

A HÉJSZERKEZET ÁTRENDEZŐDÉSE EGZOTIKUS ATOMMAGOKBAN

Dombrádi Zsolt
MTA ATOMKI, Debrecen

A magfizika történetét 1911-től számoljuk, amikor *Ernest Rutherford* α -szórási kísérleteivel kimutatta, hogy az atom nem tömör, hanem a közepében egy kicsi ($\sim 10^{-14}$ m átmérőjű) részben van az atom tömegének jelentős része, amit az atom magjának nevezett el. 1916-ban $^{14}\text{N}(\alpha, p)$ reakcióban sikerült kimutatni, hogy a magban pozitív töltésű részecskék, protonok vannak. 1932-ben ködkamrás kísérletben *James Chadwick* kimutatta, hogy az atommag másik fontos összetevője a semleges neutron. Innen számolhatjuk a kis energiás – az atommag szerkezetét proton és neutron szabadsági fokokkal értelmező – magszerkezet-kutatást. Nem sokkal az atommag felfedezése után sikerült kimutatni, hogy egy adott töltésű maghoz különböző tömegek tartozhatnak, azaz különböző izotópok léteznek. 1932-re az is kiderült, hogy ennek az az oka, hogy az adott töltésű – protonszámú – atommagok különböző számú neutronból állhatnak. Ez a felfedezés egyben utat mutatott az addigi kísérleti eredmények rendezési elvére. A proton-, illetve neutronszám függvényében ábrázolva az adatokat hamar kiderült, hogy bizonyos proton-, illetve neutronszámok közelében bizonyos mennyiségek hirtelen változást mutatnak.

Mindenek előtt a tömegmérésekből meghatározott kötési energiák, illetve az azok különbségéből kapott szeparációs energiák mutattak ugrásszerű változást bizonyos mágikus számoknál. A megfelelő magokat a kibontakozóban levő atomi kvantummechanikai analógia alapján nemesgázszerkezetűnek tekintették. Már a '30-as évek végén ismertek voltak a 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 mágikus számok, amelyek a nemesgázok zárt elektronhéjaihoz hasonlóan zárt proton-, illetve neutronhéjaknak feleltek meg. 1948-ban megszületett az atommagok héjmodellje, amellyel sikeresen lehetett értelmezni a mágikus számokat, mint

héjzáródási effektusokat, valamint a mágikushoz közeli proton- és neutronszámú atommagok alap- és gerjesztett állapotai sajátosságait. Nem sokkal később megszületett a folyadékcseppmodell továbbfejlesztéseként az atommagok kollektív modellje is, amely egy folyadékcseppben végbemenő rezgések és forgások szuperpozíciójaként értelmezi a mágikustól távoli proton- és neutronszámú atommagok gerjesztésienergia-spektrumát.

Ezek az atommagok kis energiás mozgásformáinak értelmezésre tett javaslatok meglehetősen szűk kísérleti adathalmazra alapozva jöttek létre: a kis energiás magfizika alapmodelljei a stabilitási völgy közelében elhelyezkedő atommagok néhány gerjesztett állapotának ismeretében születtek.

A magfizika kezdetei óta megvan az érdeklődés a stabilitási sávától távolabb eső atommagok előállítása és szerkezetének vizsgálata iránt. Mindig újabb és újabb technikát vetettek be, hogy még távolabb lehessen jutni a stabilitási sávától. A '30-as évektől a könnyűion-reakciókat alkalmazták mesterséges izotópok előállítására, majd az urán hasadánytermékeit azonosítva sikerült újabb területeket feltárni. Az '50-es években az izotópszeparátorok elterjedése alapozta meg az új izotópok felfedezését és tulajdonságaik vizsgálatát. A reakciótermékek α -bomlását követve sikerült egy új izotópcsaládot feltárni 1970-re. A '70-es években a spalláció és a nehézionok fúziója volt a fő módszer új izotópok előállítására, a '80-as évekre pedig a nehézionok fragmentációja vált a meghatározó technikává. Mára közel 3000 izotópot sikerült előállítani, bő tízszer annyit, mint amennyi stabil izotóp van.

