

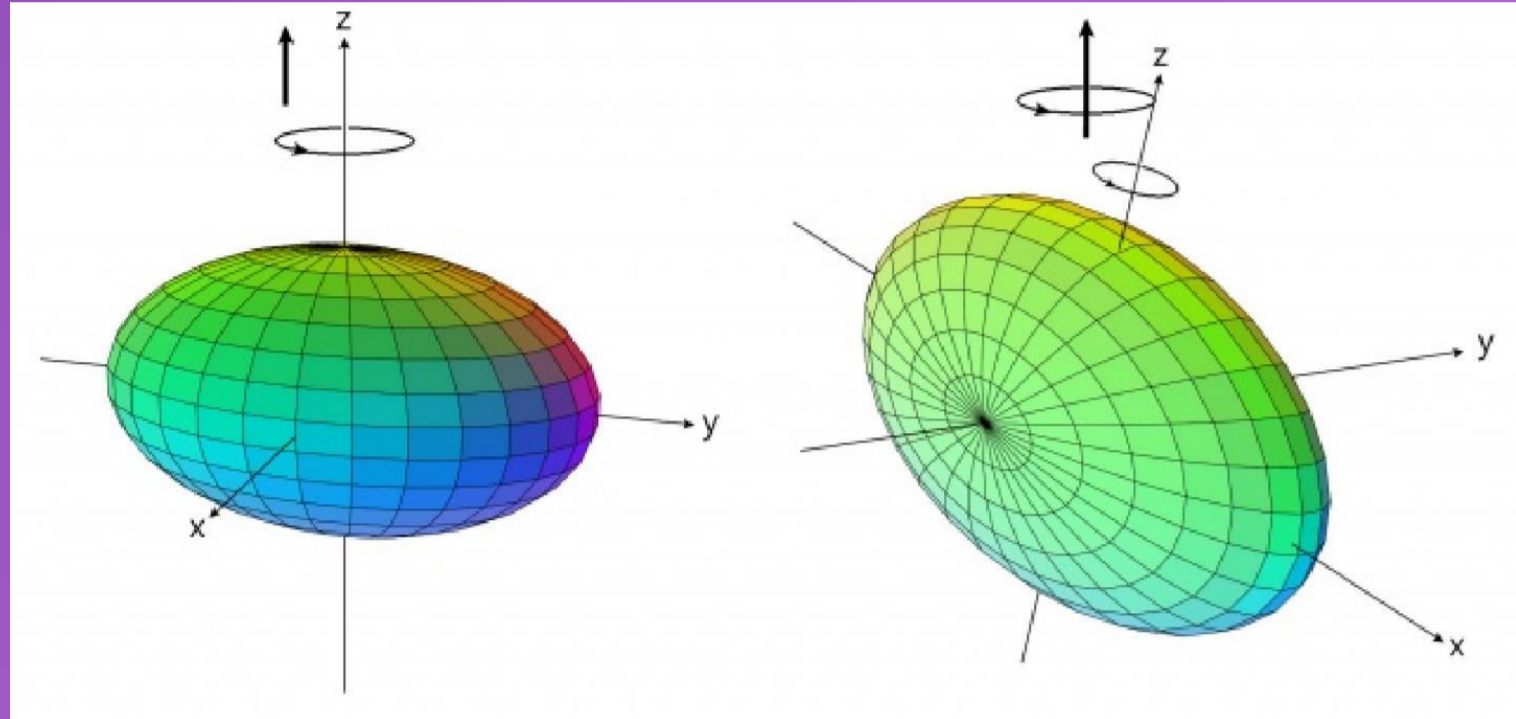
Kísérleti bizonyíték a ^{105}Pd imbolygó forgására

J. Timár¹, Q. B. Chen², B. Kruzsic¹, D. Sohler¹, I. Kuti¹, S. Q. Zhang³, J. Meng³, P. Joshi⁴, R. Wadsworth⁴, K. Starosta⁵, A. Algora^{1,6}, P. Bednarczyk⁷, D. Curien⁸, Zs. Dombrádi¹, G. Duchêne⁸, A. Gizon⁹, J. Gizon⁹, D. G. Jenkins⁴, T. Koike¹⁰, A. Krasznahorkay¹, J. Molnár¹, B. M. Nyakó¹, E. S. Paul¹¹, G. Rainovski¹², J. N. Scheurer¹³, A. J. Simons⁴, C. Vaman¹⁴ and L. Zolnai¹

