

ATOMMAGFIZIKA FÉNNYEL

Krasznahorkay Attila

az MTA doktora, tudományos tanácsadó, főosztályvezető,
MTA Atommagkutató Intézet
kraszna@atomki.hu

Bevezetés

A fényvel végzett atomspektroszkópia eredményei már a magfizika kezdetén jelentősen segítették az atommagok szerkezetének megértését. Az optikai színkép vonalak hiperfinom felhasadását már *Albert Michelson* (1891), továbbá *Maurice Charles Fabry* és *Alfred Perot* (1897) is megfigyelték interferencia-spektroszkópiai vizsgálatokban. 1914-ben már nagy mennyiségű kísérleti adat állt a kutatók rendelkezésére. 1924-ben *Wolfgang Pauli* vetette fel először, hogy a színkép vonalak hiperfinom felhasadását az atommagok mágneses momentuma okozhatja. Az ezt követő további nagy felbontású mérésekkel sikerült meghatározni sok stabil atommag spinjét és mágneses momentumát. Ezek az adatok alapvetően fontosak voltak az atommagok héjmodelljének későbbi kifejlesztéséhez.

1935-ben *Hermann Schüler* és *Theodor Schmidt* megmutatták, hogy a hiperfinom felhasadásban észlelt anomáliák az atommagok elektromos kvadrupólus-momentumával magyarázhatók. Ezen anomáliák mérése fontos adatokat szolgáltatott az atommagok deformációjára.

Megfigyelték azt is, hogy az elemek színképvonalai eltolódnak, ha az elemek különböző tömegű izotópjait vizsgálják. Ezt az effektust izotóptelodásnak nevezzük, és annak

mértéke az atommagok tömegén túl azok töltéseloszlási sugarának változásaival magyarázhatók. Az izotóptelodások mérésével így az atommagok mérete is meghatározhatóvá vált. A ritkaföldfémeknél megfigyelt nagy izotóptelodások ezen atommagok nagy deformációjával voltak magyarázhatóak.

A lézerek megjelenése nagy hatással volt a magszerkezet-kutatások kiterjesztésére is. A lézerfény monokromatikussága, jól meghatározott hullámhossza korábban elképzelhetetlen energiafelbontású mérések kivitelezését is lehetővé tette, a nagy teljesítménye pedig a mérések érzékenységet növelte meg. Mára lehetségessé vált egy-két atomon is spektroszkópiai méréseket végezni, aminek manapság a ritka radioaktív nyalábokkal végzett vizsgálatokban van különösen nagy jelentősége.

A nagy teljesítményű lézerek felhasználása a magfizikában

Az utóbbi években kifejlesztett nagy teljesítményű lézerekkel már át is alakíthatjuk az atommagokat. E lézerek fényének fókuszálásával már akár 10^{25} W/cm² intenzitásokat is elérhetünk, és a nyalábot egy céltárgyra irányítva olyan magas hőmérsékletű plazmát hozhatunk létre, amilyen az ősrobbanás utáni első másodpercben létezett. A nagy teljesítményű, ultrarövid impulzusú lézerek látványos fejlődése és az ezzel gyorsított elektronok

és a nehéz ionok megnyitották az utat újfajta magfizikai és ehhez kapcsolódó egyéb területek vizsgálatához is. A modern, nagy intenzitású lézerek segítségével ma már különféle magreakciókat is létre lehet hozni. A lézeres részecskegyorsítás eredményeinek 2004 szeptemberében a *Nature* folyóirat *Álomnyalábok* címmel egy teljes kötetet szentelt.

Felismerve a nagy teljesítményű lézerek jelentőségét mind a különböző kutatási területeken, mind az alkalmazásokban, 2010-ben Extreme Light Infrastructure (ELI) névvel egy európai programot is indítottak. Az ELI egy három helyszínen (Szeged, Prága, Bukarest) épülő európai nagyberendezés-együttes, aminek célja nagy teljesítményű lézerek kifejlesztése és azok felhasználása különböző kutatási és alkalmazási feladatokra.

Magfizikai kutatások

az ELI bukaresti helyszínén, az ELI-NP-nél

Bukarestben az ELI-NP-nél a terawattos (TW) lézerek fényét, fotonjait nagyenergiás elektronokkal ütköztetve, a fotonok energiáját a rugalmas (Compton-) szórás segítségével nagymértékben meg fogják növelni, és ilyen módon nagy intenzitású, megfelelően monokromatikus, 1–20 MeV energiájú, kis szögdivergenciájú γ -sugárzások állíthatók elő. Ezekkel a γ -nyalábokkal magszerkezet-kutatásokat, nukleáris asztrfizikai kutatásokat, alapvető kvantumelektrodinamikai folyamatok vizsgálatát, anyagtudományi, biológiai; a radioaktív hulladékok megsemmisítését célzó, továbbá belbiztonsági szempontból fontos kutatásokat fognak végezni. Ez a berendezés a tervezett nagy (10^9 γ /s/keV) intenzitásával, jó (0,3%) energiafelbontásával és széles (1–20 MeV) energiatartományával unikális lehetőségeket fog teremteni a világon jelenleg működő hasonló berendezésekhez képest (URL1).

A tervezett kutatások részleteit az ELI-NP „fehér könyve” tartalmazza (URL2). A jelen összefoglalóban olyan tervezett kutatásokról számolok be, amelyeket mi indítottunk, vagy amelyekben mi is aktívan részt fogunk venni.

