رقابت حالت‌های تجمعی و غیرتجمعی در اربیوم‌های ۱۵۶ تا ۱۶۰

INC29-1374

محدثه شایسته‌فر[1*]، اعظم کاردان[1]

۱. دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای، صندوق پستی ۳۶۴-۳۶۷۱۵، دامغان ـ ایران

چکیده:

هسته‌های خاکی نادر با A~160 که دارای تعداد محدودی از پروتون‌ها و نوترون‌ها خارج پوسته‌های بسته پروتونی $Z = ۶۴$ و نوترونی $N = ۸۲$ هستند، در یک منطقه گذار قرار دارند. اکثریت این هسته‌ها در حالت پایه‌شان، شکل کشیده و رفتار تجمعی دارند؛ اما با افزایش اسپین، رفتار تجمعی برخی از آن‌ها تغییر می‌کند و در محدوده اسپینی ۵۰-I=۳۰ به شکل پخت با رفتار غیرتجمعی تغییر وضعیت می‌دهند. هسته اربیوم از مشهورترین هسته‌ها در این ناحیه جرمی است. در کار حاضر با استفاده از روش "پیکربندی وابسته به نیلسون-استروتینسکی کرنک شده" به بررسی رقابت حالت‌های تجمعی و غیرتجمعی برای ایرست شدن یعنی تغییر رفتار در مسیر خط ایرست، برای ایزوتوپ‌های $^{۱۵۶-۱۶۰}Er$ می‌پردازیم. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت در این ایزوتوپ‌ها یک تغییر رفتار تدریجی با شروع از یک ایزوتوپ سبک ^{۱۵۶}Er، که دارای رفتار نامنظم و حالت‌های همراستاشده فراوان در ناحیه اسپین پایین است، تا یک ایزوتوپ سنگین ^{۱۶۰}Er، که تا ناحیه اسپسن بالا (اسپین ۵۰ħ) با رفتاری منظم (تجمعی) باقی می‌ماند، وجود دارد.

کلیدواژه‌ها: رفتار تجمعی، نوار دورانی، خط ایرست، روش نیلسون-استروتینسکی کرنک شده.

Competition of collective and non-collective states in $^{156-160}$Er

M. Shayestefar, A. Kardan

School of Physics, Damghan University, P.O. Box: 36715-364, Damghan, Iran.

Abstract:

Rare-earth nuclei with some protons and neutrons above Z=64 and N=82 closed shells, are in the transitional region. Most of these nuclei have prolate shape and collective behavior in the ground state but with increasing spin, collective behavior in some of them changes, and their shapes become oblate at I~30-50. Erbium is one of the famous nuclei in this mass region. In the present work, we investigate competition of collective and non-collective states for being Yrast, i.e., change behavior of Yrast line, in $^{156-160}$Er. Generally, it can be resulted that there is a gradual change behavior in these isotopes, from a lighter of them (^{156}Er) which has irregular behavior and a lot of aligned states in low-spin region, to the heavier of them (^{160}Er) which remains collective behavior up to high-spin region (I~50).

Keywords: (Collective behavior, Rotational band, Yrast line, Cranked Nilsson-Strutinsky approach.)

Email: M.shayestefar@std.du.ac.ir , mohadeseshayestefar@yahoo.com

۱. مقدمه

با افزایش نوکلئون‌های ظرفیت، هسته در پایین‌ترین حالت انرژی تغییر شکل دائمی می‌یابد. با دادن انرژی به یک هسته تغییرشکل‌یافته، هسته می‌تواند شروع به دوران می‌کند. این نوع برانگیزش جمعی منجر به ظاهرشدن نوارهای دورانی خواهد شد. نیروی کوریولیس حاصل از دوران به دو نوکلئون جفت شده دو نیروی خلاف جهت وارد می‌کند. با افزایش اسپین، در مقادیر اسپینی متوسط و در بعضی فرکانس‌ها انرژی دورانی هسته از انرژی موردنیاز برای شکستن زوج نوکلئون تزویج شده تجاوز می‌کند. بنابراین جفت‌ها شروع به شکسته شدن می‌کنند. اگر با افزایش بیشتر اسپین، تمام جفت‌های نوکلئونی شکسته شده و بردارهای اسپین تمام ذرات زوج‌های شکسته شده همراستا با محور دوران شوند، در این حالت تکانه زاویه‌ای سیستم به حداکثر مقدار خود درون این پیکربندی رسیده است. سیستم در یک پیکربندی خاص، از حالتی با خاصیت تجمعی بالا در اسپین پایین به یک حالت غیرتجمعی در اسپین ماکزیمم تغییر پیدا می‌کند. این رویداد در هسته، «پایان‌پذیری» نام دارد [۱-۵]. این پدیده در نواحی جرمی مختلفی پیش‌بینی و مشاهده شده است.

