بررسی گشتاورهای چهارقطبی الکتریکی در نوارهای دورانی ایزوتوپ‌های Er

صادقی،خدیجه* (۱)- کاردان،اعظم (۲)
دانشگاه دامغان ، دانشکده فیزیک ، گروه هسته‌ای
دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک

چکیده:

در هسته‌های دور از پوسته بسته، نوکلئون‌های خارج از قلب، هسته را قطبی کرده و هسته می‌تواند یک تغییر شکل دائمی پیدا کند. همه هسته‌های تغییرشکل یافته می‌توانند دوران کنند و این نوع برانگیزش جمعی منجر به ظاهر شدن نوارهای دورانی خواهد شد. در این مقاله نوارهای دورانی در ایزوتوپ‌های Er با استفاده از محاسبات CNS[۱] بررسی شده است. در ^{۱۵۴}Er دو نوار سه محوری و در $^{۱۵۷,۱۵۸}Er$ سه نوار سه محوری مشاهده شده است. گشتاورهای چهار قطبی الکتریکی اطلاعات مهمی را در مورد نوارهای دورانی دراختیار ما قرار می‌دهد. مقادیر گشتاور را برای هرسه ایزوتوپ توسط کد CNS محاسبه کردیم و با مقادیر تجربی مقایسه و ساختار این نوارهای سه محوری را بررسی کردیم.

کلمات کلیدی: *Er isotopes, Rotational Bands, Quadrupole moments, CNS model*

The study of electrical quadrupole moments in rotational bands of the Er isotopes.

Sadeghi, Khadijeh[1]; Kardan, Azam[2];
Damghan University, physics Department, Nuclear group
Damghan University, physics Department

Abstract:

In nuclei far from the closed shell, nucleons, outside the core, polarize the nucleus, and the nucleus can have a permanent deformation. All of the deformed nuclei can rotate, and this kind of collective excitation will result in the appearance of rotational bands. in this paper, rotational bands in Er isotopes are investigated using the CNS calculations. In ^{154}Er two triaxial bands and in $^{157,158}Er$ three triaxial bands are observed. The electrical quadrupole moments provide for us important information about the rotational bands. We have calculated the values of moments for each of the three isotopes by CNS code and compared with experimental values and studied structure of these rotational bands.

Key words: Er isotopes, Rotational Bands, Quadrupole moments, CNS model

مقدمه :

نوارهای دورانی به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند: نوارهای دورانی با تغییر شکل متعارف (ND)، تغییر شکل کشیده شده‌تر (ED)، تغییر شکل خیلی کشیده (SD) و تغییر شکل سه محوری (TSD). وجود ساختارهای بسیار کشیده، نوارهای سه محوری و نوارهای متعارف در اسپین‌های بالا در $^{۱۵۴-۱۵۷-۱۵۸}Er$ به اثبات رسیده است[1]. وجود گشتاورهای چهارقطبی نشانه‌ای ازتغییرشکل هسته‌ای است بنابراین با محاسبه گشتاور چهارقطبی می‌توانیم پارامترهای تغییرشکل رامحاسبه کنیم[۲]. گشتاور چهارقطبی الکتریکی بر دو

[۱] Cranked-Nilsson Strutinsky

نوع کوانتومی و کلاسیکی پایه‌ریزی شده است. در بدست آوردن گشتاور چهارقطبی الکتریکی کوانتومی از مدل پوسته‌ای استفاده می‌شود که یک مدل کاملاً کوانتومی است که معادله شرودینگر با یک پتانسیل هسته‌ای را حل می‌کند (که در اینجا پتانسیل نیلسون مدنظر است)[3] . با در نظر گرفتن شکل عملگری گشتاور چهارقطبی و محاسبه‌ی مقادیر چشم‌داشتی آن‌ها می‌توان گشتاورهای سیستم‌های هسته‌ای را تعیین کرد که رابطه‌ی آن به صورت زیر می‌باشد[4]:

$$Q = -\begin{bmatrix} e_n \\ e_p \end{bmatrix} \frac{2j-1}{2j+2} \langle r^2 \rangle_{N\ell} \qquad (1)$$

