

A STABILITÁSI SÁVTÓL TÁVOL ESŐ ATOMMAGOK

– 1. rész

Fényes Tibor
MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

A magfizika az elmúlt évszázadban hatalmas fejlődésen ment át, és ez a fejlődés napjainkban is folytatódik. Hozzávetőleg 7000 atommag lehet kötött állapotban, úgy hogy felezési ideje hosszabb, mint 1 μ s. Ezek közül körülbelül 300-nak van alapállapotban elegendően hosszú felezési ideje ($T_{1/2} > 1$ milliárd év) ahhoz, hogy stabilnak tekinthessük. Ilyen körülmények között természetes, hogy az atommagfizika egyik alapvetően fontos fejlődési irányát a még alig ismert vagy teljesen ismeretlen atommagok előállítása és sokoldalú vizsgálata jelenti. A következőkben a stabilitási sávtól távol eső atommagok vizsgálatának újabb fejleményeit foglaljuk össze röviden. Az atommagok táblázatát az 1. ábra mutatja.

A stabilitási sávtól távol eső atommagokat világszinten számos laboratóriumban vizsgálják. A európai kutatóhelyekről részletes áttekintés található a [2] munkában.

A stabilitási sávtól távolodva az atommagokban (és a róla alkotott ismereteinkben) számos változás tapasztalható. Néhány ezek közül:

- A héjszerkezet változásai
- Neutronglóriás atommagok, neutronbőr
- Óriásrezonanciák
- $Z = N$ magok
- Atommagtömeg-változások
- Hiperdeformált magok
- Túl a nukleonleszakadási határon
- Elméleti eredmények

A héjszerkezet változásai

Régóta ismeretes, hogy bizonyos Z proton- és N neutronszámoknál az atommagok különösen stabilak, ezek a mágikus számok. Erre utalnak például

- az első 2^+ gerjesztett állapotok energiái,
- a kétnukleon-szeparációs energiák,
- az atommagok tömegei és
- töltéssugarai,
- valamint az ab-initio¹ számítások is.

A stabilitási sáv mágikus számai a következők: Z és $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82$, továbbá $N = 126, 152$.



Fényes Tibor az MTA Eötvös-kosorús doktora, az ATOMKI professor emeritusa. Hat évig dolgozott Dubnában az Egyesített Atommagkutató Intézetben és közel fél évig a Kentucky Egyetem tandemgyorsító laboratóriumában. Fő kutatási területei az atommag- és részecskefizika. Több mint 130 tudományos publikáció és 10 könyv szerzője, illetve társszerzője.

A stabilitási sávoktól távolodva azonban változás történhet, új mágikus számok is megjelenhetnek.

A RIKEN Laboratórium RIBF radioaktív izotópnyaláb-gyára (Tokió mellett) különösen sok új izotópot állított elő ^{238}U röptében való hasadásával, vagy ^{14}N , ^{18}O , ^{48}Ca , ^{70}Zn és ^{124}Xe lövedék fragmentációjával. A 2014-ig elért eredményekről a 2. ábra szemléletes áttekintést ad. Meghatározták az előállítási hatáskeresztmetszeteket 877 radioaktív izotópra. A $^{54}_{20}\text{Ca}_{34}$ -nál (azaz $N = 34$ -nél) a RIKEN mérések új mágikus számot találtak, lásd a 3. ábrát *En'yo* alapján [3].

A 4. ábrán felül a páros-páros oxigénizotópok első 2^+ állapotának energiái láthatók. Az $^{24}_{8}\text{O}_{16}$ -nél az első 2^+ állapot energiája kiugróan magas, és az egy neutron leszakító reakció vizsgálata is arra utal, hogy a neutronok a ^{24}O -nél a $2s_{1/2}$ pályát betöltik. Ezek együtt jelzik, hogy a ^{24}O -nél (azaz $N = 16$ -nál) alhéjlezáródás van, új mágikus szám jelentkezik. Ezt az önkonzisztens számítások is alátámasztják.

A 4. ábrán középen az oxigénizotópok kötésenergiái vannak feltüntetve a kísérleti adatok és az önkonzisztens Green-függvényelmélet alapján. Látható, hogy a magasabb közelítésben végzett számítások a kísérleti adatokat jól reprodukálják. A számítások információt szolgáltatnak arra, hogy az oxigén- (és nitrogén-) izotópoknál hol van a neutronleszakadási határ.

