

# Magspektroszkópiai vizsgálatok az aktinoida tartományban

Csige Lóránt, Krasznahorkay Attila, Csatlós Margit, Gulyás János

MTA Atommagkutató Intézet

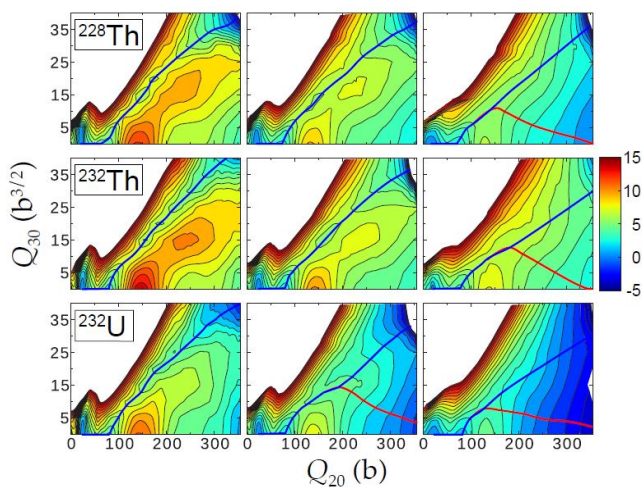
4026 Debrecen, Bem tér 18/c, tel.: +36 52 509 200

A könnyű aktinoida atommagok potenciális energiafelületének pontos ismerete alapvető fontosságú a hatékonyabb, urán-plutónium illetve tórium-urán üzemanyagciklust használó új generációs atomerőművek fejlesztéséhez. A potenciális energiafelületeket jellemző hasadási gátparaméterek fontos bemenő adatok a tervezéshez szükséges hatáskeresztmetszet számítások elvégzéséhez. Az elméleti modellek azonban még mindig jelentős ellentmondásban állnak egymással a nehéz magok nívósémájának meghatározásában és deformációs energiafelületének számításában. Éppen ezért a hasadási gát kísérletileg meghatározott paramétereit kiemelt fontossággal bírják az elméleti számítások ellenőrzéséhez és a jelenleg érvényben levő magmodellek továbbfejlesztéséhez is. Kísérleteinkben a  $^{232}\text{Pa}$ , a  $^{232,238}\text{U}$  és a  $^{238}\text{Np}$  izotópok hasadási valószínűségét mértük a gerjesztési energia függvényében, majd reakciómodell-számítások segítségével határoztuk meg a hasadási gátak paramétereit. A hasadási valószínűség finomszerkezetének feloldásával pedig olyan erősen deformált magállapotok tulajdonságait vizsgáltuk, amelyek a maghasadás során előforduló állapotok magszerkezeti jellemzőibe engednek betekintést.

## Bevezetés

A maghasadás során felszabaduló energiát közel 70 éve használja az emberiség, ám a nehéz atommagok széthasadásának folyamatát még mindig nem ismerjük részleteiben. A maghasadás pontos elméleti leírása a folyamatban részt vevő nagyszámú nukleon miatt még napjaink nagyteljesítményű számítógépeinek a használatával is komoly kihívást jelent [1], így a maghasadás kísérleti vizsgálata különösen nagy szerepet kap a folyamat pontos megértésében. Az atommagok külső gerjesztésekre adott olyan válaszainak vizsgálata, amelyben az atommag sok nukleonja vesz részt, nagy jelentőséggel bír: az ilyen ún. *kollektív* gerjesztések értékes információt szolgáltatnak a sok nukleonból álló rendszer, mint maganyag fizikai tulajdonságairól. A hasadás folyamatának tanulmányozása, amelyet a maganyag kollektív, viszkózus áramlásaként lehet leginkább elképzelni, éppen ezért ilyen fontos feladat. A hasadás vizsgálata során választ kereshetünk olyan érdekes kérdésekre, mint például hogy miként jön létre az atommag forgása és rezgése sok nukleon koherens mozgásából, vagy hogy miként fejlődik, hogyan alakul a magalak a hasadás során, illetve hogy van-e valami kapcsolat a maghasadás és a nukleonok magon belüli csoportosulása, klaszterizációja között. Érdekes kérdés az is, hogy a természet szimmetriái miként jelennek meg a folyamat során, okoznak-e valamilyen szabályszerűséget, kialakul-e valamilyen rendszer a hasadás során létrejövő magalakokra vonatkozóan. A maghasadás, mint természeti jelenség pontosabb megértésén túl ugyanakkor célunk a kísérletekben mért magszerkezeti adatokkal hozzájárulni a nukleáris technológia fejlődéséhez, így például a negyedik generációs erőművek tervezéséhez is. A tórium-urán üzemanyagciklusban lezajló sok folyamat hatáskeresztmetszete kísérletileg nem, vagy csak nagy bizonytalansággal ismert [2], így kísérleti adatok hiányában elméleti számításokkal próbálják a szükséges információt

