



Az atommag
neutronbőr-vastagságának és
hiperdeformációjának kísérleti
vizsgálata

Doktori (PhD) értekezés tézisei

dr. univ. Csatlós Margit

Témavezető: Dr. Krasznahorkay Attila

*Debreceni Egyetem
Természettudományi Kar
Debrecen, 2003.*

Előzmények és célkitűzések

A neutronbőr és az erősen deformált magalakok tanulmányozása napjaink magszerkezetkutatásának élvonalába tartozik. Mindkét esetben az atommag valamilyen általános tulajdonságát vizsgáljuk.

Az atommagban ható erők és a fermionokból álló kvantummechanikai rendszerek felépítését megszabó Pauli-elv működése azt vonja maga után, hogy az atommagban a neutronok és a protonok sűrűségeloszlása nem lesz egyenletes. Ennek legszembetűnőbb jele a mag felületén kialakuló neutron-többség lehet. Ha a felszíni többségneutronok héjként tapadnak a magfelületre, neutronbőrrel beszélünk. A neutronbőr vastagságának tanulmányozása a stabilitási sávtól távoli, neutrongazdag atommagok előállításával került az érdeklődés középpontjába. A neutronbőr vastagságának ismerete alapvető magfizikai paraméterek pontosítására ad lehetőséget.

Az elmúlt években Krasznahorkay Attila vezetésével két új módszert fejlesztettek ki a neutronbőr vastagságának meghatározására. A vizsgálatokban közös, hogy a vizsgálandó neutrongazdag atommagot kollektív gerjesztésre készítjük és a kollektív állapotok viselkedéséből következtetünk az alapállapotú nukleoneloszlásra. A rugalmatlan α szórással gerjesztett izovektor dipólus óriásrezonancia (IVGDR) hatás keresztmetszetének mérésén alapuló módszerrel a neutronbőr vastagsága abszolút módon meghatározható. A módszer ellenőrzésére újabb kísérlet végzését tűztük ki célul. Magasabb gerjesztési energiákon, ahol a hatás keresztmetszetek nagyobbak, a neutronbőr vastagságát jobb statisztikájú kísérleti adatok alapján határozhatjuk meg.

A $(^3\text{He}, t)$ töltéscserélő reakcióban gerjesztett izovektor spin-dipólus óriásrezonancia (IVGSDR) erősségének mérése relatív neutronbőr vastagság értékek meghatározására alkalmas. Olyan kísérlet végzését tűztük ki célul, amelyben a reakcióban keletkező tritonok szögeloszlását nagyobb nyalábin-tenzitással, jobb statisztikával mérhetjük és a kiértékelés finomításával is pontosíthatjuk az ón izotóplánra korábban meghatározott neutronbőr vastagság értékeket.

A magszerkezetkutatás egy másik izgalmas kérdése az egzotikus magalakokkal rendelkező atommagok vizsgálata. A nagy határfokú, jó energiafelbon-

tású, 4π térszögű γ -spektrométerek kifejlesztése lehetővé tette a nagy spinű, 2:1 tengelyarányú rendelkező szuperdeformált állapotok tanulmányozását. Napjainkban az ilyen spektrométerekkel végzett vizsgálatok fő célkitűzése a 3:1 tengelyarányú, hiperdeformált állapotok keresése.

Vizsgálataink célja a hasadást megelőző hiperdeformált állapotok azonosítása. A Strutinsky-féle héjkorrekciós potenciálfelület-számítások a könnyű aktinoida atommagokban egy harmadik lokális minimumot is jósoltak, amelyben a kialakuló állapotok 3:1 tengelyarányú és oktupóldeformált (tükraszimmetrikus) magalakkal rendelkeznek. Ilyen hiperdeformált állapotot néhány Th-izotóp hasadási rezonanciájának finomszerkezetében figyeltek meg először. Míg az elméleti előrejelzések a tórium és az urán esetén hasonlóak, az urán izotópokra vonatkozó kísérleti eredmények ellentmondásosak. Az urán izotópok hasadási rezonanciáinak jó felbontású kísérleti vizsgálatával igazolni akartuk a hiperdeformált állapotok jelenlétét.

