



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مطالعه تجربی ساختار هسته اتمی اربوم ^{156}Er با استفاده از روش مطالعه ساختار هسته ای در

اسپین بالا^۱ P. Nolan و E. Paul^۲

مسعود اکملی^۱

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

Department of Physics, University of Liverpool, United Kingdom^۲

چکیده:

با استفاده از روش نوین مطالعه هسته ای در اسپین بالا که توسط برهمکنش تبخیر جوش هسته ای^۱ میسر میشود، هسته اتمی اربوم ^{156}Er که جز عناصر کمیاب زمینی میباشد مورد مطالعه قرار گرفته است [1]. در ترازهای بالای تکانه زاویه ای (اسپین) اربوم ^{156}Er تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز اثر کوریولیسی از شکل دفرمه (پرولیت)^۲ در تراز چرخشی جمعی به شکل دفرمه (آبلیت)^۳ مبتنی بر چرخش تک ذرات هسته ای میباشد تغییر شکل میدهد. تعدادی گامای جدیدی با انرژی بالا ورودی به تراز نهایی برای اولین بار شناسایی شده اند که بر اساس محاسبات تئوریک [2] حاصل از ترازهایی مبتنی بر شکسته شدن هسته داخلی با تحریک یک پروتون - یک چاله و دو پروتون-دو چاله^۴ در سطح شکاف موجود ($\pi(d5/2/g7/2 \rightarrow d3/2)$) در $Z=64$ میباشد.

Abstract:

The high spin structures of rare-earth nuclei ^{156}Er have been studied using the fusion evaporation reactions[1]. At the highest values of angular momentum ^{156}Er undergoes a Coriolis-induced shape transition from a deformed (prolate) state of collective rotation to a non-collective(oblate) configurations. Several weak high energy Gamma rays have been newly identified feeding the terminating state in ^{156}Er . The high-lying levels from which these Gamma-rays arise are predicted [2] to present weakly deformed core-breaking configurations involving energetically expensive 1-particle 1-hole and 2-particle 2 hole proton excitations across the spherical $Z=64$, ($\pi(d5/2/g7/2 \rightarrow d3/2)$) shell gap.

کلید واژه ها: فیزیک هسته ای. ساختار هسته ای. نو کلیونیک. برهم کنش هسته ای. اسپین بالا

۱. مقدمه:

رشد چشمگیر اخیر در حوزه شتابگرهای یونهای سنگین و سیستم‌های آشکارسازی پرتوهای گاما باعث فراهم آمدن موقعیتی مناسب جهت مطالعه ساختار هسته ای در ترازهای با تکانه زاویه ای (اسپین) بالا شده است. در آزمایش انجام شده و مورد مطالعه در این مقاله به مطالعه ساختار ترازهای انرژی هسته اتمی اربوم ^{156}Er در مکانی از جدول ایزوتوپی که به آن عناصر دورانی (دفرومه) اطلاق می‌شود پرداخته است. ساختارهای شناسایی شده قبلی

^۱ - Fusion Evaporation Reaction
^۲ - Prolate
^۳ - Oblate

^۴ - Particle-hole Excitation



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

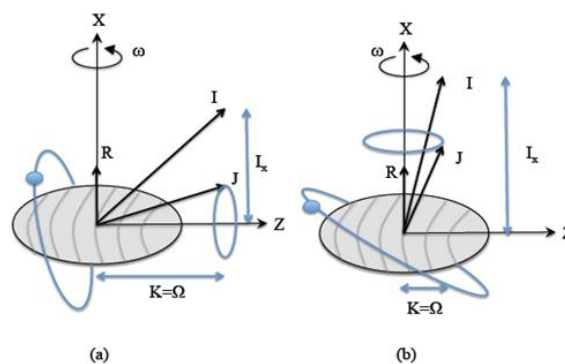
در اربوم ۱۵۶ نیز مطالعه و بازبینی مجدد قرار گرفته‌اند [8] و تعدادی پرتو های گامای جدیدی برای اولین بار مشاهده و شناسایی شده‌اند که به تراز نهایی ساختار چرخشی تراکنش میکنند. نتایج تجربی بدست آمده [1] در قالب مدل لایه‌ای چرخشی هسته ای مورد تفسیر و فهم قرار گرفته شده اند .

