

Egyetemi doktori (PhD) értekezés tézisei
Abstract of PhD Thesis

Aktinoida atommagok kísérleti vizsgálata a kvázi-kontinuum tartományban

Experimental studies of actinides in the quasi-continuum region

Tornyai Tamás Gábor

Témavezető / Supervisor
Dr. Krasznahorkay Attila



Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolája

University of Debrecen
PhD School in Physics

Debrecen
2015

Készült

a Debreceni Egyetem
Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának
Magfizika programja keretében
az MTA Atommagkutató Intézetben

Prepared at

the University of Debrecen
PhD School in Physics
and the Institute for Nuclear Research,
Hungarian Academy of Sciences

Bevezetés

Az atommagok gerjesztett állapotainak, illetve azok γ -bomlással történő legerjesztődésének tanulmányozása fontos az atommagok szerkezetének és működésének jobb megértéséhez. Alacsony gerjesztési energiákon az egyes kvantumállapotok spektroszkópiai módszerekkel jól tanulmányozhatók. Az energiát növelve, közepes tömegszámú magok esetén 2-3 MeV, nehéz magoknál már 1-2 MeV környékén elérjük az úgynevezett *kvázi-kontinuum* tartományt. Ebben a tartományban az állapotok sűrűsége meghaladja az 50 nívó/MeV értéket, amit kísérleti eszközeinkkel már nem tudunk feloldani. Tovább növelve a gerjesztési energiát, eljutunk a *kontinuum* tartományba, ahol az egyes nívók természetes szélessége nagyobb mint az átlagos nívótávolság, ennek következtében a nívók egymással fedésbe kerülnek, ezért ebben a régióban az állapotok feloldására elvi lehetőség sincs. A kvázi-kontinuum és kontinuum tartományokban az egyes állapotokat nem tudjuk szeparáltan megfigyelni, így csak átlagos magtulajdonságok mérésére van lehetőségünk.

Az *állapotsűrűség*, és a γ -*erősségfüggvény* a kvázi-kontinuum, illetve kontinuum tartománybeli gerjesztett állapotokról, és azok γ -átmeneteiről számot adó statisztikai mennyiségek, melyek nemcsak a modellszámítások, de a további kísérleti vizsgálatoknak is fontos bemenő paraméterei. Mindezek felett, az aktinoida magtartományban ezen mennyiségek pontos ismeretének gyakorlati jelentősége megkérdőjelezhetetlen az új generációs nukleáris reaktorblokkok tervezéséhez, valamint a nagy aktivitású kiegészítő fűtőelemek transzmutációjához.

Az Oslói Egyetem magfizikai csoportjával együttműködve, könnyűion reakciókkal aktinoida atommagok állapotsűrűségének és γ -erősségfüggvényének meghatározását tűztük ki célul a neutron szeparációs energia alatti tartományban. A vizsgált gerjesztési energiatartományban az aktinoidák hasadási reakciócsatornája nyitott. A gerjesztett állapotban keletkező hasadványok által emittált γ -fotonok okozta háttér kiszűrése érdekében négy darab PPAC modulból felépülő hasadványdetektor-rendszert építettem, és illesztettem a már meglévő CACTUS γ -detektorrendszerhez. Mindamellet, hogy az új mérőrendszer alacsonyabb háttérű γ -spektrumok felvételét teszi lehetővé, segítségével lehetőség nyílt γ -bomlás/hasadás elágazási arány meghatározására is.

A vizsgált $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$, $^{237-239}\text{U}$ és ^{238}Np izotópok sűrűségfügg-

vényének és γ -erősségfüggvényének meghatározása mellett, azok mindegyikében sikerült kimutatnunk egy alacsonyenergiás M1 kollektív rezonanciát, az úgynevezett *ollózó* módust.