pótolni. Ezen számítások célja az ún. deformációs potenciális energiafelület meghatározása [3], amely során a hasadó mag potenciális energiáját számolják ki a kvadrupól- ( $Q_{20}$ ), illetve oktapól ( $Q_{30}$ ) momentumának (tehát deformációjának) függvényében (1. ábra). Az ábrán látható színkódos felületek tehát azt mutatják meg, hogy adott mag, adott kvadrupól- és oktapól deformációt elszenvedve mekkora potenciális energiával rendelkezik (MeV egységben). Az energiafelület legmélyebb „völgye” a hasadási útvonal (az ábrán kék és piros vonallal jelölve): a hasadó mag a völgy által leírt deformációkat szenved el a hasadás során. A hasadási potenciál, hasadási útvonal mentén vett kvadrupóltengelyre eső vetületét hívjuk hasadási gátnak, ami a reaktorokban zajló folyamatok hatáskeresztmetszeteinek számításához, így az erőművek tervezéséhez is nélkülözhetetlen adat.



1. ábra: Potenciális energiafelület-számítások [3] eredményei néhány magra (sorok), különböző paraméterezéssel (oszlopok). A potenciális energia (színskála) MeV egységben, a kvadrupól ( $Q_{20}$ ), illetve oktapól ( $Q_{30}$ ) momentumok pedig barn egységben értendők.

A különböző modell-számítások azonban jelentős eltérést mutatnak egymással [3-5], jelezve azok nagy bizonytalanságát. Az eltérések oka a maghasadást leíró soktest probléma bonyolultsága. A hasadási gát, és a hasadás során fontos szerephez jutó kollektív magállapotok kísérleti feltérképezése ezért különösen fontos feladat, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség prioritásait figyelembe véve főként a tórium, protaktínium és urán izotópok esetében [2].

## A hasadási gát szerkezete

A hasadó mag potenciális energiafelületében nagy kvadrupóldeformációknál megjelenő második, lokális (ún. *szuperdeformált*) potenciál minimum az aktinoida magok egyik tipikus sajátja. Elméleti leírása az ún. makroszkopikus-mikroszkopikus közelítésben történik, amelyben a hasadó mag folyadékcsapp-moddal számolt deformációs energiáját egy periódikusan változó - és ebben a tartományban igen erős - héjkorrekcióval módosítják. Az így leírt második potenciálvölgy alapállapotát hasadási izomerállapotnak nevezzük a hosszú felezési idő miatt [6]. Eddig 33 ilyen atommag állapotot azonosítottak az U és Bk magtartományban („hasadási izomer-sziget”), amelyek életideje a nagy gerjesztési energiájuk ellenére is az igen hosszú, ns-ms tartományba esik. Röviddel a hasadási gát második völgyének felfedezése után, a könnyű aktinoida magokon végzett kísérletekben mért hasadási hatáskeresztmetszetek váratlan tulajdonságokat mutattak („Tórium-anómália”) [7], amelyek arra utaltak, hogy még nagyobb kvadrupól- és oktapóldeformációknál egy sekély harmadik lokális minimum is megjelenik a potenciálfelületen. A harmadik potenciálmínimumban levő állapotok már nagyon erős deformációval rendelkeznek (*hiperdeformáltak*), a hasadó mag „szétfroccsenéséhez” nagyon közel eső állapotokat tükröznek, így vizsgálatukkal a hasadás dinamikájáról értékes ismeretekre tehetünk szert. Debreceni kutatócsoportunk korábban is jelentős szerepet játszott a hiperdeformált állapotok feltérképezésében [8]. Jelen munkában a legutóbbi kísérleti eredményeinkről számolunk be.

