



محاسبه میزان تغییر شکل موثر ترازهای مختلف زنجیره ایزوتوپی ساماریوم با استفاده از مدل برهمکنش بوزونی

حسین نژاد، عسگر* (۱) - جلیلی مجارشین، امیر (۲) - صبری، هادی (۱) - فنگ، بان (۲)

(۱) دانشگاه تبریز، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای، ایران

(۲) دانشگاه لیائونینگ نرمال، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته‌ای، چین

چکیده:

در این مطالعه میزان تغییر شکل موثر ترازهای مختلف زنجیره ایزوتوپی ساماریوم تعیین شد. به این منظور ابتدا با استفاده از مقدار چشمداشتی عملگر چهار قطبی الکتریکی، ثابت شکل چهار قطبی تعیین و در مقایسه با مقادیر تجربی متناظر میزان تغییر شکل موثر چهار قطبی الکتریکی معین شد. نتایج حاصل، وجود همپوشانی در مقادیر تغییر شکل های چهار قطبی موثر ترازهای 0_3^+ و 2_1^+ را در این زنجیره ایزوتوپی نمایش می دهد. همچنین رابطه معینی بین مقادیر تغییر شکل چهار قطبی و بار موثر بوزون و فاصله ترازها مشاهده می شود. وجود این وابستگی برای زنجیره ایزوتوپی ساماریوم و همپوشانی کمیت ها را می توان به عنوان نشانه هایی از پدیده همزیستی شکلی گزارش داد.

کلمات کلیدی: گذار فازی-شکلی کوانتومی، تغییر شکل چهار قطبی الکتریکی، همزیستی شکل، مدل برهمکنش بوزونی.

مقدمه:

مطالعه تغییر شکل متاثر از گذارهای بین ترازهای در سیستم های هسته ای از اهمیت زیادی برخوردار است [1-4]. گذارهای الکترومغناطیسی دارای اطلاعات بسیار ارزشمندی به منظور بررسی ساختار هسته مانند توزیع ماده هسته ای می باشند. توزیع ماده هسته ای سبب توصیف مدهای مختلف تغییر شکل در هسته ها می شود [2,4]. با انجام گذار الکترومغناطیسی توزیع ماده هسته ای تغییر کرده و موجب ایجاد تغییر شکل در هسته می شود [3]. غالب ترین حالت تغییر شکل در هسته ها، تغییر شکل چهار قطبی می باشد که قابل محاسبه بوده و خروج از حالت کروی هسته ها از مفهوم احتمال های گذار چهار قطبی الکتریکی، را توصیف می نماید.

در گذار الکترومغناطیسی تکانه منتقل شده مقدار معینی خواهد داشت. انتقال تکانه معین را بر اساس اثر عملگرهایی که همین تکانه ها را اعمال می کنند، می توان توصیف نمود. انتقال تکانه بر اساس عملگرهای کوانتشی ثانویه در قالب مدل برهمکنش بوزونی به خوبی توصیف می شود [5]. مدل برهمکنش بوزونی فضای مناسب جهت توصیف ویژگی هسته های زوج-زوج نیمه سنگین را فراهم می کند.



در این مقاله زنجیره ساماریوم را مورد مطالعه قرار داده ایم. ساماریوم جز خانواده هسته های خاک های نادر می باشد. به دلیل قرار داشتن در ناحیه بینابینی لایه های بسته، نشانه های ترکیب تقارن ها در این هسته ها زیاد دیده شده و انتظار رفتار صرفاً منطبق بر یک نوع تقارن خاص از این هسته ها دور از ذهن خواهد بود. برای بررسی مفهوم تغییر شکل موثر، با استفاده از مدل برهمکنش بوزونی مقدار چشمداشتی عملگر اندرکنش چهارقطبی q_2 را محاسبه نمودیم. بررسی تغییرات این کمیت برای ترازهای مختلف اطلاعات مناسبی را در خصوص ترکیب تقارن ها حاصل می نماید.

