



بررسی نظری شکافت سه‌پاره‌ای ایزوتوپ ^{250}Cm با استفاده از مدل سه‌خوشه‌ای (TCM)

مستانه زاده رفیع*^(۱) - محمدرضا پهلوانی^(۲)

^(۱) و ^(۲) دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله شکافت سه‌پاره‌ای سرد^۱ در ایزوتوپ ^{250}Cm با استفاده از مدل سه‌خوشه‌ای^۲ و در نظر گرفتن ذره α به عنوان پاره ثابت شکافت، مورد مطالعه قرار گرفته است. پتانسیل و بهره^۳ شکافت برای تمام پیکربندی‌های ممکن شکافت سه‌پاره‌ای ^{250}Cm با پاره ثابت α محاسبه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ترکیب‌بندی‌های با عدد جرمی زوج به لحاظ بهره و احتمال شکافت مطلوب‌تر از ترکیب‌بندی‌های با عدد جرمی فرد هستند. همچنین مقایسه بهره‌های نسبی شکافت بین تمام پیکربندی‌های ممکن نشان می‌دهد که وجود پاره‌های با پوسته بسته، یعنی اعداد پروتونی یا نوترونی جادویی (و یا تقریباً جادویی) به شدت بهره شکافت را افزایش می‌دهد.

کلمات کلیدی: شکافت سه‌پاره‌ای، پیکربندی مثلثی، مدل سه‌خوشه‌ای، کمینه سازی پتانسیل، بهره شکافت.

Theoretical study of ternary fission of ^{250}Cm isotope using three cluster model

Mastaneh Zadehrafii*⁽¹⁾, Mohamad Reza Pahlavani⁽²⁾

^{(1), (2)} Nuclear Physics Dept., Faculty of Basic Science, University of Mazandaran

Abstract:

In this work, the cold ternary fission of ^{250}Cm isotope using three-cluster model and considering α particle as the fixed third fragment of fission has been studied. Driving potentials and yields have been calculated for all possible configurations with α as the fixed third fragment. The obtained results reveal that even-mass number components are more favored than odd-mass number components. Furthermore, the comparison between relative yields for a variety of fragmentation indicates that the presence of doubly or near doubly magic closed-shell fragments are more favored in the cold ternary fission of the ^{250}Cm isotope, and the fission yield has increased dramatically due to the presence of these fission fragments.

Keywords: Ternary fission, Triangular configuration, Three Cluster model, Potential minimization, Fission yield.

^۱ Cold ternary fission
^۲ Three Cluster Model (TCM)
^۳ Yield



مقدمه :

شکافت سه‌پاره‌ای فرایندی است که در آن یک هسته سنگین یا فوق سنگین^۱ به صورت خود به خود یا با القای نوترون به سه هسته شکافته می‌شود. این فرایند که در مقایسه با شکافت معمولی دوپاره‌ای^۲ بسیار به ندرت اتفاق می‌افتد، اولین بار با همکاری دانشمندان چینی و فرانسوی کشف شد [۱،۲] و همچنین اولین شواهد تجربی در زمینه این فرایند توسط دانشمندی به نام Alvarez به دست آمد [۳]. در یکی از آزمایشات اولیه که بر روی هسته ^{235}U انجام شد، تعداد واکنش‌های شکافت سه‌پاره‌ای حدود $3 \pm 6/7$ به ازای 10^6 شکافت دوپاره‌ای به دست آمده است [۴]. معمولاً یکی از پاره‌های شکافت سه‌پاره‌ای در مقایسه با دو پاره دیگر بسیار سبک‌تر بوده و در جهتی عمود بر محور شکافت گسیل می‌شود (پیکربندی مثلثی). چنین فرایندی را با عنوان شکافت سه‌پاره‌ای توام با ذره باردار سبک^۳ می‌شناسند (LCP). از طرف دیگر، اگر جرم هر سه پاره با یکدیگر قابل مقایسه بوده و تفاوت قابل توجهی نداشته باشند، به آن فرایند شکافت سه‌پاره‌ای حقیقی^۴ گفته می‌شود. این فرایند که حتی از نوع اول (LCP) هم کم‌احتمال‌تر است، فقط در هسته‌های بسیار سنگین با پارامتر شکافت‌پذیری^۵ بزرگ ($Z^2/A > 31$) اتفاق می‌افتد [۵] و در آن، معمولاً هر سه پاره در یک خط که همان محور شکافت است از یکدیگر جدا می‌شوند. همچنین انرژی آزاد شده در شکافت سه‌پاره‌ای حقیقی بسیار بیشتر از شکافت سه‌پاره‌ای همراه با ذره سبک است. در این مقاله توسط مدل سه‌خوشه‌ای که در سال ۲۰۰۹ معرفی شد [۶]، شکافت سه‌پاره‌ای هسته ^{250}Cm همراه با ذره سبک α در پیکربندی مثلثی مورد مطالعه قرار گرفته است.