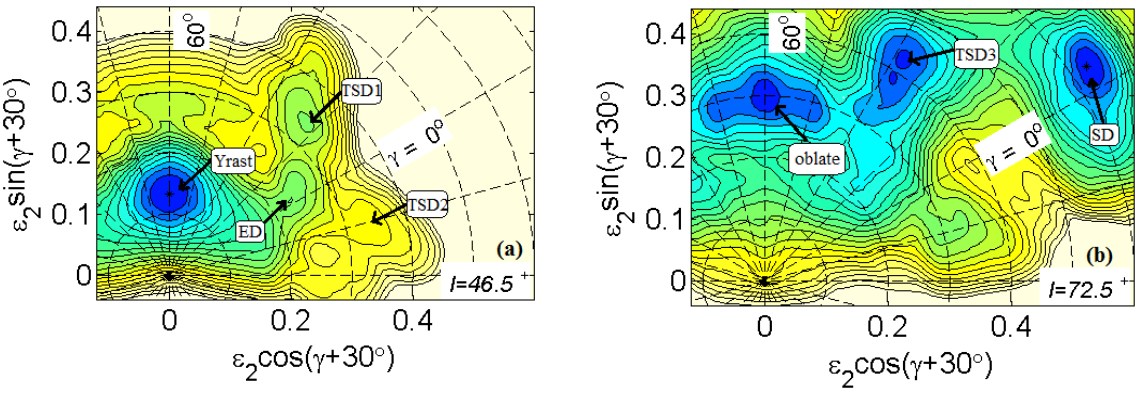
جمله گشتاور چهارقطبی کوانتومی برای پوسته‌های بسته به علاوه یک ذره یا حفره معتبر است. به تدریج که از پوسته‌های بسته دور می‌شویم قلب هسته دچار تغییرشکل می‌شود. در مدل کلاسیکی قطره-مایع رابطه کلاسیکی گشتاور چهارقطبی الکتریکی گذار به صورت زیر است[5,6]:

$$Q_t = Q_{20} \frac{\cos(\gamma+30^\circ)}{\cos(30^\circ)},\ Q_{20} = \frac{2ZeR_0^2}{\sqrt{5\pi}} \varepsilon_2 \cos\gamma \qquad (2)$$

که Q_{20} گشتاور چهارقطبی هسته‌های تغییرشکل یافته‌ی محوری است[7]. به منظور بررسی تغییرشکل‌های مرتبط با این ساختارها در اسپین‌های خیلی بالا و مشخص کردن خصوصیات آن‌ها گشتاورهای چهارقطبی گذار به صورت تجربی در مراجع [7,8] بدست آورده شد. از این مقادیر تجربی برای مقاسیه با مقادیر نظری در این کار استفاده می‌کنیم. اگر سرعت دوران زیاد باشد، دوران روی ساختار ذاتی هسته اثر می‌گذارد. برای توصیف رفتار نوارهای دورانی با اسپین بالا نیاز به یک مدل ماکروسکوپیک-میکروسکوپیک داریم تا هم دوران هسته و هم ساختار ذاتی نوکلئون‌های درون هسته بررسی شود. یکی از موفق‌ترین مدل‌ها، مدل نیلسون-استروتینسکی کرنک شده است. از مهم‌ترین دستاوردهای این مدل نسبت به مدل‌های دیگر توانایی در پیش‌بینی حالت‌های تغییرشکل یافته در اسپین‌های بالا و توضیح نوارهای پایان‌پذیر است. محاسبات در این مدل با استفاده از پتانسیل نوسانگر اصلاح شده و مجموعه‌ای از پارامترهای تک-ذره انجام می‌شود. این پیاده‌سازی‌ها اجازه می‌دهد تا انرژی را برای یک پیکربندی مشخص در یک اسپین معین کمینه کنیم[9].