روش کار :

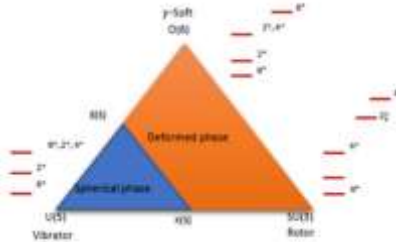
هدف ما محاسبه میزان تغییر شکل تراز های 0_1^+ و 2_1^+ و 0_2^+ و 2_2^+ و 0_3^+ و 4_1^+ در زنجیره ایزوتوپی ساماریوم در قالب مدل برهمکنش بوزونی است. علت انتخاب این ترازها عمومیت آن ها و میزان مشاهده تجربی بیش تر آن ها نسبت به سایر ترازها در هسته ها می باشد. برای تعیین میزان تغییر شکل موثر هر کدام از ترازها، مدل برهمکنش بوزونی به دلیل استفاده از عملگرهای خلق و فنا و توصیف مفهوم گذار بر اساس انتقال تکانه معین به عنوان گزینه اول انتخاب می شود. مدل اندرکنش بوزونی که توسط آریما^۱ و یا کلو^۲ معرفی شده است، یک چارچوب جبری برای توصیف حرکت جمعی در هسته های زوج - زوج فراهم می کند. در نسخه یک این مدل (IBM-1) صرفاً با استفاده از بوزون های s و d که به ترتیب اندازه حرکت های ۰ و ۲ حمل می کنند، سر و کار خواهیم داشت و هامیلتونین و عملگرها بر اساس کوانتشن ثانویه این بوزون ها تعیین خواهد شد.

مدل IBM-1 دارای سه حد دینامیکی می باشد که برای توصیف هسته های کروی، تغییر شکل یافته محوری و تغییر شکل یافته فاقد محور تقارن به کار می روند. این سه حد دینامیکی به ترتیب $U(5)$ ، $O(6)$ و $SU(3)$ می باشند. با توجه به این که قسمت عمده هسته های شناخته شده دقیقاً روی این حدود قرار نگرفته و در ناحیه بینابینی قرار می گیرند، نقاط بحرانی $E(5)$ (مرتبه دوم) و $X(5)$ (مرتبه اول) استفاده خواهیم کرد [5].

Interacting Boson Model(IBM)^۱

A.Arima^۲

F.Iachello^۳



شکل (۱). مثلث کاستن؛ سه تا تقارن دینامیکی در راس‌ها قرار دارند. نقاط بحرانی $E(5)$ (مرتبه دوم) و $X(5)$ (مرتبه اول). حالت‌ها و عملگرها در مدل برهمکنش بوزونی از عملگرهای خلق و نابودی بوزون ساخته شده‌اند. عملگر گذار با شرط‌های حفظ اصول پایستگی برای تعداد کل بوزون‌ها و مشابه بودن مرتبه تانسور عملگر گذار با مرتبه گذار، به صورت زیر است [5]:

$$\bar{T}^{(1)} = \sum_{i=1}^N \bar{t}_i^{(1)} = \alpha_2 \delta_{21} [\hat{d}^\dagger \times \tilde{s} + \hat{s}^\dagger \times \tilde{d}]_\mu^{(2)} + B_1 [\hat{d}^\dagger \times \tilde{d}]_\mu^{(1)} + \gamma_0 \delta_{10} \delta_{\mu 0} [s^\dagger \times \tilde{s}]_0^{(0)}, \quad (1)$$

غالب‌ترین مد گذار در هسته‌های تغییر شکل یافته احتمال گذار چهار قطبی الکتریکی می‌باشد. با استفاده از رابطه فوق، عملگر احتمال گذار چهار قطبی الکتریکی به صورت زیر است:

$$\hat{T}_\mu^{(E2)} = \alpha_2 \left([\hat{d}^\dagger \times \tilde{s} + \hat{s}^\dagger \times \tilde{d}]_\mu^{(2)} + \beta_2 [\hat{d}^\dagger \times \tilde{d}]_\mu^{(2)} \right), \quad (2)$$

