

ظاهرة الأحناء الخلفي في نظائر السيريوم $^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية

مشتاق عبد داود الجبوري

ظاهرة الأحناء الخلفي في نظائر السيريوم $^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية

مشتاق عبد داود الجبوري

قسم الفيزياء, كلية التربية, جامعة الموصل

الخلاصة

تم في هذا البحث تطبيق نموذج البوزونات المتفاعلة IBM-1 التحديد O(6) لدراسة مستويات الطاقة للزخوم الدنيا والاحناء الخلفي في نظائر السيريوم $^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية، إذ رسمت مستويات الطاقة دالة لـ $J(J+1)$ وعزم القصور الذاتي دالة للطاقة الدورانية وقد أظهرت هذه الأشكال حدوث انحناء خلفي في هذه النظائر.

الكلمات المفتاحية: الأحناء الخلفي, نظائر السيريوم الزوجية-الزوجية, نموذج IBM-1

Backbending Phenomenon In $^{130-134}\text{Ce}$ Even-Even Cerium Isotopes**Mushtaq Abed Dawood Al-Jubbori**

Department of Physics, College of Education, Mosul University

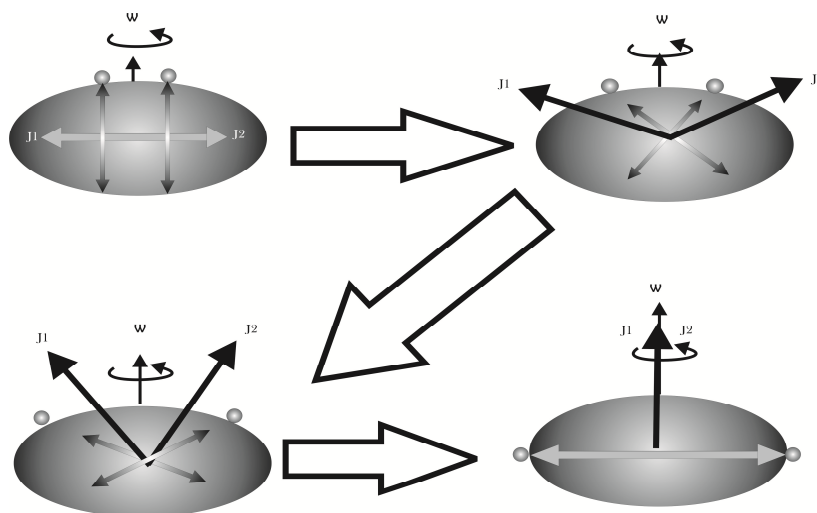
Abstract

The interacting boson model O(6) limited applied to study the energy levels for yrast levels and backbending in even-even cerium isotopes $^{130-134}\text{Ce}$, and to draw energy levels vs. $J(J+1)$ and moment of inertia vs. rotational energy, the figures appear to have backbending in this isotopes.

Key words: backbending, even-even cerium isotopes, IBM-1 model

المقدمة

تعد النواة منظومة ميكانيكية كمية تتكون من عدد معين من البروتونات والنيوترونات المتفاعلة والتي تسمى نيوكليونات [1]. إن محاولة فهم وتفسير الخصائص النووية وطبيعة التفاعلات بين النيوكليونات والنتائج العملية المتعلقة بها أدت إلى وضع نظريات تبنى على بعض الأسس الفيزيائية المهمة لتصبح القاعدة الأساسية في الحسابات النظرية مع إضافة عدة عوامل مؤثرة لملائمة النتائج العملية [2]. يعتبر التحول في طور النواة مهماً في التركيب النووي إذ لوحظ ان هنالك تحولاً طورياً من حالة الى اخرى فمن الممكن ان تتحول النواة من الحالة الاهتزازية الى الحالة الدورانية او حالة كاما غير المستقرة بسبب تغير عدد النيوترونات بين النظائر [3] وضعت أنموذجات لوصف حالات الطاقة ومنها أنموذج دافيدوف وفيليبوف [4] وأنموذج عزم القصور الذاتي المتغير (VMI) (Variable Moment of Inertia Model) وأنموذج البوزونات المتفاعلة (IBM-1) [5] وغيرها ولكل أنموذج نجاحاته في وصف النوى ذات الخصائص المناسبة له. إن التعرف على حالات الطاقة وموقعها والانتقالات بين هذه الحالات يعطي وصفاً مميزاً للنواة، ومن حالات الطاقة المهمة في التعرف على خصائص النوى هي حالات الطاقة الاوطأ (Yrast Levels) لزخم معينة التي قد تزداد طاقة كل مستوي فيها بزيادة الزخم الزاوي وبنسبة معينة. ولوحظ ان حالات الطاقة الاوطأ لبعض النوى لاتزداد بنسب متساوية حيث يحصل زيادة في الطاقة اقل من النسبة المتوقعة عند زخم معين وهذا مايسمى بالأحناء الخلفي. من التفسيرات الموضوعية لظاهرة الانحناء الخلفي هو ان سبب الانحناء الخلفي يعود الى تأثير قوة كوريولس عند زخم زاوية عالية نسبياً على بعض النيوكليونات الواقعة في القشرات الخارجية للنواة مما يؤدي الى فك ارتباط زوج او أكثر من هذه النيوكليونات (De-) pairing ان فك ارتباط زوج من النيوترونات يؤدي الى ظهور حزمة شبيهي الجسيمين (Two-Quasiparticle-2qp) وهذه الحزمة تسمى (S-Band) وتنتج هذه الحزمة عن الاصطاف الدوراني لزوج من النيوترونات في اتجاه حركة النواة كما موضح في الشكل (1) إذ يكون اتجاه زخمي النيوترونين في البداية متعاكسين وباتجاه عمودي على زخم النواة وبعد فك الارتباط بين النيوترونين وبسبب دوران النواة يترافق النيوترونين باتجاه النواة ويصبح الزخم الكلي باتجاه زخم النواة , وان فك ارتباط زوج من البروتونات فضلاً عن زوج النيوترونات يؤدي الى ظهور حزمة أشباه الجسيمات الأربعة (Four-Quasiparticle-4qp) وتقاطع هذه الحزم مع حزمة الحالة الأرضية بسبب ظاهرة الأحناء الخلفي [6-8] .