روش کار :

شکافت سه‌پاره‌ای تنها در صورتی قابل رخ دادن است که انرژی واکنش مثبت باشد، یعنی

$$Q = M - \sum_{i=1}^3 m_i > 0 \quad (1)$$

که در آن M فزونی جرم هسته مادر و m_i ها فزونی جرم هسته‌های محصول شکافت هستند. لازم به ذکر است که Q به عنوان انرژی جنبشی پاره‌های شکافت شناخته می‌شود. برای یک هسته مادر سنگین و ناپایدار، پتانسیل برهم‌کنش بین سه پاره شکافت به صورت مجموع پتانسیل کولنی و هسته‌ای در نظر گرفته می‌شود.

$$V = \sum_{i=1}^3 \sum_{j>i}^3 (V_{cij} + V_{pij}) \quad (2)$$

^۱ Super heavy

^۲ Binary fission

^۳ Light charged particle accompanied ternary fission

^۴ True ternary fission

^۵ Fissility parameter



که در آن، V_{Cij} و V_{Pij} به ترتیب پتانسیل کولنی و هسته‌ای بین هر جفت i و j از پاره‌های شکافت هستند و از روابط زیر به دست می‌آیند [۷]

$$V_{Cij} = \frac{Z_i Z_j e^2}{R_{ij}} \quad (۳)$$

$$V_{Pij}(s) = 4\pi b \gamma \bar{R} \Phi(s/b) \quad (۴)$$

در معادلات بالا، Z_i و Z_j عدد اتمی و R_{ij} فاصله بین مراکز دو هسته i و j هستند. R_x شعاع خالص هر پاره است که از فرمول نیمه تجربی به دست می‌آید. b پارامتر پخش سطحی هسته است که معمولاً مقداری نزدیک به ۱ fm برای آن در نظر گرفته می‌شود. ضریب کشش سطحی هسته، γ ، توسط فرمول جرم Lysekil محاسبه می‌شود [۸].

$$\gamma = 0.9517[1 - 1.7826(N - Z)^2/A^2] (MeV \cdot fm^{-2}) \quad (۵)$$

در این رابطه Z ، A و N به ترتیب عدد اتمی، عدد جرمی و تعداد نوترون‌های هسته مادر هستند.

\bar{R} شعاع انحنای متوسط است که از معادله زیر به دست می‌آید

$$\bar{R} = \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \quad (۶)$$

و در نهایت، $\Phi(\xi) = \Phi(s/b)$ تابع جهانی پتانسیل هسته‌ای است که تنها به صورت تابعی از فاصله بین پاره‌ها تعریف می‌شود [۹].

$$\Phi(\xi) = \begin{cases} -1/2(\xi - 2.54)^2 - 0.0852(\xi - 2.54)^3 & \text{for } \xi < 1.2511 \\ -3.437 \exp(-\xi/0.75) & \text{for } \xi \geq 1.2511 \end{cases} \quad (۷)$$

همچنین $\xi = s/b$ عبارت است از فاصله بین سطوح نزدیک هسته‌ها که در پیکربندی مثلثی برای هر سه هسته برابر در نظر گرفته می‌شود. $s = 0$ ، $s < 0$ و $s > 0$ به ترتیب بر سه ساختار مماسی، دارای هم‌پوشانی و جدا از هم دلالت دارند.

