

KÜLÖNLEGES SZIGETVILÁG A NEUTRONGAZDAG ATOMMAGOK TENGERÉN

Elekes Zoltán

Atomki, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, Debrecen

A természetben megtalálható kémiai elemek stabil vagy hosszú felezési idejű (több száz év) izotópjainak (körülbelül 200 darab) atommagjaiban a neutronok (N) és protonok (Z) száma kiegyensúlyozott, arányuk a legkönnyebb hidrogénben 1 és a legnehezebb kaliforniumban is csak 1,6. Az utóbbi évtizedekben a kísérleti technika olyan elképesztő fejlődésen ment keresztül, hogy ma már nagyjából 3200 atommagot ismerünk, amelyek jelentős része extrém N/Z aránnyal rendelkezik. Sőt, elméleti számolások azt mutatják, hogy az atommagok ezen tengerén olyan feltáratlan területek találhatók, amelyek valószínűleg ugyanennyi atommagot tartalmaznak. Az ilyen egzotikus atommagoknak természetesen rendkívül rövid az élettartama, és felmerül az is, hogy egyáltalán atommagnak tekinthetjük-e a másodperc törtrészéig létező objektumokat. Ez egy messzire vezető kérdés, azonban a területen dolgozó legtöbb kutató, mivel a különlegességekben érdekelt, minden olyan nukleoncsomót atommagnak tekint, amelynek a kísérleti nyomát fel lehet fedezni. Az utóbbi években már a zeptomásodperc (10^{-21} másodperc) élettartammal rendelkező atommagokról is megbizonyosodott, hogy szerkezettel rendelkeznek, de a yoktomásodperc tartományban is ismerünk körülbelül egy tucat atommagot. Ezek tanulmányozása elengedhetetlen ahhoz, hogy a nukleonokat összetartó erők természetét megfejtjük, mivel szerkezetük jelentősen eltér a stabil atommagokétól, ezért kiváló terepet nyújtanak a versengő elméleti modellek és eltérő megközelítések tesztelésére.

Az első sziget felfedezése

Az 1940-es években kidolgozott héjmodell és annak kifinomultabb változatai meghatározott pályákra helyezték a nukleonokat, és magyarázatot adtak a kísérletileg tapasztalt mágikus nukleonszámok (8, 20, 28, 50, 82, 126) létezésére. Továbbá az ilyen vagy ezekhez közeli nukleonszámmal rendelkező, a stabilitási völgyben elhelyezkedő atommagok jó leírását adták



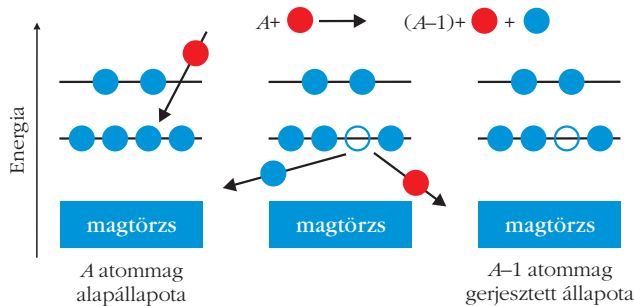
Elekes Zoltán az ATOMKI tudományos tanácsadója, a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának oktatója, témavezetője. Szakterülete az egzotikus atommagfizika és a nukleáris asztrófizika. Magszerkezettel kapcsolatos kísérleteit a japán RIKEN, a német GSI/FAIR és a francia GANIL kutatóintézetekben végezte és jelenleg is végzi. A LUNA nemzetközi együttműködés tagja, ez az olaszországi föld alatti LNGS laboratóriumban az égi objektumokban lejátszódó magreakciókat tárja fel.