A héjmodell ugyan a stabil atommagok tulajdonságaira alapozódott, de a későbbi eredmények is könnyen beilleszthetőek voltak. Megfelelő effektív kölcsönhatást használva a héjmodell széles magtartományokon nagy pontossággal képes leírni az atommagok alacsonyenergiás állapotainak sajátosságait. A héjmodell sikereinek elismeréseként 1963-ban *Maria Göppert Meyer* és *Hans Janssen* Nobel-díjat kapott. A '70-es évek közepére világossá vált, hogy az alapvető magmodellek koncepcionálisan helyesek, és az új eredmények csak a modellek finomítását tették szükségessé, de a magfizika „standard” modelljei kiállták az idő próbáját. Sokan úgy gondolták, hogy *Bohr* és *Mottelson* 1975-ös Nobel-díja a kisenergiás magfizika lezárását jelentette. A '80-as évek kísérleti eredményei, mint például a nagy spinű szuperdeformáltság kimutatása vagy új kétszermágikus atommagok megtalálása figyelemre méltó felismeréseket hoztak, ezek azonban nem változtatták meg a magról vallott felfogásunkat, „csak” az eddigi képünket tették részletekben gazdagabbá.

James Chadwick



Ernest Rutherford



Magszerkezet-vizsgálat radioaktív nyalábok segítségével

Az első jelek arra vonatkozóan, hogy nem biztos, hogy az atommagról vallott felfogásunk tökéletes, a '80-as évek közepe táján kezdtek megjelenni. Ezeket a jeleket a stabilitási sávtól távoli atommagok spektroszkópiája szolgáltatta.

Ekkorra az új izotópok előállításának meghatározó módszerévé a nehézion-ütközésekben keletkező fragmentumok röptében való szeparálása vált. Hamar kiderült, hogy ez a technika egy új kutatási irányt is megalapozott. Megfelelően nagyra növelve ugyanis a fragmentumok számát, a szeparált radioaktív ionokat mint nyalábot használva a stabilitási sávtól távoli atommagoknak nemcsak létét és bomlási tulajdonságait, hanem kölcsönhatásait is vizsgálni lehetett. A fragmentációban a kis méretű magtöredékek, fragmentumok keletkeznek legnagyobb számban, így természetes volt, hogy a legkönnyebb atommagokkal kezdődött el a radioaktív-nyalábos magfizika. A He, Li, Be magoknál sikerült leghamarabb elérni a nukleoninstabilitási vonalakat, és elkezdni a neutroninstabilitásivonal mentén elhelyezkedő atommagok sajátosságainak vizsgálatát ütközési folyamatokban.

Már a legegyszerűbb mérés, a mag kölcsönhatási sugarának mérése is meglepő eredményt hozott: A ^{11}Li négyzetes középsugara mintegy 40%-kal nagyobbak mutatkozott, mint ahogy azt az $A^{1/3}$ skálázás szerint várni lehetett. A másik figyelemre méltó felfedezés az volt, hogy a félig zárt héjú neutrontöbbletes atommagok a $^{32}\text{Mg}_{20}$ közelében nem érzik a héjzáródás hatását. A megfigyelt jelenségeket nem lehetett a szokásos héjmodellképben értelmezni. Az első értelmezési javaslat szerint az $N=20$ héjzáródás feletti neutronegyrészecske-állapotok energiája annyira lecsúszott a nagy neutrontöbblet miatt, hogy megszűnt a héjzáródás.