که در آن α_2 معرف بار موثر بوزون می‌باشد. رابطه ۲ برای بیان ارتباط گذار و تغییر شکل می‌باشد و مقادیر α_2 و β_2 از طریق برازش با مقدار تجربی احتمال گذار، با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم افزار matlab محاسبه می‌نماییم. مقدار کمیت چهار قطبی $q_2(L_n^+)$ را می‌توان با استفاده از رابطه زیر برای هر تراز دلخواه به صورت مقدار چشمداشتی عملگر اندرکنش چهار قطبی محاسبه نمود [1]:

$$q_2(L_n^+) = e^2 \langle L_n^+ | Q \cdot Q | L_n^+ \rangle, \quad (3)$$

که در آن $Q = [d^\dagger \times \tilde{s} + s^\dagger \times \tilde{d}]$ می‌باشد. فرم ویژه تابع $|L_n^+\rangle$ را برای حدود تقارن دینامیکی $O(6)$ و $SU(3)$ ، $U(5)$ به ترتیب برابر $|N, n_d, v, L\rangle$ ، $|N, (\lambda, \mu), K, L\rangle$ و $|N, \sigma, \tau, v_\Delta, L\rangle$ می‌باشد. در این مقاله ما نسخه IBM-1 را انتخاب نموده ایم، لذا ویژه تابع مورد نظر ما منطبق بر حد $U(5)$ می‌باشد. که در آن مقادیر اعداد کوانتومی برحسب توضیحات منبع [5] تعیین می‌شوند.

حال می‌توان میزان تغییر شکل چهار قطبی موثر ترازاها را با استفاده از مقدار کمیت چهار قطبی محاسبه نمود:

$$q_2(L_n^+) = \left[\frac{3ZeR_0^2}{4\pi} \right]^2 \beta_{\text{eff}}^2(L_n^+) \quad (4)$$



Z معرف تعداد پروتون ها در هسته و $R_0 = r_0 A^{\frac{1}{3}}$ معرف شعاع هسته ای است که $r_0 = 1.2 \text{ fm}$ می باشد. مقدار $q_2(L_n^+)$ محاسبه شده در رابطه ۳ را در رابطه ۴ جاگذاری نموده و به ازای یک هسته مشخص، میزان تغییر شکل به دست می آید. این کمیت وابستگی مستقیم به مشخصات هر تراز داشته و می توان از آن برای ایجاد رابطه بین ویژگی های تقارنی سیستم و مشخصات هر تراز استفاده نمود.

نتایج :

هدف ما در این مطالعه، محاسبه میزان تغییر شکل موثر چهار قطبی الکتریکی تراز های مختلف در زنجیره ایزوتوپی ساماریوم در قالب مدل IBM می باشد. این کمیت یک مشاهده پذیر به روز و مهم برای مطالعه ساختار هسته می باشد. در این فرایند، ابتدا با استفاده از رابطه ۳ مقدار ثابت شکل چهار قطبی الکتریکی مرتبه دوم $q_2(L_n^+)$ هسته های زنجیره ایزوتوپی ساماریوم، به عنوان مبنای محاسباتی انتخاب شده و با استفاده از رابطه ۴، مقدار کمیت تغییر شکل موثر چهار قطبی الکتریکی ترازا تعیین می گردد. این کمیت یک مشاهده پذیر حساس به ساختار می باشد. هدف ما به دست آوردن کمیتی است که تمام ویژگی های ساختاری سیستم را توصیف نماید. در این مطالعه ما تغییر شکل موثر ترازا را که یک کمیت متاثر از گذار های نوکلئونی بین ترازا می باشد، به صورت نظری (محاسبه شده توسط نویسندگان) و تجربی (مستخرج از منابع تجربی موجود برای طیف گامای هسته ها و سایت www.nndc.bnl.gov) تعیین نمودیم. نتایج حاصل در جدول ۱ و ۲ فهرست شده است.

جدول ۱. مقادیر $\frac{q_2}{e^2}$ برای ترازهای 0_1^+ و 2_1^+ و 0_2^+ و 2_2^+ و 0_3^+ و 4_1^+ در زنجیره ایزوتوپی ساماریوم، محاسبه شده در قالب مدل IBM (بر حسب بارن).