Kísérleteinkben az aktinoida magok extrém nagy deformációval rendelkező állapotainak vizsgálatát a hasadási gát alatti gerjesztési energián ( $E \approx 3-6$  MeV) mért prompt hasadási hatáskeresztmetszetben megjelenő transzmissziós hasadási rezonanciák azonosításával végezzük [6]. Ilyen rezonancia akkor jelenik meg, ha az első völgybeli gerjesztett állapotok energiája egybeesik egy második, vagy egy harmadik völgybeli állapot gerjesztési energiájával. A hasadás folyamata így a kapuállapotok hasadási gáton keresztüli, alagút-effektussal történő bomlásával fejezhető ki. A rezonanciaállapotok gerjesztési energia függvényében történő észlelése ad lehetőséget arra, hogy azonosítsuk az erősen deformált magállapotokat, és meghatározzuk azok gerjesztési energiáit, tulajdonságait. A forgó mikroszkopikus test forgási energiája a kvantummechanika értelmében csak a következő diszkrét értékeket veheti fel:

$$E(J) = \frac{\hbar^2}{2\Theta} J(J+1), \quad (1)$$

ahol  $\Theta$  a test tehetetlenségi nyomatéka,  $J$  pedig a perdülete  $\hbar$  egységben. Hengerszimmetrikus és egyben tükörszimmetrikus test esetén a  $J$  értéke csak páros szám lehet. Ha a tükörszimmetriát nem követeljük meg, akkor a  $J$  értéke

tetszőleges pozitív egész szám lehet. Ezért a forgási sáv azonosításához a magspineket, illetve azoknak a mag szimmetriatengelyére eső vetületét is meg kell határoznunk, ami a hasadási termékek szögeloszlásának mérésével és elemzésével tehető meg. Tehát a hasadási rezonanciák spektrumának mérésével és a fenti (1) képlet segítségével meghatározhatjuk az atommag tehetetlenségi nyomatékát, és így annak alakjáról is információt kaphatunk [9].

A hasadási hatáskeresztmetszet gát közeli és gát alatti tartományban való megméréseivel ugyanakkor a hasadási gát alakját tudjuk meghatározni. A potenciálgát maximumánál kisebb gerjesztési energia esetén a maghasadás csak alagúteffektussal történhet. Feltételezve, hogy a potenciál egymáshoz folytonosan illeszkedő parabolákkal közelíthető, az alagúteffektus valószínűsége a gerjesztési energia függvényében könnyen kiszámítható, a számított és mért valószínűségek összevetése alapján pedig a parabolák paraméterei meghatározhatók. A hasadási gát völgyeinek mélységét egy másik módszerrel is meg lehet határozni: a második, illetve harmadik völgy azonos spinű állapotainak sűrűsége az atommagok Fermi-gáz modellje alapján egyértelműen utal a völgyek mélységére.