Hirtelen minden bizonytalanná vált a neutroninstabilitásivonal mentén. A már-már reflexszerűen alkalmazott sémák és modellek alapjaikban kérdőjeleződtek meg. A magfizikában újból a '30-as évek hangulata érződött, amit megerősített a kísérleti körülmények hasonlóvá válása is. A radioaktív nyalábok minősége összemérhető az első gyorsítók által szolgáltatott nyalábok minőségével. Kis intenzitású, divergens, bizonytalan energiájú, erősen szennyezett radioaktív nyalábok állnak rendelkezésre. Ugyanakkor gyakran elegendő egyetlen csúcs kimutatása egy spektrumban egy új koncepció megerősítéséhez vagy elvetéséhez. Egy új tudományág született: a radioaktív nyalábos végzett magfizika. Nagy, romantikus lelkesedéssel vetette magát bele a kutatók jó része az új kérdések vizsgálatába, nagy erővel indult meg a magtérkép neutronban gazdag szélének feltérképezése.

Az addig meglevő, radioaktív nyaláb előállítására alkalmas laboratóriumokat elkezdtek bővíteni, felújítani, illetve új generációs berendezéseket kezdtek építeni. Befejeződött a Michigan State Universityn a Nemzeti Szupravezető Ciklotron Laboratórium re-

konstrukciója, üzembe állt a Ganilban a Spiral radioaktívion-gyorsító. Régi, nagynevű központok álltak át radioaktív nyalábos fizikára, mint például a GSI Németországban, a Triumph Kanadában, vagy Oak Ridge az USA-ban. Rikenben még ez évben átadják az új radioaktívnyaláb-gyárat, folyik a felkészülés a GSI Fair berendezésének megépítésére, és a Ganilban a Spiral2 laboratórium létrehozására.

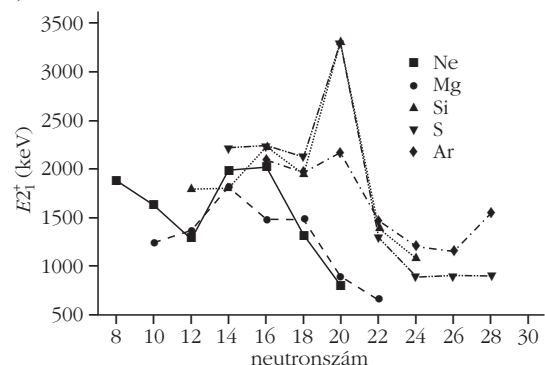
Bő egy évtizedes kutatás után sikerült tisztázni, hogy a gyengén kötött, könnyű, neutrongazdag atommagokban a magsugár növekedését az okozza, hogy a leggyengébben kötött $s_{1/2}$ és $p_{1/2}$ valencianeutronok a többi nukleontól igen távol töltik az idejük nagy részét, így egy híg neutronanyag, neutronfényudvar (glória) lengi körül a magtörzset.

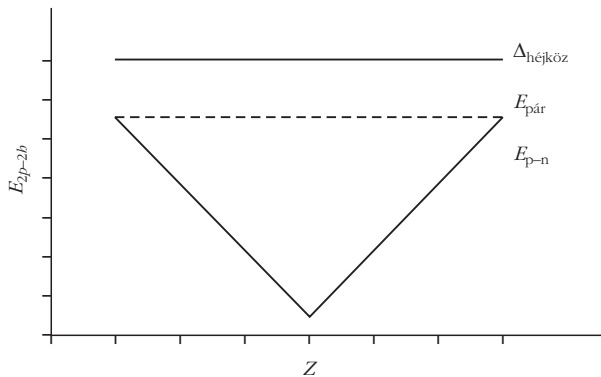
A héjzáródás megszűnése vagy a főhéjzáródáson átívelő gerjesztések?

Ami az eltűnő héjzáródások koncepcióját illeti, kísérletek sora igazolta, hogy a ^{32}Mg körül van egy atommagcsoport, melynek tagjai semmilyen szempontból nem érzik az $N=20$ héjzáródás hatását. A kötési energiákban nincs ugrás az $N=20$ vonal átlépésekor, az első 2^+ állapot energiája inkább csökken, mint nő $N=20$ -nál, ahogy az az 1. ábrán látható, és a $B(E2;0^+ \rightarrow 2^+)$ kvadrupól átmeneti valószínűségek nagyok $N=20$ esetén is. Hasonló megfigyeléseket tettek a ^{12}Be melletti atommagokra is, azaz kísérleti szempontból sem a neutrongazdag $N=8$, sem a neutrongazdag $N=20$ magok nem mutatnak egyszer mágikus jelleget. Ennek ellenére a héjzáródások megszűnésének kérdése állandó viták tárgya maradt.

