



بررسی پارامترهای ارتفاع سد شکافت و تغییر شکل هسته ^{246}Cm به وسیله کد CNS

زنگنه، هادی - کاردان، اعظم

دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک

چکیده

در این مقاله ما سطوح انرژی پتانسیل، ارتفاع سد اول و دوم شکافت را برای هسته ^{246}Cm ، با استفاده از کد CNS بررسی کرده‌ایم. محاسبات ما نشان می‌دهد هسته در حالت پایه، دارای تغییر شکل $\epsilon_2 = 0/23$ است و با افزایش اسپین، کمینه‌های پتانسیل در تغییر شکل‌های بزرگتری ظاهر می‌شوند، در نتیجه ارتفاع سد شکافت کاهش می‌یابد. همچنین ما ارتفاع سد اول و دوم شکافت را به دست آورده و با نتایج روش RMF^۲ و نتایج تجربی مقایسه کردیم. محاسبات ما نشان می‌دهد که تجربه، نتایج ما را بهتر تایید می‌کند.

کلیدواژه‌ها: ^{246}Cm ، کد CNS، روش RMF، سد شکافت

Study of the fission barrier and deformation parameters of ^{246}Cm nucleus using the CNS code

Zanganeh, Hadi - Kardan, Azam

Damghan University, Faculty of Physics, Department of Physics

Abstract

In this paper, we have studied the potential energy surfaces and the first and second fission barrier height for ^{246}Cm nucleus. Our calculations show that the nucleus has the deformation $\epsilon_2 = 0/23$ at the ground state and with increasing the spin, potential minima appear at larger deformations, consequently, the fission barrier decreases. Also, we calculated the first and second fission barrier height and compared with the RMF and experimental results. Our calculations show that the experiment verifies our results well.

Keywords: ^{246}Cm , CNS code, RMF method, fission barrier

مقدمه

ابتدایی‌ترین برداشت‌ها از شکافت هسته‌ای به سال‌های ابتدایی قرن ۲۰ برمی‌گردد که دانشمندان شکافت هسته‌ای را دوباره شدن یک هسته یکپارچه می‌دانستند و به این ترتیب اولین نظریه شکافت هسته‌ای مطرح شد [۱]. در سال ۱۹۳۵ مدل بسیار ساده‌ای که در آن برمانستگی قطره مایع با ماده هسته‌ای تأکید می‌شد، ارائه شد [۲]. دو دانشمند در سال ۱۹۵۹ مدل لایه‌ای را در فیزیک هسته‌ای ارائه

^۱ Cranked Nilsson-Strutinsky

^۲ Relativistic mean field



کردند و یک سال بعد «بوهر»^۳ و همکارانش مدل تجمعی را برای بررسی رفتار هسته‌ای پیشنهاد دادند. در یک توسعه موازی با ارائه این مدل‌ها، «سواتیک»^۴ در سال ۱۹۵۵ پیشنهاد کرد که سدهای شکافت با اضافه کردن "انرژی اصلاح شده" به مدل قطره مایع به حداقل می‌رسد. در اواسط دهه ۱۹۶۰، «استروتینسکی»^۵ یک روش را برای محاسبه این اصلاحات ارائه داد. مدل تجمعی ذکر شده، به دو بخش: ۱- ارتعاشی و ۲- دورانی، تقسیم می‌شود. در مدل ارتعاشی، هسته می‌تواند شکلی کروی داشته باشد و یا می‌تواند تغییر شکل یافته باشد ولی در مدل دورانی هسته حتماً تغییر شکل یافته است. دوران برای هسته‌ها دو حالت دارد: ۱- اگر انرژی داده شده به هسته، کم (نسبت به آن هسته) باشد سبب چرخش هسته می‌شود ولی این انرژی بر روی ترازهای نوکلئون‌های درون هسته نمی‌تواند اثر بگذارد و تبهگنی‌ها را از بین ببرد یا جفت نوکلئون‌ها را بشکند. ۲- اگر انرژی داده شده به هسته، زیاد باشد، روی ترازهای نوکلئون‌های درون هسته اثر می‌گذارد و تبهگنی‌ها را از بین می‌برد و جفت نوکلئون‌ها را می‌شکند.