الشكل (1) تراصف زوج من النيوترونات [8]

النظرية

ان الصيغ الأولية لأنموذج البوزونات المتفاعلة وضعت لدراسة طيف النوى الزوجية – الزوجية ذات التماثل الموجب والسالب وأستخدم أنموذج IBM-1 في حساب مستويات الطاقة والانتقالات الكامية بينها ذات الزخوم الزاوية العالية وأثبت نجاحه في وصف ظاهرة الأنحاء الخلفي [9]. ومن الخواص الأخرى التي يمكن حسابها إضافة إلى مستويات الطاقة باستعمال هذا الأنموذج هي معدلات الانتقالات الكهرومغناطيسية [10]. يعطى المؤثر الهاملتوني في هذا الأنموذج وحسب التحليل الوصفي لمتعدد القطبية [11, 12]:

$$\hat{H} = \varepsilon \hat{n}_d + a_0 \hat{P} \cdot \hat{P} + a_1 \hat{L} \cdot \hat{L} + a_2 \hat{Q} \cdot \hat{Q} + a_3 \hat{T}_3 \cdot \hat{T}_3 + a_4 \hat{T}_4 \cdot \hat{T}_4 \quad (1)$$

اذ ان (\hat{n}_d) مؤثر عدد البوزونات من النوع d و P, L, Q, T_3, T_4 تمثل مؤثرات الأزواج والزخوم الزاوية رباعية وثمانية القطب والسادس عشر على التوالي اما a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 فهي ثوابت تعبر عن قوة التفاعل في كل حد. وتعطى قيم مستويات الطاقة للتحديدات الثلاثة الأهتزازية $SU(5)$ والدورانية $SU(3)$ وتحديد كما الناعمة $O(6)$ بالمعادلات [13]:

for Vibrator $SU(5)$

$$E(n_d, v, L) = \varepsilon n_d + k_1 n_d (n_d + 4) + k_4 v(v + 3) + k_5 L(L + 1) \quad (2)$$

v تمثل عدد بوزونات d المرتبطة الى زخم زاوي صفري و K_1, K_4, K_5 هي عوامل القوة لكل حد.

for Rotor SU(3)

$$E(\lambda, \mu, L) = K_2 (\lambda^2 + \mu^2 + 3(\lambda + \mu) + \lambda\mu) + K_5 L(L+1) \quad (3)$$

λ, μ اعداد كمية مختزلة لعدد البوزونات والتي تحدد ترتيب البوزونات على الحالات المختلفة، وأن $K_2 = \frac{a_2}{2}$

$$[12] K_5 = a_1 - \frac{3a_2}{8}$$

for γ – unstable O(6)

$$E(\sigma, \nu, L) = K_3 [N(N+4) - \sigma(\sigma+4)] + K_4 \nu(\nu+3) + K_5 L(L+1) \quad (4)$$

ولحالات الزخوم الدنيا

$$E(\nu, L) = K_4 \nu(\nu+3) + K_5 L(L+1) \quad (5)$$

أما عزم القصور الذاتي فيعطى بالعلاقة [14]:

$$\frac{2\mathcal{I}}{\hbar^2} = \frac{4J - 2}{E(J) - E(J - 2)} \quad (6)$$

كما يمكن حساب الطاقة الدورانية من الانتقال من مستوي J الى مستوي ادنى $(J-2)$ بالمعادلة [15]:

$$\hbar\omega = \frac{E(J) - E(J - 2)}{\sqrt{J(J+1)} - \sqrt{(J-2)(J-1)}} \quad (7)$$