هسته‌های خاکی نادر با $A\sim ۱۶۰$ که دارای تعداد محدودی از پروتون‌ها و نوترون‌ها خارج پوسته‌های بسته پروتونی $Z=۶۴$ و نوترونی $N=۸۲$ هستند، در یک منطقه گذار قرار دارند. اکثریت این هسته‌ها در حالت پایه‌شان، شکل کشیده[۲] و رفتار تجمعی دارند. با افزایش اسپین، رفتار تجمعی برخی از آن‌ها تغییر کرده و در محدوده اسپینی ۵۰- I=۳۰ به شکل پخت[۳] با رفتار غیرتجمعی تغییر وضعیت می‌دهند. این گذار شکل، همان پایان‌پذیری است [۶و۷].

گذارشکل در این ناحیه جرمی اغلب هنگامی اتفاق می‌افتد که پایین‌ترین حالت‌های تجمعی (با یک تغییرشکل نرمال) در یک هسته با افزایش اسپین تعدادی از کراسینگ‌های نواری را تجربه می‌کنند به گونه‌ای که آخرین نوار یک تغییرشکل نزدیک به $\gamma=۶۰^\circ$ (پارامتر تغییرشکل چهارقطبی غیرمحوری) و $\varepsilon_۲=۰/۱۲$ (پارامتر تغییرشکل چهارقطبی محوری) دارد. تحقیق درباره‌ی این گذار تدریجی از رفتار جمعی به غیرجمعی به مطالعه نوارهای دورانی در یک محدوده اسپینی وسیع مربوط می‌شود [۸].

تعداد روش‌های نظری که می‌تواند برای مطالعه نوارهای پایان‌پذیر در هسته‌های با جرم متوسط و سنگین استفاده شود، بسیار محدود است. حداقل در حال حاضر، محاسبات با یک مدل پوسته کروی معمولی برای چنین هسته‌هایی غیرممکن است. روش هارتری-فاک کرنک‌شده بر مبنای نیروهای اسکریم یا گوگنی، نظریه میدان میانگین نسبیتی کرنک‌شده و روش پیکربندی وابسته به نیلسون -استروتینسکی کرنک‌شده بر پایه پتانسیل نیلسون کرنک شده از جمله روش‌های نظری هستند که در بررسی این پدیده بکارگرفته شده‌اند. اما در این میان روش "پیکربندی وابسته به نیلسون-استروتینسکی کرنک شده "بر مبنای پتانسیل نیلسون کرنک شده موفق‌ترین و پرکاربردترین روش است [۲].

هسته اربیوم از مشهورترین هسته‌ها در ناحیه جرمی A~۱۶۰ است. در کار حاضر با استفاده از روش "پیکربندی وابسته به نیلسون-استروتینسکی کرنک شده" به بررسی رقابت حالت‌های تجمعی و غیرتجمعی برای ایرست شدن یعنی تغییر رفتار در مسیر خط ایرست، برای ایزوتوپ‌های $^{۱۵۶-۱۶۰}Er$ می‌پردازیم.