روش کار :

محاسبات CNS برای هر سه ایزوتوپ Er انجام شد. برای ایزوتوپ ^{154}Er دو نوار سه محوری با تغییرشکل $(\varepsilon_2,\gamma) \sim (0{,}35,\ 20^\circ)$ (TSD1) و $(\varepsilon_2,\gamma) \sim (0{,}35,\ -20^\circ)$ (TSD2) و یک نوار فوق تغییر شکل یافته با $(\varepsilon_2,\gamma) \sim (0{,}62,\ 0^\circ)$ (SD) در اسپین‌های بالا یافت شد. برای ^{157,158}Er علاوه بر نوارهای TSD1، TSD2 و SD یک نوار سه محوری دیگر با تغییرشکل بزرگ‌تر $(\varepsilon_2,\gamma) \sim (0{,}43,\ 25^\circ)$ (TSD3) ظاهر شد. شکل‌های سطوح انرژی پتانسیل برای هر سه هسته رسم شد که برای نمونه این نمودارها برای هسته ^{157}Er در پاریته مثبت و $\alpha=0$ (اسپین زوج) در دو مقدار اسپین $46/5\hbar$ و $72/5\hbar$ به ترتیب در شکل ۱(a) و ۱(b) آورده شده

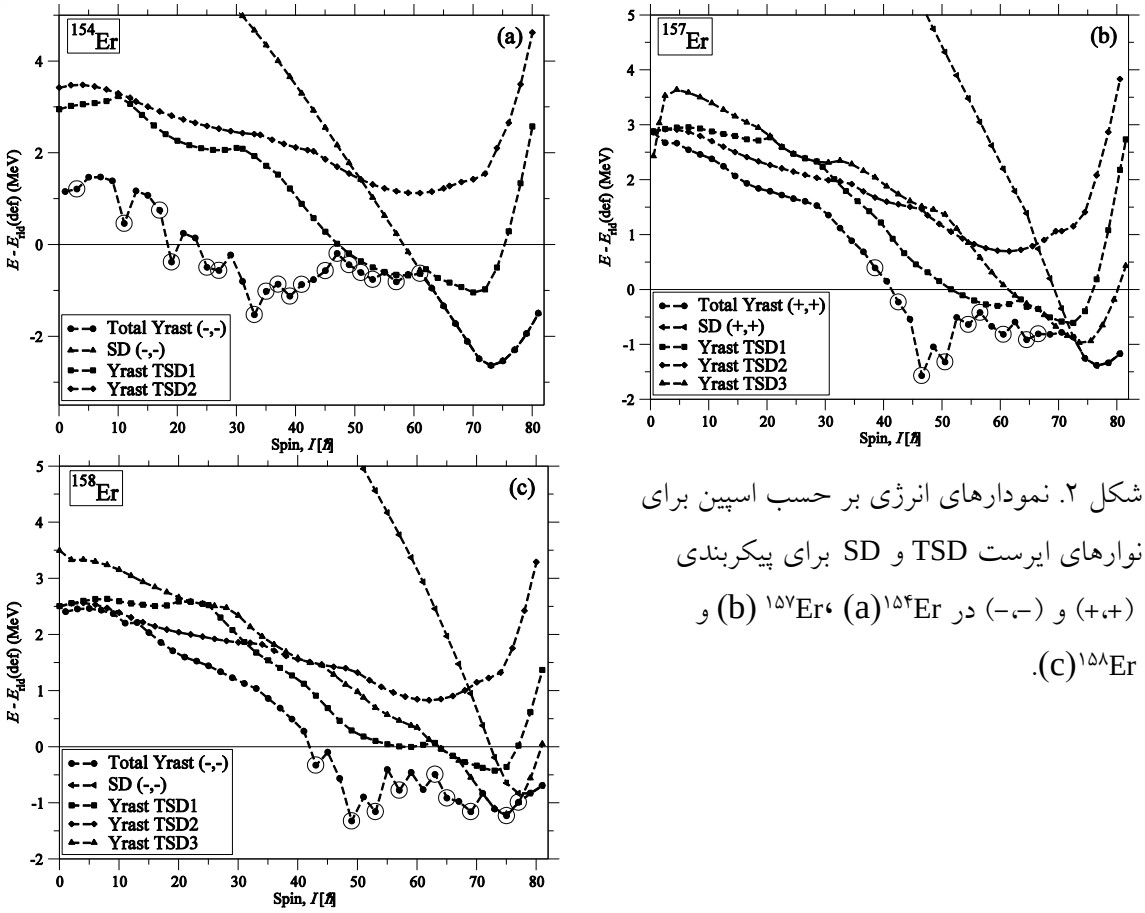


شکل ۱. سطوح انرژی پتانسیل در هسته‌ی ^{157}Er برای پیکربندی (+،+) در اسپین‌های ۴۶/۵ (a) و ۷۲/۵ (b). فاصله‌ی خطوط کانتوراستفاده شده در تصاویر ۰/۲۵MeV است.کمینه‌های مهم در شکل برچسب زده شده‌اند.

است. در ^{157}Er با توجه به اینکه هسته فرد–فرد است اسپین‌های نیمه صحیح را شاهد هستیم. در این نمودار کمینه‌ها با رنگ‌های متفاوت نشان داده شده‌اند. هرچه رنگ تیره‌تر باشد یعنی عمق کمینه‌ی موردنظر بیشتر است. اسپین ۷۲/۵ħ جایی است که کمینه‌ی SD ایرست[۱] می‌شود و سه کمینه‌ی SD، TSD3 و ایرست کلی بر هم منطبق می‌شوند. در نمودار مشاهده می‌شود که هر سه کمینه به یک میزان پررنگ هستند و با هم رقابت دارند. این نکته را با نمودار ایرست در شکل (۲) می‌توان مطابقت داد.