۲. مدل هسته ای:

دهه های گذشته شاهد رشد سریع در پیشرفت های چشمگیری در مدل های هسته ای و در نتیجه پیشرفت در دانش بشری در خصوص ساختار هسته ای شده است [6][5][4][3][2]. جهت تشریح حالت و رفتار (ساختار) هسته اتمی در ترازهای اسپین وانرژی بالا مدل لایه ای چرخشی^۱ بکار گرفته میشود (شکل شماره ۱). در این مدل چرخش هسته اتمی حول محور X که عمود بر محور تقارن هسته اتمی میباشد برای اولین بار توسط D.R Inglis در سال ۱۹۵۴ [12] مطرح گردید و توسط Bengtsson و Frauendorf در سال ۱۹۷۹ [13] گسترده گردید. مدل لایه ای چرخشی هر ذره نوکلون را به طور مستقل و مجزا تصور و تاثیر چرخش را بر روی ترازهای انرژی نیلسونی (مدل نیلسونی [4]) محاسبه میکند. لذا همیلتونیان^۰ چرخشی H_{ω} طبق رابطه زیر که مجموع همیلتونیان های تک ذرات متشکل هسته است محاسبه میشود:

$$(^1) H_{int} - \hbar\omega I_x = H_{\omega}$$

که در رابطه فوق H_{ω} و $\hbar\omega I_x$ به ترتیب همیلتونیان ذاتی تک ذره و میزان مشارکت نیروهای گریز از مرکز و اثر کوریولیزی (که بر روی ساختار هسته در حال چرخشی تاثیر میگذارند) میباشد.

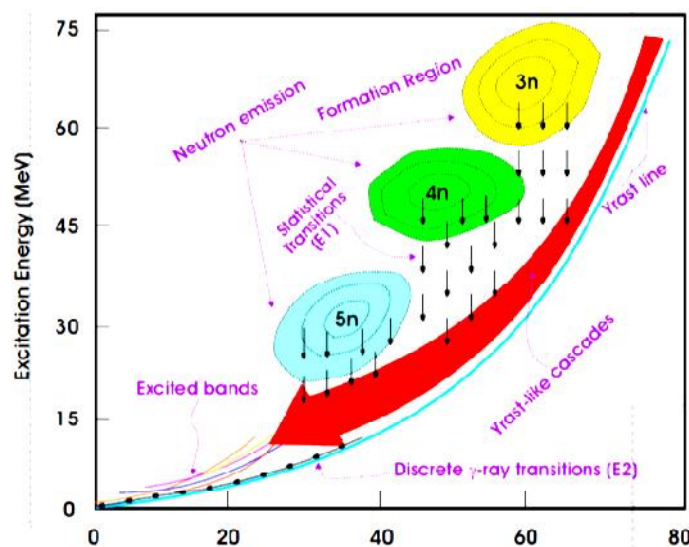


شکل ۱: نمایی از چرخش نوکلئونی و جفت شدن حرکت آنها: (a) نمای همراستا شدن با دفورماسیون (محور تقارن - در اسپین پایین) و (b) نمای هم راستا شدن با چرخش (محو چرخشی - در تراز های اسپین بالاتر)

^۰ - Hamiltonian

۳. جزئیات آزمایش:

برهمکنش‌های همجوشی تبخیری یون‌های سنگین یکی از مناسبترین و کارا ترین روش‌های انتقال بیشینه انرژی و تکانه زاویه‌ای با سطح مقطع مناسب است. طی فرآیند برهم‌کنش ذکر شده هسته پرتابه برخوردی با هسته هدف همجوشی کرده و تشکیل یک هسته مرکب (پس از عبور از سد کولمبی موجود) را میدهد. هسته مرکب ایجاد شده در موقعیتی با انرژی و اسپین بالا پس از مدت زمان کوتاهی (حدود 10^{-9} ثانیه) به واپاشی ذرات و پس از گذر از حد انرژی معینی به گسیل پرتوهای گاما می‌کند. شکل شماره ۲.



شکل ۲: نمایش فازهای آخرین حاصل از برهم‌کنش همجوشی تبخیری یون‌های سنگین شامل: گسیل گاماها یا آماری (و خنک‌شدن هسته).