[1]. Azonban már a hetvenes években kimutatták, hogy a neutrongazdag $^{31}_{11}\text{Na}_{20}$ és $^{32}_{11}\text{Na}_{21}$ atommagok erősebben kötöttek, mint az várható volt a héjmodell alapján. Majd a $^{32}_{11}\text{Mg}_{20}$ igen alacsony energián megtalált első gerjesztett állapota újabb jelzést adott arra vonatkozóan, hogy az $N=20$ -as héjefektusok nem a vártak megfelelően alakulnak. Természetesen ezek az anomáliák rögtön kiváltották az elméleti szakemberek érdeklődését. Hamarosan két megközelítés alakult ki. A kísérleti adatokat egyrészt egy úgynevezett *inverziósziget* segítségével sikerült értelmezni, amelyet a $Z=10-12$, $N=20-22$ tartományban elhelyezkedőnek jósoltak, ahol az atommagok alapállapota deformált, ami ugyan kicsit csökkenti a héjközt, de megőrzi a 20-as neutronsám mágikusságát. Azonban ezek a különleges jelenségek úgy is értelmezhetőek voltak, hogy a nukleonpályák energiája megváltozik, ami a héjzáródás megszűnésével jár. Ezzel a megközelítéssel az ezredfordulón japán kutatóknak sikerült megmagyarázni a kísérleti adatokat. Sőt, rámutattak arra is, hogy az inverziósziget határai valószínűleg nem ott vannak és nem olyan élesek, mint azt eredetileg gondolták. Ezen túl a számolások azt is jelezték, hogy máshol (6, 14, 16, 34, ...) viszont várhatók héjzáródások a neutrongazdag atommagok tartományában [2].

Kísérleti vizsgálatok

A nukleonpályák energetikai viszonyainak feltérképezésére elvileg olyan magreakciót kell alkalmazni, amelyben a bombázó részecske csak a vizsgált pályát szondázza és a többit zavartalanul hagyja. Ezért alacsony energián (<10 MeV/nukleon) általában nukleonátadási reakciókat szoktak használni. Ilyenkor vagy egy egyszerű bombázórészecske (például proton) visz magával egy nukleont az atommagból és egy összetettebb részecske távozik, vagy egy összetettebb részecske (például deuteron) bombázza az atommagot, amely átad egy nukleont az atommagnak.

A stabilitási sávtól távoli atommagok rövid élettartama miatt céltárgyat nem lehet belőlük készíteni, ezért magreakciókat rajtuk inverz kinematikában hajtanak végre, azaz a vizsgálandó egzotikus atommagokat tartalmazó ionnyalábot hoznak létre és ezt ütköztetik valamilyen stabil céltárggyal. Azonban ahhoz, hogy egyre nagyobb N/Z arányú atommagok is elérhetővé váljanak a kísérletek számára, létrehozásukkor az energiát is növelni kell (200–1000 MeV/nukleon). Ebben az energiatartományban a nukleonátadási reakciók már nem elég hatékonyak, ezért manapság nukleonkiütési reakciókat alkalmaznak (1. ábra).

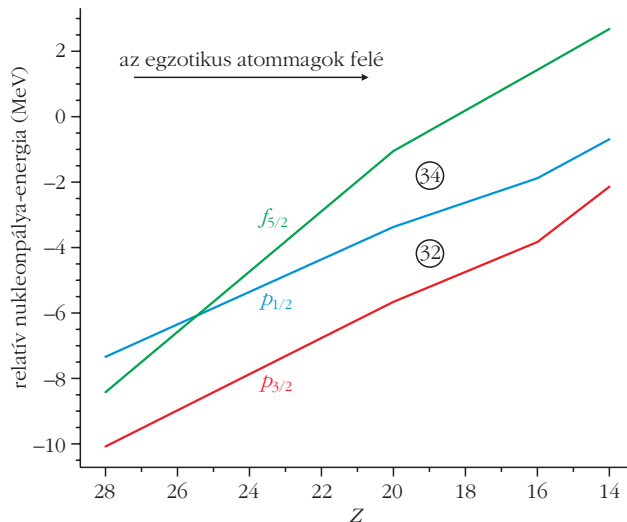


1. ábra. Nukleonkiütési magreakció sematikus rajza. A kék és piros körök a nukleonokat jelzik, amelyek megegyezők is lehetnek.

Ilyenkor az A atommag reakcióban részt nem vevő magtörzse feletti pályákon elhelyezkedő, úgynevezett valencianukleonok közül a céltárgy egy nukleonja kiüt egy másikat, így egy eggyel kisebb tömegszámú $A-1$ atommag keletkezik alap- vagy gerjesztett állapotban, attól függően, hogy a kiütés melyik pályáról történik, illetve kirepül két nukleon is. Az ilyen egyszerű, alacsony energiájú gerjesztett állapot γ -sugárzás kíséretében elbomlik az alapállapotba, és a sugárzás energiája megadja a gerjesztett állapot energiáját.