Új tudományos eredmények

1. Megterveztem, és megépítettem a NIFF hasadási detektorrendszert, melynek segítségével jó hatásfokkal meg tudjuk különböztetni a vizsgált atommagokból, illetve az azok hasadási termékeiből érkező γ -kvantumokat, ennek köszönhetően jobb csúcs/háttér arányú γ -spektrumokat kapunk az aktinoida tartomány γ -spektroszkópai vizsgálatakor [P2].
2. Meghatároztam a ^{238}Np atommag állapotosűrűségét, valamint munkámval hozzájárultam a $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ és a $^{237-239}\text{U}$ izotópok állapotosűrűségének kísérleti vizsgálatához a neutron szeparációs energia alatti tartományban. Az állapotosűrűségek értékeire kapott kísérleti pontjaink jól illeszkednek az állandó hőmérsékletű formulával számolt elméleti értékekre [P1][P3][P4].
3. Részt vettem a ^{238}Np , $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ és a $^{237-239}\text{U}$ izotópok kvázi-kontinuumbeli γ -erősségfüggvényének megállapítását célzó kísérletekben, ahol a ^{238}Np erősségfüggvényének megállapításában döntő szerepem volt [P1][P3].
4. A ^{238}Np γ -erősségfüggvényének analízise során szignifikáns eltérést tapasztaltam az ismert kollektív rezonanciák kisenergiás extrapolációja és a kísérleti értékek között az $E_\gamma=1-4$ MeV energiatartományban, amit egy kisenergiás kollektív M1 rezonancia, az úgynevezett ollózó módusként azonosítottam. A rezonanciát Lorentz függvényekkel illesztve meghatároztam annak helyét és erősségét, ami jó egyezést mutat az elméleti számításokkal [P1][P3].

Az eredmények részletes ismertetése

1. Kísérleteink célja a könnyűion reakcióban gerjesztett aktinoida magok γ -bomlásának vizsgálata. A tanulmányozott energiatartományban az aktinoidák gyakran hasadás útján igyekeznek alacsonyabb energiájú állapotba kerülni. A keletkező hasadványok szinte minden esetben gerjesztett állapotban jönnek létre. A gerjesztett fragmentumok részecskeemisszióval, illetve γ -bomlással szabadulnak meg fölösleges energiájuktól. Az innen származó γ -fotonok háttérrel okoznak a számunkra érdekes γ -spektrumokban, ami rontja a mérési eredmények pontosságát.

Az általam épített, négy darab gáztöltésű lavinadetektorból álló hasadási detektorrendszer feladata ezen nemkívánatos események kiszűrése azáltal, hogy a hasadványokkal koincidenciában mért γ -kvantumokat figyelmen kívül hagyjuk. A detektorok által lefedett nagy térszögnek, és gyors működésüknek köszönhetően effektív hatásfokuk 55%. Az új gázdetektorok fontos tulajdonsága, hogy érzéketlenek a beszoródó könnyű töltött részecskékre, amik kísérleteink során igen nagy számban vannak jelen.

2. Az atommagok gerjesztett állapotainak sűrűsége a gerjesztési energia növelésével közelítőleg exponenciálisan nő. Mivel a kvázi-kontinuum tartományban már nem tudjuk az egyes állapotokat szeparáltan megfigyelni, ezért ebben a tartományban csak statisztikai mennyiségek mérésére van lehetőségünk. Az egyik ilyen statisztikai mennyiség az állapotsűrűség, ami megadja az egységnyi energiaintervallumba eső állapotok számát.

Munkám során meghatároztam a ^{238}Np atommag állapotsűrűségét, valamint részt vettem a $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ és $^{237-239}\text{U}$ izotópok állapotsűrűségének mérésében. A kapott sűrűségfüggvények mindegyike jól illeszkedik az *álladó hőmérsékletű állapotsűrűség-formula* segítségével számolt sűrűségértékekhez.

3. A γ -erősségfüggvény a gerjesztett állapotok közötti γ -átmenetekről ad számot a γ -energia függvényében, ami adott multipolaritású átmenet esetén az átmenet valószínűségével arányos. Kísérleti mód-

szerünkkel meg tudjuk határozni az erősségfüggvény alakját, annak abszolútértékét pedig ismert adatokhoz való normálással kapjuk. A Brink-Axel hipotézist alapul véve, miszerint a gerjesztett, és az alapállapotra épülő kollektív rezonanciákat leíró Lorentz függvényeknek ugyanazokkal a paraméterekkel kell rendelkezniük, az általunk kapott γ -erősségfüggvényt korábról ismert pygmy, és óriás dipólrezonanciák erősségfüggvényeihez normáljuk.

A módszerrel meghatároztam a ^{238}Np atommag γ -erősségfüggvényét, valamint munkámmal hozzájárultam a $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ és $^{237-239}\text{U}$ izotópok γ -erősségfüggvényének megállapításához.