Fotoindukált magreakciók vizsgálata

Míg a magfizikai vizsgálatokra általánosan használt magreakciók során az erős kölcsönhatás játssza a döntő szerepet, a nagyenergiás γ -sugárzásoknak az atommaggal történő kölcsönhatása a jól ismert elektromágneses kölcsönhatással írható le. Ez jelentősen megkönnyíti a kísérleti eredmények értelmezését.

Ha a γ -sugárzások energiája kisebb az atommagot alkotó protonok és neutronok kötési energiájánál, akkor az atommag gerjesztett állapotának megszűnése is csak γ -sugárzások kibocsátásával történhet. Ezt a folyamatot nukleáris rezonancia fluoreszcenciának (NRF) nevezzük, és az ELI-NP-nél ez az egyik legfontosabb kutatási terület mind az alap-, mind az alkalmazott kutatások szempontjából. Az NRF hatáskeresztmetszete egy nívóra akkor a legnagyobb, ha a γ -sugárzás energiája pontosan megegyezik a nívó energiájával. Ekkor a hatáskeresztmetszet arányos az alapállapotról az adott nívóra történő átmenet valószínűségével. A hatáskeresztmetszet mérésével így a fenti átmeneti valószínűségek meghatározhatók, és ezek a magmodellek teszteléséhez nagyon fontos adatokat jelentenek. Elektromos dipólus átmenetekre ezek a hatáskeresztmetszetek elég nagyok (kb. 100 barn) ahhoz, hogy azok az ELI-NP által szolgáltatott γ -nyalábokkal és egy kellően nagy hatásfokú γ -detektor-rendszerrel mérhetőek legyenek.

Az NRF azonban nemcsak alapkutatásokra, hanem számos gyakorlati felhasználás számára is fontos módszer. A nukleáris anyagok összetétele, dúsítási foka például kiégett

fűtőelemek esetén ezzel a módszerrel jól mérhetővé válik. Szintén mérhető lesz a radioaktív hulladékok hosszú felezési idejű, nagy radiotoxicitású tartalma is. Az ezekhez a vizsgálatokhoz kulcsfontosságú adatokat, gerjesztési energiákat és átmeneti valószínűségeket a szóban forgó atommagokra azonban először pontosan meg kell mérni, mivel ezek nem állnak az irodalomban a rendelkezésünkre. Különösen nem a hosszú felezési idejű radioaktív hulladékokra.

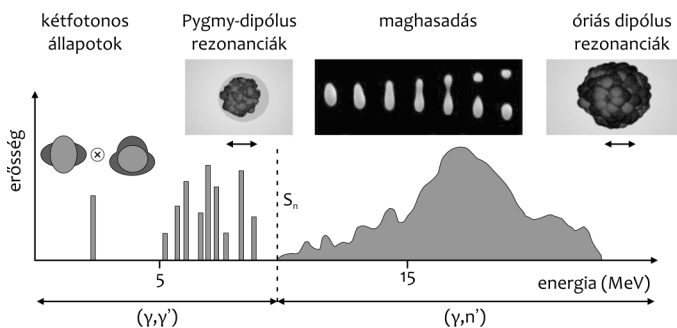
A bombázóenergia növelésével a nívósűrűség exponenciálisan növekszik, és az egyes nívók már nem lesznek feloldhatók, de az energia függvényében végzett hatáskeresztmetszet-mérések ideális eszközök az atommagok dipóluserősség-eloszlásának meghatározására. Ezen eloszlások vizsgálatával az atommagok különböző óriásrezonanciáit tanulmányozhatjuk (1. ábra).

Óriásrezonanciáknak az atommag olyan kollektív gerjesztéseit, rezgési állapotait nevezük, amikor az atommagot alkotó protonok és neutronok legalább fele aktívan részt vesz a koherens vibrációban. A legismertebb óriásrezonancia a dipólus-óriásrezonancia, amelynek első elméleti értelmezésében a magyar származású *Teller Ede* jelentős szerepet játszott.

Nehéz magok esetén a nagyobb gerjesztési energiáknál megjelenő, mind elméleti, mind gyakorlati szempontból igen érdekes jelenség az atommaghasadás jelensége. A maghasadás során az atommag teljes egésze átalakul, két részre hasad.

A magfizika tudománya kialakulása óta jelentős szerepet játszott az energiatermelésben. *Enrico Fermi* korai eredményei után azonban ezen a téren kevés áttörés történt. A maghasadás tipikus kollektív jelenség, ahol a részecskekorrelációk meghatározó szerepet játszanak, és ezek pontos leírására nagy szükség van. A maghasadás vizsgálatára vonatkozó, az ELI-NP-nél végzendő kísérleteink célja ezen leírások pontosítása, hogy a modelljeink segítségével megoldásokat találjunk a társadalom számára égetően fontos kérdésekre is.

A társadalomnak szüksége van tiszta energiára, de a jelenlegi atomreaktorok sok hulladékot termelnek. A hulladékokat transzmütációval át lehet alakítani kevésbé veszélyes anyagokká. Szükség van a nukleáris anyagok pontos mérésére is. Ha például a $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ izotóparányt a reaktorokban használt fűtőelemekben pontosan lehetne mérni, akkor a fűtőelemek átrakását optimalizálhatnánk, így sokkal több energiát nyerhetnénk. Jelenleg



1. ábra • Fotoindukált magreakciókkal gerjeszthető kollektív atommaggerjesztések, illetve magátalakulások

nem tudjuk pontosan ellenőrizni, hogy a korábbi nukleáris hulladékok milyen anyagokat tartalmaznak. Az ilyen kérdések megválaszolása nagy nemzetközi összefogással folyik.