الحسابات والنتائج

لنواة السيريوم (58) بروتوناً وتمتلك النظائر $^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية عدد من النيوترونات من (72) الى (76)

نيوترون وان النسبة $\frac{E_{4^+}}{E_{2^+}}$ لهذه النظائر هي $(2.798, 2.639, 2.562)$ keV وهذه النسب تعد مؤشراً الى ان النظائر

تمتلك التحديد O(6) حيث ان $3 \geq \frac{E_{4^+}}{E_{2^+}} \geq 2.4$ وفي هذا البحث تم التعرف على خصائص مستويات الطاقة لنظائر

$^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية اذ تم الاعتماد على نسب الطاقة (E_1/E_2) دالة لعدد النيوترونات الشكل (2). حسبت مستويات الطاقة لهذه النظائر باستخدام نموذج البوزونات المتفاعلة التحديد O(6) المعادلة (5) وبما ان احد اسباب ظاهرة الأتحاء الخلفي هو تقاطع الحزمتين الأرضية g والحزمة المثارة S لذا وجدت قيم كل من K_4 و K_5 لكلا الحزمتين ولجميع النظائر قيد الدراسة كما في الجدول (1). الجداول (2-4) تبين مستويات الطاقة العملية والمحسوبة ونسبة الخطأ، تم حساب عزم القصور الذاتي والطاقة الدورانية من المعادلتين (6, 7) على التوالي والجداول (5-7) تبين القيم العملية والمحسوبة للنظائر قيد الدراسة. الشكل (3) يبين مستويات الطاقة العملية والمحسوبة لحزمة Yrast, رسمت طاقة كل مستوي دالة للزخم الزاوي $J(J+1)$ كما في الشكل (4) ولدراسة الأتحاء الخلفي بصورة ادق رسمت طاقة الانتقال بين مستويين (E_γ) دالة للزخم الزاوي J وهذا ما يوضحه الشكل (5)، اما الشكل (6) يبين عزم القصور الذاتي $2g/\hbar^2$ دالة للطاقة الدورانية $(\hbar\omega)$.

الجدول (1) عدد البوزونات وقيم كل من K_4 و K_5 للحزمتين g و S للنظائر $^{130-134}\text{Ce}$

Isotopes	Number of Bosons	g-band		S-band	
		$K_4(\text{keV})$	$K_5(\text{keV})$	$K_4(\text{keV})$	$K_5(\text{keV})$
^{130}Ce	9	55.347	5.41	150.51	-30.871
^{132}Ce	8	84.203	-1.9118	197.1	-44.695
^{134}Ce	7	104.97	-1.7767	205.82	-45.673

ظاهرة الأتحناء الخلفي في نظائر السيريوم $^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية

مشتاق عبد داود الجبوري

الجدول (2) القيم النظرية مقارنة مع القيم العملية [16] للنظير ^{130}Ce

$J \pi$	0_1^+	2_1^+	4_1^+	6_1^+	8_1^+	10_1^+	12_1^+	14_1^+	16_1^+	18_1^+	20_1^+	22_1^+	24_1^+
E_{exp} (keV)	0	253.85	710.37	1324.1	2053	2809	3311.9	3860.5	4553.2	5384.2	6341.6	7408.6	8570
E_{cal} (keV)	0	253.85	661.68	1223.5	1939.3	2809	3311.9	4053.1	4848.4	5697.7	6601.1	7558.5	8570
Δ (%)	0	0	6.85	7.5995	5.5407	0	0	-4.9	-6.48	-5.85	-4.09	-2.02	0

الجدول (3) القيم النظرية مقارنة مع القيم العملية [17] للنظير ^{132}Ce

$J \pi$	0_1^+	2_1^+	4_1^+	6_1^+	8_1^+	10_1^+	12_1^+	14_1^+	16_1^+	18_1^+	20_1^+	22_1^+
E_{exp} (keV)	0	325.34	858.82	1542.6	2329.6	3157.8	3670.8	4241.2	4940.4	5763.9	6702.8	7737.1
E_{cal} (keV)	0	325.34	803.79	1435.4	2220	3157.8	3670.8	4410.8	5187.4	6000.7	6850.6	7737.1
Δ (%)	0	0	6.4075	6.9511	4.7027	0	0	-3.99	-4.99	-4.1	-2.2	0