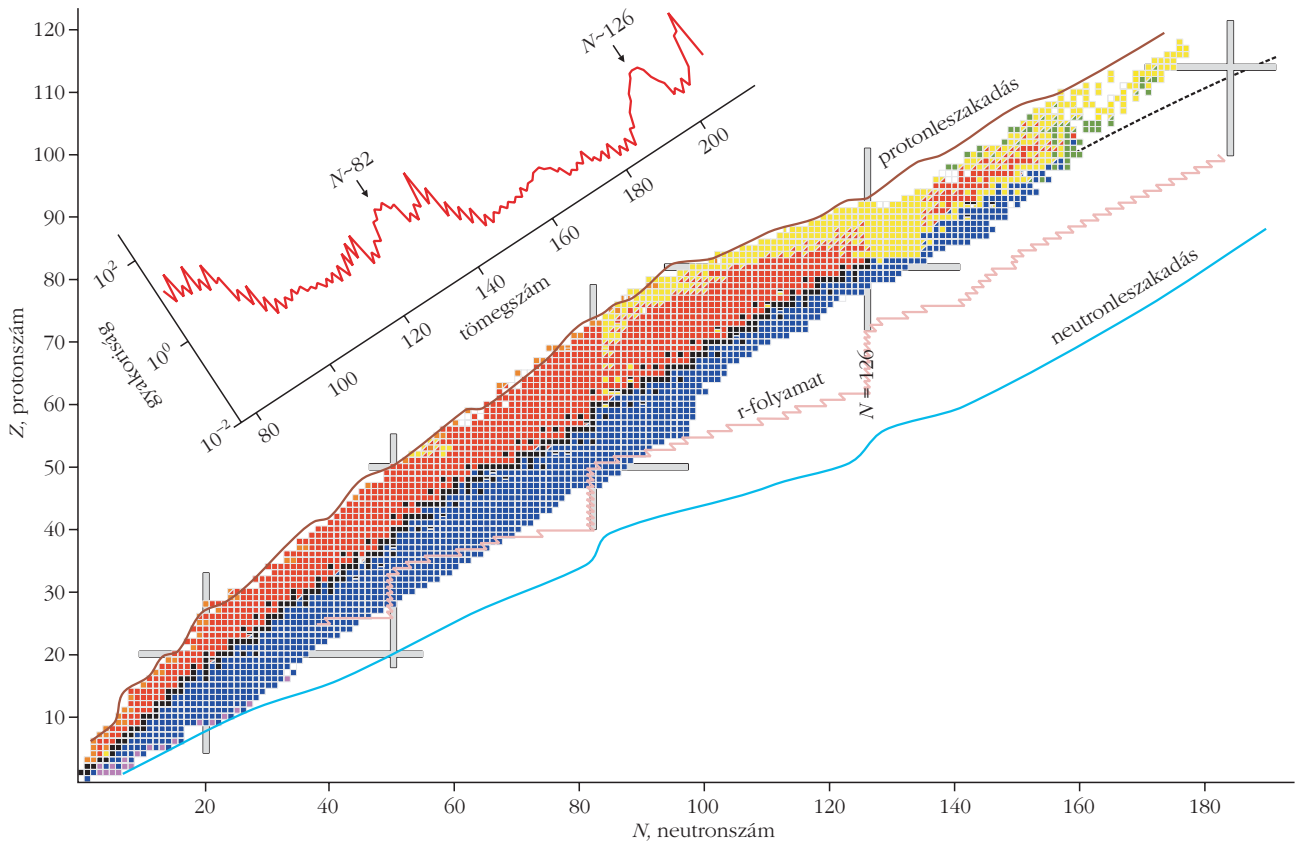
A 4. ábrán alul a nyolc neutronot tartalmazó páros-páros atommagok alsó nívói láthatók. A $^{12}_{4}\text{Be}_8$ -nál (azaz $Z = 4$ -nél) jól látható a 2^+ és 1^- gerjesztési energiák hirtelen változása, ami itt a $Z = 4$ kitüntetett jellegére utal. Az ACCULINNA nevű, fragmens-szeparátorokra alapozott együttműködés (Dubna, Orosz Föderáció) eredménye.

A héj- és magszerkezet változásait Z és N függvényében az MTA Atomkiban is – a RIKEN (Japán), GANIL (Franciaország), Legnaro (Olaszország), GSI (Németország) és NSCL (Michigan, USA) laboratóriumokkal együttműködésben – intenzíven vizsgálták. Ezekhez radioaktív izotópnyalábokat használtak, kombinálva fragmens-szeparátorokkal. Mérték a β - és γ -spektrumokat, vizsgálták a Coulomb-gerjesztést, és a nyert adatokat összevetették az elméleti eredményekkel.