با توجه به اینکه هسته یک سیستم کوانتومی است، برای بررسی و توصیف ساختار هسته نیاز به حل معادله شرودینگر می‌باشد، اما حل معادله شرودینگر برای یک سیستم بس-ذره‌ای و پیچیده‌ای مانند هسته‌های سنگین، بسیار مشکل و تقریباً غیر ممکن است. بنابراین برای بررسی ساختار هسته ناچار به ارائه مدل‌های هسته‌ای هستیم. اگر مدل ارائه شده موفق به توجیه و پیش‌بینی نتایج تجربی شود، مدل مناسبی خواهد بود و به ما در فهم رفتار و خصوصیات هسته کمک خواهد کرد. مدل نیلسون - استروتینسکی (کرنک شده) یکی از موفق‌ترین مدل‌ها در توصیف و پیش‌بینی رفتار هسته‌ها در اسپین‌های بالا می‌باشد [۳]. محاسبه‌ی سد شکافت روش‌های مختلفی دارد مانند: ۱- محاسبه‌ی سد شکافت با استفاده از دیدگاه ماکروسکوپی - میکروسکوپی [۴] و ۲- محاسبات خودسازگار: الف) محاسبات با استفاده از نیروی اسکیرم [۵] ب) محاسبات با استفاده از نیروی گوگنی [۶] ج) محاسبات با استفاده از نیروی میدان میانگین نسبیتی [۷]. دو روش مهم دیگر هم وجود دارد به عنوان روش استاتیک و روش دینامیک. البته باید تصریح کرد که برای به دست آوردن یک تصویر واقع بینانه از انرژی پتانسیل، لازم است که انرژی برای چند میلیون شکل مختلف محاسبه شده و از تکنیک‌های خاص برای شناسایی نقاط زینی مناسب در مسیرهای حالت پایه هسته استفاده کرد [۸]. کد CNS که ما در این مقاله برای بررسی پارامترهایی مانند سد شکافت و انرژی برحسب پارامتر تغییر شکل برای هسته ^{246}Cm از آن استفاده می‌کنیم، بر اساس این مدل می‌باشد و در نهایت نتایج را با نتایج مدل محاسباتی میدان میانگین نسبیتی RMF مقایسه می‌کنیم. انگیزه ما در پژوهش حاضر بررسی توانایی روش کد CNS در پیش‌بینی ارتفاع سد شکافت در مقایسه با روش RMF است. دلیل انتخاب هسته ^{246}Cm این است که ما قصد داشتیم یک هسته سنگین انتخاب کنیم که جدیدترین محاسبات روز دنیا بر روی سد شکافت، روی

Bohr^۳
Swiatecki^۴
Strutinsky^۵
Skyrme^۶
Gogny^۷



آن انجام شده باشد. پس از جستجوها، به روزترین مقاله‌ی معتبری که یافتیم محاسبات سد شکافت را روی هسته سنگین ^{246}Cm انجام داده بود، بنابراین ترجیح دادیم هسته ^{246}Cm را انتخاب کنیم.

روش کار

محاسبات ما بر اساس مدل CNS انجام می‌شود. این مدل توانایی پیش‌بینی تغییر شکل‌های کشیده، سدشکافت، انرژی برحسب پارامتر تغییر شکل هسته و غیره را دارد. محاسبات در این مدل بر اساس نوسانگر هماهنگ اصلاح شده و همچنین مجموعه‌ای از پارامترهای تک ذره μ و κ است. در این مدل فرض بر این است که نوکلئون‌ها در یک پتانسیل دوران کننده که خودشان آن را به وجود آوردند، قرار گرفته‌اند. یکی از نکات مثبت و مهم مدل CNS این است که یک مدل میکروسکوپیکی ماکروسکوپیکی است. این امر، مدل CNS را به یکی از بهترین و قوی‌ترین مدل‌های هسته‌ای در بررسی ساختار هسته در اسپین‌های بالا تبدیل کرده است [۹]. انرژی کل در این محاسبات به دو بخش میکروسکوپیکی و ماکروسکوپیکی تقسیم می‌شود. بخش میکروسکوپیکی انرژی (E_{micro}) یا رفتار ذاتی هسته با توجه به محاسبات نیلسون و تصحیحات پوسته‌ای استروینسکی بدست می‌آید، همچنین قسمت ماکروسکوپیکی انرژی (E_{macro}) یا رفتار دورانی هسته به وسیله مدل قطره مایع LSD که نسبت به مدل قطره مایع LDM جمله انحنا سطح را نیز شامل می‌شود، محاسبه می‌شود. با توجه به این پیاده‌سازی‌ها، انرژی کل را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{macro}} + E_{\text{micro}} \quad (1)$$