رفتار کلی هسته در اسپین‌های مختلف را می‌توان توسط نمودارهای انرژی بر حسب اسپین بررسی کرد. نمودارهای انرژی بر حسب اسپین شامل نوارهای ایرست هسته می‌شوند. نمودار ایرست بدست آمده شامل چهار پیکربندی با پاریته و α (+،+)، (–،+)، (+،–) و (–،–) است. حالت ایرست به پایین‌ترین سطح انرژی به ازای یک اسپین خاص گفته می‌شود. این نمودارها را برای هرسه ایزوتوپ به دست آوردیم و نوارهای ایرست هر ایزوتوپ را مطابق شکل (۲) در یک نمودار قرار داده‌ایم. در این نمودارها، ایرست نوارهای TSD را از هر چهار پیکربندی بدست آوردیم و نوارهای SD و ایرست کلی را برای یک پیکربندی خاص رسم کرده‌ایم. بررسی نمودارهای ایرست رسم شده نشان می‌دهد که نوار ایرست سه محوری با $\gamma > 0°$ (TSD2) نسبت به سایر نوارهای ایرست، در اسپین‌های بالا بخصوص برای ^{154}Er در انرژی بالاتری قرار می‌گیرد. پس می‌توان نتیجه گرفت که این ایزوتوپ‌ها در اسپین‌های بالا در کمینه‌هایی با $\gamma > 0°$ قرار نمی‌گیرند. وجود نوار-های پایان‌پذیر یکی از ویژگی‌های مهم است که در این نمودارها مشاهده می‌شود. این نوارها با دایره‌های توخالی بزرگ مشخص شده‌اند و نشان دهنده‌ی این هستند که حرکت جمعی تمام شده و هسته رفتار تک–ذره خواهد داشت. با توجه به محاسبات ما، این نوارها در هر سه ایزوتوپ Er ظاهر شده‌اند و با افزایش نوترون خارج از پوسته‌ی بسته که معادل افزایش عدد جرمی است، کمتر می‌شوند. با افزایش عدد جرمی از ۱۵۴ به ۱۵۸ تعداد این نوارها کم شده و بازه‌ی اسپینی آن هم کمتر و محدودتر می‌شود. سه نوار ایرست کلی،