4. A γ -erősségfüggvényre kapott kísérleti pontjaink, és az ismert kollektív dipólrezonanciákra illesztett Lorentz-görbék összegzéséből adódó erősségfüggvény között szignifikáns eltérés mutatkozott az $E_\gamma=1-4$ MeV tartományban minden vizsgált aktinoida esetén. Ezt az eltérést egy kisenergiás kollektív M1 rezonancia, az ollózó módusként azonosítottuk, ami egy olyan izovektor vibráció, amikor a deformált proton-, és neutronfelhő forogva oszcillál egymással szemben.

Introduction

Investigations of excited states and γ decays of atomic nuclei are important in order to gain better understanding of their structure and behavior. At low excitation energies, γ spectroscopy is a great tool to study individual quantum-states. The *quasi-continuum* is reached as the excitation energy increases to 1-2 MeV in the case of heavy nuclei or to 2-3 MeV in the middle mass region. In the quasi-continuum the level density exceeds 50 levels/MeV, thus current devices can not resolve single states. As the energy is further increased, we can get to the *continuum* region where the energy width of excited states is larger than the average level spacing, thus there is no way to study individual quantum-states. Since we can not separate the energy levels in the quasi-continuum and continuum, it means that only the average properties of the nuclei can be studied in this energy region.

Level density and *γ -strength function* account for quantities of excited states and γ decays in the quasi-continuum and continuum region, that are important input parameters to model calculations and further experimental investigations. In addition, these quantities have unquestionable importance for the development of new-generation power plants and transmutation of high-activity nuclear waste.

In cooperation with the nuclear group of the University of Oslo, we aimed at studying level densities and γ -strength functions in actinides using light charged particle reactions. In the investigated excitation energy region, fission reaction channel opens in the actinides. In order to reduce the rate of γ photons emitted by fission fragments I have built and installed a new fission fragment detector array consisting four PPAC modules to the existing γ -detector system called CACTUS. This new complex device, in addition to determining level densities and strength functions with higher accuracy, is a suitable tool to study γ -decay/fission branching ratios.

We have measured level densities and γ -strengths in $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$, $^{237-239}\text{U}$ and ^{238}Np isotopes and a low-energy collective M1 resonance, the so-called *scissors resonance* was found in all of these nuclei.

New scientific results

1. I have designed and built a new fission detector system to complement CACTUS γ -detector array. We can distinguish between γ -quanta from the studied nucleus and those from fission fragments by the help of the newly developed fission detectors, thus peak/background ratios have been improved in the γ spectra [P2].
2. I extracted the level density in ^{238}Np nucleus and I participated in experimental studies of level densities in $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ and $^{237-239}\text{U}$ isotopes [P1][P3][P4].
3. I measured the γ -strength function in ^{238}Np and I took a part in investigations of γ -strength functions in $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ and $^{237-239}\text{U}$ nuclei [P1][P3].
4. Analysing the γ -strength function in ^{238}Np I identified a low-energy collective M1 resonance and I also contributed to the studies of the same resonances in $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ and $^{237-239}\text{U}$ isotopes [P1][P3].

Discussion

1. The aim of our experiments is investigating γ decay in the actinides using light-particle transfer reactions. Actinides often decay to lower energy state by fission process in the studied energy region. Fission fragments arise in excited state in most cases. Excited fragments get rid of their extra energy by particle emission and γ decay. Gammas originating from those processes cause background in the γ spectra, what decreases the accuracy of results. The function of the new fission detectors is to discard these unwanted events by neglecting γ rays in coincidence with fission fragments. Due to the large solid angle covered and the fast processing time, the effective efficiency of the new detector array is 55%. An important property of the newly developed gas-filled detectors is their insensitivity for incoming light particles, which are present in large numbers at our experiments.

2. The density of excited states in nuclei increases close to exponential as a function of excitation energy. In the case of actinides, level density reaches quasi-continuum at 1 - 2 MeV. Since individual levels can not be resolved experimentally above this value, only statistical quantities can be measured. One of them is the level density given as the number of levels per energy unit.

During my work I extracted the level density in ^{238}Np and I collaborated in studies of level densities in $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ and $^{237-239}\text{U}$ isotopes. All of the observed level densities follow closely the *constant temperature level density formula*.