Ha csökkennek a főhéjak közötti energiakülönbségek, a mag mágikus jellege természetesen előbb-utóbb megszűnik, és hajlamos lesz a deformációra. De nem ez az egyetlen út egy mágikus számú neutronnal rendelkező magban deformált állapotok létrehozására. Ha például egy neutronpárt a következő főhéjra helyezünk, akkor 0-ról 4-re nő az aktív valencianeutronok száma (2-részecske–2-lyuk gerjesztés), és, ha van elegendő valenciaproton is, akkor az általános elvárásnak megfelelően a mag deformálódik ebben az

1. ábra. A $Z=10-18$ atommagok 2_1^+ energiáinak viselkedése a neutronszám függvényében. A Ne és Mg atommagok nem érzik az $N=20$ héjzáródás hatását.

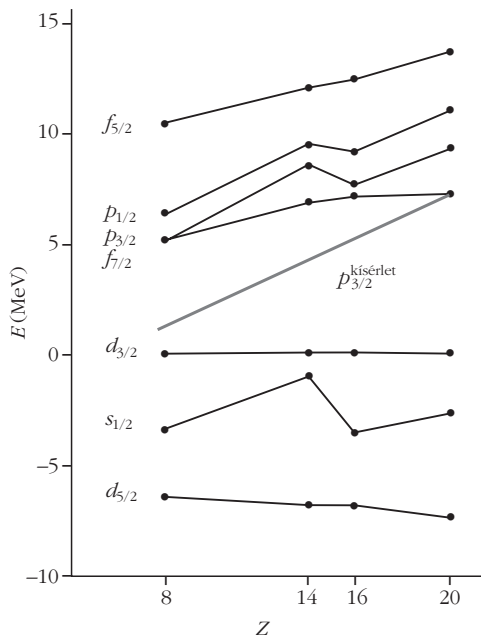




2. ábra. A héjazródáson keresztül történő gerjesztések energiája a protonszám függvényében perturbációs számítás első közelítésében. A párkölcsönhatás erősségének növekedéséből nyert energia egyenletesen, a proton–neutron kvadrupól–kvadrupól kölcsönhatás az aktív protonok számával arányosan csökkenti az intruder állapotok energiáját.

állapotban. Így a normál szférikus konfiguráció mellett egy deformált „intruder” konfiguráció is megjelenik valamilyen gerjesztési energiánál. Ennek az intruder állapotcsaládnak a viselkedése analóg lesz a mágiikus szám ± 4 neutronszámú mag viselkedésével. Az intruder analóg állapotok energiája a deformáció során nyert potenciális energia és a főhéjazródáson át történő 2-részecske–2-lyuk gerjesztés energiájának a különbsége határozza meg, amit a 2. ábra mutat be. Ahhoz hogy két részecskét a következő főhéjra helyezzünk, $\Delta_{h\acute{e}jk\acute{o}z}$ energia kell. Nemi energianyereség származik a megnövekedett párkölcsönhatási energiából (a spin–pálya kölcsönhatás miatt a következő főhéj első egyrészecske-állapota nagyobb spinű, mint a zárt héj utolsó egyrészecske-állapota, és a párkölcsönhatási energia $2j+1$ -gyel arányos). Több energiát lehet nyerni a mag deformálása útján, amit a proton–

3. ábra. A neutronegyrészecske-energiák várható változása a stabilitási sáv közelében meghatározott effektív kölcsönhatást használó 2-főhéjas héjmodellszámítás szerint, és az $N = 20$ héjazródás erőssége a mérések alapján (vastag szürke vonal).