آبشارهای گسیل‌های جمعی (کند کردن چرخش‌ها و پهن‌شدن) و گسیل‌های مقطعی ما بین ترازهای پایین‌تر و نزدیک‌تر از آنها بر سر تک‌هسته‌ها مشاهده می‌شود.

از آنجاییکه تشعشع یک پرتو گاما حاصل تقریبی تفاوت انرژی دو تراز انرژی هسته‌ای می‌باشد، گسیل تشعشعات الکترومغناطیس (و یا پرتوهای گاما) می‌توانند بیانگر بسیاری از مشخصات و جزئیات ترازهای ابتدایی و ترازهای انتهایی این گسیل باشند. ساختار هسته اتمی اریوم ۱۵۶ در اسپین‌های بالا با استفاده از آرایه آشکارساز جرمانیوم گاماسفیر [10] و با برهم‌کنش $^{114}\text{Cd}(^{48}\text{Ca}, 6n)$ با انرژی ۲۱۵ مگا الکترون ولت (MeV) مورد مطالعه قرار گرفته است. باریکه ۲۱۵ مگا الکترون ولتی کلسیم ۴۸ توسط سیکلوترون ۴۸ اینچی آزمایشگاه لارنس برکلی آمریکا به هسته هدف که شامل دو هدف نازک به هم‌چسبیده به قطر کلی ۱.۱ میلی گرم بر سانتی متر مربع (mg/cm^2) می‌باشد تابیده شده است. جهت شناسایی و آشکارسازی پرتوهای گامای خروجی بر مبنای ضبط بر اساس هم‌رویدادی گاماها [7] نیز از آرایه آشکارسازی گاماسفیر^۸ که شامل ۱۰۲ آشکارساز فوق خالص جرمانیوم

^۶-48-inch Cyclotron, Berkeley Lawrence National Lab, USA

^۷- Coincidence

^۸- Gammasphere Ge Array



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

(^{67}Ge) استفاده شده است. بر اساس شروط از قبل تعریف شده در سیستم دریافت داده هابطوریکه که حد اقل ۷ آشکارساز جرمانیوم بصورت همزمان ضبط رویداد کرده باشند باشند ($n \geq 7, \gamma^n$) تعداد $2.1 * 10^9$ رویداد ضبط شده است. این تعداد رویداد ضبط شده سپس با استفاده از کد ردور^۹ [9] به ماتریسی 4×4 مختصاتی از داده ها با همرویدادی ۴ تایی جهت ایجاد و ساخت ترازهای انرژی بالا تبدیل شده است. جهت مطالعه و بازیابی مشخصات و جزییات گاماها گسیل شده از ترازها (بندها) ی ایجاد شده در برهمکنش هم جوشی تبخیری از قوانین بقای انرژی و قوانین انتخابی الکترومغناطیس استفاده میشود. لذا مشخصات تراز های هسته ای از قبیل انرژی تراز تحریک شده، تکانه زاویه ای (اسپین) و پارامتر قابل دریافت میباشند. همچنین جهت ایجاد ساختار ترازها (بند های) هسته ای نیز از تکنیک هایی از قبیل همرویدادی^۲ و DCO^5 استفاده شده است. همانطور که در شکل شماره ۲ به صورت شماتیک نشان داده شده است، پس از بر همکنش هسته ای و ایجاد هسته مرکب، آبخاری از گاما با انرژی متفاوت از هسته حاصله از هسته مرکب (پس از گسیل ذرات) ساطع میشود که با استفاده از تکنیک هم رویدادی میتوان در مدت زمان معین و تعریف شده قبلی یک مجموعه کامل این آبخار را شناسایی و با توجه با شدت گامای دیده شده و استفاده از ماتریس ۴ وجهی به ایجاد ساختارهای بند و ترازهای انرژی در لایه های بالای هسته ای پرداخت. با استفاده از تکنیک DCO^{10} نیز با توجه به اینکه هسته مرکب خروجی دارای موقعیتی عمود بر محور باریکه میباشد گسیل تشعشعات گاما دارای توزیع زاویه ای به نسبت محور باریکه میباشد میتوان تک قطبی بودن و یا دو قطبی بودن گاما ها را مشخص نمود. [1]