۲.روش کار

همانطور که در بخش قبل اشاره کردیم، در تحقیقات اصولی برای توصیف هسته‌های دورانی در تکانه های زاویه‌ای بالا و بطور خاص "نوارهای دورانی پایان‌پذیر"، روش نظری با عنوان «پیکربندی وابسته به نیلسون-استروتینسکی کرنک‌شده

---

[۲] Prolate

[۳] Oblate

(CNS)» از دیرباز تاکنون یک روش بسیارموفق بوده است. در واقع این مدل توصیف مکانیک کوانتومی هسته با استفاده از یک پتانسیل پدیده شناختی، پتانسیل نیلسون، است که با توصیف ماکروسکوپی بوسیله مدل قطره مایع همراه شده است. بدلیل ترکیب این دو مدل، گاهی از مدل CNS به عنوان یک روش میکروسکوپی-ماکروسکوپی یاد می‌شود [۲و۹]. در این مدل میدان هسته‌ای با سرعت زاویه‌ای ثابت ω حول یک محور اصلی، معمولا محور x، دوران می‌کند و هامیلتونی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H^{\omega} = H^{o} - \omega j_x = \sum_{iocc} h_i^{\omega} \qquad (۱)$$

$$h^{\omega} = h - \omega j_x \qquad (۲)$$

که در روابط بالا، H^{ω}: هامیلتونی در سیستم دورانی، H^{o}: هامیلتونی کل در سیستم آزمایشگاه (هامیلتونی نیلسون با پارامترهای κ و μ)، j_x: مولفه x تکانه زاویه‌ای تک ذره‌ای، H^{ω}: هامیلتونی تک ذره در سیستم دورانی، h: هامیلتونی تک ذره در سیستم آزمایشگاه را نشان می‌دهند. با حل هامیلتونی تک ذره کرنک شده برای پتانسیل نوسانگر هماهنگ، انرژی‌های تک ذره حاصل می‌شود، اما محاسباتی که شامل جمع روی اربیتال‌های تک ذره‌ای بدست‌آمده از پتانسیل‌های پدیده‌شناختی، مانند نیلسون یا وودساکسون، تقریب‌های نامناسبی از خواص میانگین هسته‌ای و تغییر شکل‌های وابسته به آن‌ها و انرژی کل را حاصل می‌کند. به منظور غلبه بر این مشکلات انرژی‌های کل با رفتار قطره مایع دورانی بهنجار می‌شوند. در این روش انرژی کل هسته در یک تغییر شکل خاص و در یک اسپین خاص به صورت مجموع انرژی قطره مایع دورانی و انرژی پوسته‌ای مشخص می شود.

$$E_{tot} = E_{macro} + E_{shell} \qquad (۳)$$

که در آن، انرژی ماکروسکوپی با استفاده از رابطه قطره مایع لوبلین-استرابورگ (LSD) [۱۰، ۱۱] محاسبه می‌شود:

$$E_{macro} = b_{surf}\,(1 - k_{surf} I^2) A^{\frac{2}{3}}\, B_{surf}(\varepsilon_2, \gamma, \varepsilon_4) + b_{cur}\,(1 - k_{cur} I^2) A^{\frac{1}{3}}\, B_{cur}(\varepsilon_2, \gamma, \varepsilon_4) + \frac{3}{5}\,\frac{e^2 Z^2}{4\pi\varepsilon_0 r_0 A^{1/3}}\, B_{coul}(\varepsilon_2, \gamma, \varepsilon_4) \qquad (۴)$$

و انرژی پوسته‌ای از اختلاف بین جمع‌های گسسته و پیوسته انرژی‌های تک-ذره روی حالت‌های اشغال شده بدست می‌آید:

$$E_{shell} = \sum_i e_i(\omega, def) - \sum_i \tilde{e}_i(\omega, def) \qquad (۵)$$

که در آن جمع پیوسته (با نماد ~) با استفاده از روش استروتینسکی محاسبه می‌شود.