¹Institute for Nuclear Research, Hungarian Academy of Sciences, Pf. 51, 4001 Debrecen, Hungary; ²Physik-Department, Technische Universität München, D-85747 Garching, Germany; ³State Key Laboratory of Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China; ⁴Department of Physics, University of York, York, YO10 5DD, United Kingdom; ⁵Department of Chemistry, Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia V5A 1S6, Canada; ⁶Instituto de Fisica Corpuscular, CSIC-University of Valencia, E-46071, Valencia, Spain; ⁷Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences, PL-31342 Krakow, Poland; ⁸Université de Strasbourg, CNRS, IPHC UMR7178, 67037 Strasbourg, France; ⁹LPSC, IN2P3-CNRS/UJF, F-38026 Grenoble-Cedex, France; ¹⁰Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, 980-8578, Japan; ¹¹Oliver Lodge Laboratory, Department of Physics, University of Liverpool, Liverpool L69 7ZE, United Kingdom; ¹²Faculty of Physics, St. Kliment Ohridski University of Sofia, 1164 Sofia, Bulgaria; ¹³Université Bordeaux 1, IN2P3- CENBG - Le Haut-Vigneau BP120 33175, Gradignan Cedex, France; ¹⁴Department of Physics and Astronomy, SUNY, Stony Brook, New York, 11794-3800, USA

Bevezetés:

A deformált atommagok legkisebb energiájú gerjesztett állapotaihoz tartozó mozgásforma a forgás. A deformált atommagok többsége közelítőleg forgási ellipszoid alakú, és a szimmetriatengelyre merőleges tengely körül foroghatnak, mely forgástengely iránya egybeesik a perdületvektorával. Az atommagelméletek szerint bizonyos neutron- és protonszám tartományba eső atommagok alakja nem forgási ellipszoid, hanem háromtengelyű ellipszoid. Az ilyen atommagok a fentebb leírt forgáson kívül egy bonyolultabb forgást is végezhetnek: gyorsan forognak az egyik főtengely körül, és ez a forgástengelyük lassabban körbefordul a térben állandó perdületvektor körül. Ezt nevezzük "wobbling", vagy imbolygó forgásnak [1].



1. ábra A forgási ellipszoid alakú atommag állandó tengelyű forgása (bal oldal) és a háromtengelyű atommag imbolygó forgása (jobb oldal).