3. The γ -strength function accounts for γ transitions between excited nuclear levels as a function of γ energy. Using our method, we can extract the shape of strength functions, and their absolute values can be determined by normalizing to known experimental data. According to the Brink-Axel hypothesis, collective resonances built on excited and ground states have the same resonance parameters, thus our γ -strength functions are normalized to known pygmy and giant dipole resonances. Using this method I extracted γ -strength function in ^{238}Np and I cooperated in determining strength functions in $^{231-233}\text{Th}$, $^{232,233}\text{Pa}$ and $^{237-239}\text{U}$ nuclei.

4. Fitting our experimental data obtained for the γ strength to the low-energy tail of dipole contributions shows a significant enhancement around $E_\gamma = 1 - 4$ MeV in all of the studied nuclei. These enhancements were identified as the collective M1 scissors resonance, which is an isovector vibration occurring when the deformed neutron and proton halos are oscillating against each other, explained in a simple picture, as the blades of scissors.

Közlemények / Publications

Az értekezés témakörében megjelent tudományos közlemények / Scientific papers related to the dissertation

- P1 T. G. Tornyi, M. Guttormsen, T. K. Eriksen, A. Görgen, F. Giacoppo, T. W. Hagen, A. Krasznahorkay, A. C. Larsen, T. Renstrom, S. J. Rose, S. Siem, G. M. Tveten
Level density and γ -ray strength function in the odd-odd ^{238}Np nucleus,
Physical Review C **89**, 044323 (2014)
Impact factor: 3.715
- P2 T. G. Tornyi, A. Görgen, M. Guttormsen, A. C. Larsen, S. Siem, A. Krasznahorkay, L. Csige
A new fission-fragment detector to complement the CACTUS-SiRi setup at the Oslo Cyclotron Laboratory,
Nuclear Instruments and Methods **738**, 6-12 (2014).
Impact factor: 1.142
- P3 M. Guttormsen, L. A. Bernstein, A. Görgen, B. Jurado, S. Siem, M. Aiche, Q. Ducasse, F. Giacoppo, F. Gunsing, T. W. Hagen, A. C. Larsen, M. Lebois, B. Leniau, T. Renstrom, S. J. Rose, T. G. Tornyi, G. M. Tveten, M. Wiedeking, J. N. Wilson
Scissors resonance in the quasi-continuum of Th, Pa, and U isotopes,
Physical Review C **89**, 014302 (2014).
Impact factor: 3.715

- P4 M. Guttormsen, B. Jurado, J. N. Wilson, M. Aiche, L. A. Bernstein, Q. Ducasse, F. Giacoppo, A. Görgen, F. Gunsing, T. W. Hagen, A. C. Larsen, M. Lebois, B. Leniau, T. Renstrom, S. J. Rose, S. Siem, T. G. Tornyi, G. M. Tveten, M. Wiedeking
Constant-temperature level densities in the quasi-continuum of Th and U isotopes,
 Physical Review C **88**, 024307 (2013).

Impact factor: 3.715

Előadások / Talks

T1 T. G. Tornyi

Study of the γ -ray strength in ^{238}Np by the help of a newly improved fission fragment detector array

Student conference in the Section of Subatomic- and Astrophysics, Bergen, Norway (2012).

T2 T. G. Tornyi

Observation of large scissors resonance strength in actinides,
 4th Workshop on Nuclear Level Density and Gamma Strength,
 Oslo, Norway (2013).

**A dolgozathoz nem kapcsolódó tudományos közlemények /
Other publications**

- O1 A. C. Larsen, N. Blasi, A. Bracco, F. Camera, T. K. Eriksen, A. Görgen, M. Guttormsen, T. W. Hagen, S. Leoni, B. Million, H. T. Nyhus, T. Renstrom, S. J. Rose, I. E. Ruud, S. Siem, T. G. Tornyi, G. M. Tveten, A. Voinov, M. Wiedeking
Evidence for the Dipole Nature of the Low-Energy Enhancement in ^{56}Fe ,
Physical Review Letters **111**, 242504 (2013).
Impact factor: 7.943
- O2 A. Krasznahorkay, J. Gulyás, M. Csatlós, A. Cs. Vitéz, T. G. Tornyi, L. Stuhl, L. Csige, Z. Gácsi, Jr. A. Krasznahorkay, M. Hunyadi, T. J. Ketel,
Searching for a light neutral axial-vector boson in isoscalar nuclear transitions,
Proceedings (Frascati Physics Series) **56**, 1:86-97 (2013).
Impact factor: 0.000
- O3 A. Krasznahorkay, M. Csatlós, L. Csige, T. K. Eriksen, F. Giacoppo, A. Görgen, T. W. Hagen, M. N. Harakeh, R. Julin, P. Koehler, N. Paar, S. Siem, L. Stuhl, T. G. Tornyi, D. Vretenar,
Neutron-skin thickness of ^{238}Pb from the study of the anti-analog giant dipole resonance,
Proceedings (32nd International Workshop on Nuclear Theory, Rila, Bulgaria) **32**, 12-21 (2013).
Impact factor: 0.000