همچنین هامیلتونی کل را به صورت زیر می‌توان نوشت [۱۰]:

$$H^{\omega} = H^{(0)} - \omega_j i_{j0} \quad \text{for } x \text{ or } y \text{ or } z \quad (2)$$

که $H^{(0)}$ هامیلتونی سه محوری نیلسون است:

$$= \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2} m (\omega_x^2 x^2 + \omega_y^2 y^2 + \omega_z^2 z^2) H^{(0)} \quad (3)$$

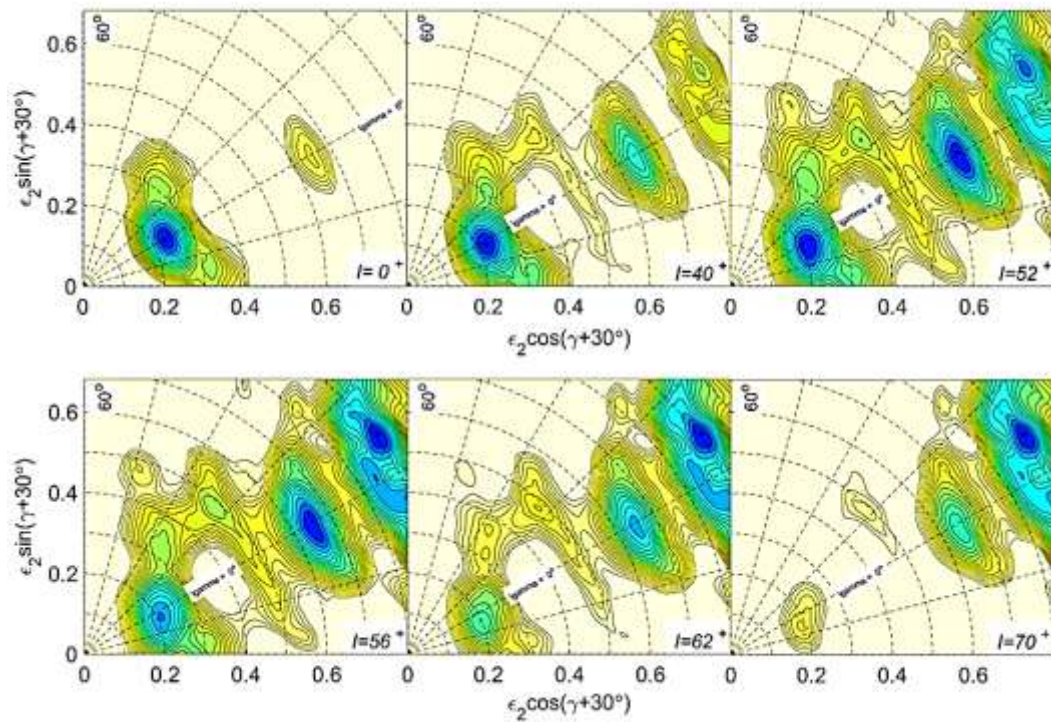
ω_x و ω_y و ω_z فرکانس‌های نوسانی هستند. در حالت کلی می‌توان با رابطه زیر بیان کرد:

$$\omega_j = \omega_j (\varepsilon_2 \cdot \gamma) \left[1 - \frac{2}{3} \varepsilon_2 \cos \left(\gamma + \frac{2\pi v_j}{3} \right) \right] \quad j = \{x, y, z\} \quad (4)$$