بر اساس مدل سه‌خوشه‌ای (TCM)، بهره نسبی شکافت برای تمام کانال‌های خروجی به صورت زیر تعریف می‌شود

$$Y(A_i, Z_i) = \frac{P(A_i, Z_i)}{\sum P(A_i, Z_i)} \quad (۸)$$

که در آن، $P(A_i, Z_i)$ احتمال نفوذ پاره i شکافت در سد پتانسیل هسته‌ای سه جسمی بوده و $\sum P(A_i, Z_i)$ مجموع احتمالات نفوذ در سد برای تمام پاره‌های ممکن است. احتمال نفوذ در سد پتانسیل را با استفاده از تقریب یک بعدی W.K.B می‌توان محاسبه کرد.

$$P = \exp\left\{-\frac{2}{\hbar} \int_{s_1}^{s_2} \sqrt{2\mu(V - Q)} ds\right\} \quad (۹)$$

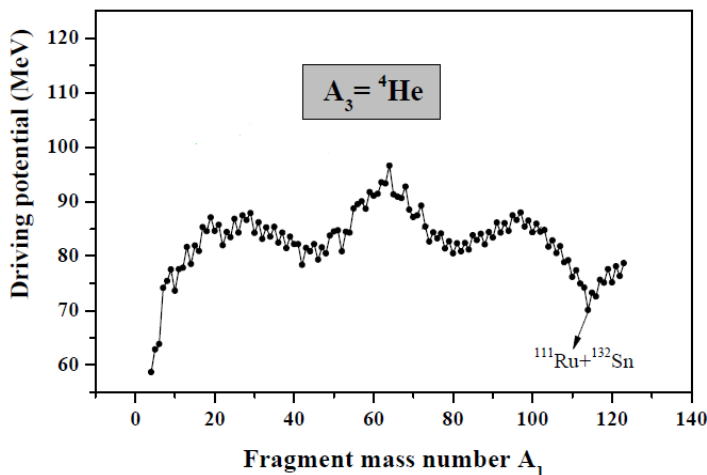
در این معادله V پتانسیل برهم‌کنش است که با معادله (۲) داده می‌شود و Q انرژی آزاد شده در شکافت سه‌پاره‌ای است که در معادله (۱) تعریف آن را آوردیم.



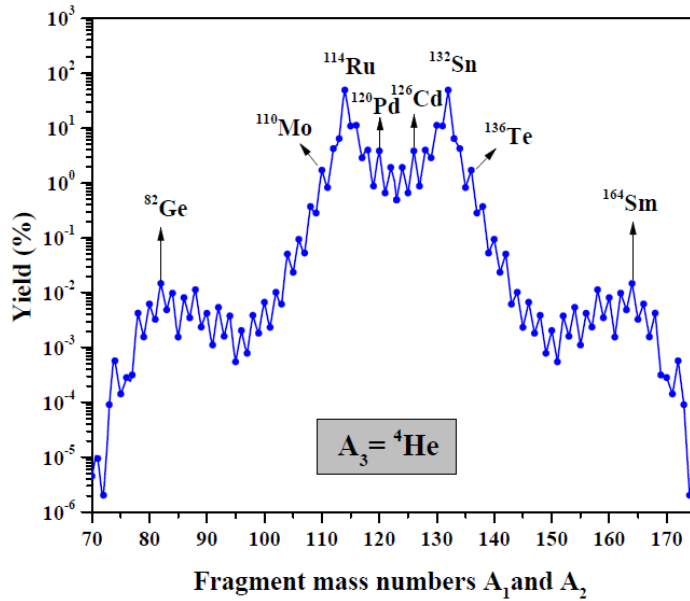
حد پایین انتگرال مربوط به اولین نقطه بازگشت در پیکربندی مماسی است، $s_1=0$. حد بالای انتگرال W.K.B مربوط به دومین نقطه بازگشت سد پتانسیل است که رابطه $V(s_2) = Q$ را ارضا می‌کند. μ نیز جرم کاهش یافته مربوط به پاره‌های شکافت سه‌پاره‌ای است [۱۰-۱۵].