Az inverziószigetet jól leíró, korábban említett japán héjmodellszámítások (mélyebben érdeklődőknek az irodalomjegyzékben található, az ismeretterjesztésen túlmutató összefoglaló cikket ajánlom [3]) azt mutatták, hogy a 32-es neutronsám környékén a nukleonpályák jelentősen átrendeződnek (2. ábra). A stabilitási vonaltól (nikkelizotópok, $Z = 28$) protonok elvételével az egzotikus atommagok felé haladva, a valenciapályák között már jelentős héjköz alakul ki a kalcium- ($Z = 20$) és az argonizotópoknál ($Z = 18$), ami a 32-es és a 34-es neutronsámok mágikusságát okozza. Ezt az előrejelzést már csaknem húsz évvel ezelőtt publikálták, de kísérletileg néhány évvel ezelőtt sikerült csak kimutatni először a kalcium-, majd az argonizotópoknál is. A 32-es neutronsám mágikusságát, illetve arra utaló jeleket is felfedezték, hogy a 34-es héjköz is nagy.

Az utóbbi igazolásának és az előbbi ellenőrzésének érdekében az Atommagkutató Intézet vezetésével ezért célba vettük az $^{51}_{18}\text{Ar}_{33}$ atommagot, amely 33 neutronnal rendelkezik, és így kiváló terep mind a 32-es, mind pedig a 34-es héjzáródás vizsgálatára, ugyanis első két gerjesztett állapota úgy áll elő, hogy egy neutront a $p_{1/2}$, illetve az $f_{5/2}$ pályára emelünk. A világ vezető magfizikai gyorsítókomplexumában, a japán RIKEN kutatóintézetben nagy energiájú (200 MeV/nukleon) $^{52}_{19}\text{K}_{33}$ ionnyalábot hoztunk létre, amelyet egy folyékonyhidrogén-céltárgynak ütöztettünk. A céltárgyban lévő protonok az $^{52}_{19}\text{K}_{33}$ atommagból protont ütöttek ki. Az így keletkezett $^{51}_{18}\text{Ar}_{33}$ gerjesztett állapotainak legerjesztődéséből származó γ -sugárzást egy 226 egységből álló észlelő-



2. ábra. Nukleonpályák energiájának változása az egzotikus atommagok felé haladva a 32-es neutronsám környékén.

berendezéssel regisztráltuk. Minthogy a γ -sugárzást egy gyorsan mozgó atommag bocsátotta ki, annak a laboratóriumban mérhető E_{lab} energiáját jelentősen megváltoztatta a Doppler-hatás. Ahhoz, hogy visszaálítsuk az eredeti, tömegközépponti E_{TKP} γ -energiát, az észlelés θ szögét, és a kibocsátás pillanatában az ion relatív

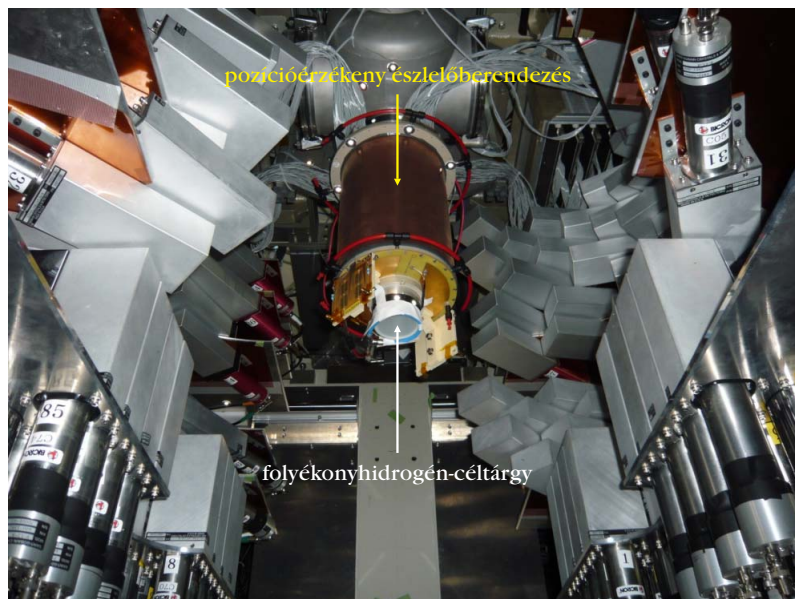
$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

sebességét szükséges ismerni az

$$E_{\text{TKP}} = E_{\text{lab}} \gamma [1 - \beta \cos(\theta)]$$

összefüggés szerint, ami vékony céltárgyak esetén nem jelent problémát.