Az ELI-NP-nél a nagyenergiás γ -sugárzásokkal végzendő méréseink során főként a fenti két témára, nevezetesen az óriásrezonanciák, illetve az atommaghasadás vizsgálatára fogunk koncentrálni. Ezért a továbbiakban ezt a két témát fejtem ki részletesebben.

Az óriásrezonanciák

Az óriásrezonanciák az atommag nagy frekvenciájú, sok nukleont (protont és neutron) magában foglaló kollektív rezgései. Az első óriásrezonanciát, a fent említett dipólus-óriásrezonanciát, nagy (10–30 MeV) energiájú γ -sugárzás rezonanciaszerű abszorpciójának megfigyelésével fedezték fel. Az abszorpció létrejöttének valószínűsége sokkal nagyobb, mint amekkorát egy nukleon mozgásával meg lehetett volna magyarázni. *Maurice Goldhaber* és *Teller* voltak az elsők, akik értelmezni tudták a jelenséget. E munkájukkal indították el az óriásrezonanciák kutatását, amelyek később jelentősen hozzájárultak az atommagok nagyenergiás gerjesztett állapotainak megértéséhez, és vizsgálatuk még jelenleg is a magszerkezet-kutatások egyik legfontosabb irányát képezi.

Modelljük értelmében az elektromos dipólusugárzás elnyelődését az atommag összes protonjának és neutronjának egymáshoz képest történő kollektív rezgésének gerjesztődését okozza. A rezgések csillapodásáért és így a rezonancia kiszélesedéséért pedig az atommag bonyolultabb gerjesztéseihez történő csatolódás a felelős.

Csupán néhány korai kísérleti eredményt ismerve *Goldhaber* és *Teller* a következő feltevéssel élt: a protonok és a neutronok

eloszlása egy-egy merev, de egymáson áthatolni képes gömbszerű eloszlás, amelyek egymáshoz képest rezeghetnek. Így magyarázatot adtak a rezonancia energiájának tömegszám-függésére (*Goldhaber-Teller*-modell).

A dipólus-óriásrezonanciát később megfigyelték a természetben előforduló összes stabil izotópnál. A γ -abszorpció valószínűsége a legtöbb esetben jól leírható egy Lorentz-görbével, amelynek átlagenergiája csak lassan változik a tömegszám függvényében, és az atomokat és atommagokat egyébként széles körűen jellemző héj-effektusokat szinte egyáltalán nem mutatja.

A dipólus-óriásrezonanciát *Helmuth Steinwedel* és *Hans Jensen* szerint egy $\lambda=2R$ hullámhosszú állóhullámnak is elképzelhetjük az atommagon belül, ahol $2R$ az atommag átmérője. Az olyan magokban, amelyek alapállapotban forgási ellipszoid alakúak, a rezonancia két komponensre hasad fel: a nagy-tengelynek megfelelő nagyobb hullámhosszú, tehát kisebb energiájú, és a kistengelynek megfelelő rövidebb hullámhosszú, következésképpen nagyobb energiájú komponensre.

A fenti modelleket és azok paramétereit később az atommag folyadékcséppmodelljéből is sikerült levezetni. Az is kiderült, hogy valójában a *Goldhaber-Teller*- és a *Steinwedel-Jensen*-modellek szuperpozíciója az, ami a cséppmodellből adódik, és ez a kombináció írja le helyesen a kísérleti eredményeket is.

A rezgések létrejöttéhez szükséges visszatérítő erő a cséppmodellben szereplő ún. szimmetriaenergia-tagból származtatható. A cséppmodell e tagja azt fejezi ki, hogy a természetben előforduló atommagok a proton-neutron szimmetriára törekszenek. Bármely irányú eltérés az egyenlő proton- és neutron-számtól az atommag energiájának növekedéséhez vezet. A protonok és a neutronok egy-

mástól történő eltávolításával tehát a rendszer energiája növekszik. A növekedés mértékéből a visszatérítő erő kiszámítható.