نتایج :

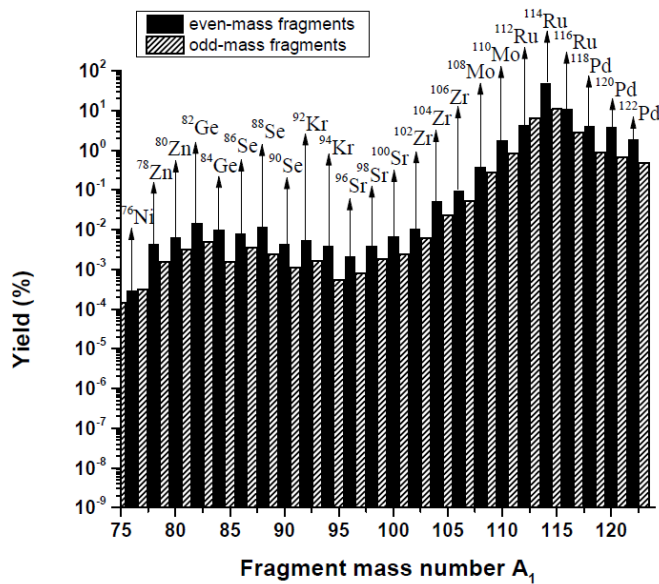
با استفاده از روابط معرفی شده در بخش قبل، پتانسیل محرک^۱ را که برابر است با تفاضل پتانسیل برهم کنش و انرژی واکنش (V-Q)، برای تمام ترکیب‌بندی‌های ممکن از شکافت سه‌پاره‌ای ^{250}Cm به همراه ذره α به عنوان پاره سوم ثابت، در پیکربندی مثلثی محاسبه کردیم. حاصل محاسبات در قالب یک نمودار در شکل (۱) آورده شده است. آن گاه به کمک معادلات (۸) و (۹)، احتمال نفوذ در سد پتانسیل سه جسمی و سپس بهره شکافت را برای تمام ترکیب‌بندی‌های یاد شده (که تعداد ۱۲۰ گروه را تشکیل می‌دهد) به دست آوردیم. نتیجه این محاسبات در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲) به وضوح مشخص است که ترکیب‌بندی $^{114}\text{Ru} + ^{132}\text{Sn} + ^4\text{He}$ دارای بیشترین بهره شکافت سه‌پاره‌ای از بین ۱۲۰ گروه معرفی شده است و این به دلیل وجود هسته دوبار جادویی ^{132}Sn در این ترکیب می‌باشد. از مقایسه نمودارهای (۱) و (۲) می‌توان دریافت که کمینه پتانسیل محرک معادل است با بیشینه بهره و احتمال شکافت. همچنین نمودار میله‌ای شکل (۳) نشان می‌دهد که پیکربندی‌هایی که در آن‌ها عدد جرمی پاره‌ها زوج است، مطلوب‌تر و محتمل‌تر از پیکربندی‌های با دوپاره فرد می‌باشند.



شکل شماره (۱): پتانسیل محرک محاسبه شده برای تمام پیکربندی‌های شکافت سه‌پاره‌ای ^{250}Cm با پاره سوم α ، برحسب عدد جرمی پاره اول شکافت.