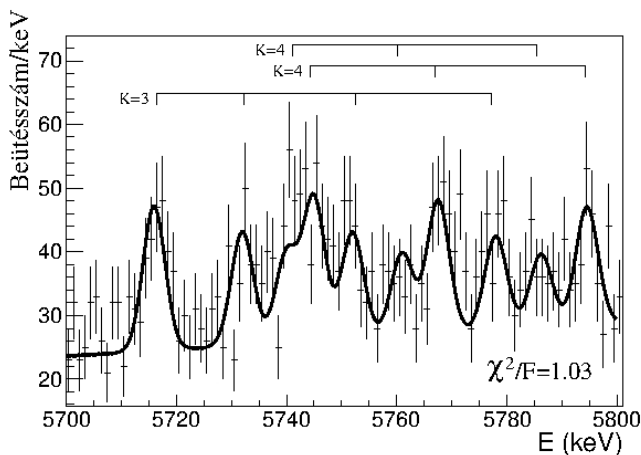
## A hasadási gát vizsgálata töltött-részecske nyalábokkal

Az erős deformációval és kis gerjesztési energiával rendelkező atommag-állapotok egyik fontos vizsgálati módszere a neutronátadással járó direkt reakciók alkalmazása, amellyel „negatív” energiájú neutron lehet a mának átadni. Az aktinoida tartományban sok esetben ilyen reakciók használatával lehet csak információt nyerni a hasadási gát alatti állapotokról, főleg olyan magoknál, ahol a neutronszeperációs energia nagy (5,5-7 MeV) értéket vesz fel.

Töltött-részecske nyalábot alkalmazó kísérleti vizsgálataink fő helyszíne a münchen-i Maier-Leibnitz Tandemlaboratórium (München, Németország) volt. Kísérleteinkben a  $^{232}\text{U}$  [10], a  $^{232}\text{Pa}$  [11], és legutóbb a  $^{238}\text{Np}$  magok gát alatti hasadási rezonanciáinak és azok forgási finomszerkezetének vizsgálatát, illetve a hasadási gátak paramétereinek megállapítását tűztük ki célul. Az elvégzett kísérletekben a hasadási valószínűségek gerjesztési energiától való függését határoztuk meg, amelyhez a  $^{231}\text{Pa}(d, pf)$ , a  $^{231}\text{Pa}(\alpha, df)$ , illetve a  $^{237}\text{Np}(d, pf)$  reakcióból származó, hasadványokkal koincidienciában levő könnyű részecskék kinetikus energiáját mértük meg nagy feloldással ( $\Delta E = 5$  keV) egy Q3D típusú mágneses spektrográf segítségével. A kilépő töltött részecskék kinetikus energiájából a hasadó mag gerjesztési energiáját lehet meghatározni. A hasadványokat az MTA ATOMKI-ben fejlesztett, nagy hatásfokú, helyzet-érzékeny, kisnyomású lavinadetektorokkal (PPAC) figyeltük meg. Fontos megemlíteni, hogy a fenti kísérletek elvégzése azért vált lehetővé, mert a müncheni Ludwig-Maximilians Egyetem Radioaktív Céltárgy-laboratóriuma igen jó minőségű, rendkívül vékony ( $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), erősen radioaktív  $^{231}\text{Pa}$  és  $^{237}\text{Np}$  céltárgyat készített és biztosított számunkra.

A hasadási gát paramétereinek meghatározásához mindhárom esetben a TALYS [12] nevű reakciókóddal végeztünk számításokat. A számítások során használt reakció-modellben a hasadási gát paraméterei bemenő adatok, amelyek változtatásával a számolt hatáskeresztmetszet a kísérleti pontokhoz illeszthető. Az így meghatározott gátparaméterek körülbelül  $\pm 200-300$  keV

pontosságúak, elsősorban a szintén bemenő adatként szereplő állapotsűrűségekre vonatkozó paraméterek bizonytalansága miatt. Utóbbi paraméterek fontosságát jelzi, hogy jelenleg is több nemzetközi kutatócsoport foglalkozik az állapotsűrűség széles energiatarományban történő kísérleti meghatározásával, amellyel ezt a bizonytalanságot lehetne jelentősen csökkenteni. A hasadási gát paramétereire vonatkozó eredményeinkkel [10,11] jelentősen hozzájárultunk az aktinoidákra vonatkozó, reaktorfizikai szempontból lényeges mag szerkezeti adatbázisok kiterjesztéséhez.