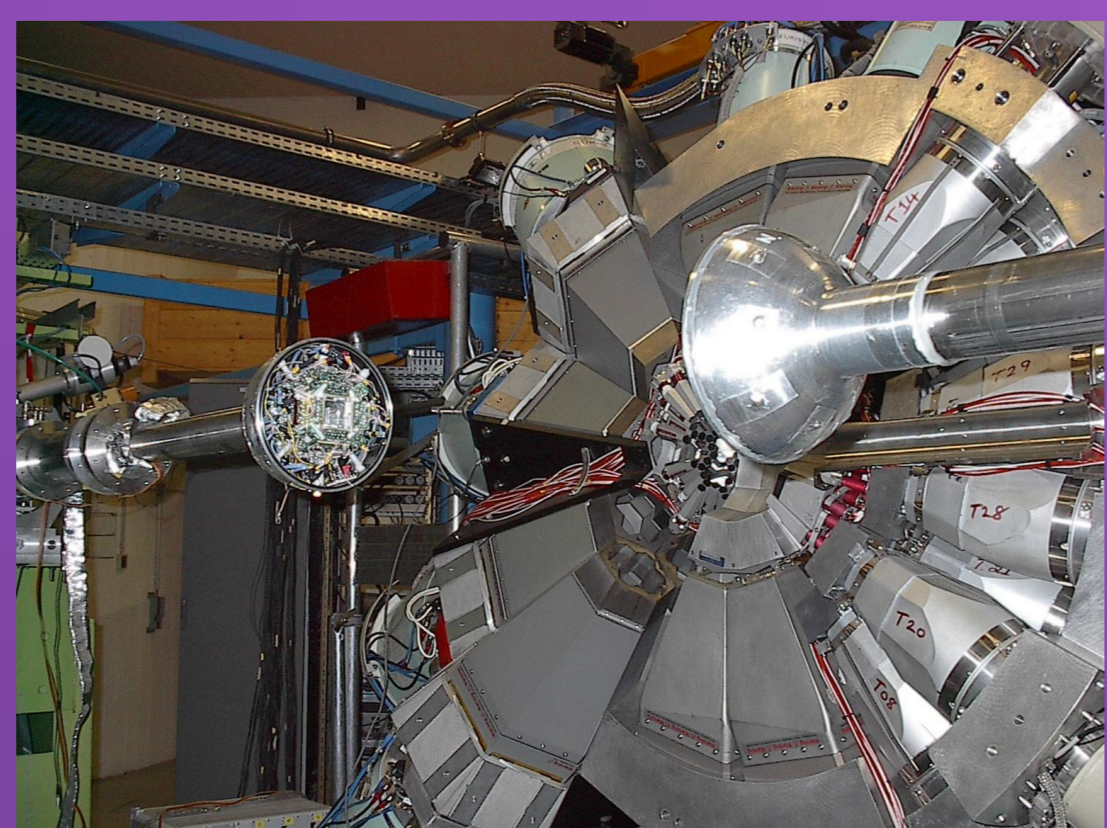
Az imbolygást a forgástengely kvantummechanikai vibrációjával írjuk le, melyhez a vibrációs (n) kvantumszámmal jellemzett diszkrét energiaértékek tartoznak. Így az imbolygó forgást végző atommag gerjesztési energiaspektrumában nem egy, hanem több E2 forgási sáv tartozik egy konfigurációhoz. Ezek az n vibrációs kvantumszámokban különböznek úgy, hogy az eggyel nagyobb kvantumszámhoz tartozó állapothoz nagyobb energia és egy egységgel nagyobb spin tartozik. Az egymás utáni n kvantumszámokhoz tartozó sávok megfelelő állapotai egy egységnyi spinnel különböznek egymástól, így a nagyobb n kvantumszámú (és nagyobb energiájú) állapot $\Delta I=1$, M1+E2 (mágneses dipól + elektromos kvadrupól) gamma-átmenettel bomlik a kisebb kvantumszámú állapotba. Ez alapján az $n=1$ sáv mind energiájában mind bomlási tulajdonságában hasonlít az $n=0$ (yrast) sáv "szignatúra partner" sávjára, amely forgási ellipszoid alakú atommagoknál is várható. A különbség köztük a gamma-átmenet M1 és E2 multipolaritásának keveredési arányában van. Míg a "szignatúra partner" sáv $\Delta I=1$ gamma-átmenete főleg M1 multipolaritású kis E2 bekeveredéssel, addig az $n=1$ wobbling sáv átmenete éppen ellenkezőleg főleg E2 multipolaritású kis M1 bekeveredéssel.

