagban történt. Mi az $A \sim 100$ magtartományban terveztük kimutatni a ^{103}Rh atommagban, ahol szintén várható volt az elmélet szerint. A ^{103}Rh atommag közepes- és nagyspinű állapotait $^{96}\text{Zr}(^{11}\text{B}, 4n)$ fúzió-párolgás típusú reakcióban gerjesztettük, a kisugárzott gamma sugárzást pedig a nagy hatásfokú, ~ 100 detektort tartalmazó Gammasphere Ge detektorlabdával detektáltuk. Három királis-jelölt forgási sávpárt találtunk a vizsgált atommagban.

Ezeknek a tulajdonságait “korlátozott kovariáns sűrűség funkcionál elmélet” és “részcseke-rotor modell” számítások eredményeivel vetettük össze. Ez alapján három királis sávpárt azonosítottunk és meghatároztuk a héjmodell-konfigurációikat. Azt találtuk, hogy a három királis sávpárból kettő ugyanahhoz a konfigurációhoz tartozik. Ilyen típusú többszörös kiralitást korábban még nem azonosítottak. A megfigyelt új típusú többszörös kiralitás azt mutatja, hogy az atommagokban a királis geometria egy adott konfiguráció belső gerjesztése ellenére is fennmaradhat [*Multiple Chiral Doublet Bands of Identical Configuration in ^{103}Rh* , *Physical Review Letters* 113, 032501 (2014)].

Az atommagok királis forgására utaló jeleket először az $A \sim 130$ magtartományban, a ^{134}Pr majd a ^{132}La atommagban figyelték meg. Az elméleti eredmények megerősítették, hogy ezekben az atommagokban valóban várható a jelenség. Azonban későbbi nívóéletidő mérések eredményei megmutatták, hogy az eredetileg királisnak hitt sávpárok nem azok. Viszont a ^{132}La atommagban észleltek egy új forgási sávot, ami az állapotok energiáit tekintve királis párja lehetett volna az egyik korábban észlelt forgási sávnak, ami feloldotta volna az ellentmondást az elméletben várt, de kísérletileg nem észlelt kiralitásban. Azonban az új sáv paritása és az állapotok spinjei nem voltak ismertek. Két kísérletben az európai EUROBALL és az amerikai Gammasphere detektorrendszerekkel vizsgáltuk a ^{132}La atommag gerjesztett állapotait. Új állapotokkal egészítettük ki az új sávot és meghatároztuk az állapotok spinjeit és paritását. Azt találtuk, hogy az új sáv paritása nem egyezik meg a korábbi sávokéival, így nem lehet a királis párjuk [*Medium- and high-spin band structure of the chiral candidate ^{132}La* , *Physical Review C* 87, 044323 (2013)].

A neutronhiányos Ru és Rh atommagok közepes- és nagyspinű állapotai

A neutronhiányos Ru és Rh atommagok gerjesztett állapotai fúzió-párolgás típusú magreakciókban állíthatók elő. Azonban ezekben a reakciókban sok más atommag is előáll a vizsgáltknál lényegesen nagyobb hatás keresztmetszettel. Ezért ezekben a kísérletekben speciális detektorrendszert alkalmaztunk, amely a nagy hatásfokú EXOGAM gamma-detektorból, a részben a csoportunk által kifejlesztett DIAMANT töltött-részecske detektorból és egy több-elemű neutrondetektorból állt. A speciális detektálási technika lehetővé tette a ^{94}Ru és a ^{95}Rh közepes- és nagyspinű nívósémájának kibővítését. Az észlelt új állapotok spin paritás értékeit gamma-szögkorreláció és lineáris polarizáció mérésekből egyértelműen meghatároztuk. Így a nívósémák összevethetővé váltak a nagy állapottérrel dolgozó héjmodell-számítások eredményeivel, amivel jó egyezést mutatnak [*Character of particle-hole excitations in ^{94}Ru deduced from γ -ray angular correlation and linear polarization measurements*, *Physical Review C* 89, 014301 (2014); *Spectroscopy of the neutron-deficient $N = 50$ nucleus ^{95}Rh* , *Physical Review C* 89, 044310 (2014)].

Szintén az EXOGAM detektorrendszerrel vizsgáltuk a ^{91}Ru atommag állapotait, és a kísérleti nívósémát félempirikus héjmodell számítások eredményeivel vetettük össze. A kísérleti és elméleti eredmények jó egyezése alátámasztja az észlelet $(21/2^+)$ és $(17/2^+)$ nem-yrast állapotok azon interpretációját, hogy azok a $v(g_{9/2})^{-3}$ 3-as szenioritású multiplett J_{\max} és $J_{\max}-2$ tagjai [*γ -ray linear polarization measurements and $(g_{9/2})^{-3}$ neutron alignment in ^{91}Ru* , *Physical Review C* 87, 044328 (2013)].

A proton – neutron párkölcsönhatás

A magerők rövid hatótávolsága miatt az azonos pályán mozgó proton és neutronok között erős kölcsönhatás várható, ha 0 eredő spinnel kapcsolódnak. Emiatt minden páros – páros atommagnak 0 az alapállapot spinje, és az egyszeresen zárt héjú magokban proton, illetve neutron párkondenzáció is képződik. A magerők töltésfüggetlensége miatt természetes elvárásnak tűnik, hogy az $N=Z$ magokban deuteron jellegű proton – neutron pár kondenzáció alakuljon ki. A deuteron kondenzációból történő beta bomlásnak nagyon szelektívnek kellene lennie, egy állapotot kellene populálni a leánymagban. A ^{62}Ge mag bomlását vizsgálva azt találtuk, hogy az erősség 6 állapot között oszlik szét, azaz a bomlás nem párkondenzációból történik [*Hindered Gamow-Teller decay*].

to the odd-odd $N = Z$ 62Ga : Absence of proton-neutron $T = 0$ condensate in $A = 62$, *Physical Review Letters* 113, 092501, 2014]. A párkondenzáció hiányát meg tudjuk érteni, ha nem feledkezünk meg arról, hogy a proton – neutron párkölcsönhatás mellett továbbra is hatnak a proton – proton, illetve neutron – neutron párerők is, ami miatt nem deutron jellegű párkondenzáció, hanem egy alfa jellegű kvartett korreláció kialakulása várható.

Tudománymetriai adatok

A projekt 5 éve alatt a világ vezető laboratóriumban kaptunk nyalábidót elképzeléseink megvalósítására. Számos figyelemre méltó eredményt értünk el különböző ad hoc együttműködések keretében. A projekt támogatásával 56 közlemény született. Ezek közül egyet a Nature Physics-ben, 12-t a Physical Review Letters-ben, 7-et a Physics Letters-ben 31-et pedig Physical Review C-ben közöltünk. A publikációk átlagos impaktfaktora 4,9, összesített impaktfaktora pedig 269,5. A projekthez kapcsolódóan született két PhD értekezés: Kuti István: „Atommagok királis forgásának vizsgálata az $A \approx 130$ és az $A \approx 100$ magtartományokban” és Vajta Zsolt „Az $N = 14$ és $N = 16$ alhéjzáródások környékén elhelyezkedő ^{19}C , ^{21}N és ^{25}F radioaktív atommagok szerkezetének vizsgálata” című műve, mely még védésre vár.