3. ábra. Folyékonyhidrogén-céltárgy a körülötte lévő pozícióérzékeny észlelőberendezéssel és a γ -sugárzást rögzítő detektorokkal (szürke téglatestek).

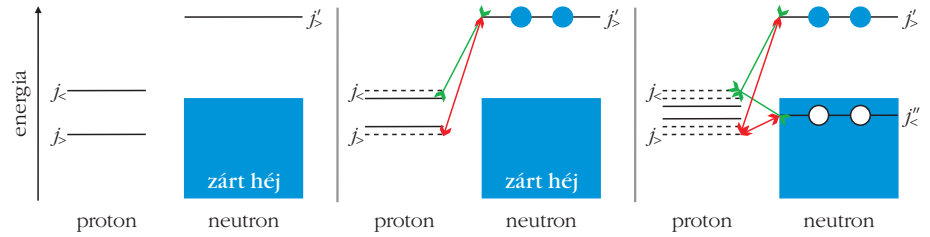


Mivel azonban ilyen egzotikus ionnyalábot jelenleg csak alacsony intenzitással lehet előállítani, a magreakció gyakoriságát úgy lehet emelni, ha a céltárgy hosszát, azaz a céltárgymagok számát növeljük. Esetünkben a céltárgy hossza 10 cm volt, ami azt jelentette, hogy köré egy pozícióérzékeny észlelőberendezést kellett építeni, amely a kirepülő protonok irányát rögzítette, így meghatározhatóvá vált a magreakció pontja (3. ábra).

A kísérlet kiértékelése arra vezetett, hogy az első két gerjesztett állapot nagyon kis valószínűséggel állt elő a protonkiütési magreakcióban, ami azt mutatja, hogy mind a 32-es, mind pedig a 34-es, a héjmodell által megjósolt új neutronhéj-záródás erős az argonizotópoknál, ezzel a húszéves elméleti jóslatot igazolni tudtuk.

Újabb szigetek felbukkanása

A nukleonok között ható (NN) erőt sorba lehet fejteni multipólusok szerint. A japánok héjmodelljének kulcs-eleme az NN erő úgynevezett tenzorkomponensének a sorbafejtésekor megjelenő első tagja, a monopólus-kölcsönhatás, amely a spin-pálya felhasadást jelentősen csökkenti. A 4. ábrán intuitív módon jelenik ez meg. A