A program megvalósítását a 90-es évek elején Hollandiából a debreceni Atommagkutató Intézet (ATOMKI) ciklotronlaboratóriumába telepített mágneses spektrográf tette lehetővé. Vizsgálatainkat a ^{236}U atommag hasadási rezonanciáinak tanulmányozásával kezdtük. A debreceni kísérletsorozat eredménye a ^{236}U izotóp esetén elsőként igazolta a hiperdeformált állapotok létezését. Ez az eredmény alapozta meg a müncheni Ludwig-Maximilian Egyetem (LMU) kutatóival való együttműködést, s a továbbiakban kísérleteinket az LMU gyorsítólaboratóriumában folytattuk, kiterjesztve a vizsgálatot a ^{240}Pu szuperdeformált és a ^{234}U hiperdeformált állapotaira.

A dolgozatomban leírt kísérlet célja egyrészt a ^{236}U hasadási rezonanciáinak még jobb feloldással, szélesebb gerjesztésienergia-tartományban történő vizsgálata, másrészt a harmadik völgy mélységére vonatkozó ismeretek szerzése volt.

Elméletileg a ^{232}Th harmadik völgybeli alakját egy gömbszerű nehéz mag (^{132}Sn) és egy erősen deformált könnyű mag (^{100}Zr) együtteséből álló rendszerként írták le. Felmerült a kérdés, a hasadványok tömegeloszlása mutat-e különbséget, ha a hasadás hiperdeformált vagy nem hiperdeformált állapotból állapotból történik. Célunk a $^{232}\text{Th}(n,f)$ hasadási valószínűségében $E_n = 1.6$ MeV bombázó energiánál lévő hiperdeformált rezonancia hasadásakor

keletkező hasadványok vizsgálata volt.

Kísérleti módszerek

Az atommagok neutronbőr-vastagságának a vizsgálatát a groningeni (Hollandia) magfizikai intézetben (KVI) végeztük.

Az ^{208}Pb neutronbőrének vastagságát az izovektor dipólus óriásrezonancia hatáskeresztmetszetének ($\alpha, \alpha'\gamma_0$) reakcióban történő méréséből határoztuk meg. Az ^{208}Pb céltárgyat $E_\alpha=196$ MeV-es α nyalábbal bombáztuk, a rugalmatlanul szóródott α részecskék energiáját és szórási szögét a nyaláb irányához képest 2.8° -os szögben állított Big Bite mágneses spektrográffal és az EuroSuperNova együttműködésben készült fókuszsíkdetektor-rendszerrel határoztuk meg. Az izovektor dipólus óriásrezonanciát a monopólus és kvadrupólus óriásrezonanciák és a rugalmatlan α -szórás által alkotott folytonos háttér elnyomja. A háttérből való kiemelés $\alpha - \gamma_0$ koincidencia méréssel végeztük el. A dipólus óriásrezonancia alapállapotra történő bomlásakor keletkező γ_0 -sugárzást antikoincidencia árnyékolással ellátott NaI(Tl) és BGO árnyékolással ellátott négy-szegmensű Ge (Clover) spektrométerrel detektáltuk.

A neutronbőr vastagság vizsgálatát a spin dipólus óriásrezonancia hatáskeresztmetszetének mérésével a természetben előforduló leghosszabb stabil izotóplánc, az ón-izotópok esetére végeztük el. 177 MeV-es ^3He nyalábbal ($^3\text{He}, t$) töltéscserélő reakcióban, a $^{112,114,116,118,120,122,124}\text{Sn}$ izotópokban gerjesztettük az izovektor spin dipólus óriásrezonanciát. A reakcióból származó tritonok energiáját és szórási szögét a nyaláb irányához képest 0° -os szögbe állított Big Bite spektrográf és az EuroSuperNova detektor-rendszerrel határoztuk meg.

Az ^{236}U izotóp hiperdeformált állapotainak a vizsgálatára az ^{235}U céltárgyat (d,p) reakcióban gerjesztettük és az ^{236}U közbenső mag hasadványait a reakcióból származó protonokkal koincidenciában detektáltuk. A protonok energiáját a Q3D spektrográf katód-strip fókuszsíkdetektorával mérve az ^{236}U atommag gerjesztési energiáját pontosan meg tudtuk határozni. A hasadványok detektálására Debrecenben készült gáztöltésű lavinadetektorokat

használtunk.