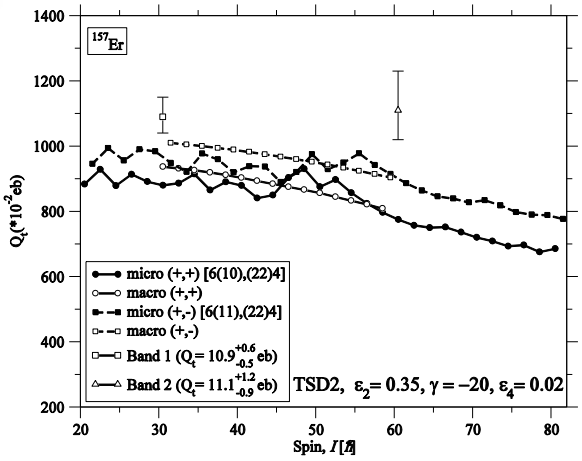
[۱] Yrast



شکل ۲. نمودارهای انرژی بر حسب اسپین برای نوارهای ایرست TSD و SD برای پیکربندی (+،+) و (−،−) در ^{154}Er (a)، ^{157}Er (b) و ^{158}Er (c).

SD و TSD با افزایش عدد جرمی در اسپین‌های بالاتری همدیگر را قطع می‌کنند. به طوری که در ^{154}Er در اسپین ħ ۶۰ ~ I و در ^{157}Er حدود اسپین ħ۷۳ ~ I و در ^{158}Er حدود اسپین ħ ۷۷ ~ I این انطباق صورت می‌گیرد. با افزایش عدد جرمی نوارهای TSD در اسپین‌های بالاتر به نوار ایرست کلی نزدیک می‌شوند و در انرژی پایین‌تری قرار می‌گیرند و به عبارتی مشاهده نوارهای TSD در ایزوتوپ‌های سنگین‌تر Er مناسب‌تر است. به طورکلی ایرست این هسته‌ها در اسپین‌های بالا بر روی کمینه‌ی SD قرار می‌گیرد و در تعداد محدودی از پیکربندی‌ها بر روی کمینه‌ی TSD3 قرار می‌گیرد. همچنین با افزایش عدد جرمی مشاهده می‌شود که ایرست کلی در بازه اسپینی کمتری بر روی کمینه‌ی SD قرار می‌گیرد و شاهد پیدایش کمینه‌ی TSD3 هستیم. به طوری‌که در ^{154}Er کمینه‌ی TSD3 را نداریم، اما در ^{157}Er این کمینه پیدا می‌شود و در ^{158}Er می‌بینیم که حتی کمینه‌ی TSD3 در اسپین‌های ۷۱ و ۷۳ ایرست می‌شود. یعنی با افزایش عدد جرمی ایرست روی کمینه‌ی TSD3 قرار می‌گیرد. در هر سه ایزوتوپ مشاهده می‌شود نوار TSD۱ در بازه‌ی اسپینی ħ(۶۰−۳۰) با فاصله‌ی حدود ۱MeV پایین‌تر از دو نوار TSD۲،۳ قرار گرفته است.

در این کار گشتاورهای چهارقطبی الکتریکی گذار(Q_t) توسط کد CNS در دو حالت میکروسکوپیکی (کوانتومی) و ماکروسکوپیکی (کلاسیکی) محاسبه شده است.