^۹ - Radware

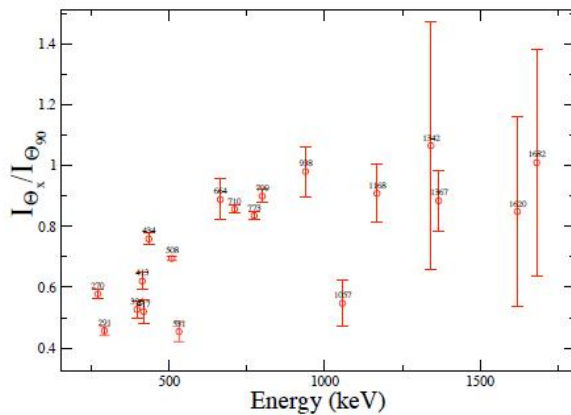
^{۱۰} - Directional Correlation from Oriented Nuclei



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مقادیر اندازه گیری شده مشخصات پرتو های گاما که در نمودار شماره ۳ رسم شده اند: جدول 1



E_γ (keV)	R	Multipolarity	$I_i \rightarrow I_f$	Band
1057	0.54(0.08)	M1	$43^+ \rightarrow 42^+$	$\rightarrow 1$
1345	1.06(0.40)	E2	$44^+ \rightarrow 42^+$	$\rightarrow 1$
1620	0.84(0.31)	E2	$44^+ \rightarrow 42^+$	$\rightarrow 1$
1685	1.01(0.37)	E2	$44^+ \rightarrow 42^+$	$\rightarrow 1$
291	0.46(0.02)	E1	$11^- \rightarrow 10^+$	$2 \rightarrow 1$
270	0.58(0.02)	E1	$10^- \rightarrow 10^+$	$3 \rightarrow 1$
413	0.52(0.04)	M1	$10^- \rightarrow 9^-$	$3 \rightarrow 2$
531	0.45(0.03)	E1	$9^- \rightarrow 8^-$	$2 \rightarrow 1$
509	0.68(0.01)	E2	$13^- \rightarrow 11^-$	2
664	0.89(0.07)	E2	$40^+ \rightarrow 38^+$	1
710	0.86(0.01)	E2	$20^+ \rightarrow 18^+$	1
938	0.98(0.08)	E2	$36^+ \rightarrow 34^+$	1
1168	0.90(0.09)	E2	$38^+ \rightarrow 36^+$	1

شکل 3: مقادیر اندازه گیری شده در روش DCO جهت اطمینان از نتایج تعدادی از گسیل های قبلی که در مطالعات قبلی دوقطبی و یا چهار قطبی بودن آنها محاسبه شده ان نیز به گاما ها اضافه شده اند.

ع. نتایج:

با استفاده از تکنیک های ذکر شده ساختار ترازهای هسته ای برای هسته های اربوم ۱۵۶ تا انرژی و اسپین های بالا گسترده شده اند. با قراردادن شروط هم رویدادی بر روی ۳ وجه از ماتریس ۴ وجهی ایجاد شده میتوان وجه چهارم و یا گامای هم رویداد با گاما های دیگر را دید و درون ساختار بند قرار داد. همچنین همانطور که آبخار گسیلی از ترازهای بالای به سمت ترازهای انرژی پایین فرود میآیند مسلماً شدت گاما های تراز های پایینی نسبت به ترازهای بالاتر بیشتر است و این خود نیز میتواند به عنوان یکی دیگر از مولفه های ایجاد ساختارهای ترازهای هسته ای مورد استفاده قرارگیرد. در شکل شماره 6 و جدول شماره ۱ نمونه ای از طیفهای شناسایی شده در آزمایش اربوم ۱۵۶ و مشخصات پرتو های شناسایی شده نشان داده شده اند. ساختار هسته ای ترازهای انرژی (بند) مربوط به هسته اربوم ۱۵۶ مورد مطالعه نیز در شکل ۸ نشان داده شده اند.