A ^{232}Th neutronokkal indukált hasadásból származó hasadványok tömeg- és a teljes kinetikus energia eloszlásának tanulmányozásához a monoenergetikus neutronokat az $E_p=3.2 - 3.425$ MeV energiatartományban, $^7\text{Li}(p,n)$ reakcióban állítottuk elő. A bombázó energiát 25 keV-os lépésekben változtattuk. A hasadványok kinetikus energiájának a mérésére egy kettős ionizációs kamrát építettünk.

Eredmények

A neutronbőr vastagságának méréseiből kapott eredményeket a következőkben foglalom össze:

1. A kísérleti adatokból meghatároztam a $^{208}\text{Pb}(\alpha, \alpha'\gamma_o)$ hatáskeresztmetszetet, ami 336 ± 34 $\mu\text{b}/\text{sr}$ -nak adódott. A kísérleti hatáskeresztmetszetet a neutronbőr vastagság függvényében végzett csatolt csatornás számítások eredményeivel hasonlítottam össze. Ennek alapján az ^{208}Pb neutronbőr-vastagságára a 0.12 ± 0.07 fm értéket kaptam. Ez hibahatáron belül egyezik a KVI-ben korábban $E_\alpha=120$ MeV bombázó energiánál mért, nagyságrenddel kisebb hatáskeresztmetszetekből meghatározott (0.19 ± 0.09) fm neutronbőr-vastagsággal, valamint igen jól egyezik a (p,p) szórásból kapott (0.14 ± 0.04) fm értékkel. Ezzel bizonyítottam a neutronbőr vastagság meghatározására Krasznahorkay és munkatársai által bevezetett módszer alkalmazhatóságát.
2. A természetben előforduló valamennyi páros ón izotópra egyetlen mérésorozatban meghatároztam a ($^3\text{He},t$) töltéscserélő reakcióban gerjesztett izovektor spin dipólus óriásrezonancia hatáskeresztmetszeteit. A neutronbőr-vastagság és a hatáskeresztmetszet közötti közvetlen összefüggés alapján a ^{112}Sn , ^{114}Sn , ^{116}Sn , ^{118}Sn , ^{120}Sn , ^{122}Sn és ^{124}Sn izotópokra a neutronbőr vastagság értékei: 0.11 ± 0.01 , 0.14 ± 0.01 , 0.16 ± 0.01 , 0.19 ± 0.01 , 0.22 ± 0.01 , 0.24 ± 0.01 és 0.28 ± 0.01 fm. A kapott eredmények az eddigi legpontosabb relatív értékek és jól egyeznek az iroda-

lomban található különböző kísérleti, és a rendelkezésre álló elméleti számolásokkal.

Az $^{235}\text{U}(d, pf)^{236}\text{U}$ reakció vizsgálatának fontosabb eredményei a következők:

3. Az $^{235}\text{U}(d, pf)^{236}\text{U}$ magreakcióból származó, jó, 8 keV-es energiafelbontással mért protonok energiaspektrumából a gerjesztési energia függvényében a $4.9 \text{ MeV} < E^* < 5.6 \text{ MeV}$ gerjesztésienergia-tartományban meghatároztam a ^{236}U hasadási valószínűségét.
4. Az 5.2 MeV gerjesztési energia feletti tartományban a rezonanciák finomszerkezetét egymást átlapoló, $K=4^-$ -es sávfejú, váltakozó paritású rotációs sávokkal illesztettem. Az illesztett sávok rotációs paraméterének függvényében végzett χ^2 analíziséből, a rotációs paraméter értékére $\hbar^2/2\theta = 2.3_{-0.45}^{+0.2}$ keV adódott, amely a hiperdeformált állapotokra jellemző értéknek felel meg. $K=3,4$ és 5 sávfejú váltakozó paritású sávokat felhasználva az A_2 szögkorrelációs együtthatókat is le tudtam írni. Az így számított $\Theta=217 \pm 38 \hbar^2/\text{MeV}$ tehetetlenségi nyomaték érték jól egyezik a hiperdeformált állapotokra jósolt értékekkel.
5. A $K=4,5$ rotációs sávok $J=5$ impulzusmomentumú állapotainak átlagos távolságát a módosított Fermi-gáz formulával számolt átlagos nívótávolságokkal hasonlítottam össze. Az ^{236}U harmadik völgyének alapállapot energiájára először határoztam meg a kísérleti adatok alapján a $3.3 \pm 0.4 \text{ MeV}$ értéket, ami összhangban van az harmadik völgyének mélységére adott számolás eredményével, valamint az ^{234}U -ra kísérletileg meghatározott értékkel is.
6. Az 5.1 MeV gerjesztési energia környékén megfigyelt rezonanciák szerkezetét leíró rotációs sávokból a tehetetlenségi nyomatéokra a $\Theta=208 \pm 70 \hbar^2/\text{MeV}$ értéket kaptam, ami szintén a hiperdeformált állapotok tehetetlenségi nyomatékára elméletileg jósolt és kísérletileg meghatározott értékkel egyezik meg. A korábbi feltevésekkel ellentétben, így ezt a rezonanciacsoportot harmadik völgybeli állapotok alkotják. Ebből az