به طوری که $v_x = 1$ و $v_y = -1$ و $v_z = 0$ و محاسبات در این حالت در سیستم مختصات کشیده انجام می‌شوند [۹]. μ و κ پارامترهای تک ذره‌ای هستند که برای پروتون و نوترون با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تعیین می‌شوند و مقدار آنها با توجه به عدد جرمی هسته برآورد می‌شود. نهایتاً جمله آخر در رابطه (۲) به دوران هسته که جمله کرنیکینگ است، اشاره می‌کند. ما در روش کد CNS پس از اجرای کد و گرفتن داده‌ها، این داده‌ها را به وسیله کد نویسی در برنامه متلب و استفاده از ابزارهای مناسب، با توابع مختلف



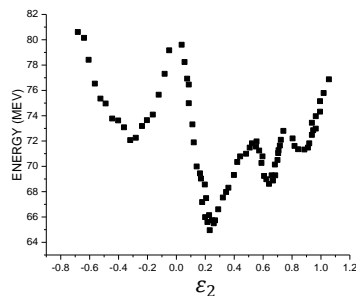
از جمله SIN8 و FOURIER8 و GAUSSIN8 برازش کردیم. بهترین تابعی که بهترین برازش را داشت تابع گاوسی مرتبه ۸ با دقت برازش ۰/۹۷۳۱ و سپس تابع فوریه مرتبه ۸ با دقت برازش ۰/۹۶۶۰ و سپس SIN8 بادقت برازش ۰/۹۶۵۲ بود. به صورت طبیعی برای غلبه بر سد شکافت یک هسته باید به آن انرژی معادل با سد شکافت آن داده شود تا هسته شکافته شود. در این پژوهش با توجه به تصاویر سطوح انرژی پتانسیل شکل (۱) حاصل از بررسی سد شکافت هسته ^{246}Cm با استفاده از کد CNS، مشاهده می‌کنیم که هسته در $\gamma = 0$ قرار دارد و رفتار آن تجمعی است و تک‌ذره‌ای نیست. هسته دارای تقارن محوری است و در حالت کشیده است. در تصاویر شکل (۱)، نقاط تیره نشان دهنده مینیمم‌ها هستند و مینیمم‌ها احتمال حضور هسته را نشان می‌دهند. با بررسی تصاویر شکل (۱) می‌بینیم که در اسپین 0^+ هسته در مینیمم انرژی حدود ۶۵ مگاالکترون‌ولت و در تغییر شکل $2^+ = 0/23$ قرار دارد و این یعنی احتمال حضور هسته در حالت پایه در این انرژی و این تغییر شکل، بیشتر است. در اسپین 0^+ کمینه اول انرژی که بیشترین احتمال حضور هسته در آن حالت است و به کمینه حالت پایه معروف است، تقریباً در $2^+ = 0/23$ است ولی با افزایش اسپین به ۵۲، کمینه اول در انرژی بالا می‌رود یعنی احتمال حضور هسته در آن ناحیه کمتر می‌شود و کمینه پتانسیل دوم (کمینه ثانویه یا ایزومر شکافت) در انرژی، پایین می‌آید. اگر به تصویر سطح انرژی پتانسیل در اسپین ۵۲ نگاه کنید می‌بینید که کمینه انرژی در این اسپین برای این هسته از $2^+ = 0/23$ به $2^+ = 0/62$ انتقال یافته است و این یعنی کشیدگی زیادی در هسته به وجود آمده است و احتمال حضور هسته در آن ناحیه بیشتر از سایر نواحی است. در اسپین ۵۶ کمینه دوم انرژی، بالا می‌رود و کمینه سوم انرژی، پایین می‌آید. این حالت نشان می‌دهد که انرژی پتانسیل هسته در اسپین‌های مذکور سه‌گوشه است و همچنین این معنا را می‌رساند که کمینه انرژی از تغییر شکل $2^+ = 0/62$ به $2^+ = 0/81$ تغییر کرد و هسته کشیدگی بیشتری پیدا کرده است. از اسپین ۵۶ به بعد مشاهده می‌کنیم کمینه‌های انرژی اول و دوم مطابق با شکل، با افزایش اسپین یا انرژی، با کاهش سد شکافت، احتمال نفوذ از سد را با انرژی‌های کمتر، افزایش می‌دهد و به‌ازای افزایش اسپین و همزمان با کاهش ارتفاع سد شکافت و انتقال کمینه‌های انرژی، هسته کشیده و کشیده‌تر می‌شود و به سمت شکافت کامل پیش می‌رود.