A kutatómunkában az ATOMKI részéről *Dombrádi Zs.*, *Elekes Z.*, *Fülöp Zs.*, *Kuti I.*, *Podolyák Zs.*, *Sobler D.* és *Vajta Zs.* vettek részt. Az elmúlt évtizedben több mint 30 publikációjuk született a következő atommagokkal kapcsolatban:

$Z = 5$	^{17}B	$Z = 10$	$^{26,28,30}\text{Ne}$
$= 6$	$^{16,19,20}\text{C}$	$= 11$	$^{30,31}\text{Na}$
$= 7$	^{21}N	$= 12$	$^{33,34,36}\text{Mg}$
$= 8$	$^{20,22}\text{O}$	$= 14$	$^{33,34,39,41}\text{Si}$

¹ Itt „ab-initio” a kezdetekből kiinduló, azaz a kvantum-szindinamika Lagrange-energiásűrűségéből, vagy annak különböző közelítéseiből kiindulót jelöli.



1. ábra. Atommagok a Z rendszám és N neutronszám síkban. A stabil magokat fekete négyzetek jelölik. Balra felül a stabil magok relatív gyakorisága látható. Minden atommag a $Z = 100$ felett neutronhiányos. Zagrebaev és Greiner [1] alapján.

$Z = 16$	$^{40,44}\text{S}$	$Z = 28$	$^{70,72}\text{Ni}$
$= 18$	^{46}Ar	$= 29$	^{79}Cu
$= 20$	^{44}Ca	$= 30$	$^{80,81,82,83}\dots\text{Zn}$
$= 24$	^{66}Cr	$= 36$	^{96}Kr
$= 25$	$^{68,69,70}\text{Mn}$	$= 46$	$^{122,124,126}\text{Pd}$
$= 26$	$^{70,72}\text{Fe}$	$= 48$	^{132}Cd
$= 27$	$^{70,76}\text{Co}$	$= 50$	$^{100,104,136}\text{Sn}$

Neutronglóriás atommagok, neutronbőr

Neutronglóriás atommagok

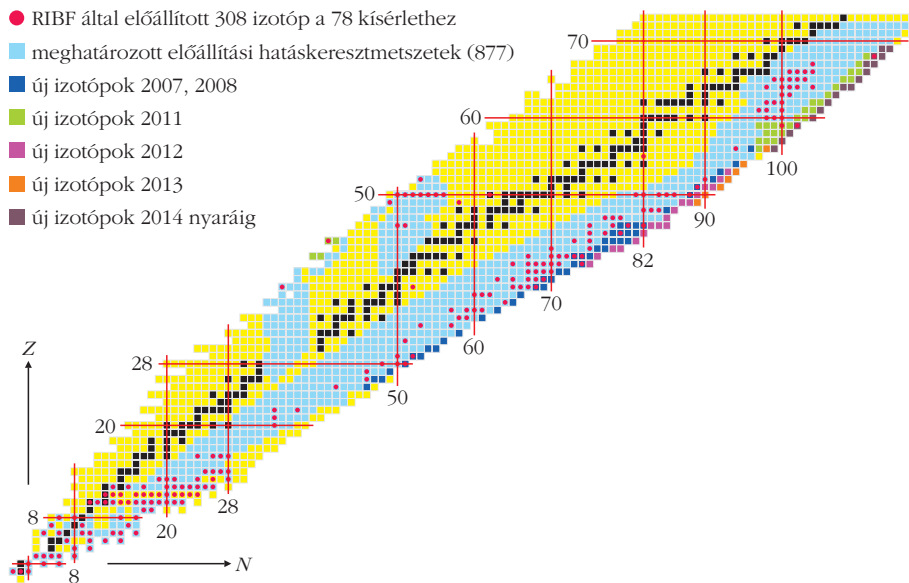
A stabilitási sávtól távol a legkülső nukleonok kötés-energiája kicsi, ami az atommag térbeli kiterjedésének jelentős növekedésével járhat. Az extrém nagy kiterjedésű, kis sűrűségű nukleoneloszlást halónak (glóriának) nevezzük. A mag többi nukleonja továbbra is nagysűrűségű törzset alkothat.