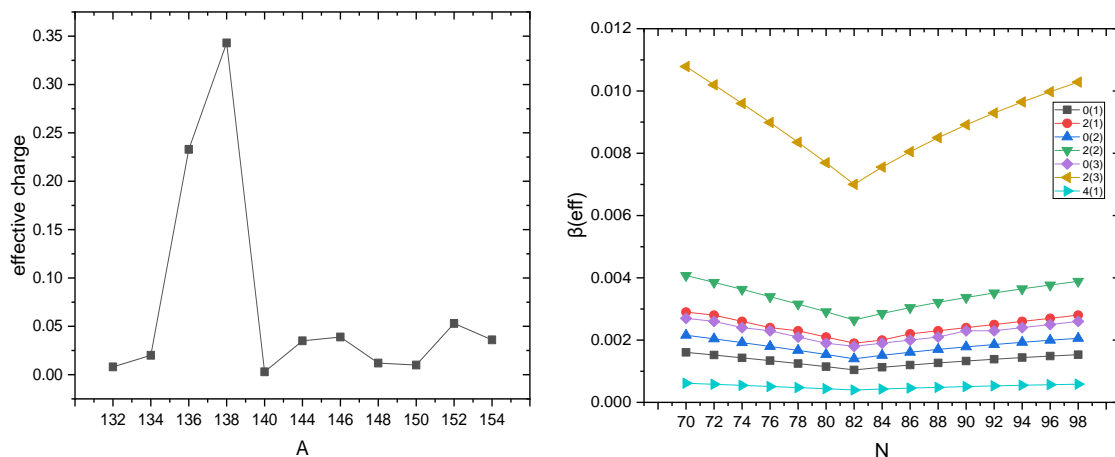
Nuclei	N	$\frac{q_2(0_1^+)}{e^2}$	$\frac{q_2(2_1^+)}{e^2}$	$\frac{q_2(0_2^+)}{e^2}$	$\frac{q_2(2_2^+)}{e^2}$	$\frac{q_2(0_3^+)}{e^2}$	$\frac{q_2(4_1^+)}{e^2}$
$^{132}_{62}\text{Sm}$	12	35.54219	2.369479	5.077456	1.421687	2.734014	0.114883
$^{134}_{62}\text{Sm}$	11	32.42533	2.161688	4.632190	1.297013	2.494256	0.104809
$^{136}_{62}\text{Sm}$	10	29.30814	1.953876	4.186877	1.172325	2.254472	0.094733
$^{138}_{62}\text{Sm}$	9	26.1905	1.746033	3.7415	1.04762	2.014653	0.084656
$^{140}_{62}\text{Sm}$	8	23.07223	1.538148	3.296033	0.922889	1.774787	0.074576
$^{142}_{62}\text{Sm}$	7	19.95304	1.330203	2.850435	0.798121	1.534849	0.064494
$^{144}_{62}\text{Sm}$	6	16.83243	1.122162	2.404634	0.673297	1.294802	0.054407
$^{146}_{62}\text{Sm}$	7	19.95304	1.330203	2.850435	0.798121	1.534849	0.064494
$^{148}_{62}\text{Sm}$	8	23.07223	1.538148	3.296033	0.922889	1.774787	0.074576
$^{150}_{62}\text{Sm}$	9	26.1905	1.746033	3.7415	1.04762	2.014653	0.084656
$^{152}_{62}\text{Sm}$	10	29.30814	1.953876	4.186877	1.172325	2.254472	0.094733
$^{154}_{62}\text{Sm}$	11	32.42533	2.161688	4.632190	1.297013	2.494256	0.104809
$^{156}_{62}\text{Sm}$	12	35.54219	2.369479	5.077456	1.421687	2.734014	0.114883
$^{158}_{62}\text{Sm}$	13	38.65880	2.577253	5.522686	1.546352	2.973754	0.124957
$^{160}_{62}\text{Sm}$	14	41.77522	2.785014	5.967888	1.671008	3.213478	0.135031



جدول ۲. مقادیر تجربی موجود q_2 برای ترازهای 0_1^+ و 2_1^+ و 0_2^+ و 2_2^+ و 4_1^+ در زنجیره ایزوتوپی ساماریوم (بر حسب W.u.). علامت - و X به ترتیب بیانگر عدم گزارش داده تجربی و عدم موجودی تراز تجربی می باشند.