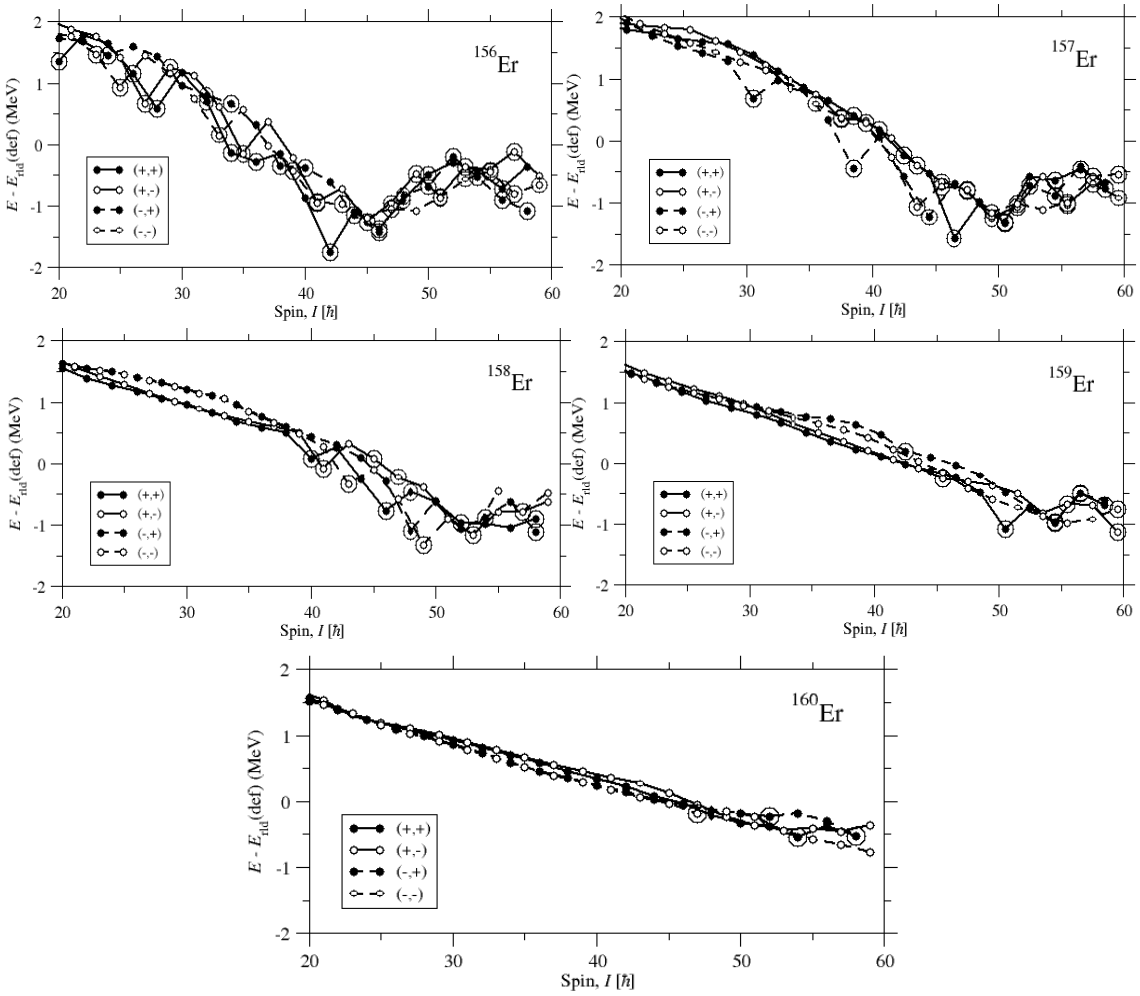
پاریته و علامت دو عدد کوانتومی خوب در این مدل هستند و برچسب‌زنی ترازهای انرژی تک‌ذره با آن‌ها صورت می‌گیرد [۲و۳]. در روش CNS اربیتال‌ها درون هر پوسته N، به اربیتال‌های j -بالا و j -پایین گروه‌بندی می‌شوند. اربیتال-های j -بالا از سایر اربیتال‌های همان پوسته، که می‌توانند با آنها برهم کنش داشته باشند، نسبتا دور هستند. بقیه اربیتال‌های باقی مانده در پوسته N با نام j -پایین برچسب‌گذاری می‌شوند [۲].