2. ábra: A  $^{232}\text{Pa}$  hiperdeformált forgási állapotai [9]

A  $^{232}\text{Pa}$  hasadási valószínűsége az 5,7-5,8 MeV gerjesztési energiatarományban gazdag finomszerkezetet mutat (2. ábra), amely a korábban már említett forgási sávok megjelenésével magyarázható. Az ábra felső részén jelölt forgási szerkezetet feltételezve sikerült értelmezni ezt a finomszerkezetet (folytonos vonal), és a tehetetlenségi nyomatékot meghatározni, amely egyértelműen hiperdeformált magalakra utal. Így a páratlan neutron és protonszámmal rendelkező atommagokban először sikerült kimutatni erősen deformált magállapotok jelenlétét. Hasonló eredményre jutottunk a  $^{232}\text{U}$  esetében is, amely jól illeszkedik az uránizotópokra korábban végzett kísérletek eredményeihez [11,13] is. A  $^{238}\text{Np}$  atommagra vonatkozó kísérleti adatok feldolgozása jelenleg is tart, a megfigyelt rezonanciaszerkezet azonban nagyon hasonló a  $^{232}\text{Pa}$  esetében megfigyelt szerkezethez.

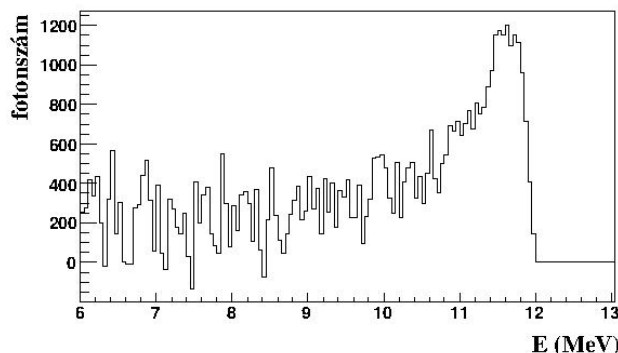
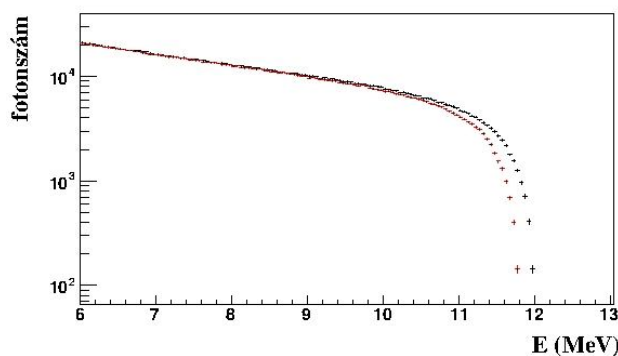
## A hasadási gát vizsgálata új generációs $\gamma$ nyalábokkal

Az aktinoida atommagok hasadási rezonanciáit korábban csak könnyű részecske ( $^3\text{He}$ , deuteron, proton, neutron) indukált reakciókban, konverzióelektron-,  $\gamma$ - illetve töltött-részecske spektroszkópiai módszerekkel vizsgálták, vizsgáltuk. Ilyen magreakciókban a második és harmadik völgybeli állapotok gerjesztése rendkívül kis valószínűségű folyamat. A mérések egyik komoly nehézsége, hogy a nem-rezonáns (ún. *prompt*) hasadásból származó háttéresemények száma öt nagyságrenddel nagyobb a rezonáns-hasadások számánál. További probléma, hogy a hasadási valószínűség csak nagy bizonytalansággal határozható meg, ugyanis a közbelsőmag-keletkezésével nem járó reakciómechanizmusok járulékat nem tudjuk pontosan figyelembe venni. Foton-indukált magreakciók elviekben alkalmasabbak a fenti kutatások végzéséhez, egyrészt a nem-rezonáns hasadás kis