neutron kvadrupól–kvadrupól kölcsönhatás okoz. Ez a járulék az aktív valencianukleonok számával arányos, így a (proton)héj közepén maximális, és akár olyan nagy is lehet, hogy a deformált intruder analóg állapot lesüllyed a szférikus alapállapot alá. Ez a mechanizmus nincs összefüggésben a proton/neutron aránnyal, és a magtérképen minden egyszeresen zárt magtartományban megfigyelhető. Köztudott, hogy a könnyű $^{182-186}\text{Pt}$ magokban az intruder állapot olyan mértékben lesüllyedt, hogy ott már ő az alapállapot. Az $N = 20$ tartományban is lehet ez a helyzet.

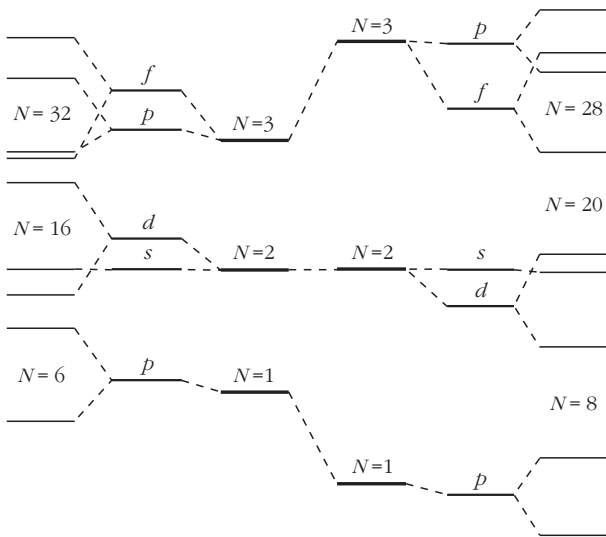
Hamarosan kiderült, hogy a ^{32}Mg körül észlelt jelenségek teljes mértékben értelmezhetőek az intruder analóg állapotok segítségével. A '90-es évekre teljes konszenzus alakult ki a különböző héjmodelliskolák között, hogy a $Z = 10-12$, $N = 20, 21$ szigeten a deformált, neutron-2-részecske–2-lyuk állapotok a szférikus, zárt héjú állapotok alá süllyedtek, és nincs szükség az $N = 20$ héjazródás megszűnésének a feltételezésére. A proton–neutron effektív kölcsönhatás monopól komponense ugyan csökkenti valamelyest az $N = 20$ héjközt (a ^{40}Ca -ban észlelt 7 MeV-ről kb. 5 MeV-re), ahogy ez a 3. ábrán látszik, ez a csökkenés azonban nem szünteti meg a héjazródást, csak hozzájárul ahhoz, hogy az intruder állapotok a gömbszerű normál állapotok alá süllyedjenek.

A fenti állásponttól lényegében csak a tokiói iskola tért el. Ők ugyanis 2-főhéjas héjmodell-számításaikhoz módosították az egy-egy főhéjra illesztett effektív kölcsönhatásokat úgy, hogy a kísérletnek megfelelően a ^{26}O már ne legyen kötött. Ezzel az effektív kölcsönhatással számolva hasonlóan jó leírást tudtak adni az ismert jelenségekre, mint azok a csoportok, amelyek a stabilitási völgyben megfigyelt adatokhoz illesztették a kölcsönhatási mátrixelemeket. Ugyanakkor ezzel az effektív kölcsönhatással azt jósolták, hogy a neutronegyrészecske-energiák erősen függenek a neutronszámtól, és az $N = 20$ héjazródás teljesen megszűnik $Z = 8$ -nál. A megszűnő héjazródás hatása az anomálishan viselkedő tartománytól távolabb levő atommagoknál a legszembetűnőbb: még $N = 17$ -nél is alacsonyan fekvő intruder állapotok lehetnek a neutrongazdag magokban.

Az a felvetés, hogy a stabilitási sávhoz közelebb fekvő magok vizsgálata adhat kulcsot a héjazródások kérdésének a megoldásához, új lendületet adott a kísérleti munkának.