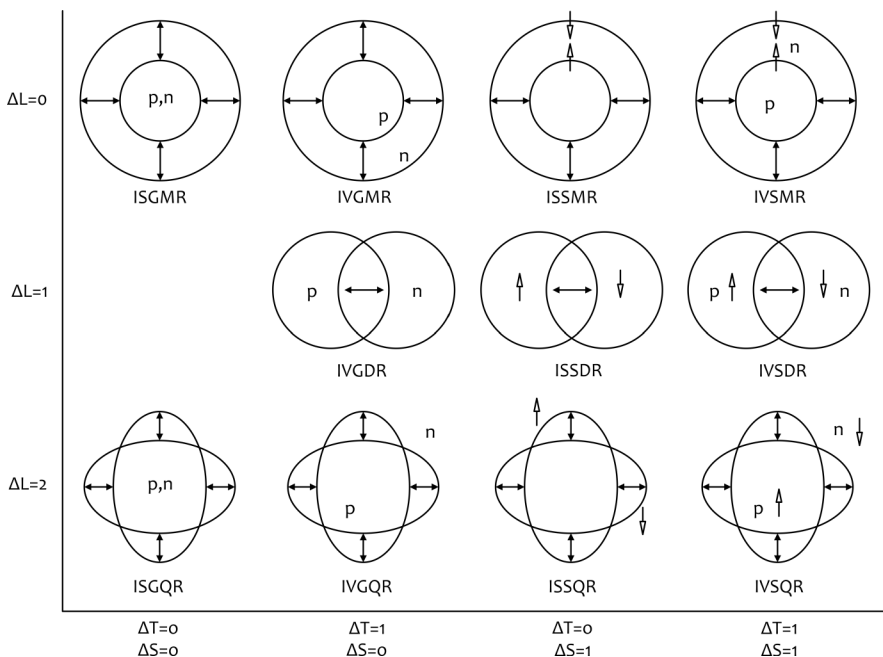
A folyadékceppmodell alapján azonban az atommag további kollektív rezgési módusai is kiadódtak. A módusok aszerint osztályozhatók, hogy hány pólusú a geometriai alakzat deformációja, illetve, hogy bennük a protonok és a neutronok azonos vagy ellentétes fázisban rezegnek-e. Ezek alapján a korábban tárgyalt dipólus-rezonancián kívül beszélhetünk még monopólus-rezonanciáról, ami gömbszerű, ütemes felfúvódást, lélegző rezgést, illetve kvadrupólus-rezonanciáról, ami megnyúlt és lapult alak közötti oszcillációt jelent.

Mind egyik rezonancia esetén beszélhetünk ún. izoskalár rezgési módusról, amikor a protonok és a neutronok azonos fázisban rezegnek, illetve izovektor módusról, amikor ellentétes fázisban rezegnek. A lehetséges

módusok számát tovább növeli, ha figyelembe vesszük a rezgés során a protonok és neutronok spinjeinek (perdülleteinek) relatív irányát is. Az óriásrezonanciák egyszerűsített összefoglalása a 2. ábrán látható.

A dipólus-óriásrezonancia felhasználása a maganyag állapotegyenletének pontosítására

Napjaink magfizikájának legnagyobb beruházásai a már ismert elemek eddig ismeretlen neutrongazdag izotópjainak előállítását és szerkezetének megértését célozzák. A magtérkép egy hatalmas, eddig ismeretlen, több ezer új izotópot tartalmazó tartományának a megismerését tűzik ki célul, amit jelenleg *terra incognita* (ismeretlen terület) néven emlegetnek. A neutrongazdag maganyagra vonatkozó pontos ismereteink hiánya miatt jelenleg még a neutronelhullatási vonalat, a terra incognita határát sem ismerjük pondo-



2. ábra • Az óriásrezonanciák folyadékceppmodellel alapuló osztályozása

san. Az elméleti becslés pontossága a legalap-
 osabban ismert ónizotópokra is csak mint-
 egy ± 10 tömegegység.

Természetesen felmerül a kérdés, hogyan
 határozhatnánk meg pontosabban a nukleá-
 ris stabilitás határát, illetve hogyan pontosít-
 hatnánk a neutrongazdag maganyag állapot-
 egyenletét. A stabil atommagokban megfi-
 gyelet külső, neutrongazdag réteget, az ún.
 neutronbőrt már jelenleg is tanulmányozhat-
 juk. A neutronbőr-vastagságra vonatkozóan
 a jelenlegi legjobb elméleti számítások ered-
 ményei között két-háromszoros eltérés van.
 Igaz, hogy ez a neutronbőr-vastagság – ame-
 lyet a neutron- és protoneloszlás sugarainak
 különbségeként értelmezhetünk – egyrészt
 nagyon kicsi, az atommag sugarának mind-
 össze néhány százaléka, másrészt nagyon ne-
 hezen mérhető.

A folyadékcseppmodell alapján azt várhat-
 nánk, hogy a neutron- és protoneloszlás ilyen
 különbségének valamilyen kapcsolatban kell
 lennie a szimmetriaenergia értékével. A leg-
 újabb elméleti munkák alapján valóban ha-
 tározott összefüggést figyeltek meg a szimmet-
 riaenergia és a neutronbőr-vastagság között.

Ezek alapján a neutronbőr-vastagság pon-
 tos mérésével pontosabbá tehetjük a neutron-
 gazdag maganyag állapotegyenletének szim-
 metriaenergia-tagját, aminek ismeretében a
 neutrongazdag atommagok szerkezetére
 pontosabb előrejelzéseket adhatunk.

Az elmúlt évtizedek során több olyan, az
 óriásrezonanciák gerjesztését felhasználó
 módszert is kidolgoztak (tunk), amelyek se-
 gítségével adatokat kaphatunk az atomma-
 gok neutronbőrének vastagságára. Ezek egy
 részét, a törpe (kisenergiás) dipólus-rezonan-
 ciák (az egyszerű kép értelmében a neutron-
 bőr rezeg az atommag többi protonjához és
 neutronjához képest) vizsgálatát, illetve a

dipólus-polarizálhatóság pontos mérését -
 amihez szintén a kisenergiás dipóluserőségek
 pontos kimérése szükséges - tervezzük majd
 felhasználni az ELI-NP-nél végzett méréseink
 során is.