۳. نتایج

نمودارهای انرژی‌های برانگیختگی نوارهای دورانی برحسب اسپین به کرات در توصیف خواص هسته‌های دورانی استفاده می‌شوند. هرچند بدلیل اینکه اصولا چند نوار دورانی در مجاورت خط ایرست وجود دارند و ممکن است نمودارشان بهم نزدیک یا روی هم بیافتد، چنین نمودارهایی اطلاعات کمی را ارائه می‌دهند. یک روش حساس‌تر و دقیق‌تر، تفریق یک مرجع دوران صلب میانگین است. این نمودار که با عنوان $E(I) - E_{RLD}(I)$ مشهور است، اطلاعات قابل توجه و

جزئی‌تری از نوارهای دورانی ارائه می‌دهد. به دلیل چشم‌پوشی از اثرات جفت‌شدگی، محاسبات می‌تواند برای اسپین‌های بالای I~ ۲۰ħ واقع‌بینانه در نظر گرفته شود [۲].

نمودار چهار پیکربندی ایرست را برای ایزوتوپ‌های $^{۱۵۶-۱۶۰}Er$ در شکل ۱ رسم کرده‌ایم. حالت‌ها به صورت ترکیب‌های مختلف از دو عدد کوانتومی پاریته و علامت (π,α) جداسازی و دسته‌بندی می‌شوند. حالت‌های کاملا همراستا شده یا نزدیک همراستایی کامل دورشان دایره گرفته شده است. با استفاده از این نمودارها می‌توان پایین‌ترین حالت‌های جمعی و غیرجمعی در این ایزوتوپ‌ها و نیز اثر افزایش اسپین بر مطلوب‌ترین حالت‌ها به لحاظ انرژی را استخراج و تفسیر نمود.



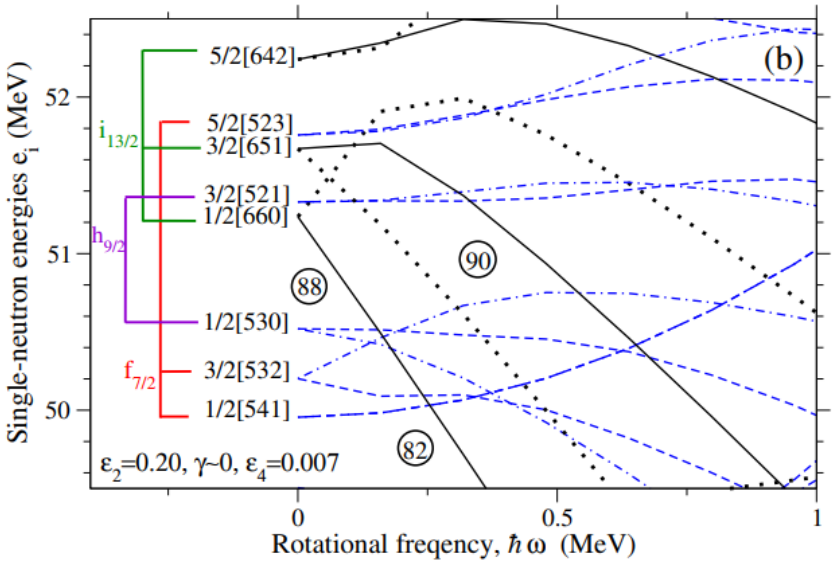
شکل ۱. چهار نوار ایرست برای ایزوتوپ‌های $^{۱۵۶-۱۶۰}Er$.

اگرچه حضور حالت‌های همراستا شده در نوارهای ایرست همه این ایزوتوپ‌ها دیده می‌شوند، اما مقادیر اسپینی که این حالت‌ها ایرست می‌شوند برای ایزوتوپ‌های مختلف متفاوتند. در ایزوتوپ سبک‌تر ^{۱۵۶}Er، حضور این حالت‌ها را در پایین‌ترین انرژی‌های برانگیختگی و از اسپین‌های پایین شاهد هستیم. رفتار نامنظم و حالت‌های همراستاشده فراوان، قرارگرفتن پیکربندی‌های پایان‌پذیر در مسیر خط ایرست را توصیف می‌کنند. اما با سنگین‌ترشدن ایزوتوپ‌ها، کاهش تعدد حالت‌های همراستا شده و نیز پدیدار شدن این حالت‌ها، از مقادیر اسپین بالاتر در خطوط ایرست به چشم می‌خورد. به گونه‌ای که در ایزوتوپ سنگین‌تر ^{۱۶۰}Er حالت‌های همراستاشده تنها در اسپین‌های خیلی بالا دیده می‌شوند. بنابراین بطور کلی می‌توان گفت در این ایزوتوپ‌ها یک تغییر رفتار تدریجی با شروع از یک ایزوتوپ سبک ^{۱۵۶}Er، که دارای رفتار نامنظم و حالت‌های همراستاشده فراوان در اسپین پایین است، تا یک ایزوتوپ سنگین ^{۱۶۰}Er، که تا اسپین $۵۰\hbar$ با