A héjazródások átrendeződése

A kutatásnak ebbe a fázisába kapcsolódtak be az MTA ATOMKI-nak azok a munkatársai, akik a francia nemzeti nehézion laboratóriumban, a GANIL-ban, és a japán fizikai-kémiai kutató intézet RIKEN radioaktív nyaláb gyárában magspektroszkópiai módszerekkel vizsgálták a neutron instabilitási vonal közelében fekvő atommagokat $Z = 6$ -tól $Z = 20$ -ig, és jelentős mértékben hozzájárultak a héjazródások kérdésének tisztázásához.



4. ábra. A stabilitási völgyhöz közeli ($N = Z$) és a neutron-instabilitásivonalhoz közeli ($N = 2Z$) atommagok Fermi-nívóhoz közeli egyrészecske-állapotainak energiája.

Arra vonatkozóan, hogy a hiányzó héjzáródási effektusokat mégiscsak az egyrészecske-állapotok energiájának jelentős változása okozza, az első jelet az $N = 18$ magok vizsgálata szolgáltatta. A ^{29}Na -ban, a ^{28}Ne -ban és a ^{27}F -ban az első néhány gerjesztett állapot energiája a neutrontöbbséttel egyre nagyobb mértékben tér el a gyengén változó héjközzel dolgozó modellek jóslatától, ami megkérdőjelezi ezen modelleknek a héjköz nagyságára vonatkozó feltételezését. A neutrongazdag $N = 17$ magok vizsgálata még tisztább bizonyítékot adott. Az ATOMKI kutatói a 17 neutronot tartalmazó sd -héjú ^{27}Ne és ^{26}F atommagokban az fp -héjból belógó alacsony energiás állapotokat mutattak ki. Ezek az eredmények csak az $N = 20$ héjköz jelentős csökkenésével értelmezhetők: A ^{27}Ne magra vonatkozó kísérleti adataik héjmodell analízise szerint az $N = 20$ héjköz körülbelül 3 MeV-re csökken $Z = 10$ -nél. A 230 transzfer reakció vizsgálatával közvetlenül meg tudták határozni az egyrészecske-energiákat, így modellfüggetlen módon megmutatták, hogy $Z = 8$ -nál az $N = 20$ héjközt adó $d_{3/2} - p_{3/2}$ egyrészecskeenergia-különbség csak $\sim 1,8$ MeV, azaz a héjzáródás teljesen megszűnik. Ez azt jelenti, hogy a Riken-ATOMKI együttműködés eredményeként elsőként az $N = 20$ tartományra sikerült bizonyítani, hogy a megszűnő héjzáródások sokat vitatott koncepciója helyes. Az $N = 20$ héjzáródás megszűnését, a neutronegyrészecske-energiák változását a rendszám függvényében a 3. ábra mutatja be. A $Z = 20$ -nál még 7 MeV erősgű héjzáródás a várt ~ 2 MeV-es csökkenés helyett 5,5 MeV-vel csökken!

Míg az $N = 20$ héjzáródás eltűnt, az $N = 16$ megerősödött. A 3. ábrán a neutron $d_{5/2}$, $s_{1/2}$ és $d_{3/2}$ egyrészecske-energiák változása látható az sd héjmodellszámolás alapján. A neutrongazdag $^{21-23}\text{O}$ atommagok spektroszkópiai vizsgálatával megmutatták, hogy az oxigénizotópokban $N = 14$ -nél keletkező alhéjzáródás erős, az $N = 16$ -nál keletkező pedig még erősebb, 5,6 MeV-es. Érdekes, hogy a protonszám további csökkenésével a ^{20}C -ben az $N = 14$ alhéjzáródás is megszűnik.