Az atommaghasadás kísérleti vizsgálata

Az atommaghasadás felfedezése óriási lendü-
 letet adott a magfizikai kutatásoknak. Az
 atommag cseppmodelljével a maghasadás
 jellemzőinek értelmezése igen jól sikerült. *Lise
 Meitner*, a maghasadás egyik felfedezője a
 folyamatot az élő sejtek osztódásához, az élet
 keletkezéséhez hasonlította. Ez a felfedezés a
 magfizika robbanásszerű fejlődéséhez vezetett.

A folyadékcseppmodell értelmében az
 atommagok hasadását egy elektromosan töl-
 tött folyadékcsepp széthasadásaként képzel-
 hetjük el. Elektromos töltés nélkül egy folya-
 dékcsepp a felületi feszültségből származó
 energia minimalizálására törekszik, ezért a
 lehető legkisebb felületű, azaz gömb alakú
 egy súlytalan folyadékcsepp. Az atommagot
 azonban a protonok töltése miatt töltött
 folyadékcseppnek kell elképzelni. Az egyfor-
 ma töltések taszítása miatt energetikailag
 kedvezőbbé válik a csepp számára, ha defor-
 málódik, és így a töltések egymástól távolabb
 kerülhetnek. Így érthető, hogy a nagy rend-
 számú atommagok alakja általában eltér a
 gömbtől.

Ha az atommagnak például egy neutron
 hozzáadásával további energiát adunk, akkor
 az egyre deformáltabbá válik, és végül szét-
 hasad. A két hasadvány közötti erős taszítóerő
 nagy sebességre gyorsítja fel a hasadványokat.
 A hasadványok lefékeződésekor keletkező hő
 hasznosítja az atomreaktorokban.

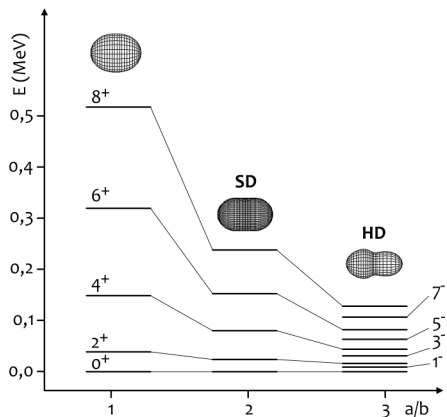
Az atommagok széthasadásakor előfordu-
 ló egzotikus magalakokról sajnos nem tudunk
 „fényképfelvételeket” készíteni, mivel az atom-

mag túl kicsi, és a maghasadás túlságosan gyorsan történik. Lehetséges azonban, hogy a teljes széthasadás előtt az atommag még valamiféle erősen deformált, átmenetileg stabil, ún. metastabil állapotba kerül, és csak utána hasad szét. Nehéz atommagok hasadásakor valóban megfigyelték, hogy bizonyos esetekben a maghasadás nem történt meg közvetlenül a magreakció lezajlása után, hanem csak néhány ns-mal (10^{-9} s) vagy néhány ms-mal (10^{-3} s) később. Ezeket az állapotokat hasadási izomer állapotoknak nevezték el. Az ilyen állapotoknak már sikerült kísérletileg meghatározni az alakját.

Az atommagok alakjának kísérleti meghatározása

Egy deformált atommag a molekulákhoz hasonlóan foroghat is. E forgó kvantummechanikai rendszereknek a perdületüktől függően csak jól meghatározott gerjesztett állapotok lehetségesek: $E = \hbar^2 / (2\theta) J(J+1)$, ahol E a gerjesztett állapot energiáját, \hbar a Planck-féle állandót, θ az adott molekula vagy atommag tehetetlenségi nyomatékát, J a perdületét jelöli. A fenti gerjesztett állapotok (forgási sávok) mérésével meghatározhatjuk az atommagok tehetetlenségi nyomatékát. Mivel ellipszoidnak feltételezve az atommagot, annak tehetetlenségi nyomatéka a kis- (b) és nagy- (a) tengelyével a mechanikából ismert módon kifejezhető. Adott tehetetlenségi nyomatékhoz így adott magalak rendelhető.

A 3. ábrán feltüntettem egy tipikus transzurán atommag alapállapotához tartozó forgási állapotokat (az alapállapot forgási sávot), illetve a szuperdeformált (SD, ahol $a/b=2$), valamint a hiperdeformált (HD, ahol $a/b=3$) állapotok forgási sávjait is. HD állapotok esetén az elméleti előrejelzések értelmében az atommag már nem tükrörszimmetrikus, ezért



3. ábra • Különböző alakú atommagok tipikus forgási gerjesztett állapotai

páratlan perdületű állapotokkal is ki kell egészíteni a forgási sávot, ugyanúgy, mint a molekulák esetén.