száma miatt, másrészt a foton abszorpcióra vonatkozó kiválasztási szabály miatt, amely szerint:

$$(J_i - J_f) \leq L \leq J_i + J_f, \quad (2)$$

ahol  $J_i$  és  $J_f$  az atommag kezdeti- és végállapotának impulzusmomentuma,  $L$  pedig a  $\gamma$ -foton által a magnak átadott impulzusmomentum. Az  $E1$  elektromos dipól és az  $E2$  elektromos kvadrupól abszorpció a két legvalószínűbb folyamat, amely átmeneteket a hasadványok szögeloszlásából egyértelműen azonosítani tudunk. A fenti kiválasztási szabály miatt így a hasadási valószínűség rezonanciaszerkezetét könnyen értelmezni tudjuk.



3. ábra: Két, különböző végponti energiájú ( $E=11,8$  és  $12$  MeV) fékezési sugárzás energiaspektruma (felső ábra), illetve azok különbsége (alsó ábra)

Aktinoidák gát alatti fotohasadását korábban nagy intenzitású fékezési sugárzás segítségével vizsgálták, amely kísérletekben a hasadási hatáskeresztmetszetet adott energián bonyolult módon, nagy szisztematikus hibával terhelt lehetett csak meghatározni. A fékezési sugárzás folytonos energiaspektruma (3. ábra) miatt a hasadási hozamot két különböző végponti energiával rendelkező fékezési sugárzással mérték, majd a két hozamot kivonták egymásból. Így meghatározták azt a hasadási hozamot, amely az alsó ábrán látható energiaspektrummal rendelkező fotonokhoz tartozik. Az effektív energiabizonytalanság láthatóan igen nagy, tipikusan a  $\Delta E/E=4-6 \times 10^{-2}$  tartományba esik, ráadásul a spektrum Gauss-függvényvel nem leírható, ami a meghatározott hatáskeresztmetszet gerjesztési energiabeli pontatlanságával jár. Mindezen nehézségek miatt fékezési sugárzással a fotohasadás hatáskeresztmetszetének csak nagyléptékű vizsgálatát tudták elvégezni, gát alatti transzmissziós rezonanciákat nem sikerült észlelni. A hatáskeresztmetszet durvaszerkezetében alacsony energián megfigyeltek azonban egy érdekes tartományt, ahol a hatáskeresztmetszet energiafüggése nem a várt tendenciát



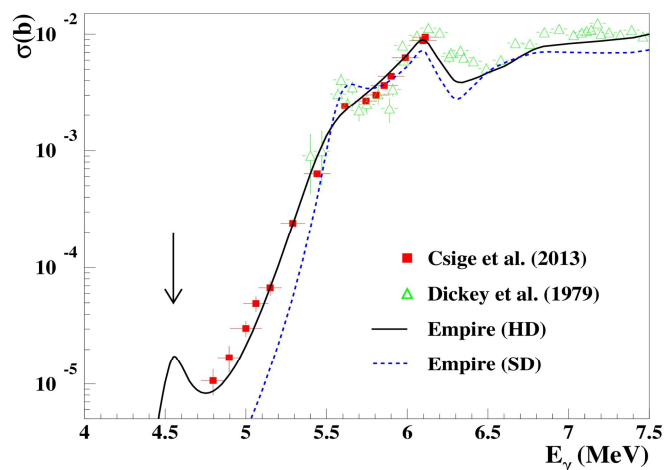
mutatatta, az exponenciális energiatartományban történő felváltsági jellegűvé vált („izomer-váll”). Az ellentmondást azzal a feltevéssel sikerült értelmezni, hogy az izomer-váll az izomer és a prompt hasadás versengésének eredménye, egy sok hasadási rezonanciából álló tartomány [14]. A megfelelő energiatartományban történő nagy-feloldású kísérletek hiányában azonban eddig még nem sikerült ezt a feltevést hitelt érdemlően igazolni.