رفتاری منظم (تجمعی) باقی می‌ماند، وجود دارد. به علاوه، با افزایش تعداد نوترون خارج پوسته $N = ۸۲$ مقدار اسپین پایان‌پذیری نیز افزایش می‌یابد به نحوی که رخداد پایان‌پذیری در ایزوتوپ ^{۱۶۰}Er، در $I > ۵۰$ پیشنهاد می‌شود. به لحاظ تجربی اگرچه مشاهدات این هسته در سال ۱۹۹۹ [۱۲] تا حالت ۵۴^{+} توسعه یافته، اما داده‌های تجربی در سال ۲۰۱۱ [۱۳] تنها تا حالت ۴۸^{+} با نتایج قبلی توافق دارد و سه گذار آخر تا ۵۴^{+} را تایید نمی‌کند. این عدم توافق می‌تواند به‌واسطه رقابت شدید حالت‌های کشیده تجمعی و پخت غیرتجمعی در $I \sim ۵۰$ و بالاتر از آن باشد.

حالت‌های غیرتجمعی تک-ذره (پایان‌پذیر) مشاهده شده در نوارهای تجربی این ایزوتوپ‌ها با آنچه در محاسبات حاضر پیش‌بینی شده، همخوانی خوبی دارند. از میان آن‌ها می‌توان به مشاهده حالت‌های پایان‌پذیر ۴۲^{+} در ^{۱۵۶}Er [۱۴]، $\frac{۹۳}{۲}^{+}$ در ^{۱۵۷}Er [۱۵]، ۴۶^{+} در ^{۱۵۸}Er [۱۶] و $\frac{۱۰۱}{۲}^{+}$ در ^{۱۵۹}Er [۱۷] اشاره نمود.

علت این تغییر رفتار هنگام سنگین‌تر شدن ایزوتوپ‌ها، را می‌توان با استفاده از نحوه پرشدن اربیتال‌ها توجیه کرد. برای هسته‌های خاکی نادر با A~۱۶۰، سطح فرمی پروتونی و نوترونی بالای گپ پوسته‌ای Z=۶۴ و N=۸۲ قراردارد. اربیتال‌های نزدیک سطح فرمی نوترونی $i_{13/2}$ و $(h_{9/2}f_{7/2})$ هستند که بترتیب اربیتال j-بالا و j-پایین نوترونی نامیده می‌شوند و در شکل ۲ مشخص شده‌اند. با افزایش فرکانس، اثرات نیروی کوریولیس و کاهش جفت شدگی بین نوکلئون‌ها باعث می‌شود که اربیتال‌های j-بالا با شیب زیادی پایین می‌آیند. تغییر تعداد نوکلئون در این اربیتال‌ها، باعث می‌شود پیکربندی‌های (چینش نوکلئونی) پایان‌پذیر در انرژی‌های پایین‌تر قرار گرفته و ایرست شوند. نتایج پژوهش اخیر ما [۱۸] نشان داد که از شروط مهم مشاهده پایان‌پذیری در مسیر ایرست این است که این اربیتال j-بالا کمتر از نیمه پر باشد. از طرف دیگر به نظر می‌رسد تعداد نوکلئون‌های خارج پوسته بسته در یک هسته برای رخداد پایان‌پذیری(گذار از رفتار تجمعی به غیرتجمعی)، حدود ۱۰ الی ۱۲ ذره باید باشد.