شکل ۳. گشتاور چهار قطبی الکتریکی گذار (Q_t) بر حسب اسپین به صورت میکروسکوپیکی و ماکروسکوپیکی در هسته ^{157}Er در نوار TSD2 برای دو پیکربندی (+،+) و (−،+).

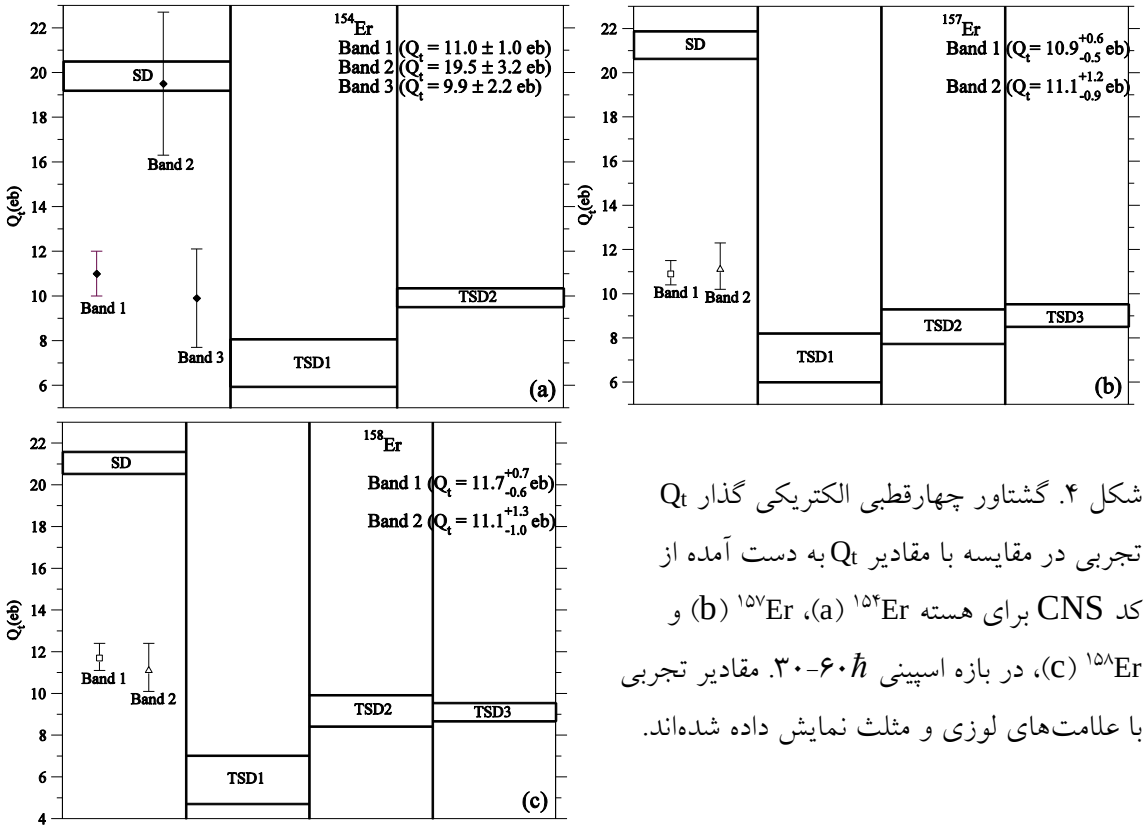
در ^{157}Er برای نوارهای۳-TSD۱ و نوار SD در هر چهار پیکربندی Q_t به دست آورده شد. به عنوان نمونه در شکل (۳) نمودار Q_t بر حسب اسپین، برای نوار TSD۲ آورده شده است.