Az új fejlesztésű, extrém intenzitású és jó energiefeloldású Compton-visszaszórt  $\gamma$  nyalábok azonban lehetővé teszik a könnyű aktinoidák erősen deformált kollektív magállapotainak, illetve hasadási gátjainak foton-indukált magreakciókban történő szelektív vizsgálatát. Ilyen berendezés lesz az Európai Unió által finanszírozott és Bukarest (Románia) határában hamarosan megépülő „Extreme Light Infrastructure - Nuclear Physics” (röviden: ELI-NP) kutatóközpont is. Az ELI-NP központ magfizikai kísérletek számára fog biztosítani a világon egyedülállóan nagy intenzitású ( $10^{13}$   $\gamma/s$ ) és jó energiefeloldású ( $dE/E=0,1\%$ )  $\gamma$ -nyalábot. Az ELI-NP nagyberendezés két komponensből álló összetett rendszer lesz: az egyik egy nagy intenzitású lézer, amelyet két 10 PW-os lézer nyalábjának koherens szuperpozíciójával állítanak elő, összesen  $10^{23}$  -  $10^{24}$  W/cm<sup>2</sup> teljesítményt szolgáltatva. A másik komponens egy extrém intenzitású ( $10^{13}$   $\gamma/s$ )  $\gamma$ -nyaláb 0,1% energiastabilitással és  $E=19$  MeV maximális energiával, amelyet egy lézer nyaláb  $E_c=600$  MeV energiájú relativisztikus elektron-nyalábon való inkoherens Compton-visszaszórásával nyernek. A Compton-visszaszórt  $\gamma$ -nyalábok nagy fluxusával és energiefeloldásával először sikerülhet észlelni a hasadási izomer-völgy finomszerkezetét is, és pontosan megmérni a (korábban említett bizonytalanságtól mentes) hasadási valószínűséget.

Várakozásunk szerint a több-fotonos rezgési állapotok széles energiatartományban történő feltérképezésével először nyerhetünk értékes információt arról is, hogy a második potenciálmínimum leírható-e egyáltalán harmonikus potenciállal, mint ahogy azt jelenlegi közelítéseinkkel tesszük. Az atommagon belüli nukleonsoportok (klaszterek) kialakulásának lehetőségét figyelembe vevő elméleti megfontolások olyan jóslatokkal is szolgálnak, hogy a hiperdeformált magállapotok egy gömbszerű, mágikus neutron- ( $N=82$ ) és protonszámot jelentő ( $Z=50$ )  $^{132}\text{Sn}$  klaszterből, és egy megnyúlt alakú kiegészítő nukleonsoportból állnak [15]. Mivel a hasadási termékek tömegeloszlását a hasadási pont konfigurációja határozza meg, és a harmadik potenciálvölgy atommagállapotai nagyon közel állnak a hasadási ponthoz, azt várhatjuk, hogy az ilyen erősen deformált, harmadik völgybeli állapotok hasadása során keletkező hasadványok tömegeloszlása aszimmetrikusabb eloszlást mutat jelentősen megnövekedett csúcs-völgy aránnyal, mint az első potenciálvölgybeli (normál deformált) állapotok hasadása során keletkező hasadványoké. Azonban ilyen effektust mindeddig nem sikerült kimutatni a gyenge tömegfeloldás (5 amu) és a már korábban is említett erős nem-rezonáns hasadási háttér miatt.

A fent említett ELI-NP berendezés még építés alatt áll, azonban a jelenleg működő HI $\gamma$ S berendezés (Duke Egyetem, USA)  $\gamma$ -nyalábjára kiváló lehetőséget biztosít(ott) kísérleti programunk elkezdéséhez, az első, próbakísérlet

elvégzéséhez és a fotohasadás-technológia kifejlesztéséhez. 2012-ben nemzetközi együttműködésben sikeres kísérletet végeztünk a HI $\gamma$ S berendezésnél [16], amely során a  $^{238}\text{U}$  fotohasadási hatáskeresztmetszetét (4. ábra) mértük meg a  $\gamma$  energia függvényében egy nagy hatásfokú PPAC detektorrendszerrel. A nagy nyalábtartomány segítségével sikerül a hasadási gát paramétereinek meghatározásánál döntő fontosságú, mélyen gát alatti energiatartományban is megmérnünk a hatáskeresztmetszetet, így kiterjeszteni a kísérletileg ismert hatáskeresztmetszet adatokat 2 nagyságrenddel kisebb értékekre. A korábban ismert adatokat háromszöggel, míg az kísérletünk eredményét négyzettel jelöltük a 4. ábrán.