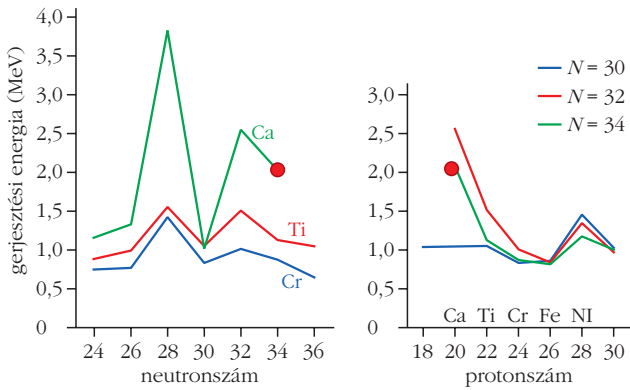
Összefoglalóan megállapítható, hogy a nukleonudvarok léte jól megalapozott a könnyű, neutrontöbbletes, valamint a neutronhiányos atommagok között is. A teljes kinematikai reakcióvizsgálatok, szögeloszlásmérések, a fragmentek γ -spektrumának vizsgálata halofeltöltési reakciókban lehetőséget adnak arra, hogy pontos betöltési valószínűségeket határozzanak meg a héjmodellállapotokra, és adatokat nyerjenek a magtörzs esetleges módosulásaira is.

A halomagok szerkezetéről és reakcióiról részletes összefoglalás található Suzuki, Lo-

2. ábra. A RIKEN BigRIPS (Radioactive Ion Projectile Separator) berendezéssel elért eredmények. 2014 nyaráig 120 új izotópot és 43 új izomért fedeztek fel.

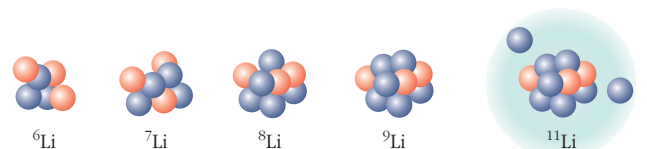
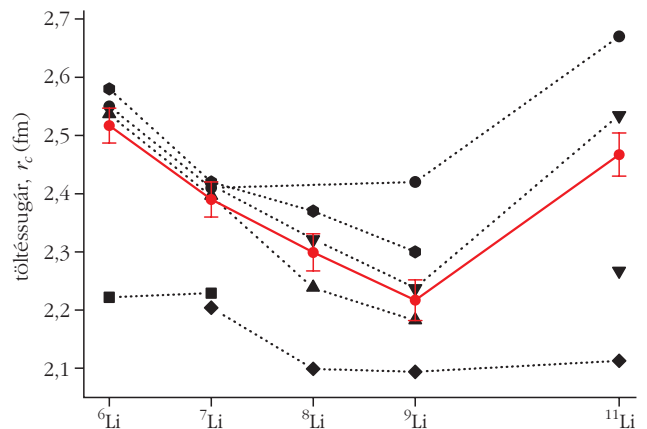
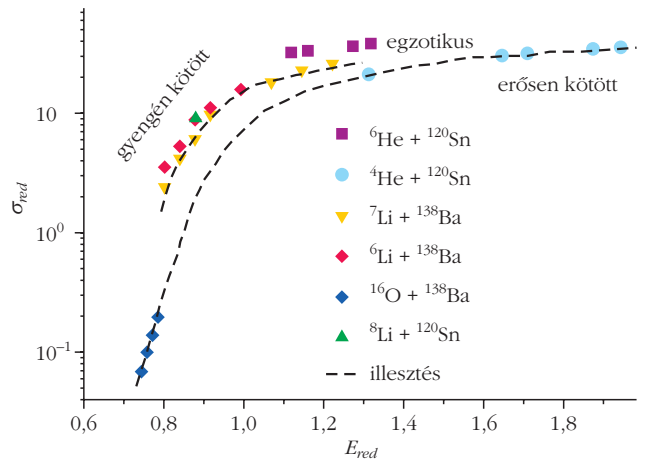
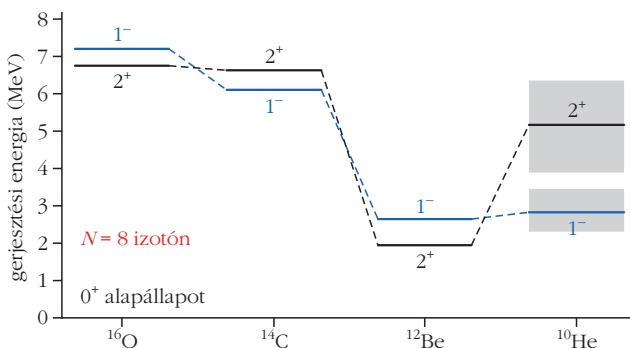
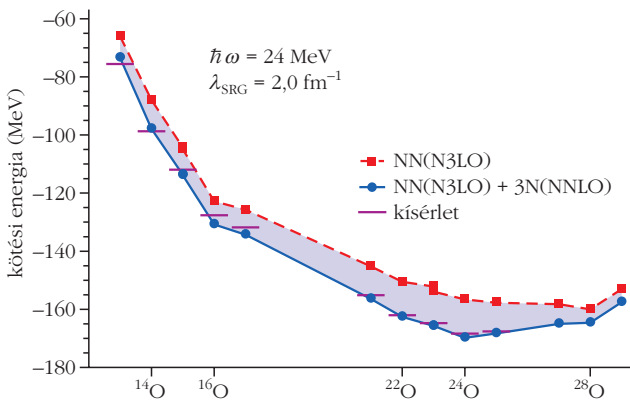
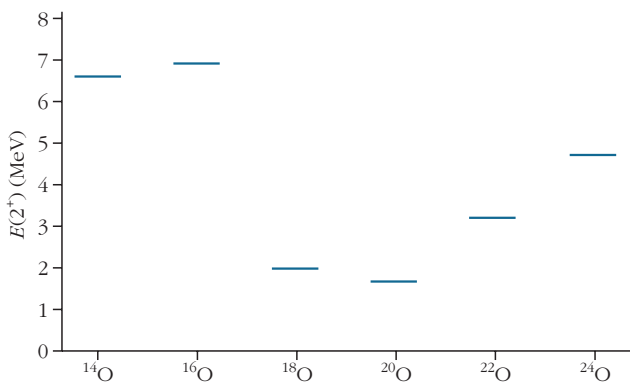
- RIBF által előállított 308 izotóp a 78 kísérlethez
- meghatározott előállítási hatáskeresztmetszetek (877)
- új izotópok 2007, 2008
- új izotópok 2011
- új izotópok 2012
- új izotópok 2013
- új izotópok 2014 nyaráig