مقدار $Q_t = ۱۰/۹^{+۰/۶}_{-۰/۵}$ برای نوار ۱ و مقدار $Q_t = ۱۱/۱^{+۱/۲}_{-۰/۹}$ برای نوار ۲ در مرجع [8] اندازه‌گیری شد. در شکل (۳)، مقدار Q_t در اسپین ۳۶ برای پیکربندی [6(10),(22)4]، ۸/۶۶eb بدست آمد که کمتر از مقدار تجربی است، اما مقدار Q_t در اسپین ۳۶ برای پیکربندی [6(11),(22)4]، ۹/۷۷eb بدست آمد که به مقدار تجربی نزدیک‌تر است. این مورد در سایر نوارها نیز مشاهده شد و نشان می‌دهد که پیکربندی با یک پروتون بیشتر در پوسته‌ی N=6 (اوربیتال $i_{13/2}$) مقدار Q_t را نزدیک‌تر به مقدار تجربی به‌دست می‌دهد. در مرجع [7] برای ^{۱۵۸}Er مقدار $Q_t = ۱۱/۷^{+۰/۷}_{-۰/۶}$ برای نوار ۱ و مقدار $Q_t = ۱۱/۱^{+۱/۳}_{-۱/۰}$ برای نوار ۲ به صورت تجربی اندازه‌گیری شد که ثابت می‌کند این مقادیر با تغییرشکل‌های بزرگ همراه است. برای مثال برای حالت پایه نوار ^{۱۵۸}Er مقدار Q_t آن حدود ۶eb است و با یک شکل کشیده‌ی متعارف $(\varepsilon_2,\gamma)\sim(۰/۲, ۰^\circ)$ همراه است[10]. در ^{۱۵۴}Er نوار۱ مقدار $Q_t = ۱۱/۰\pm۱/۰eb$ است[8] که شبیه به مقادیر مشاهده شده‌ی اخیر برای ۴ نوار سه محوری به شدت تغییر شکل یافته‌ی TSD در $^{۱۵۷،۱۵۸}Er$ در مرجع [7] می‌باشد. دومین نوار مقدار $Q_t = ۱۹/۵\pm۳/۲eb$ را دارد[8] که مشابه با شکل فوق تغییر شکل یافته‌ی محوری (SD) و شبیه به مقادیر گشتاور نوار SD در ایزوتون ^{۱۵۲}Dy می‌باشد[12]. نوار ۳ مقدار $Q_t = ۹/۹\pm۲/۲eb$ را دارد[8].

بحث ونتیجه گیری :

طبق نمودارهای به‌دست آمده، مقادیر Q_t با افزایش اسپین اندکی کاهش می‌یابد و سپس یک محدوده را شکل می‌دهد که در شکل (۴) برای هر سه ایزوتوپ Er این محدوده‌ها نشان داده شده است. مقادیر تجربی Q_t در $^{۱۵۷،۱۵۸}Er$ با نوارهای SD و TSD1 مطابق نیست و این دو نوار را به عنوان کمینه رد می‌کند. مقادیر تجربی Q_t به مقادیر نظری نوارهای TSD2 و TSD3 نزدیک هستند، اما هنوز بزرگ‌تر هستند. در ^{۱۵۷}Er، TSD3 کمی نزدیک‌تر به مقدار تجربی است و در ^{۱۵۸}Er، نوار TSD2 با پیکربندی [7(10),(22)4] به مقادیر تجربی نزدیک

است، هر چند TSD2 در محدوده‌ی اسپینی $\hbar$۶۰-۳۰ با TSD3 رقابت می‌کند. در شکل (۴) قسمت (a)



شکل ۴. گشتاور چهارقطبی الکتریکی گذار Q_t تجربی در مقایسه با مقادیر Q_t به دست آمده از کد CNS برای هسته ^{154}Er (a)، ^{157}Er (b) و ^{158}Er (c)، در بازه اسپینی $\hbar$۶۰-۳۰. مقادیر تجربی با علامت‌های لوزی و مثلث نمایش داده شده‌اند.