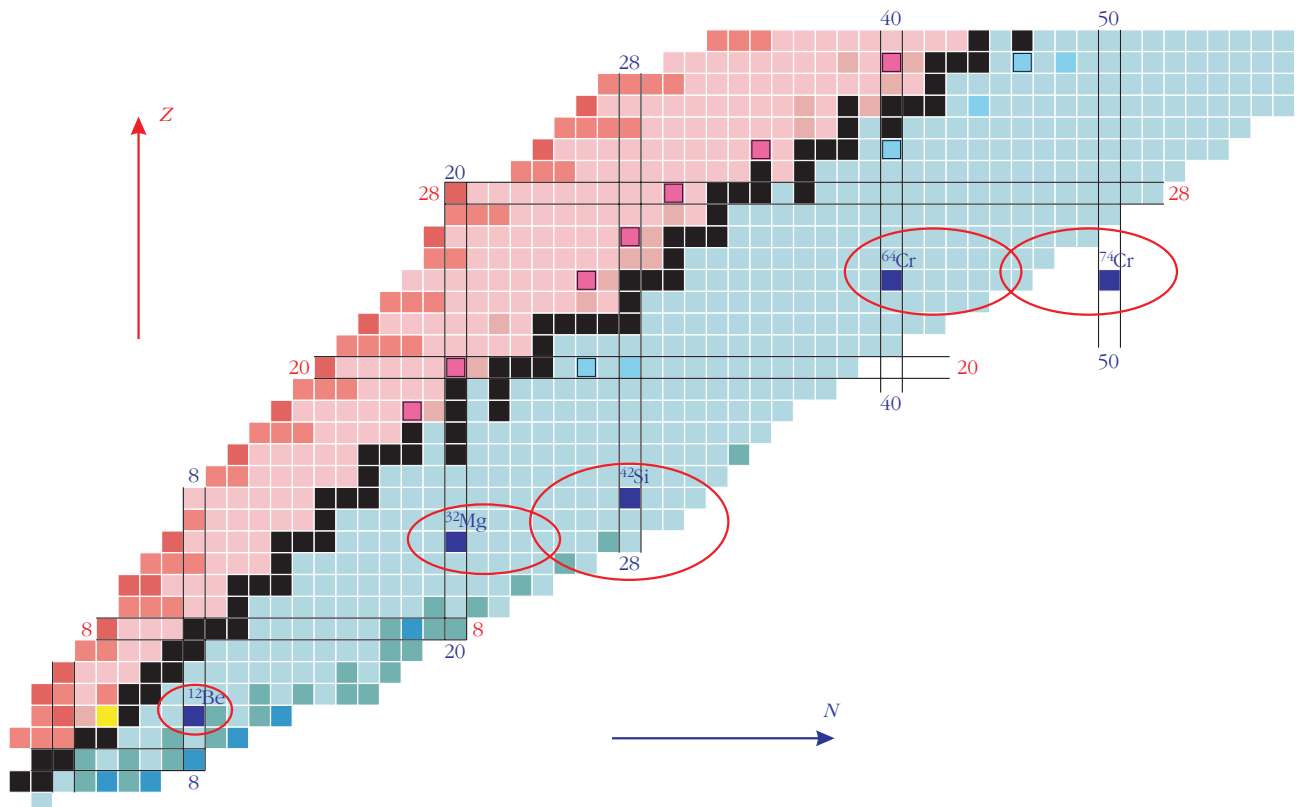


4. ábra. A tenzorerő hatása. A kék teli körök nukleonrészekkéket, a fehér körök nukleonlyukakat jelölnek. A zöld nyílak vonzó, a pirosak pedig taszító kölcsönhatást jelképeznek a pályák között.

bal oldali képen a spin-pálya kölcsönhatás miatt felhasadt két protonpályát láthatunk: $j_c = l - 1/2$, $j_s = l + 1/2$, ahol l a pálya-impulzusmomentum, $1/2$ pedig a nukleon spinje (saját-impulzusmomentum). Itt a neutronok zárt héjjal rendelkeznek, amely felett egy neutronpályát tüntettem fel. Ha két valencianeutront helyezünk erre a j'_s neutronpályára (középső kép), akkor működésbe lép a tenzorerő: a j'_s és j_c pályák között vonzás (zöld nyíl) jelenik meg, míg a j'_s és j_s pályák között taszítás (piros nyíl) jelenik meg, tehát a proton spin-pálya partnerek energetikailag közelebb kerülnek egymáshoz. Az effektus lineárisan nő a zárt héjon kívüli pályára helyezett neutronok számával, és maximális nagyságú, ha $j = j'$. Például a 2. ábrán megjelenő új héjzáródások is elsősorban az $f_{7/2}$ protonpálya és az $f_{5/2}$ neutronpálya között fellépő tenzorerőnek tudhatók be.