الجدول (4) القيم النظرية مقارنة مع القيم العملية [18] للنظير ^{134}Ce

$J \pi$	0_1^+	2_1^+	4_1^+	6_1^+	8_1^+	10_1^+	12_1^+	14_1^+	16_1^+	18_1^+	20_1^+	22_1^+
E_{exp} (keV)	0	409.2	1048.7	1863.1	2811.1	3208.6	4006.8	4762.8	5725.9	6598.1	7583.1	8585.1
E_{cal} (keV)	0	409.2	1014.1	1814.7	2811.1	3208.6	3989.1	4815.8	5688.7	6607.9	7573.4	8585.1
Δ (%)	0	0	3.2959	2.5951	0	0	0.44	-1.11	0.64	-0.14	0.12	0

$$* \Delta(\%) = \frac{E_{Exp.} - E_{Cal.}}{E_{Exp.}} \times 100$$

الجدول (5) قيم طاقات الانتقال والطاقة الدورانية وعزم القصور الذاتي المحسوبة نظرياً والقيم العملية المحسوبة [16]

لنظير ^{130}Ce

$J_i^\pi \rightarrow J_f^\pi$	Experimental			Calculated		
	E_γ (keV)	$\hbar\omega$ (keV)	g/\hbar^2 (keV) $^{-1}$	E_γ (keV)	$\hbar\omega$ (keV)	g/\hbar^2 (keV) $^{-1}$
$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$	253.85	103.63	0.023636	253.85	103.63	0.023636
$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	456.52	225.7	0.030667	407.83	201.63	0.034328
$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	613.73	305.55	0.035846	561.8	279.7	0.03916
$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$	728.9	363.62	0.041158	715.78	357.08	0.041913
$10_1^+ \rightarrow 8_1^+$	756	377.47	0.050265	869.75	434.27	0.043691
$12_1^+ \rightarrow 10_1^+$	502.9	251.21	0.091469	502.9	251.21	0.091469
$14_1^+ \rightarrow 12_1^+$	548.6	274.11	0.098432	741.2	370.34	0.072855
$16_1^+ \rightarrow 14_1^+$	692.7	346.17	0.089505	795.26	397.42	0.077962
$18_1^+ \rightarrow 20_1^+$	831	415.33	0.084236	849.32	424.49	0.082419
$20_1^+ \rightarrow 18_1^+$	957.4	478.54	0.081471	903.38	451.54	0.086342
$22_1^+ \rightarrow 20_1^+$	1067	533.36	0.0806	957.44	478.59	0.089823
$24_1^+ \rightarrow 22_1^+$	1161.4	580.57	0.080937	1011.5	505.64	0.092931

الجدول (6) قيم طاقات الانتقال والطاقة الدورانية وعزم القصور الذاتي المحسوبة نظرياً والقيم العملية المحسوبة [17]

لنظير ^{132}Ce

$J_i^\pi \rightarrow J_f^\pi$	Experimental			Calculated		
	E_γ (keV)	$\hbar\omega$ (keV)	$2g/\hbar^2$ (keV) $^{-1}$	E_γ (keV)	$\hbar\omega$ (keV)	g/\hbar^2 (keV) $^{-1}$
$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$	325.34	132.82	0.018442	325.34	132.82	0.018442
$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	533.48	263.75	0.026243	478.45	236.55	0.029261
$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	683.76	340.42	0.032175	631.56	314.43	0.034834
$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$	787	392.61	0.038119	784.67	391.45	0.038232
$10_1^+ \rightarrow 8_1^+$	828.23	413.53	0.045881	937.78	468.23	0.040521

$12_1^+ \rightarrow 10_1^+$	512.95	256.23	0.089677	512.95	256.23	0.089677
$14_1^+ \rightarrow 12_1^+$	570.4	285	0.09467	740	369.75	0.072973
$16_1^+ \rightarrow 14_1^+$	699.24	349.44	0.088668	776.64	388.12	0.079831
$18_1^+ \rightarrow 20_1^+$	823.5	411.58	0.085003	813.27	406.47	0.086072
$20_1^+ \rightarrow 18_1^+$	938.9	469.3	0.083076	849.9	424.81	0.091776
$22_1^+ \rightarrow 20_1^+$	1034.3	517.01	0.083148	886.53	443.15	0.097007