مشاهده می‌کنیم که مقدار تجربی Q_t نوار ۲ مطابق با شکل SD است و دقیقاً در بازه مقادیر نظری قرار گرفته است. مقادیر گشتاورهای چهارقطبی نوار۱ و۳ مطابق با شکل های TSD هستند. اما بیشتر از مقدار نظری نوار TSD1 هستند و بیشتر به مقادیر نوار TSD2 نزدیک هستند. وقتی که مقایسه Q_t با محاسبات CNS انجام شد، نوارهای فرا اسپینی در $^{157,158}Er$ دیده شد که توافق بیشتری با هر یک از دو کمینه‌ی سه محوری گامای منفی، TSD2 ($\varepsilon_2 \sim$ ۰٫۳۴) یا کمینه‌ی فوق تغییر شکل یافته‌ی TSD3 ($\varepsilon_2 \sim$ ۰٫۴۳) دارد. این یک نتیجه‌ی شگفت‌آور است، زیرا در نمودارهای ایرست، محاسبات، یک فاصله‌ی ۱MeV را بین کمینه‌های TSD1 و TSD2,3 در محدوده‌ی اسپینی $\hbar$۶۰-۳۰ نشان می‌دهند. در حالی که مقایسه‌ی مقادیر تجربی Q_t با مقادیر تئوری ثابت می‌کند که TSD2 یا TSD3 ایرست هستند. این اختلاف نشان‌دهنده‌ی یک چالش بزرگ برای درک درجات سه محوری در هسته است. علت این اختلاف را می‌توان با بررسی پارامترهای κ و μ و یا روابط مربوط به Q_t یافت و یا ممکن است این نوارها TSD نباشند. نتایجی که برای نمودارهای ایرست و گشتاور چهارقطبی در این کار بدست آوردیم همگی با مراجع [7,8] مطابقت می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که به اندازه‌گیری‌های بیشتر و دقیق‌تر در این ناحیه از ساختارهای به شدت تغییرشکل یافته سه محوری، برای ارائه‌ی دقیق‌تر مقادیر گشتاور چهارقطبی الکتریکی برای این نوارها نیاز داریم.

مراجع :

[1] E.S. Paula et al, Recent results at ultrahigh spin: terminating states and beyond in mass 160 pare-earth nuclei, acta physica polonica B, No. 3 , Vol.46, p 487-496, (2015).
[2] S Mohammadi, Quadrupole Moments Calculation of Deformed Nuclei, J. Phys, Conf. Ser 381 , 012129, (2012).
[3] Martin, B. R (Robert, Brian), Nuclear and Particle Physics, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, p237, (2006).
[4] Krane, Kenneth S., Introductory Nuclear Physics, John Wiley & sons, New York, Vol. I, p101, (1988).
[5] S. G. Nilsson and I. Ragnarsson, Shapes and Shells in Nuclear Structure, Cambridge University Press, New York, p105, (1995).
[6] P.E. Hodgson, E. Gadioli and E. Gadioli Erba, introductory Nuclear Physics, Clarendon Press, Combridge, (2002).
[7] X. Wang et al., Quadrupole moments of Collective structures up to spin ~ 65ħ in ^{157}Er and ^{158}Er: A challenge for understanding triaxiality in nuclei, Phys. Lett. B 702 , 127, (2011).
[8] J. P. Revill et al, Quadrupole moments of coexisting collective shapes at high spin in ^{154}Er, Phys. Rev. C88, 031304, (2013).
[9] Carlson, J. A., Wirringa, R. B., Langanke, K., Maruhn, J. A., Koonin, S. E, Computational Nuclear Physics 1, p52, springer verlag, New York (1991).
[10] S.L. Shepherd, et al., High precision quadrupole moment measurements of states up to I=20ħ in the yrast band of ^{158}Er, Phys. Rev. C 65, 034320, (2002).
[11] D. Nissius et al., Differential lifetime measurements and configuration-dependent quadrupole moments for superdeformed bands in nuclei near ^{152}Dy, Phys. Lett. B 392, 18 (1997).