A 4. ábra jobb oldalán azt figyelhetjük meg, hogy ha a zárt neutronhéj egy pályájáról (j'') két neutront a j'_s pályára helyezünk, akkor egyrészt a korábban tag-

5. ábra. Az atommagok tengere, ahol minden kis négyzet egy atommagot jelöl, amelyek úgy helyezkednek el, hogy a vízszintes tengely a neutronszám, a függőleges tengely pedig a protonszám felel meg. A piros ellipszisek jelölik a különleges inverziós szigetvilágot.



lalt hatás jelenik meg a proton spin-pálya partnereknél. Másrészt azonban ilyenkor a két neutronhiány a zárt héjban gyengébbé teszi a $j'_<$ és a proton spin-pálya partnerek kölcsönhatását, azaz a két lyuk hatása a $j'_<$ pályán megegyezik a két részecskéével a $j'_>$ pályán, így a proton spin-pálya partnerek még közelebb kerülnek egymáshoz. Az ilyen, úgynevezett két-részecske-kétyluk gerjesztések alapvető szerepet játszanak az inverziószigeten lévő atommagok alapállapotainak kialakításában. A zárt héjon túli nukleonok – az energetikai minimumra történő törekvés miatt – a deformáció felé viszik az atommagot, ezért ha egy mag igen messze van a mágikus számoktól, akkor deformációja általában jelentős. Hasonlóan, ha a tenzor-erő következtében egy klasszikus mágikus nukleon-számmal rendelkező atommagban a nukleonpályák úgy rendeződnek át, hogy a nagy héjközök lecsökkennek, akkor a kétrészecske-kétyluk gerjesztések könnyen megjelennek, ami magával hozza az atommag deformációját. Ebből a szempontból az NN erő monopólus tagokon túli tagjai (elsősorban a kvadrupólus) is jelentős hatást fejthetnek ki, tehát a monopólus és az afeletti effektusok érzékeny egyensúly formálja az atommagok szerkezetét.

Ebből következik, hogy egy klasszikus mágikus neutronszám közelében megjelenő inverziószigetet a deformáció megjelenésével lehet azonosítani. Az atommag deformációja kísérletileg nem mérhető mennyiség, mértékére az első gerjesztett állapot energiájából, illetve ezen állapot alapállapotból történő gerjesztési hatékonyságából következtethetnek. Ha alacsony az első gerjesztett állapot energiája és nagy a gerjesztési hatékonyság, akkor általában nagy a deformáció.

A korábban már ismertetett kísérlet keretében nemcsak nukleonkiütési magreakciók jönnek létre, hanem a hidrogéncéltárgyban található protonok rugalmatlan szórás során megpörgethetik a deformált atommagokat, amelyek így az első gerjesztett állapotukba kerülnek. Az onnan történő legerjesztődés során a nukleonkiütéshez hasonlóan γ -sugárzás keletkezik, amelynek intenzitásából a gerjesztés hatékonyságát meg lehet határozni. Ilyen módon vizsgáltuk a 40 neutronnal rendelkező, azaz zárt alhéjú ${}^{63}_{23}\text{V}_{40}$ atommagot, és bebizonyítottuk, hogy nagy a deformációja. Így a korábban már felfedezett ${}^{64}_{24}\text{Cr}_{40}$ atommag környéki inverziószigetre újabb atommagot sikerült elhelyezni. Az 5. ábrán ezt és a többi szigetet láthatjuk piros ellipszisekkel jelölve. A ${}^{12}_4\text{Be}_8$, ${}^{32}_{12}\text{Mg}_{20}$ és a ${}^{42}_{14}\text{Si}_{28}$ környékén található szigeteket már nagyrészt feltárták, azonban a kísérleti technika csak az utóbbi öt évben jutott el arra a szintre, hogy a ${}^{64}_{24}\text{Cr}_{40}$ környékén behatóbban vizsgálódhassunk. A ${}^{74}_{24}\text{Cr}_{50}$ -nél elméletileg előrejelzett, és a nehezebb atommagoknál esetleg megjelenő szigetek pedig az elkövetkező évekre nyújtanak érdekes terepet, tovább bővítve a szigetvilágot. Ugyan jelenleg azt gondoljuk, hogy értjük az inverziószigetek kialakulásának mechanizmusát, azonban a feltáratlan területek hozhatnak még nem várt meglepetéseket, ahogyan az a múltban oly sokszor előfordult.

Irodalom

1. Elekes Z.: Mágikus számok, nemes atommagok. *Fizikai Szemle* 58 (2008) 98.
2. Dombrádi Zs.: A héjszerkezet átrendeződése egzotikus atommagokban. *Fizikai Szemle* 57 (2007) 221.
3. T. Otsuka és munkatársai: Evolution of shell structure in exotic nuclei. *Reviews of Modern Physics* 92 (2020) 015002.