is következik, hogy a belső gát magasságának 5.2 MeV-nél alacsonyabbnak kell lennie.

A $^{232}\text{Th}(n,f)$ reakcióból származó hasadványok vizsgálatának eredményei a következőképpen összegezhetők:

7. Minden egyes bombázó energiánál a mért kinetikus energiából meghatároztam a hasadványok tömegeloszlását, valamint a két hasadvány teljes kinetikusenergia-eloszlását (TKE). A tömegeloszlásokat két, azonos amplitúdójú és azonos szélességű Gauss függvény összegével illesztettem és a kapott σ értékeket a neutronenergia függvényében ábrázoltam. Az 1.6 MeV neutronenergia körüli rezonanciához közeledve néhány %-os csökkenés, majd emelkedés, s az 1.7 MeV-es rezonancia felé ismét kis csökkenés tapasztalható.
8. A teljes energiatartományt tekintve a TKE-eloszlást a tömegeloszlás függvényében ábrázoltam. A nagyobb TKE-értékek felé haladva a tömegeloszlásban jól meghatározott keskenyedést figyeltem meg. A könnyű hasadványok $A = 100$, a nehéz hasadványok $A = 132$ körül csoportosulnak. A teljes kinetikus energia eloszlását 10 MeV-es tartományokra bontva az egyes tartományokhoz tartozó tömegeloszlásokat vizsgáltam a bombázó energia függvényében. Megállapítottam, hogy a teljes kinetikus energia növekedésével a tömegeloszlások keskenyednek. Azokat az eseményeket vizsgálva, amelyek esetén a teljes kinetikus energia 180 MeV-nél nagyobb, a bombázó energia függvényében már a korábbiaknál is jóval nagyobb méretű keskenyedés tapasztalható. 1.5 MeV-es bombázó energiánál a tömegeloszlás félértékszélessége: 7.79 ± 0.47 amu, az 1.61 MeV-nél lévő rezonanciánál pedig 5.86 ± 0.47 amu. Kiválasztottam az $A = 132$ körül két, az $A = 132 \pm 2$ és $A = 132 \pm 4$ tartományt, és az ezen tömegszám-tartományokhoz tartozó hasadványok teljes kinetikus energiájának viselkedését vizsgáltam a bombázó energia függvényében. Az így kiválasztott tömegszám-tartományhoz tartozó hasadványok kinetikus energiája a teljes tömegszám-tartományhoz viszonyítva közel 10 MeV-vel nagyobb, a hiperdeformált rezonanciánál pedig határozott növekedés látható.

9. A ^{233}Th tömeg- és teljes kinetikusenergia-eloszlás vizsgálatának eredményei hideg hasadás esetén alátámasztják a hiperdeformált állapotok alakjára vonatkozó feltételezést, a $^{132}\text{Sn} + ^{100}\text{Zr}$ magmolekula lehetőségét.

Az értekezés témakörében megjelent közlemények

1. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, M. Hunyadi, J. Gulyás, Z. Máté, J. Molnár, J. Timár and J. Végh : Properties of ^{236}U at the third-minimum deformation.