4. ábra: A  $^{238}\text{U}(\gamma,f)$  reakció hatáskeresztmetszete

A hagyományos, töltött-részecske nyalábokkal végzett kísérleteinkhez hasonlóan ebben az esetben is reakciókód számítások segítségével határoztuk meg a hasadási gát paramétereit. A 4. ábrán szaggatott vonallal olyan számítások eredménye látható, amelyekben nem vettünk figyelembe harmadik potenciálvölgyet, a reakciómodellt kétvölgyes hasadási gátra korlátoztuk, míg a folytonos vonallal jelölt számításnál háromvölgyes hasadási gáttal számoltunk. Eredményeink azt jelzik, hogy a  $^{238}\text{U}$  mag is háromvölgyes potenciálfelülettel rendelkezik, ahogy azt az elméleti előrejelzések is sugallták. Érdekes (és fontos) volna még alacsonyabb energiákon megmérni a hatáskeresztmetszetet a nyíllal jelzett foton energia közelében, ahol egy megjelenő rezonancia a modellünk helyességét kizárólagosan igazolni tudná. Ezt a mérést azonban már csak az új ELI-NP berendezésnél lehet majd elvégezni.

A hasadási rezonanciák megismerése ipari felhasználási lehetőségekkel is kecsegtet. Elképzelésünk szerint a nagy áthatolóképességű  $\gamma$ -nyalábok egy rendkívül hasznos alkalmazása lehetne a radioaktív hulladéktárolókban levő hosszú életidejű aktinoidák transzmutációja a harmadik potenciálvölgy előre feltérképezett és kiválasztott, nagy amplitúdójú rezonanciának fotonok általi gerjesztésével, amely során ezen aktinoidák indukált hasadásával ártalmatlan, rövid életidejű, gyengén radioaktív hasadványok keletkeznének a tárolók érintetlenül hagyása mellett.

## Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] P. Möller et al., *Nature* 409 (2001) 785.
- [2] *Evaluated nuclear data for nuclides within the thorium–uranium fuel cycle*, International Atomic Energy Agency, STI/PUB/1435, Vienna (2010).
- [3] M. Kowal et al., *Physical Review C* 85 (2012) 5:1302.
- [4] J.D. McDonnell et al., *Physical Review C* 87 (2013) 5:4327.
- [5] T. Ichikawa et al., *Physical Review C* 87 (2013) 5:4326.
- [6] P.G. Thirolf and D. Habs, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 49, (2002) 325.
- [7] J. Blons et al., *Nuclear Physics A* 477 (1988) 231.
- [8] A. Krasznahorkay et al., *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 2073;  
A. Krasznahorkay, in *Handbook of Nucl. Chem.* (Springer-Verlag, Berlin, 2011), 281.
- [9] Krasznahorkay A., *Természet Világa* 138 (2007) 214.
- [10] L. Csige et al., *Physical Review C* 80 (2009) 011301.
- [11] L. Csige et al., *Physical Review C* 85 (2012) 054306.
- [12] A. J. König et al., *AIP Conf. Proc.* 769, (2005) 1154.
- [13] M. Csatlós et al., *Physics Letters B* 615, (2005) 175.
- [14] G. Bellia et al., *Zeitschrift für Physik A* 314, (1983) 43.
- [15] S. Cwiok et al., *Physics Letters B* 322, (1994) 304.
- [16] L. Csige et al., *Physical Review C* 87 (2013) 044321.