شکل۲. انرژی های تک ذره نوترونی برحسب فرکانس دوران

۴. بحث و نتیجه گیری

محاسبات ما نشان می‌دهد که در ایزوتوپ‌های اربیوم ۱۵۶ تا ۱۶۰، پیکربندی‌های تجمعی و غیرتجمعی برای ایرست شدن با هم رقابت می‌کنند. به گونه‌ای که با افزایش نوترون، حالت‌های غیرتجمعی در اسپین‌های بالاتری ایرست می‌شوند. در ایزوتوپ سبک‌تر ^{۱۵۶}Er، حضور این حالت‌ها را در پایین‌ترین انرژی‌های برانگیختگی و از اسپین‌های پایین شاهد

هستیم در حالی که با سنگین‌ترشدن ایزوتوپ‌ها، کاهش تعدد حالت‌های همراستا شده و نیز پدیدار شدن این حالت‌ها، از مقادیر اسپین بالاتر در خطوط ایرست به چشم می‌خورد. این رخداد را می‌توان نتیجه تغییر چینش نوکلئون‌ها در اربیتال‌های j-بالای نزدیک سطح فرمی و نیز تعداد نوکلئون‌های خارج پوسته بسته (حدود ۱۰ الی ۱۲ ذره برای ناحیه جرمی ۱۶۰~A) دانست.

۵. مراجع

1. Bohr and B. R. Mottelson, *Nuclear Structure* (W. A. Benjamin Inc., New York, 1975), Vol. II.
2. A. Afanasjev et al., *Termination of rotational bands: disappearance of quantum many-body collectivity*, Physics reports 322, 1 (1999).
3. I. Ragnarsson, and S.G. Nilsson, *Shapes and shells in nuclear structure*, Cambridge university press (2005).
4. P. Banerjee, *A brief review of intruder rotational bands and magnetic rotation in the A= 110 mass region*, Physica Scripta 93, 054001 (2018).
5. A. Afanasjev and I. Ragnarsson, *Gradual loss of collectivity in rotational bands in the A∼110 (Z⩾50, N∼60) mass region*, Nucl. Phys. A 591, 387 (1995).
6. Bengtsson, T. and Ragnarsson, I., ”*Shape Changes, Band Crossings and Band Terminations in the Very High Spin Region of A= 150-160 Nuclei*.” Phys. Scr. T5, 165 (1983).
7. E.S. Paul et al., *Recent results at ultrahigh spin: Terminating states and beyond in mass 160 rare-earth nuclei*, Acta Phys. Polon. B 46, 487 (2015).
8. Byrski, T., et al., ”*Search for correlations between prolate-shape collective and oblate-shape non-collective nuclear rotation: High-spin states in* ^{159,160}*Yb*.” Nucl. Phys. A 474, 193-218. (1987).
9. B. Gillis Carlsson, *Models for rotating nuclei-Cranking and rotor+particles coupling*, Ph. D. thesis, Lund University, (2007).
10. Pomorski, K. and Dudek, J., ”*Nuclear liquid-drop model and surfacecurvature effects*.” Phys. Rev. C 67, 044316 (2003)..
11. Carlsson, B. G. and Ragnarsson, I., ”*Calculations of nuclear masses at finite angular momenta*.” Phys. Scr. T125, 130 (2006).
12. Kondev, F. G., et al., ”*Exploring the I= 50-60 ℏ domain: collective and terminating structures in* ^{156}*Dy,* ^{159}*Er and* ^{160}*Er*.” Journal of Phys. G: Nuclear and Particle Physics 25, 897 (1999).
13. Ollier, J., et al., ”*Structure changes in* 160*Er from low to ultrahigh spin*.” Phys. Rev. C 83, 044309 (2011).
14. Paul, E. S., et al., ”*Loss of collectivity in the transitional* ^{156}*Er nucleus at high spin*.” Phys. Rev. C 79, 044324 (2009).
15. Evans, A. O., et al. ”*High-spin structure in* ^{157} *Er up to and above band termination*.” Phys. Rev. C 73, 064303 (2006).
16. Simpson, J., et al., ”*Single particle excitations and properties of multiple band terminations near spin 50 ℏ in* ^{158}*Er*.” Phys. Lett. B 327, 187 (1994).
17. Mustafa, M., et al., ”*Diverse collective excitations in* ^{159}*Er up to high spin*.” Phys. Rev. C 84, 054320 (2011).
18. Shayestefar, M., and A. Kardan. ”*Gradual loss of collectivity in rotational bands in N= 89 isotones.* ” Europhysics Letters 135, 32001 (2021).