Ez idáig nagyon kevés atommagban mutatták ki az imbolygó forgást. Az első kísérleti bizonyítékot az atommag wobbling mozgására a páratlan protonszámú ^{163}Lu ($Z=71$) atommagban [2], később a ^{161}Lu , ^{165}Lu , ^{167}Lu atommagokban, továbbá a ^{167}Ta ($Z=73$) atommagban találták, mindegyik esetben az erősen deformált, háromtengelyű, $\pi(h_{11/2})$ konfigurációjú sávokban. A közelmúltban a ^{135}Pr ($Z=59$) atommagban bizonyították be kísérletileg [3], ahol a wobbling sáv konfigurációja $\pi(h_{11/2})$. Ezek mind olyan atommagok, amelyekben a proton- és neutronpárokból álló magtörzsen kívül egy proton található. Az ilyen, a magtörzsen kívül egy párosítatlan részecskét tartalmazó atommagok imbolygó forgása az elmélet szerint kétféle lehet; "transzverzális", ha a részecske perdülete merőlegesen áll a forgástengelyre, és "longitudinális", ha az párhuzamos vele [4]. A gamma-átmenet tulajdonságai mindkét esetben hasonlóan várható (erős E2 + gyenge M1), az $n=1$ sávhoz tartozó állapotoknak az $n=0$ sáv állapotaihoz képesti energiája (a wobbling energia) viszont különböző a két esetben. A transzverzális esetben csökken a forgási frekvencia növekedésével, míg a longitudinális esetben nő. Az eddig ismert esetekben mindig csökkenést tapasztaltak, tehát mind transzverzális wobbling.