3. *ábra.* Az ^{54}Ca -nál felfedezett új mágikus neutronszám, $N = 34$. A 2^+ állapot E gerjesztési energiája a neutron- és protonszám függvényében.

4. *ábra.* Felül a páros-páros oxigénizotópok első 2^+ állapotai. Középen az oxigénizotópok kötésienergiái a kísérleti adatok alapján, valamint az önkonzisztens Green-függvény elmélet számításainak eredményei különböző közelítésekben. Alul a nyolc neutron tartalmazó páros-páros atommag alsó nívói. A ^{12}Be -nél jól látható a héjszerkezet változása.



5. *ábra.* Felül az E_{red} -hez (red: redukált) tartozó σ_{red} reakció-hatáskeresztmetszetek az $A \sim 120$ céltárgyakon különböző bombázó részecskéknél. $E_{red} = E_{cm}(A_p^{1/3} + A_t^{1/3})Z_pZ_t$, ahol p = projectile (bombázó részecske), t = target (céltárgy), cm = tömegközéppont. A szaggatott vonalak csak a tájékozódást segítik. A ^4He és ^{16}O erősen kötött magok vannak alul, a gyengén kötöttek ($^{6,7,8}\text{Li}$) középen és a $2n$ -halo ^9He felül. Lépíne-Szilgy és munkatársai [7] nyomán. Középen a Li-izotópok r_c töltéssugara a tömegszám függvényében. A vastag vonal a kísérletileg mért eredményeket köti össze, a pontozott vonalak különböző elméleti számítások eredményeit mutatják. Látható, hogy a ^{11}Li -nál a töltéssugár a kétneutron-halo miatt ugrásszerűen megnőtt. Alul a Li-izotópok atommagjainak modelljei zárják az ábrát.

vas, Yabama, Varga [4] alapvető munkájában. A nukleonglóriás atommagokat részletesen tárgyalják *Fényes* és munkatársai [5] és *Fényes T.* [6] könyvei is.

A kutatásoknak új lendületet ad, hogy radioaktív nyalábokban is vizsgálják a halojelenséget. Az eddigi legnehezebb $^{31}_{10}\text{Ne}_{21}$ halomagon kívül – a rövid felezési idejű atommagok között – várhatóan még sok haloerjesztett állapot van.

A következőkben a 5. *ábrán* csak néhány újonnan nyert eredmény ismertetésére szorítkozunk.

Az 5. *ábra* felső része a redukált hatáskeresztmetszeteket mutatja $A \sim 120$ céltárgyakon, különböző bombázó részecskével létrehozott reakciókra az E_{red}