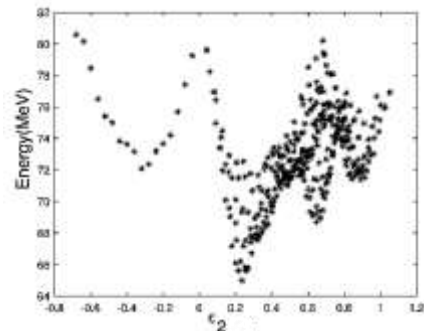
شکل (۱) سطوح انرژی پتانسیل هسته ^{246}Cm در اسپین‌های مختلف

بحث و نتیجه‌گیری:

در شکل‌های (۲) و (۳) که مربوط به اسپین 0^+ است مشاهده می‌کنید که با افزایش انرژی و افزایش تغییر شکل، احتمال حضور هسته و هم سد پتانسیل در اسپین‌های بالاتر، کم می‌شود و هم کمینه انرژی در تغییر شکل‌های بزرگتر قرار می‌گیرد.



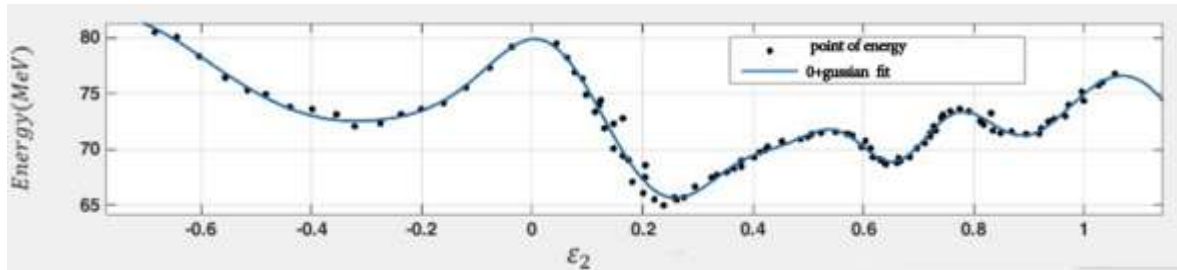
شکل (۳) انرژی ایرست بر حسب پارامتر تغییر شکل برای هسته ^{246}Cm در اسپین 0^+



شکل (۲) تغییرات انرژی بر حسب پارامتر تغییر شکل چهارقطبی برای هسته ^{246}Cm در اسپین 0^+



شکل (۲) انرژی ایرست و شکل (۳) انرژی برحسب پارامتر تغییر شکل چهارقطبی برای پیکربندی چهارگانه هسته ^{246}Cm در اسپین 0^+ را نشان می‌دهد که از طریق مینیمم‌های انرژی آن‌ها، به احتمال حضور هسته پی می‌بریم.



شکل (۴) انرژی‌های ایرست هسته ^{246}Cm در حالت پایه 0^+ است که براساس تابع Gaussian مرتبه ۸ برازش شده است. در شکل شماره (۴) که منحصرأ مربوط به حالت پایه 0^+ هسته ^{246}Cm است، ارتفاع سد شکافت اول حدوداً $6/12\text{MeV}$ است که با مقدار تجربی به دست آمده یعنی 6MeV [۱۰] حدوداً $0/12\text{MeV}$ اختلاف دارد در حالی که مقدار مشابه محاسبه شده به روش میدان میانگین نسبیتی RMF [۱۰] با مقدار تجربی حدوداً $1/13\text{MeV}$ اختلاف دارد. سد دوم شکافت محاسبه شده به روش CNS، $0/27\text{MeV}$ با نتایج تجربی اختلاف دارد در حالی که ارتفاع سد شکافت دوم در روش RMF، $0/20\text{MeV}$ با مقدار تجربی به دست آمده اختلاف دارد.