Nuclei	$q_2(2_1^+)$	$q_2(4_1^+)$	$q_2(0_2^+)$	$q_2(2_2^+)$	$q_2(0_3^+)$	α_2	β_2
$^{134}_{62}\text{Sm}$	202	218	×	×	×	0.008	-0.997
$^{136}_{62}\text{Sm}$	131	179	-	×	×	0.02	-1.022
$^{138}_{62}\text{Sm}$	64	×	×	-	×	0.233	-1.001
$^{140}_{62}\text{Sm}$	50.5	69.8	-	-	-	0.343	-1.015
$^{144}_{62}\text{Sm}$	11.9	790	-	3.9	-	0.003	-1.125
$^{146}_{62}\text{Sm}$	7.4	13	-	-	-	0.035	-1.036
$^{148}_{62}\text{Sm}$	31.2	51	-	33.5	-	0.039	-0.989
$^{150}_{62}\text{Sm}$	57.1	110	53	110.81	-	0.012	-0.816
$^{152}_{62}\text{Sm}$	145	209.5	33.3	193.7	34.8	0.01	-0.973
$^{154}_{62}\text{Sm}$	176	245	12	3.7	-	0.053	-1.133
$^{156}_{62}\text{Sm}$	300	-	-	-	×	0.036	-0.899

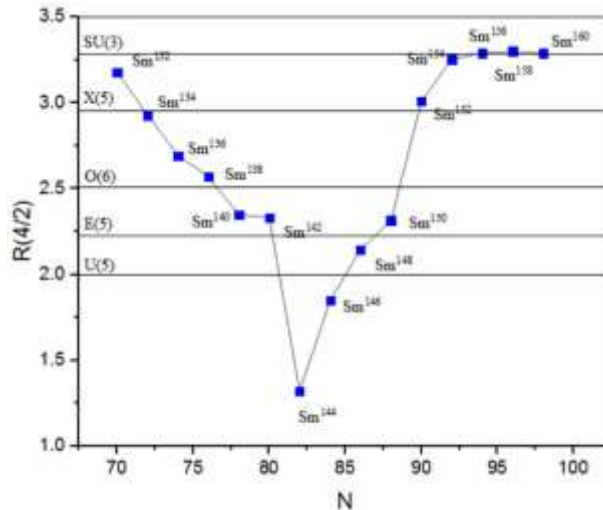
از روی مقادیر q_2 و با استفاده از رابطه ۴ مقادیر β_{eff} را محاسبه کردیم و نمودار تغییرات مقادیر β_{eff} ترازها برای زنجیره ایزوتوپی ساماریوم بر حسب تغییرات تعداد نوترون ها به صورت زیر حاصل شد:



شکل (۲). نمودار تغییرات β_{eff} و بار موثر بوزون بر حسب تغییرات تعداد نوترون ها در زنجیره ایزوتوپی ساماریوم.

نتایج حاصل، نشان از همپوشانی در مقادیر تغییر شکل های چهار قطبی موثر تراز های 0_3^+ و 2_1^+ برای ایزوتوپ های $^{152}_{62}\text{Sm}$ و $^{146}_{62}\text{Sm}$ و $^{144}_{62}\text{Sm}$ و $^{138}_{62}\text{Sm}$ می باشد. همچنین برای این هسته ها تغییرات بار موثر بوزون بیشتر است. با در نظر گرفتن نتایج مطالعات منابع [6-11]، این همپوشانی را می توان به عنوان نشانه هایی از پدیده همزیستی شکلی گزارش داد.