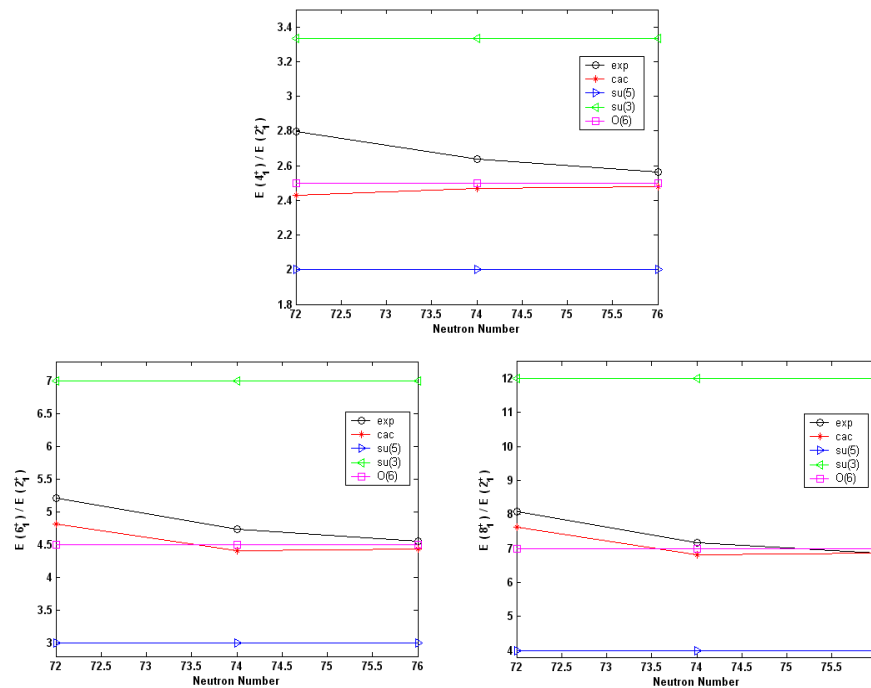
الجدول (7) قيم طاقات الانتقال والطاقة الدورانية وعزم القصور الذاتي المحسوبة نظرياً والقيم العملية المحسوبة [18]

للنظير ^{134}Ce

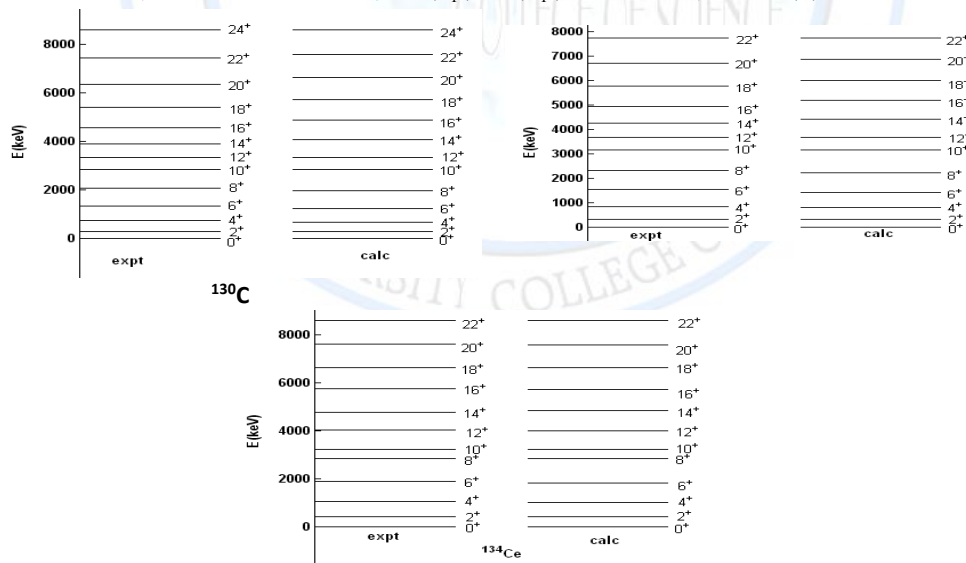
$J_i^\pi \rightarrow J_f^\pi$	Experimental			Calculated		
	E_γ (keV)	$\hbar\omega$ (keV)	$2J/\hbar^2$ (keV) $^{-1}$	E_γ (keV)	$\hbar\omega$ (keV)	$2J/\hbar^2$ (keV) $^{-1}$
$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$	409.2	167.06	0.014663	409.2	167.06	0.014663
$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	639.48	316.16	0.021893	604.92	299.07	0.023144
$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	814.42	405.47	0.027013	800.63	398.6	0.027478
$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$	948	472.93	0.031646	996.35	497.05	0.03011
$10_1^+ \rightarrow 8_1^+$	397.5	198.47	0.095597	397.5	198.47	0.095597
$12_1^+ \rightarrow 10_1^+$	798.2	398.72	0.05763	780.46	389.86	0.058939
$14_1^+ \rightarrow 12_1^+$	756	377.74	0.071429	826.71	413.07	0.065319
$16_1^+ \rightarrow 14_1^+$	963.1	481.3	0.064375	872.96	436.25	0.071023
$18_1^+ \rightarrow 20_1^+$	872.2	435.92	0.080257	919.21	459.42	0.076153
$20_1^+ \rightarrow 18_1^+$	985	492.34	0.079188	965.46	482.57	0.080791
$22_1^+ \rightarrow 20_1^+$	1002	500.86	0.085828	1011.7	505.71	0.085005

ظاهرة الأتحناء الخلفي في نظائر السيريوم $^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية

مشتاق عبد داؤد الجبوري



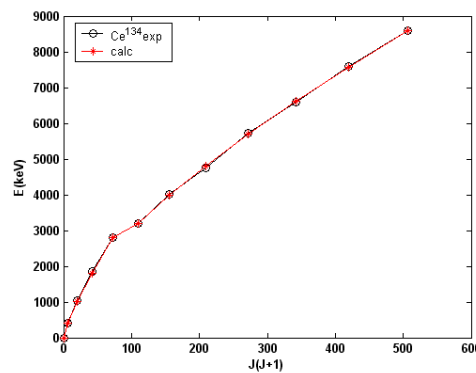
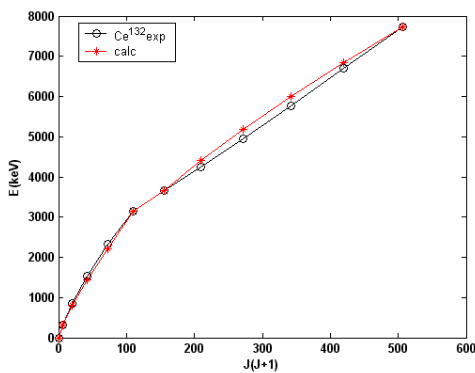
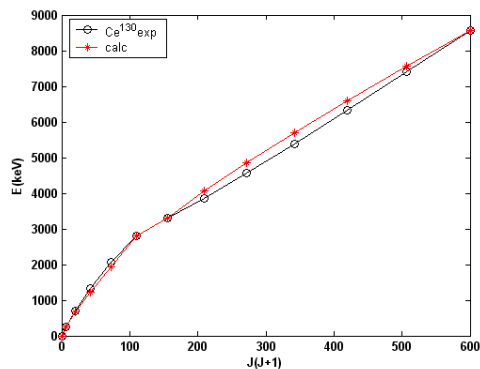
الشكل (2) تغير قيم نسب الطاقة $E(J_1^+) / E(2_1^+)$ مع عدد النيوترونات والقيم النموذجية



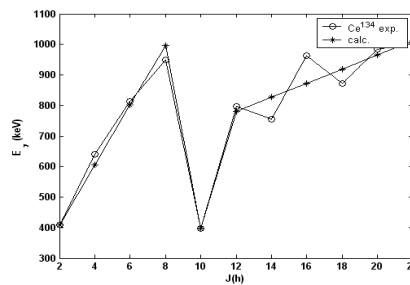
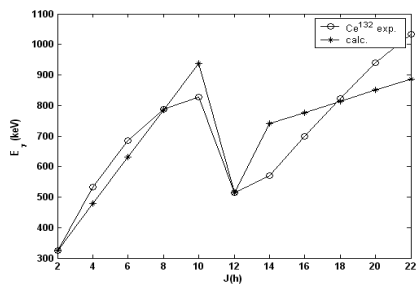
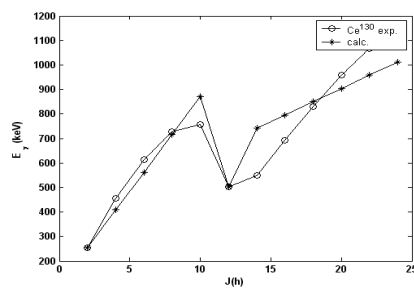
الشكل (3) مستويات الطاقة العملية والمحسوبة لحزمة Yrast

ظاهرة الأتحناء الخلفي في نظائر السيريوم $^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية

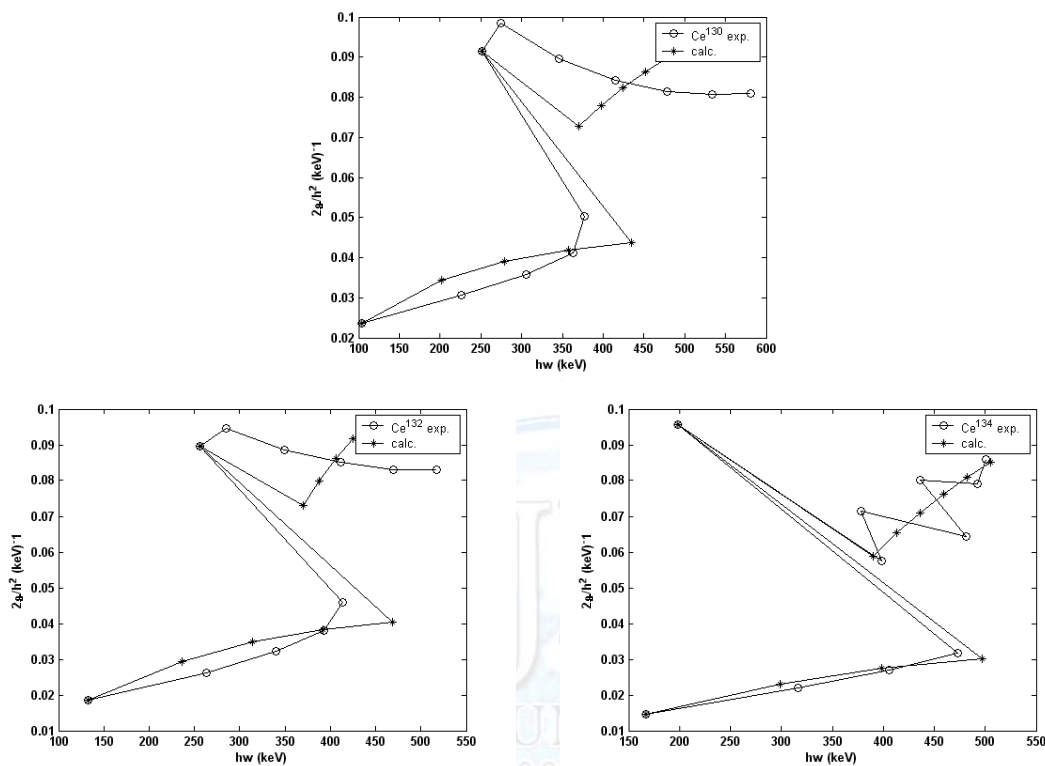
مشتاق عبد داود الجبوري



الشكل (4) مستويات الطاقة العملية والمحسوبة دالة لـ $J(J+1)$ للنظائر $^{130-134}\text{Ce}$



الشكل (5) تغير طاقة الانتقال E_γ مع الزخم الزاوي



الشكل (6) العلاقة بين عزم القصور الذاتي والطاقة الدورانية

المناقشة

في هذا البحث تم التعرف على خصائص بعض نظائر السيريوم $^{130-134}\text{Ce}$ الزوجية – الزوجية إذ تعد النسبة $(E4_1^+ / E2_1^+)$ إحدى المؤشرات الأولية على خصائص هذه النظائر وان هذه النسبة تساوي (2.798, 2.639, 2.562) لنظائر السيريوم قيد الدراسة أي أنها تقع ضمن تحديد كاسا الناعمة O(6). رسمت هذه النسبة والنسب $(E6_1^+ / E2_1^+)$ و $(E8_1^+ / E2_1^+)$ دالة لعدد النيوترونات والشكل (2) يوضح هذه النسب ان النظائر لها خصائص التحديد O(6) ولذا طبقت المعادلة (5) الخاصة بهذا التحديد لحساب مستويات الطاقة اذ حددت المعاملات (k_4, k_5) لكلا الحزمين الحزمة الأرضية (g-band) والحزمة المثارة (S-band) والجدول (1) يبين هذه القيم. بعد ان تم تحديد خصائص هذه النظائر وإيجاد المعاملات (k_4, k_5) حسب مستويات الطاقة الجداول (4-2) تبين قيم مستويات الطاقة العملية والمحسوبة بالإضافة الى نسبة الخطأ ويتضح من تفحص هذه الجداول ان القيم العملية متفقة مع القيم المحسوبة اذ ان اعلى نسب خطأ تراوحت % (7.5, 7, 3.25) للنظائر $^{130-134}\text{Ce}$ على التوالي. والشكل (2) يبين مقارنة بين القيم العملية والمحسوبة لمستويات الطاقة لجميع نظائر $^{130-134}\text{Ce}$ حيث يتضح التوافق الجيد بين القيم المحسوبة والقيم العملية. وبما ان الأهتمام في

هذا البحث منصب على الأحناء الخلفي الحاصل في مستويات الطاقة عند نقطة التقاطع بين الحزمتين g و S فكان من الضروري حساب قيم طاقات الانتقال E_γ والطاقة الدورانية $\hbar\omega$ إضافة الى عزم القصور الذاتي لكل انتقال ولكل نظير , والجدول (5) الى (7) تبين القيم العملية والقيم المحسوبة لهذه المعالم ومن تفحص هذه الجداول يتضح مدى تقارب القيم المحسوبة مع القيم العملية مما يؤكد سلامة وصحة اختيار التحديد لهذه النظائر, رسم الشكل (4) ليوضح الأحناء الحاصل في مستويات الطاقة العملية والمحسوبة دالة لـ $J(J+1)$ ويتضح من هذا الشكل ان هنالك اتفاق جيد بين القيم المحسوبة والقيم العملية لمستويات الطاقة وتطابق موقع الأحناء الخلفي لجميع النظائر القيمة 156 لـ $J(J+1)$ أي عند قيمة $J=12$ عدا النظير ^{134}Ce اذ ظهر الأحناء عند قيمة 110 لـ $J(J+1)$ أي عند $J=10$, وان ابرز انحناء حصل للنظير ^{134}Ce وسبب هذا يعود الى زيادة عدد الجسيمات (النوكليونات) ونقصان عدد الفجوات (الفراغات) في الغلاف نفسه. الشكل (5) يوضح العلاقة بين طاقة الانتقال E_γ دالة لـ J ويتضح أيضاً زيادة في طاقة الانتقال بزيادة J الى القيمة $J=10$ ثم حصول نقصان في طاقة الانتقال عند $J=12$ ما عدا النظير ^{134}Ce حيث ان نقصان طاقة الانتقال حدث عند $J=10$ وهذا بدوره يؤدي الى حدوث انحناء خلفي. اما الشكل (6) فيبين العلاقة بين عزم القصور الذاتي $2\theta/\hbar^2$ والطاقة الدورانية $\hbar\omega$ حيث يتضح في هذه الشكل النقصان المفاجئ في الطاقة الدورانية يرافقه زيادة في عزم القصور الذاتي وذلك بسبب نقصان طاقة الانتقال عند قيمة عالية نسبياً $J=12$ مسببة الزيادة في عزم القصور الذاتي المعادلة (6) والنقصان في الطاقة الدورانية المعادلة (7).