جدول (۱) مقادیر تجربی و انرژی سدهای اول و دوم شکافت برای هسته ^{246}Cm براساس

روش های RMF و CNS

رتبه	پارامتر مورد بررسی	ارتفاع سد شکافت اول MeV	ارتفاع سد شکافت دوم MeV
۱	روش نظری RMF	۷/۱۳	۴/۸۰
۲	نتایج تجربی	۶/۰	۵
۳	نتایج پژوهش حاضر با استفاده از کد CNS	۶/۱۲	۴/۷۳

براساس جدول (۱) ما پارامتر ارتفاع سد شکافت اول و دوم را که با توجه به روش کد CNS به دست آورده‌ایم، با نتایج روش RMF که در مقاله [۱۰]، ارائه شده است مقایسه کردیم. نتایج محاسبات ما در این مقاله نشان می‌دهد که سدهای شکافت به دست آمده از روش کد CNS که در ردیف شماره ۳ از جدول (۱) ارائه شده است، نسبت به نتایج روش RMF، در مجموع قرابت بیشتری به نتایج تجربی، ارائه شده در ردیف شماره ۲ از جدول (۱)، دارد. در آینده پژوهش‌های دیگری در زمینه محاسبه سد شکافت برای



ایزوتوپ‌های مختلف Cm با روش کد CNS انجام خواهیم داد و سد شکافت سایر ایزوتوپ‌های هسته Cm و هسته‌های سنگین دیگر را به دست خواهیم آورد. پیش‌بینی ما این است که مانند هسته ^{246}Cm این روش برای سایر هسته‌های سنگین نیز با درصد احتمال بالایی قابلیت پیش‌بینی ارتفاع سد شکافت را داشته باشد.

مراجع:

- [1] Meitner, L., & Frisch, O. R, Products of the Fission of the Uranium Nucleus. *Nature*, 143(3620), 471, (1939).
- [2] Meyerhof, W. E., *Elements of nuclear physics*, McGraw-Hill, Vol. 7, (1967).
- [3] Kardan, A., & Sayyah, S, Shape evolution with angular momentum in Lu isotopes. *International Journal of Modern Physics E*, 25(06), 1650044, (2016).
- [4] Tamagno, P., Bouland, O., Serot, O., & Moller, P., Macroscopic-microscopic model of nuclear potential energy. In *EPJ Web of Conferences* Vol. 146, p. 04013, (2017).
- [5] Xu, Y., Guo, H., Han, Y., & Shen, Q., New extended Skyrme interaction for nuclear properties and nuclear reactions. *Physical Review C*, 96(2), 024621, (2017).
- [6] Jiang, W. G., Hu, B. S., Sun, Z. H., & Xu, F. R., Gogny-force-derived effective shell-model Hamiltonian. *Physical Review C*, 98(4), 044320, (2018).
- [7] Lourenço, O., Dutra, M., & Menezes, D. P, Critical parameters of consistent relativistic mean-field models. *Physical Review C*, 95(6), 065212, (2017).
- [8] Möller, P., Sierk, A. J., Ichikawa, T., Iwamoto, A., Bengtsson, R., Uhrenholt, H., & Åberg, S, Heavy-element fission barriers. *Physical Review C*, 79(6), 064304, (2009).
- [9] Kardan, A., Ragnarsson, I., Miri-Hakimabad, H., Motevali, L., Interpretation Of The Large-Deformation High-Spin Bands In Select $A=158-168$ Nuclei. *Physical Review C*, 86(1), 014309, (2012).
- [10] Bhuyan, M., Carlson, B. V., Patra, S. K., & Gupta, R. K., Neck configuration of Cm and Cf nuclei in the fission state within relativistic mean field formalism. *arXiv preprint arXiv:1804.07338*, (2018).