A kísérletek egyértelműen bizonyítják, hogy a neutronegyrészecske-energiák olyan erősen változnak a neutron-, illetve protonszám változásával, hogy a stabilitási sáv közelében megszokott mágikus számok eltűnnek, és helyettük újak keletkeznek, mire a neutron-instabilitásivonal közelébe érünk. Az $N = 2Z$ vonal közelében megszűnik az $N = 20$ héjzáródás, és helyette keletkezik az $N = 16$. Az ^{24}O -nél az $N = 16$ héjzáródás erőssége 5,6 MeV, az $N = 20$ héjköz pedig 1,8 MeV-re csökken. Az $N = 2Z$ vonal közelében ^{42}Si -nél kezd eltűnni az $N = 28$ héjzáródás, miközben a ^{52}Ca -ban kialakul egy alhéjzáródás $N = 32$ -nél. A legfrissebb transzfervizsgálatok szerint a neutron-instabilitásivonalon túl megszűnik az $N = 8$ héjzáródás is. A ^9He -ban az $s_{1/2}$ és a $p_{1/2}$ állapotok helyet cserélnek. Az $N = 8$ héjzáródás helyett létrejön az $N = 6$ héjzáródás a ^8He -ban, amelynek az erőssége 4,2 MeV.

Mindennek alapján tudunk adni egy sematikus képet arról, hogy hogyan változnak az egyrészecske-energiák, amint a neutron-instabilitásivonalhoz közeledünk. A változást a 4. ábra szemlélteti. Az $N = 8 \rightarrow 6$ átrendeződés azt jelenti, hogy a neutron $p_{1/2}$ állapot felkerül az sd héjba, míg az $N = 20 \rightarrow 16$ átrendeződés következtében a $d_{3/2}$ állapot az sd héjból felcsúszik az $f_{7/2}$ állapot mellé az fp oszcillátor héjba. Az $N = 28 \rightarrow 32$ átrendeződés pedig azt mutatja, hogy a $p_{3/2}$ állapot is lecsúszik az fp főhéjból az $f_{7/2}$ állapot mellé.

Összevetve a héjzáródások helyét a stabilitási vonal ($N = Z$) és a neutron-instabilitásivonal ($N = 2Z$) közelében rögtön látszik az alapvető különbség: a héjközök csökkenése azt jelenti, hogy az egyes oszcillátorhéjak energiában közelebb kerülnek, azaz a valencianeutronok egy sekély potenciálvölgyet éreznek, ami összefüggésben van alacsony kötési energiájukkal. Egészen a neutron-instabilitásivonal mentén a kis pályamomentumú állapotok közelebb kerültek a nagy momentumú állapotokhoz (s a d -hez és p az f -hez), sőt még alájuk is süllyednek, ami módosított oszcillátorpotenciál-átlagteret használva az ll kölcsönhatás előjelének a megváltozását, a potenciál diffúziójának növekedését jelenti. Emellett kicsit megnő a spin-pálya felhasadás mértéke is. Az új mágikus számok a spin-pálya felhasadás mentén alakulnak ki. Az $N = 6$ $p_{3/2} - p_{1/2}$ felhasadásnak felel meg, az $N = 16$ a $d_{5/2} - d_{3/2}$ felhasadásnak és az $N = 32$ a $p_{3/2} - p_{1/2}$ felhasadás miatt jön létre.

A rikeni gyorsítókomplexum tervének elkészítésekor a projekt vezetője, I. Tanihata azt hangsúlyozta, hogy a radioaktív nyalábokra épülő magfizikától olyan eredményeket várhatunk, amelyek alapján át kell írni a magfizikakönyveket. Arról az alaptételről, mely szerint a mag sugara a tömegszám köbgyökével arányos már kiderült, hogy nem érvényes a neutron-instabilitásivonal közelében. Részben a mi eredményeinknek köszönhetően a mágikus számok eltolódása is bizonyítottnak tekinthető. További váratlan jelenségeket lehet megfigyelni az erősen neutrongazdag atommagokban, mint például a valencianeutronoknak a törzsről való lecsatolódása, vagy a neutron-neutron effektív kölcsönhatás gyengülése. Tanihata jóslata kezd beigazolódni.