شکل شماره (۲): بهره شکافت محاسبه شده برای مهم ترین پیکربندی‌های شکافت سه پاره‌ای ^{250}Cm با پاره سوم α ، برحسب عدد جرمی پاره‌های اول و دوم شکافت.



شکل شماره (۳): بهره شکافت محاسبه شده برای مهم ترین پیکربندی‌های شکافت سه پاره‌ای ^{250}Cm با پاره سوم α ، برحسب عدد جرمی پاره اول شکافت. در این نمودار میله‌ای که پاره‌های زوج و فرد متمایز از هم نشان داده شده اند، مطلوبیت بیشتر کانال‌های خروجی با پاره‌های زوج به خوبی مشخص است.



بحث و نتیجه گیری :

با استفاده از مدل سه خوشه‌ای، شکافت سه پاره‌ای سرد ایزوتوپ ^{250}Cm در پیکربندی مثلی با در نظر گرفتن ذره α به عنوان پاره سوم ثابت مورد مطالعه قرار گرفت. برای تمام پیکربندی‌های ممکن، پتانسیل محرک، مقادیر انرژی واکنش و بهره نسبی محاسبه شد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که پیکربندی‌هایی که در آن‌ها عدد جرمی پاره‌ها زوج است، مطلوب‌تر و محتمل‌تر از پیکربندی‌های با دوپاره فرد می‌باشند که اثرات پوسته‌ای می‌توانند دلیل توجیه‌کننده این موضوع باشند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که وجود هسته‌های با پوسته بسته جادویی یا نیمه جادویی (مانند ^{82}Ge و ^{132}Sn) نقش بسیار مهمی در افزایش بهره شکافت سه پاره‌ای دارند. به علاوه، از نتایج محاسبات می‌توان دریافت که به ازای یک پاره سوم ثابت و مشخص، ترکیب‌های دوتایی که اختلاف جرم کمتری دارند، عموماً مطلوب‌تر هستند.

مراجع :

- [1] Tsien San-Tsiang, Ho Zah-Wei, R. Chastel and L. Vignerone, *Journal Physique Radium*, **8**, 6 (1947).
- [2] Tsien San-Tsiang, Ho Zah-Wei, L. Vignerone and R. Chastel, *Nature* **159** (1947).
- [3] L. W. Alvarez, G. Farwell, E. Segrè and C. Wiegand, *Phys. Rev.* **71**, 327 (1947).
- [4] L. Rosen and A.M. Hudson, *Phys. Rev.* **78**, 533 (1950).
- [5] W. von Oertzen and A. K. Nasirov, *Phys. Lett. B* **734**, 234 (2014).
- [6] K. Manimaran and M. Balasubramaniam, *Phys. Rev. C* **79**, 024610 (2009).
- [7] K. R. Vijayaraghavan, M. Balasubramaniam, and W. von Oertzen, *Phys. Rev. C* **90**, 024601 (2014).
- [8] W. D. Myers and W. J. Swiatecki, *Ark. Fys.* **36**, 343 (1967).
- [9] J. Blocki, W. J. Swiatecki, *Ann. Phys. (N.Y)* **132**, 53 (1983).
- [10] K. R. Vijayaraghavan, M. Balasubramaniam, and W. von Oertzen, *Phys. Rev. C* **90**, 024601 (2014).
- [11] M. Balasubramaniam, K. R. Vijayaraghavan, and K. Manimaran, *Phys. Rev. C* **93**, 014601 (2016).
- [12] K. P. Santhosh, Sreejith Krishnan, and B. Priyanka, *Eur. Phys. J. A* **50**, 66 (2014).
- [13] K. P. Santhosh, Sreejith Krishnan, and B. Priyanka, *International Journal of Modern Physics E* **23**, 11 (2014).
- [14] D. N. Poenaru et al., *Romanian Reports in Physics* **55**, 549 (2003).
- [15] D. N. Poenaru, R. A. Gherghescu, and W. Greiner, *Nucl. Phys. A* **747**, 182 (2005).