Acta Physica Polonica, **B28** (1997) 37

2. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, J. C. S.Bacelar, A. Balanda, W. Przygoda, S. Schadmand and M.J.A. de Voigt: Energy response of a novel compact Ge+BGO spectrometer for 4-20 MeV gamma-rays.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section, **A421** (1999) 272

3. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, A.M. van den Berg, M.N. Harakeh, S.Y. van der Werf, M. Hagemann, M.N. de Huu , H. Akimune, H. Fujimura, M. Fujiwara, K. Hara and T. Ishikawa: A new methods to measure the neutron skin.

Acta Physica Hungarica New Series - Heavy Ion Physics, **13** (2001) 203

4. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, A.M. van den Berg, M.N. Harakeh, M.N. de Huu, S.Y. van der Werf, M. Hagemann, H. Akimune, H. Fujimura, M. Fujiwara, K. Hara and T. Ishikawa: Neutron-skin thickness from excitation of spin-dipole resonance.

Acta Physica Polonica **B33** (2002) 331

5. A. Krasznahorkay, **M. Csatlós**, L. Csige, Y. Eisermann, T. Faestermann, Z. Gácsi, G. Graw, J. Gulyás, D. Habs, M.N. Harakeh, M. Heil,

R. Hertenberger, F. Kaeppler, A. Krasznahorkay Jr., H.J. Maier, Z. Máté, R. Reifarth, P.G. Thirolf, J. Timár and H.F. Wirth: Hyperdeformation and clustering in the actinide region.

Acta Physica Hungarica New Series - Heavy Ion Physics, **18** (2003) 323

6. **M. Csatlós**, Z. Gácsi, J. Gulyás, A. Krasznahorkay, A. Krasznahorkay Jr., Z. Máté, J. Timár, M. Heil, F. Kaeppler, R. Reifarth and M. Fayed-Hassan: Effects of the third minimum on the fission characteristics in the actinide region.

Acta Physica Polonica **B34** (2003) 2119

7. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, D. Sohler, A.M. van den Berg, N. Blasi, J. Gulyás, M.N. Harakeh, M. Hunyadi, M.A. de Huu, Z. Máté, S.Y. van der Werf, H.J. Wörtche and L. Zolnai: Measurement of neutron-skin thickness in ^{208}Pb by excitation of the GDR via inelastic α -scattering.

Nuclear Physics **A719** (2003) 304

8. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, P.G. Thirolf, D. Habs, Y. Eisermann, T. Faestermann, G. Graw, J. Gulyás, M.N. Harakeh, R. Hertenberger, M. Hunyadi, H.J. Maier, Z. Máté, O. Schaile, H.F. Wirth: Resonant tunnelling through the triple-humped fission barrier of ^{236}U ,

Physics Letter B (submitted for publication).

Konferencia előadások, poszterek

1. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, M. Hunyadi, J. Gulyás, Z. Máté, J. Molnár, J. Timár and J. Végh : Properties of ^{236}U at the third-minimum deformation.

31st Zakopane School of Physics. Trends in Nuclear Physics. Zakopane, Poland, Sept.3-11,1996

2. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, A.M. van den Berg, M.N. Harakeh, M.N. de Huu, S.Y. van der Werf, M. Hagemann, H. Akimune, H. Fuji-

mura, M. Fujiwara, K. Hara and T. Ishikawa: Neutron-skin thickness from excitation of spin-dipole resonance.

27th Mazurian Lakes School of Physics. Krzyze, Poland, 2-9 Sept., 2001

3. **M. Csatlós**, Z. Gácsi, J. Gulyás, A. Krasznahorkay, A. Krasznahorkay Jr., Z. Máté, J. Timár, M. Heil, F. Kaeppler, R. Reifarth and M. Fayed-Hassan: Effects of the third minimum on the fission characteristics in the actinide region.

37th Zakopane School of Physics. Zakopane, Poland, 3-10 Sept., 2002

4. **M. Csatlós**, A. Krasznahorkay, D. Sohler, A.M. van den Berg, N. Blasi, J. Gulyás, M.N. Harakeh, M. Hunyadi, M.A. de Hoo, Z. Máté, S.Y. van der Werf, H.J. Wörtche and L. Zolnai: Measurement of neutron-skin thickness in ^{208}Pb by excitation of the GDR via inelastic α -scattering.

Nuclear Physics in Astrophysics. 17th International Nuclear Divisional Conference of the European Physical Society. Debrecen, Hungary, 30 Sept.-4 Oct. 2002