- O4 Q. Ducasse, B. Jurado, M. Aiche, L. Mathieu, T. G. Tornyi, A. Görgen, J. N. Wilson, G. Barreau, I. Companis, S. Czajkowski, F. Giacoppo, F. Gunsing, M. Guttormsen, A. C. Larsen, M. Lebois, J. Matarranz, T. Renstrom, S. J. Rose, S. Siem, I. Tsekhanovich, G. M. Tveten, T. W. Hagen, M. Wiedeking, O. Serot, G. Boutoux, P. Chau, V. Méot, O. Roig,
Neutron-induced cross sections of actinides via the surrogate-reaction method,
 EPJ Web of Conferences **42**, 1003(5) (2013).
 Impact factor: 0.000
- O5 I. Kuti, J. Timár, D. Sohler, E. Paul, K. Starosta, A. Astier, D. Bazzacco, P. Bednarczyk, A. J. Boston, N. Buforn, H. J. Chantler, C. J. Chiara, R. M. Clark, M. Cromaz, M. Descovich, Zs. Dombrádi, P. Fallon, D. B. Fossan, C. Fox, A. Gizon, J. Gizon, A. A. Hecht, N. Kintz, T. Koike, I. Y. Lee, S. Lunardi, B. M. Nyakó, T. G. Tornyi, L. Zolnai,
Medium- and high-spin band structure of the chiral candidate ^{132}La ,
 Physical Review C **87**, 4:4323(10) (2013).
 Impact factor: 3.715
- O6 L. Csige, J. Gulyás, D. Habs, A. Krasznahorkay, P. G. Thirolf, T. G. Tornyi,
Nuclear photofission studies with monochromatic gamma ray beams,
 Proceedings (AIP Conference) **1462**, 167-172 (2012).
 Impact factor: 0.901
- O7 L. Csige, M. Csatlós, T. Faestermann, Z. Gácsi, J. Gulyás, D. Habs, R. Hertenberg, A. Krasznahorkay, R. Lutter, H. J. Maier, P. G. Thirolf, T. G. Tornyi, H. F. Wirth
Hyperdeformed fission resonances and transition states observed in ^{232}U ,
 Journal of Physics **212**, 2022(6) (2011).
 Impact factor: 0.901

- O8 C. Langer, A. Algora, A. Couture, M. Csatlós, J. Gulyás, M. Heil, A. Krasznahorkay, J. M. O'Donnell, R. Plag, R. Reifarth, L. Stuhl, K. Sonnabend, T. G. Tornyi, F. Tovesson,
Simulations and developments of the Low Energy Neutron detector Array LENA,
Nuclear Instruments and Methods **659**, 411-418 (2011).
Impact factor: 1.207
- O9 Yu. V. Pyatkov, D. V. Kamanin, A. Krasznahorkay, A. A. Alexandrov, I. A. Alexandrova, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, F. Naqvi, N. A. Kondratyev, E. A. Kuznetsova, A. N. Tyukavkin, T. G. Tornyi, V. E. Zhuchko,
Preliminary results on direct observation of true ternary fission in the reaction $^{232}\text{Th}+d(10\text{ MeV})$,
Proceedings (AIP Conference) **1224**, 393-401 (2010).
Impact factor: 0.000
- O10 D. V. Kamanin, Yu. V. Pyatkov, A. Krasznahorkay, A. A. Alexandrov, I. A. Alexandrova, M. Csatlós, L. Csige, J. Gulyás, F. Naqvi, N. A. Kondratyev, E. A. Kuznetsova, T. G. Tornyi, A. N. Tyukavkin, V. E. Zhuchko,
Preliminary results on collinear cluster tripartition in $^{232}\text{Th}+d(10\text{ MeV})$ reaction,
Proceedings (AIP Conference) **1462**, 167-172 (2012).
Impact factor: 0.000