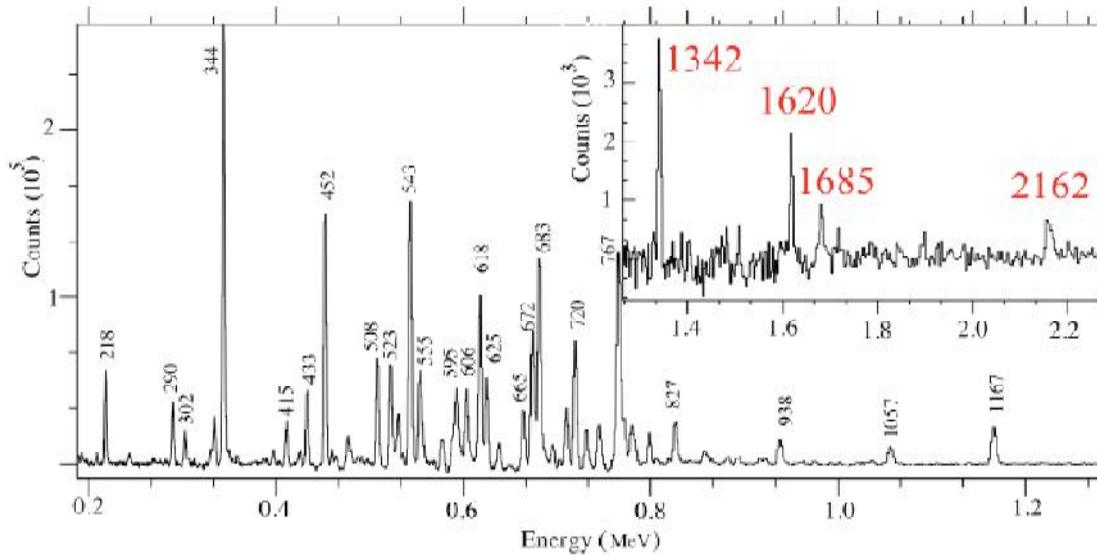
E_γ (keV)	I_γ (%)	R	Multipolarity	$I_i \rightarrow I_f$	Band
1057	14.3	0.54(0.08)	M1	$43^+ \rightarrow 42^+$	$\rightarrow 1$

جدول ۲: مشخصات اندازه گیری شده پرتو های گاما شناسایی شده بعد از تراز ۴۲+

1082	2.1	1.01(0.37)	E2	$(44^+) \rightarrow (42^+)$	$\rightarrow 1$
2162	1.9	—	E2	$44^+ \rightarrow 42^+$	$\rightarrow 1$



بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران



بن مطالعه

هس

ته

عنا

صر

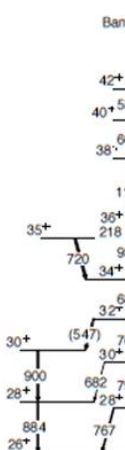
کمیا

ب

زمینی

لا تر ۴۲+

از جمله اربوم که در حالت پایه به شکل پرولیت^{۱۱} هستند میتوانند تکانه زاویه ای (اسپین) مورد نیاز هسته را در ترازهای انرژی پایینی به وسیله حرکت های چرخشی دسته جمعی ایجاد کنند. هرچند پس از شکستن تعدادی از جفت های ذره ای (بر اثر نیروی گریز از مرکز و اثر کرولیوسی) و مطابقت اسپین های آنها با محور حرکت چرخشی هسته اتم شکل هسته از پرولیت (در وضعیت حرکت جمعی) به شکل آبلیت^{۱۲} (در وضعیت حرکت تک ذره ای-منفرد) تغییر شکل پیدا میکند. این ناپدید شدن حرکت جمعی در اسپین ۳۰ اتفاق می افتد که که میتوان از نتیجه عبور ساختار اسپین پایین تر هسته بر روی ساختاری دیگر که حرکت جمعی نسبی کمتری دارد باشد که به عنوان بند کراسینگ^{۱۳} معروف است میباشد که در نهایت منجر به ناپدید کلی ساختار یا بند میشود.



^{۱۱}-Prolate

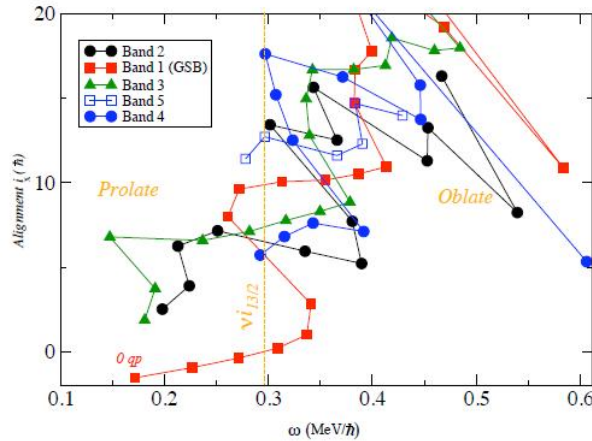
^{۱۲}-Oblate

^{۱۳}- Band Crossing



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۲: همراستایی (i_x Alignment) و عبور بندی $i_{13/2}$ نوترونی. $\hbar\omega = \Delta E / \Delta I$