A jelen munka célkitűzése imbolygó forgás keresése volt az $A \sim 100$ ($Z \sim 45$) atommagok tartományában, ahol eddig ez még nem volt ismert annak ellenére, hogy a magelméletek itt jósolják a legnagyobb eltérést a forgási ellipszoid magalaktól, és ahol a jelenség nem páratlan protonnal, hanem páratlan neutronnal rendelkező atommagokban várható.

Kísérlet:

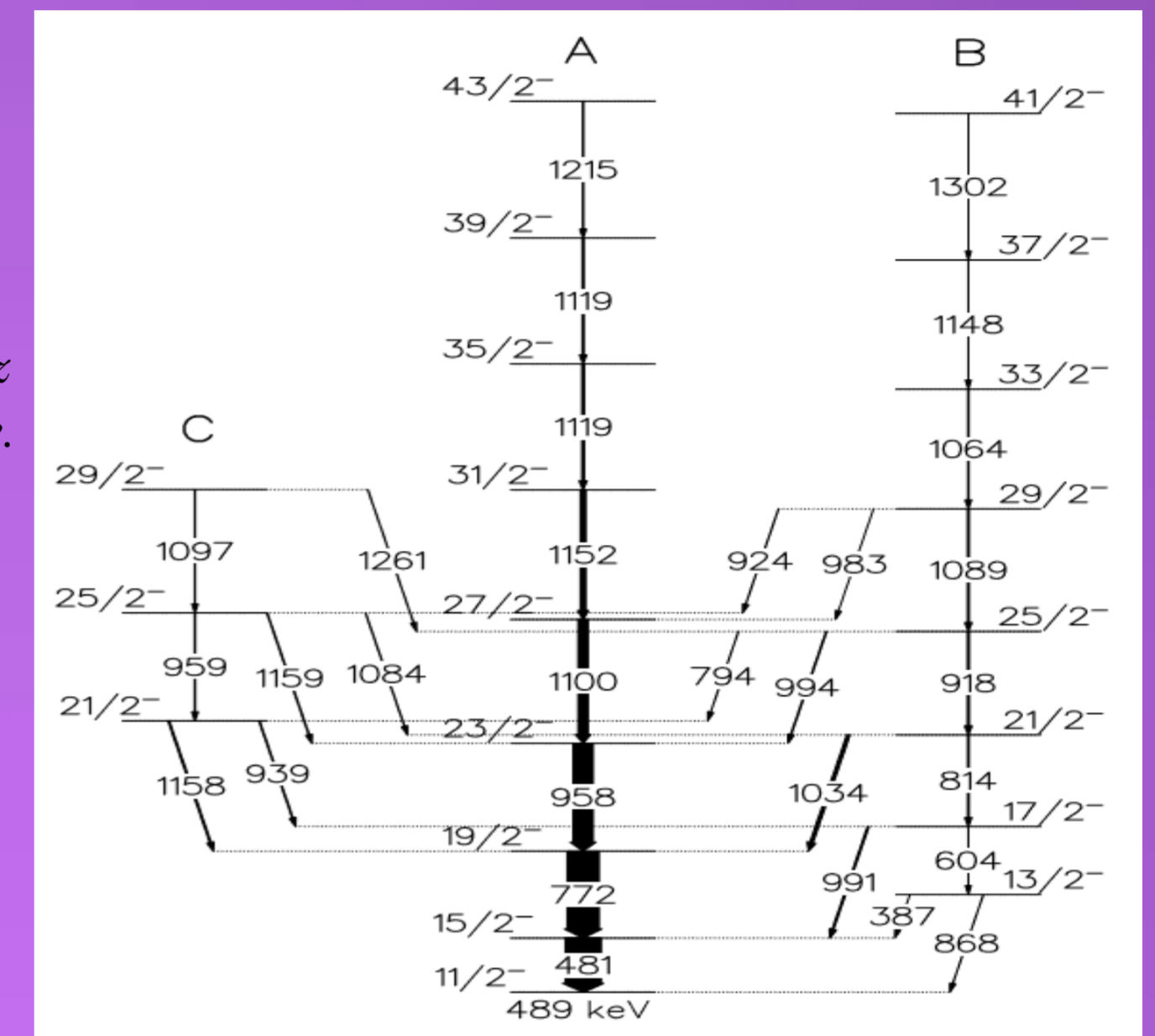
A ^{105}Pd közepes és nagy spinű állapotait $^{96}\text{Zr}(^{13}\text{C},4n)$ reakcióval állítottuk elő. A ^{13}C nyaláb előállítására a strasbourggi IReS kutatóintézet Vivitron részecskegyorsítójával történt 160 MeV energián. Ezt a nyalábot két, ^{96}Zr izotópban $\sim 86\%$ -osan dúszított céltárgy fóliával ütköztettük. A céltárgyak egyenkénti vastagsága kb. 0.6 mg/cm^2 volt. A kibocsátott gamma-sugarakat a EUROBALL IV gamma-spektrométerrel detektáltuk, amely 15 Cluster detektort tartalmazott hátrafelé irányban és 24 Clover detektort 90° -ban a nyalábirányhoz képest. Ezt kiegészítette a nagy határfokú, 88 CsI detektorból álló DIAMANT töltött részecske detektorrendszer, amelyet töltött részecske reakciócsatornákból származó szennyezők kiszűrésére használtunk. Az alkalmazott detektorelrendezés lehetővé tette a kibocsátott gamma-sugárzás szögkorrelációjának (DCO) és lineáris polarizációjának a meghatározását. A kísérletben azokat az eseményeket gyűjtöttük és írtuk mágnesszalagra, amelyekben legalább három gamma-sugárzást detektáltunk egyszerre a koincidencia időablakon belül. Körülbelül 2×10^9 eseményt gyűjtöttünk a kísérlet során.