الاستنتاجات

نجاح أنموذج البوزونات المتفاعلة IBM-1 التحديد كما الناعمة (6) O لحساب مستويات الطاقة لحزمة الزخوم الدنيا (yrast) لنظائر السيريوم $^{130-134}\text{Ce}$, التوافق بشكل جيد بين القيم العملية والقيم المحسوبة للطاقة الدورانية وعزم القصور الذاتي. ظهور الأحناء الخلفي عند المستوي $J=12$ للنظيرين $^{130-132}\text{Ce}$ اما النظير ^{134}Ce فقد ظهر الأحناء عند $J=10$ وان الأحناء في هذا النظير يكون بشكل حاد اكثر من النظيرين $^{130-132}\text{Ce}$.

المصادر

1. واحد، سوزان شكر نوري (2005)، " دراسة نظرية للتركيب النووي لنظائر النديميوم $^{144-150}\text{Nd}$ الزوجية-الزوجية "، رسالة ماجستير، كلية التربية، جامعة الموصل، العراق.
2. المتيوتي، خلف عجاج (2012) " دراسة خصائص بعض نظائر (Pd,Cd,Te,Nd,Sm) الزوجية-الزوجية ونسب المزج $\delta(E2/M1)$ فيها ولعدد من انتقالات أشعة كما" رسالة ماجستير، كلية التربية، جامعة الموصل، العراق.
3. Krane, K. S. (1987) "Introductory Nuclear Physics" John Wiley and Sons, Ltd

4. Davydov, A. S. and Filippov G. F. (1958), "Rotational States in Even – Even Atomic Nuclei". Nucl. Phys. 8, 237-249
5. Arima, A. and Iachello, F. (1974), "Boson Symmetries in Vibrational Nuclei". phys.Lett.13, 53,309.
6. Bengtsson, R and Frauendorf, S,(1979),"Qusi_Particle Spectra New Yrast Line".Nucl.phys.A,327:139_171.
7. Hara K and Sun Y,(1991),"Studies of High Spin States in Rare Earth Nuclei Using the Angular Momentum Projection Method".Nucl.Phys.A,520:445_466.
8. الجبوري, مشتاق عبد داؤد (2008) "محاكاة حاسوبية جديدة لأنموذج البوزونات المتفاعلة IBM-1 لدراسة الأتحناء الخلفي في نظائر الزينون $^{120-126}\text{Xe}$ الزوجية – الزوجية" رسالة ماجستير, كلية التربية, جامعة الموصل, العراق.
9. Heyde, K.; Jolie, J.; Isacker, P. V.; Moreau, J. and Waroquier, M. (1984) "High-Spin states and the Boson Cutoff in Rotational Nuclei: Application to Even-Even Dy Nuclei" Phys. Rev. C, Vol. 29, N. 4.
10. Warner, D. D. and Casten, R. F. (1981) "Interacting Bosons Approximation Description of the Collective States of ^{168}Er and a Comparison with Geometrical Models", Phys. Rev. C, Vol. 24, No. 4 (1713-1733).
11. Iachello, F. (1980) "An Introduction to the Interacting Boson Model", Nuclear structure Edited by, Abrahams, K.; Allaart, K., and Dieperink, A. E. L. Plenum press (53-87).
12. Casten, R. F. and Warner, D. D. (1988) "Interacting Boson Approximation", Rev. mod. Phys 60, (389-465).
13. NSDD Workshop,Triste,(2005).
14. Wong, S. M. (1990) "Introductory Nuclear Physics" prentice-Hall International", Inc.
15. Sorenson R A,(1973),"Nuclear Moment of Inertia at High Spin". Rev. Mod. Phys. 45(3):353-367.
16. Singh, B.; (2001). Nuclear Data Sheets.AR_ 99-19.ens
17. Khazov, Y.; Rodionov A.A.; Sakharov, S. and Singh, B; (2005). Nuclear Data Sheets.AR_ 103-2.ens
18. Sonzogni ,A.A.; (2004). Nuclear Data Sheets.AR_ 103-3.ens