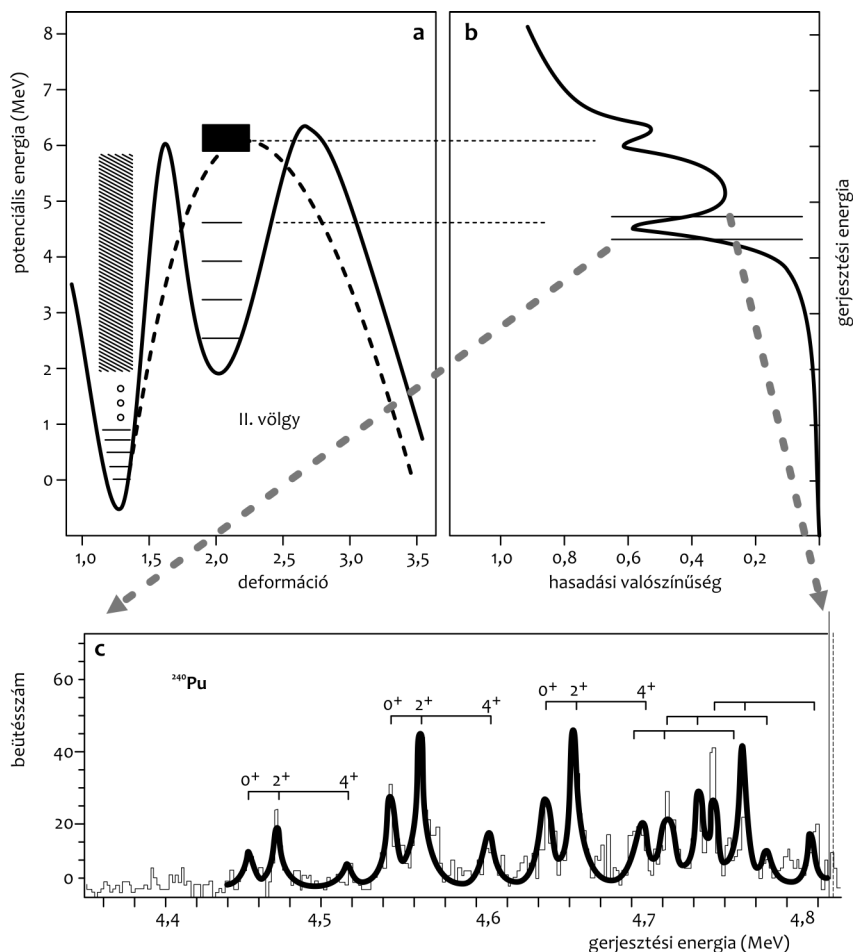
Az atommagok alakjának meghatározásához tehát meg kell mérnünk a fenti gerjesztett állapotok energiáit. A ^{240}Pu esetén nagyon gondos magspektroszkópiai vizsgálatokkal sikerült az izomerállatra épülő forgási sávot is meghatározni. A sáv tehetetlenségi nyomatékából az következett, hogy valóban erősen deformált (szuperdeformált), 2:1 tengelyarányú állapotról van szó.

A 4a. ábrán szaggatott vonallal a ^{240}Pu hasadó atommag cseppmodell alapján várható potenciális energiáját (hasadási potenciált) tüntettem fel a magtengelyek arányának függvényében. Ebből lehet megállapítani, hogy egy atommag milyen alaknál éri el a minimális energiáját (stabil vagy metastabil) állapotot. Ezzel a potenciállal nem lehet értelmezni a hasadási izomer állapotot. Annak értelmezéséhez a nukleonok között ható magerők pontosabb figyelembevétele is szükségessé vált. A pontosabb számítások eredményét a 4a. ábrán folytonos vonallal tüntettem fel. Az itt mutatkozó második minimum

(völgy) folytán ez már alkalmas a hasadási izomer állapot értelmezésére.

A hasadványokat összetartó hasadási potenciál magasságát és szélességét a hasadási valószínűségeknek a gerjesztési energia függvényében történő mérésével határozhatjuk meg. A potenciálgát maximumánál kisebb gerjesztési energia esetén a maghasadás csak alagúteffekttussal történhet meg, ezért annak a valószínűsége az energia csökkenésével exponenciálisan csökken (*4b. ábra*).

A hasadási valószínűséget jó energiafelbontással mérve, abban rezonanciaállapotokat is megfigyeltek. A rezonanciákat a II. völgybeli gerjesztett állapotokon keresztül történő ún. rezonáns alagúteffektus segítségével sikerült értelmezni. A hasadási valószínűségben megfigyelt forgási sávok is arra utaltak, hogy például a ^{240}Pu atommag hasadása II. völgybeli szuperdeformált állapotokon keresztül történt. Az erre vonatkozó eredményeinket a *4c. ábra* szemlélteti.



4. ábra • A ^{240}Pu atommag hasadási potenciálja a deformáció függvényében (a), sematikus hasadási valószínűsége a gerjesztési energia függvényében (b) és mért hasadási valószínűsége (c)

*Hiperdeformált állapotok kimutatása
Debrecenben*

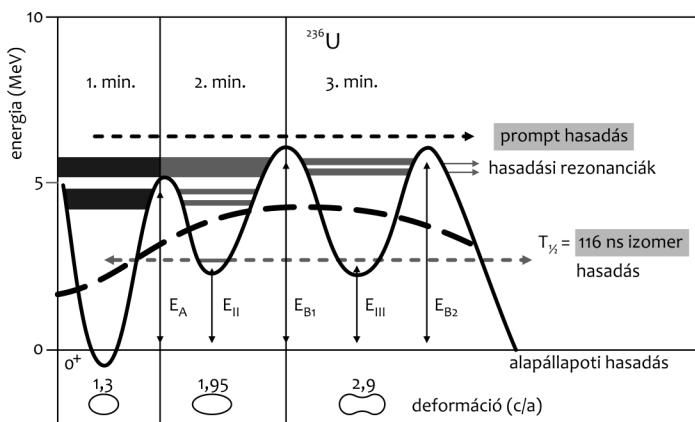
Az elmúlt évtizedekben a hiperdeformált állapotok γ -spektroszkópiai kimutatása nagy erővel folyt, de mindeddig sikertelenül. Különböző anyagokból készült, néhány mikrométer vastag céltárgyakat nagy energiájú nehéz ionnal bombáznak, és az ennek hatására kibocsátott milliónyi γ -fotonból igyekeznek azokat összeválogatni, amelyek ugyanazon magtól származnak. A lövedék hatására felpörgő mag meg is nyúlhat, erről az egymás után kibocsátott több tucatnyi γ -kvantum energiasorozata árulkodik.