2. ábra Az EUROBALL IV gamma-spektrométer (jobb oldal) és a DIAMANT detektorrendszer (bal oldal) a kísérlet helyszínén szétbontva.

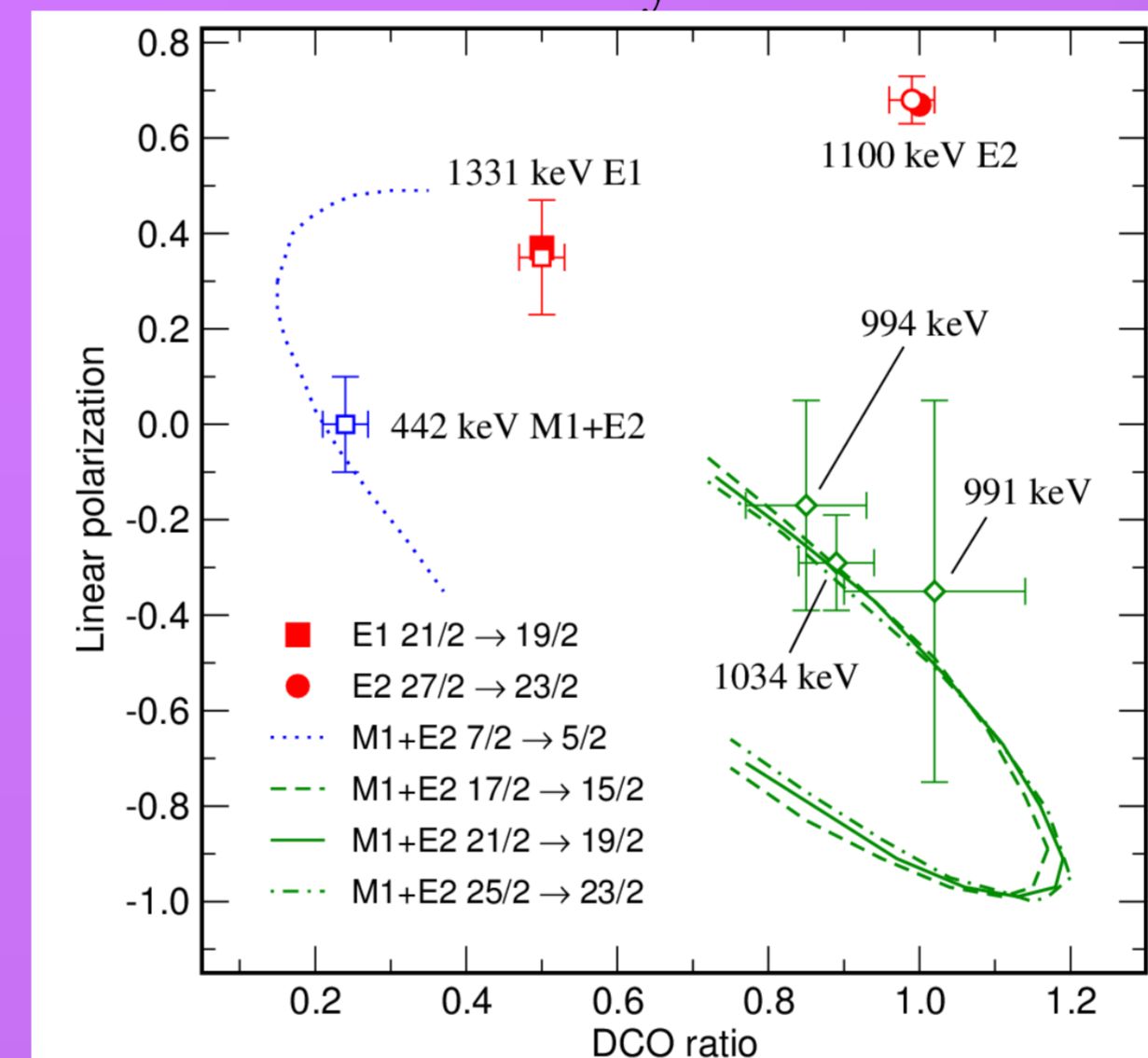
Eredmények:

A kísérleti adatok elemzésével felépítettük a ^{105}Pd nívósémáját (a gerjesztett állapotok rendszerét) a gamma-sugárzások hármas-koincidencia kapcsolatai, továbbá az energia- és intenzitásmérlegek alapján. Az analízishez a Radware programcsomagot használtuk. Számos új forgási sávot azonosítottunk a ^{105}Pd atommagra vonatkozóan [5]. Közük negatív paritású E2 forgási sávokat, amelyek valószínűleg a neutron $h_{11/2}$ konfigurációhoz tartoznak. Ezek közül két sáv állapotainak a spin értékei különböznek a már ismert, yrast $h_{11/2}$ sáv állapotainak spin értékeitől, tehát ez a két sáv jöhet számításba, mint a keresett $n=1$ wobbling sáv vagy az yrast sávhoz tartozó szignatúra partner sáv. A 3. ábra mutatja az yrast neutron $h_{11/2}$ sávot (A sáv) és a két újonnan azonosított sávot (B és C sávok).



3. ábra A ^{105}Pd atommag nívósémájának az imbolygó forgás szempontjából releváns része. Az A sáv az yrast ($n=0$) sáv, a B sáv az imbolygó forgáshoz tartozó ($n=1$) sáv, a C sáv pedig az A sávhoz tartozó szignatúra partner sáv