هسته اریبوم ۱۵۶ را میتوان به صورت یک هسته شامل هسته اصلی شامل هسته گادولینیوم ^{146}Gd (که ۱۰ ذره پروتون و نوترون دارد) و کروی است و به علاوه ذرات والانس اطراف آن (شبه به اتمی) که شامل ۱۰ ذره پروتون و نوترون است. بر اثر تطابق اسپین های ذرات موجود در والانس مجموعه مورد نظر (شکسته شدن جفت ذرات بر اثر نیروی گریز از مرکز) و تطابق محور اسپین آنها با محور چرخش هسته، هسته مورد نظر انرژی کافی جهت رسیدن به تراز با انرژی 42^+ با ساختار $\pi [(h11/2)^4] \otimes [(f7/2)^2 (h9/2)^2 (i13/2)^2]$ را دارد. لذا جهت ایجاد تراز بالاتر از تراز مورد نظر (تراز نهایی 42^+) هسته نیاز به تحریک ذره-چاله ایدارد. با استخراج انرژی دقیق پرتوهای گاما و تکانه زاویه ای (اسپین) هر یک از ترازهای ایجاد شده در ساختارهای شناسایی شده میتوان نمودارهای انرژی و اسپین (شکل شماره ۵) و اسپینوفراکانسز اوئیهای (شکل شماره ۴) را رسم و مدلهایماناسب با جمله مدل چرخشی لایه های [3] [2] تطابق داد. با توجه به شکل شماره ۵، که ترازهای نهایی دلخواه هسته (از نظر انرژی) چندبند در ترازهای بالاتر نشان داده شده اند گسیل های بعد از تراز نهایی دلخواه هسته مورد نظر نیز (و در این مطالعه برای اولین بار شناسایی شده اند) آورده شده اند. جهت مشخص کردن تک قطبی و یا چهار قطبی بودن گاماها با انرژی ۱۳۴۵، ۱۶۲۰، ۱۶۸۵، ۲۱۵۸ Kev. از روش DCO (شکل شماره ۳) استفاده شده است. بر طبق محاسبات نیلسون استراتیسکی که توسط پروفیسور اینگمار رگنرسون و تورد بنگستون [2] انجام شده است این مطالعه بیانگر این مطلب است که این گسیل این گاماها در نتیجه تحریک ذره-چاله 14^+ در شکاف لایه ای $Z=64$ میباشد. تراز 44^+ بخصوص که در این مطالعه دیده شده است در نتیجه تحریک یک ذره-یک چاله در شکاف لایه ای $Z=64$ $(\pi (d5/2/g7/2 \rightarrow d3/2))$ پروتون میباشد. بنابراین،