Ezen állapotok vizsgálatára nagy hatásfokú és jó energiafelbontású, ugyanakkor nagyon költséges spektrométereket építettek mind Európában (Euroball), mind az Amerikai Egyesült Államokban (Gammasphere). Sebesen pörgő magok hiperdeformált állapotainak megfigyeléséről először 1993-ban számoltak be, azonban az eredményeket 1995-ben visszavonták. Elméleti számítások arra is utaltak, hogy nehéz, hasadó magokban gyors

pörgetés nélkül is kialakulhatnak „körte alakú” hiperdeformált állapotok, amelyek 100 és 132-es tömegszám környéki darabokra szeretnek hasadni. Az 5. ábrán a ^{236}U atommagra számított hasadási potenciált ábrázoltam. A számítások értelmében a hasadási potenciálnak ez esetben nemcsak 2. völgye, hanem 3. völgye is várható volt.

Az MTA debreceni Atommagkutató Intézetének ciklotronlaboratóriumában korábban egy Hollandiából kapott mágneses spektrométert telepítettünk. Ez repülő ionokat tud energia szerint pontosan szétválogatni. Holland (NWO) és magyar (OTKA, GVOP) pénztámogatásokat felhasználva a spektrométerhez modern elektronikus detektort és adatgyűjtő rendszert építettünk.

A hasadó magok hiperdeformált állapotai kis energiájú, könnyű ionnal való bombázással gerjeszthetők, és a másodperc törtrésze alatt széthasadnak. A reakció csak a hiperdeformált forgási állapotot gerjesztő energián megy végbe, és észleléséhez gyors egymásutánban kell a reakció során kirepülő részecskét és a hasadási terméket megfigyelni. Előbbit a



5. ábra • A ^{236}U atommag hasadási potenciálja a mag deformációjának függvényében. A nyilak a 3. völgybeli hiperdeformált forgási sávokon keresztül történő rezonáns alagúteffektust szimbolizálják.

mágneses spektrométerrel, utóbbit az Atomkiban kifejlesztett gáztöltésű detektorokkal végeztük. E viszonylag egyszerű berendezések segítségével mértük a ^{236}U atommag hasadási valószínűségét a gerjesztési energia függvényében, és így először sikerült hiperdeformált forgási sávokat megfigyelni. Első eredményeinket 1997-ben, egy Debrecenben rendezett nemzetközi szimpóziumon mutatuk be, 1998-ban pedig a legrangosabb fizikai folyóirat közölte azokat. A témakör iránti nagy érdeklődés miatt hasonló konferenciákat 2000-ben és 2005-ben is rendeztünk.

Időközben sikeres együttműködést alakítottunk ki a müncheni Ludwig Maximilians Egyetem kutatóival, amelynek célja az aktinoida tartományba eső atommagok hasadási valószínűségeinek és hasadási potenciáljainak (a két fragmentumot hiperdeformált alakban tartó kölcsönhatás jellemzője) szisztematikus vizsgálata volt. Eredményeinkről magyar nyelven is és kézikönyvben is beszámoltam (Krasznahorkay, 2007, 2009, 2011).

A maghasadás vizsgálatára vonatkozó terveink az ELI-NP-nél

Az atommag egy olyan mikroszkopikus laboratórium, amelyben számos érdekes természeti jelenség tanulmányozható. Például az a kérdés is, hogyan jön létre a kollektív mozgás az egyéni szabadsági fokokból. Adott esetben egyszerű rezgések és forgások sok nukleon összehangolt mozgásaként, vagy az alak sokféle megváltozása, és akár az egész mag kettéhasadása következhet. Milyen kölcsönhatások működnek az egyes alkotóelemek között, ezek milyen kollektív erőterekre vezetnek, és hogyan függenek össze a rendszer dinamikájával és szimmetriáival?

Munkánk során ezeket a kérdéseket tervezük megvizsgálni. Felkutatjuk a magban fel-

lépő csoportosulásokat (a mag fűrtösödését), azok mozgását és szétválását, vagyis a mag hasadását. Kikutatjuk, milyen összefüggés van a magot alkotó neutronok és protonok száma, valamint a mag vibrációja között. Mi a közös gyökere a nukleonok egyedi mozgásának, az egész mag folyadékszerű rezgésének és forgásának, valamint fűrtösödésének és felbomlásának. Mindezt sok atommagon szisztematikusan végrehajtott (hasadási, ütközési és bomlási) kísérlettel, és hozzájuk kapcsolódó elméleti vizsgálatokkal reméljük elérni.