با در نظر گرفتن نتیجه حاصل برای تعدادی از هسته‌ها و از طرفی وابستگی محل ترازهای انرژی به تقارن‌های سیستم، می‌توان با بررسی $R_{\frac{4}{2}}$ صحت نتایج حاصل را ارزیابی نمود. به این منظور، مقدار $R_{\frac{4}{2}}$ برای زنجیره ایزوتوپی مورد مطالعه به صورت وابسته به تعداد نوترون در شکل ۳ ترسیم شده است:



شکل (۳). نمودار تغییرات $R_{\frac{4}{2}}$ بر حسب تغییرات تعداد نوترون‌ها در زنجیره ایزوتوپی ساماریوم.

مطابق با شکل ۳، هسته $^{152}_{62}\text{Sm}$ در نزدیکی نقطه بحرانی $X(5)$ که ناحیه گذار بین $U(5)$ و $SU(3)$ را توصیف می‌کند و لذا تقارن دینامیکی اش به صورت ترکیبی خواهد بود. هسته‌های $^{146}_{62}\text{Sm}$ و $^{144}_{62}\text{Sm}$ در نزدیکی ناحیه $U(5)$ قرار دارد. هسته $^{138}_{62}\text{Sm}$ در نزدیکی حد دینامیکی $O(6)$ قرار دارد. این نتیجه نشان دهنده قرار گرفتن هسته‌های دارای همپوشانی مقدار تغییر شکل موثر در نواحی بینابینی گذاری با استفاده از شکل ۳ تایید می‌شود.

بحث و نتیجه گیری :

در این مطالعه، میزان تغییر شکل چهار قطبی ترازهای مختلف در زنجیره ایزوتوپی ساماریوم تعیین شده است. میزان تغییر شکل چهار قطبی ترازها با استفاده از برچسب زنی حالت‌ها و محاسبه مقدار چشمداشتی در قالب مدل برهمکنش بوزونی محاسبه شده و در مقایسه با روش‌های دیگر، صحت نتایج تأیید شده است. با استفاده از مقایسه با مقادیر تجربی مقدار بار موثر بوزون تعیین شد. نتایج نشان از وجود ارتباط بین تغییرات تغییر شکل موثر ترازها و تغییرات بار موثر بوزون در هسته‌ها دارد.

همچنین تغییرات $R_{\frac{4}{2}}$ برای این هسته‌ها بررسی شد و هسته‌هایی که همپوشانی بین مقادیر تغییر شکل موثر از خود نمایش می‌دادند، در نواحی گذار بین حدود دینامیکی مدل برهمکنش بوزونی قرار گرفتند.



مراجع :

- [1]. V. Werner et al., Deformation crossing near the first-order shape-phase transition in $Gd^{152-156}$, Phys. Rev. C, 78, 051303 (2008).
- [2]. R. Mittal et al., Effect of deformation and orientation on spin orbit density dependent nuclear potential, EPJ Web of Conferences, 163, 00038 (2017).
- [3]. S. Akkoyun et al., A study on estimation of electric quadrupole transition probability in nuclei, Journal of Nuclear Sciences, 2, 2148 (2015).
- [4]. A. Adamu et al., Determination of Nuclear Potential Radii and Its Parameter from Finite – Size Nuclear Model, Int. J. Theo. Math. Phys, 7, 9 (2017).
- [5]. F. Iachello, A. Arima, The Interacting Boson Model (Cambridge University Press, Cambridge, England, 1987).
- [6]. F. S. Babra et al., Investigation of a large change in deformation for the γ -soft nucleus ^{136}Sm , Phys. Rev. C, 100, 054308 (2019).
- [7]. W. D. Kulp et al., Shape Coexistence and Mixing in ^{152}Sm , arXiv:0706.4129v2 (2007).
- [8]. E S Paul et al., Prolate and oblate rotational bands in ^{136}Sm , J. Phys. G, 9, 861 (1993).
- [9]. E S Paul et al., Shape coexistence in ^{136}Sm and evidence for the rotational alignment of a pair of N = 6 neutrons, J. Phys. G, 20, 1405 (1994).
- [10]. P. E. Garrett et al., New Features of Shape Coexistence in ^{152}Sm , Phys. Rev. Lett, 103, 062501 (2009).
- [11]. I. E. Assimakis et al., Magic numbers for shape coexistence, arXiv:1811.01071v1 (2018).