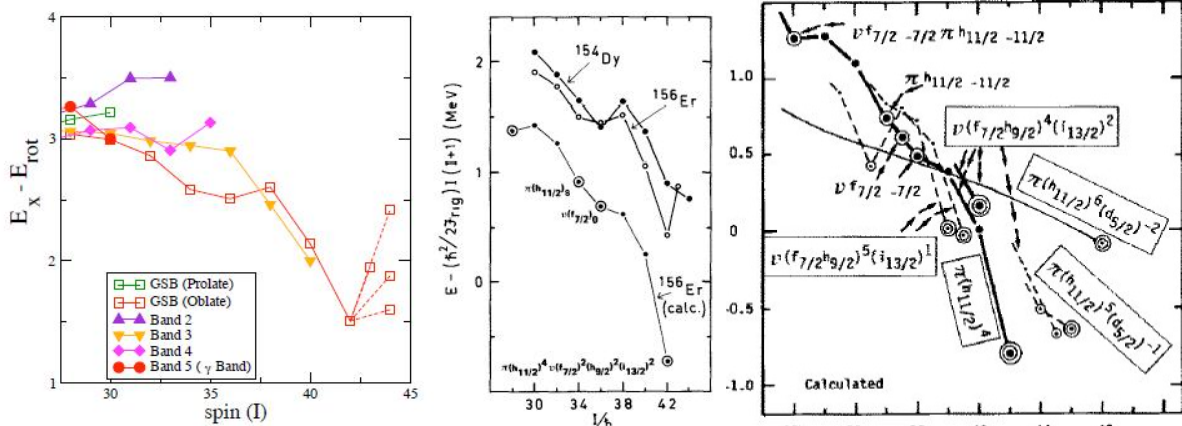
¹⁴ - Particle-Hole Excitation



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

طریق دلخواه مستهجنه تا ایجاد ترازهای انرژی اسپین $50-40 \hbar$ میتواند با ایجاد چاله در اوربیتال $d_{5/2}$ پایین تر از شکاف $Z=64$ و قراردادن ذره تحریک شده در اوربیتال $h_{11/2}$ میباشد ($\pi(d_{5/2} \rightarrow h_{11/2})$).



در این مطالعه و در سمت راست ترازهای محاسبه شده در اربوم ۱۵۶ همراه ترازهای اندازه گیری شده در اربوم ۱۵۴ و دیسپوزیم ۱۵۴ قابل مشاهده میباشد [8].

۵. نتیجه گیری:

مطالعه حاضر ترازهای انرژی اربوم ۱۵۶ را تا ترازهای نهایی و بالاتر از ترازهای نهایی مورد اندازه گیری و مطالعه قرار داده است. مشخصات و خصوصیات محاسبه شده ترازها و گسیل های گامای ورودی در مقایسه با محاسبات تئوری رفتارهای مختلفی از هسته اربوم در ترازهای انرژی بالاتر بخصوص بعد از تراز نهایی آشکار میسازد و مطالعات مشابهی در ایزوتوپ های ۱۵۷ و ۱۵۸ اربوم نیز بیانگر نتایج مشابه بوده اند که ترازهای انرژی بالاتر از تراز نهایی (در جتایی که هسته اتم انرژی کافی از تک ذرات والانس خود جهت ایجاد تراز با انرژی بالاتر ندارد) حاصل تحریک اچاله-یک ذره و ۲ چاله-۲ ذره پروتونی در میان شکاف کروی لایه ای $Z=64$ میباشد.

۶. مراجع:

- 1.M. Akmal. High-Spin Studies of ^{156}Er and ^{130}Ce . University of Liverpool, United Kingdom. PhD thesis, 2010
- 2.I. Ragnarsson and T. Bengtsson. Band Crossing and Band Terminations in Rapidly Rotating Nuclei. Nuclear Physics A, volume A447, Pages 251-256. 1985
3. A. Bohr and B.R. Mottelson. Nuclear Structure. W.A. Benjamin Inc, 1969
4. B. Nilsson. Nucl. Phys. A, volume 129, 445. 1969
5. V. M. Strutinsky. Nuclear Physics, volume A95 420. 1967
- 6.V. M. Strutinsky. Nuclear Physics, volume A122 1. 1968
7. G.F.Knoll. Radiation Detection and Measurement. John Wiley and Sons. 2000



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

8. F. C. Stephens, M. A. Deleplanque, and R. M. Diamond. Structure changes in ^{156}Er at high spin, *Physical Review Letters*, volume 54, 2584-2587. 1985
9. D. C. Radford. ESCL8R and LEVIT8R: Software for Interactive Graphical Analysis of HPGe Coincidence Data Sets. URL <http://radware.phy.ornl.gov/rw/escleve/escleve.html>
10. I. Y. Lee. *Nuclear Physics*, volume A520 641c. 1990.
11. B. Crowell M. P. Carpenter R. G. Henry R. V. F. Janssens T. L. Khoo T. Lauritsen and D. Nisius. Background Subtraction for High -Fold Gamma-Ray Coincidence Data. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, volume 355, 575-581. 1995
12. D. R. Inglis. Nuclear Moments of Inertia due to Nucleon Motion in a Rotating Well. *Physical Review*, volume 103:1786-1795. 1956.
13. R. Bengtsson and S. Frauendorf. An Interpretation of Backbending in Terms of the Crossing of the Ground State Band with an Aligned Two-Quasiparticle Band. *Nuclear Physics A*, volume 314, 27-36. 1979
14. H.W. Cranmer-Gordon. et al., *Nuclear Physics*. *Nuclear Physics*, volume A465 506-528. 1987.