A γ -indukált hasadás segítségével szelektíven gerjeszthetők a könnyű aktinoida atommagok széthasadása előtti, erősen deformált állapotai, amelyek vizsgálatával szeretnénk jobban megérteni a dimbes-dombos potenciálisenergia-felület szerkezetét ezekben az atommagokban. A mérések szelektivitása abból fakad, hogy a hasadást létrehozó γ -sugárzások csak jól definiált kis impulzusmomentumot visznek be az atommagba, amely állapotok relatíve kis sűrűsége még a hasadási gát környékén is megengedi az állapotok egymástól független vizsgálatát. Nagy felbontású méréseket tervezünk, hogy a potenciálfelület első, második és harmadik minimumában elhelyezkedő, jól meghatározott kezdeti állapotok bomlásából származó hasadványok tömegszámát, rendszámát és energiáját is pontosan megmérhessük.

Méréseink tudományos célja, hogy az ezekre az állapotokra elméletileg előre jelzett fűrtösödési/csomósodási effektusokat megértsük, és adatokat nyerjünk a többdimenziós hasadási potenciál ún. hideg völgyeire, amelyeken keresztül a maghasadás jól meghatározott rendszámú és tömegszámú hasadási termékeket eredményez. Vizsgálni szeretnénk a szuper- és hiperdeformált állapotok hasadási dinamikáját, és az ezekben az álla-

potokban fellépő csomósodási effektusokat. Másrészt tervezzük az aktinoida-tartományba eső potenciálisenergia-felületek alakjának feltérképezését és azok paramétereinek pontos meghatározását. A hasadási gátak ezen paramétereire alapvető bemenő adatok a negyedik generációs erőművekben tervezett tórium-urán égetési ciklus szimulálásához.

A fotohasadás szelektivitása lehetővé teszi a hasadási gát második és harmadik minimumához rendelhető hasadási rezonanciák nagy felbontású vizsgálatát. Az SD- és HD-állapotok transzmissziós rezonancia spektroszkópiával történő tanulmányozása hasznos lehet a jelenleginél sokkal tisztább energiatermelés szempontjából is. Felmerült a nukleáris hulladékok hosszú élettartamú, leginkább veszélyes komponensei transzmutációjának lehetőségére is a HD-állapotokon keresztül történő hasadási folyamat kontrollálásával.

Egy másik kutatási terület, amelyet vizsgálni szeretnénk: a hármas hasadás, amikor két nehéz és egy könnyű töltött részecske (például α -rész) keletkezik, illetve az igazi hármas hasadás, amikor három kb. egyforma tömegű hasadási termék keletkezik. Érdekes lenne még az erősen deformált hasadási termékek által intenzív töltött részecske – elméletileg előre jelzett – kibocsátásának vizsgálata is.

Az ELI-NP-nél tervezett méréseink előkészítése érdekében nemrég a ^{238}U atommag fotohasadását vizsgáltuk a hasadási gát alatti energiók esetén a fotonenergia függvényében

a Duke Egyetemen (USA) épített, a világon jelenleg legnagyobb intenzitású, foton-elektron Compton-visszaszóráson alapuló γ -forrás, a HI γ S (High Intensity γ Source) segítségével (Csige et al., 2013). A méréseket a 4,7–6,0 MeV γ -energia-intervallumban 3%-os relatív energiafelbontással végeztük. 5,1 és 5,6 MeV körül gyenge hasadási rezonanciákat figyeltünk meg. A mérési eredményeink elméleti értelmezése és a háromvölgyes hasadási gát paramétereinek meghatározása magreakció-programmal történő számítások eredményeivel való összevetéssel történt. Az eredményeink összhangban vannak a ^{234}U és ^{236}U esetén korábban bevezetett mély 3. völgy paramétereivel, de ellentmondanak a legújabb elméleti számítások eredményeinek.

Az ELI-NP-nél tervezett, a fenténél egy nagyságrenddel jobb, 0,3%-os energiafelbontás és jóval nagyobb intenzitású γ -nyaláb minőségileg új lehetőségeket fog teremteni a fenti jelenségek jelenleginél sokkal pontosabb vizsgálatára. Ha választ találunk ezekre a kérdésekre, nemcsak a természetet ismerjük meg jobban, hanem hasznosítható tudásra is szert teszünk. Az atommagok viselkedésének és reakcióinak pontos megértése szükséges ahhoz, hogy emberhez méltó élet lehessen a Földön a kőolajkészletek kimerülése után is.

Kulcsszavak: *óriásrezonancia, neutronbőr-vastagság, állapotegyenlet, maghasadás, hiperdeformált állapot, tisztább energiatermelés*

IRODALOM

- Csige Lóránt – Krasznahorkay Attila et al. (2013): Exploring the Multihumped Fission Barrier of ^{238}U via Sub-barrier Photofission. *Physical Review C*. 044321. DOI: 10.1103/PhysRevC.87.044321
- Krasznahorkay Attila (2007): Egzotikus atommagok, *Természet Világa*. 5, 214–216.
- Krasznahorkay Attila (2009): Egzotikus alakú atom-

- magok. In: Vértés A. (szerk.): *Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből*. Akadémiai, Bp., 329. o.
- Krasznahorkay Attila (2011): *Tunneling through Triple-humped Fission Barriers: Handbook of Nuclear Chemistry*. Springer-Verlag, Berlin, 281–318.
- URL1: <http://www.eli-np.ro/>
- URL2: <http://www.eli-np.ro/documents/ELI-NP-WhiteBook.pdf>