Az EUROBALL IV gamma-spektrométer nagy határfoka, speciális detektorai és detektor elrendezése lehetővé tette a B sáv 991 keV, 1034 keV és 994 keV gamma-átmeneteire DCO (szögkorreláció) és lineáris polarizáció mérését. A 4. ábrán a kapott kísérleti DCO - lineáris polarizáció értékpárokat (szimbólumok hibásávokkal) vetettük össze az elméletileg várható értékpárokkal különböző E2/M1 keveredési arányok esetén (folytonos, szaggatott, pontozott-szaggatott görbék, a görbék mentén a keveredési arány folytonosan változik). Az összevetés nagy keveredési arányokat mutat, amelyek erős E2 és gyenge M1 komponensre utalnak. Az 1100 keV, 1331 keV és 442 keV gamma átmenetek korábban ismert sugárzások, melyeknek az ismert multipolaritás, illetve keveredési arány értékeit kísérleti eredményeink jól reprodukálják. A B sáv 991 keV, 1034 keV és 994 keV gamma-átmeneteire kapott kísérleti E2/M1 keveredési arányok egyértelműen bizonyítják, hogy a B sáv az $n=1$ imbolygó forgáshoz tartozó sáv. A wobbling energia ebben a sávban csökken a forgási frekvencia függvényében, tehát ez is transzverzális wobbling, mint a korábban ismert esetek. A C sáv pedig valószínűleg az A sávhoz tartozó szignatúra partner sáv, bár a két sáv közti gamma-átmenetek keveredési arányait nem sikerült meghatározni.



4. ábra A kísérleti DCO - lineáris polarizáció értékpárokat (szimbólumok hibásávokkal) összevetése az elméletileg várható értékpárokkal különböző E2/M1 keveredési arányok esetén (folytonos, szaggatott, pontozott-szaggatott görbék).

A kísérleti eredmények megerősítése céljából modellszámításokat végeztünk a ^{105}Pd atommag alakjára és a várható forgási sávok tulajdonságaira vonatkozóan Kovariáns Sűrűség Funkcionál Elmélet (CDFT) [6] modell és Részecske Rotor Modell (PRM) [7] felhasználásával. A kapott elméleti eredmények jó összhangban vannak a kísérleti adatokkal, háromtengelyű magalaktól jósolnak és jól reprodukálják a kísérleti nívóenergiákat és a sávok közti gamma-átmenetek intenzitás arányait, valamint az E2/M1 keveredési arányokat. A kapott hullámfüggvények igazolják az imbolygó forgást a ^{105}Pd atommagban.

Konklúzió:

Összegezve, kimutattuk a transzverzális wobbling mozgást a ^{105}Pd atommagban, ahol a wobbling sáv a $\nu(h_{11/2})$ egy-neutron konfigurációhoz tartozik [8]. A DCO értékek és a lineáris polarizáció adatok pontos mérése megmutatta a wobbling sávban az M1+E2 átmenetek domináns E2 karakterét. A CDFT és a PRM modellszámítások eredményei jól reprodukálják a kísérletileg észlelt sávok tulajdonságait, és megerősítik az új észlelt sáv wobbling jellegét. Ez az eredmény az első kísérleti bizonyíték wobbling sávra egy-neutron konfiguráció esetén, illetve a wobbling mozgás első kísérleti megfigyelése az $A \sim 100$ tömegszám tartományban.

Hivatkozások:

- [1] A. Bohr and B. R. Mottelson, Nuclear Structure (Benjamin, New York, 1975), Vol. II.
- [2] S. W. Odegard, G. B. Hagemann, D. R. Jensen, M. Bergström, B. Herskind, G. Sletten, S. Törmänen, J. N. Wilson, P. O. Tjøm, I. Hamamoto et al., Phys. Rev. Lett. 86, 5866 (2001).
- [3] J. T. Matta, U. Garg, W. Li, S. Frauendorf, A. D. Ayangeakaa, D. Patel, K. W. Schlax, R. Palit, S. Saha, J. Sethi et al., Phys. Rev. Lett. 114, 082501 (2015).
- [4] S. Frauendorf and F. Dönau, Phys. Rev. C 89, 014322 (2014).
- [5] B. Kruzsic, DE-TTK Fizika BSc Szakdolgozat, Királis konfigurációk keresése a ^{105}Pd atommagban (2017)
- [6] J. Meng, J. Peng, S. Q. Zhang, and S.-G. Zhou, Phys. Rev. C 73, 037303 (2006).
- [7] S. Frauendorf and F. Dönau, Phys. Rev. C 89, 014322 (2014).
- [8] J. Timár, Q. B. Chen, B. Kruzsic, D. Sohler, I. Kuti, S. Q. Zhang, J. Meng, P. Joshi, R. Wadsworth, K. Starosta, et al., Phys. Rev. Lett. 122, 062501 (2019).