

سطح مقطع باقیمانده تبخیر واکنش $Ca^{249}Cf^{48}$ با استفاده از پتانسیل‌های مجاورت

مختلف

INC29-1031

بهادر شریفی*، داریوش نادری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کد پستی: ۶۷۱۴۴۱۴۹۷۱، کرمانشاه-ایران

چکیده:

تشکیل هسته‌ی فوق سنگین اوگانسیم با عدد جرمی ۲۹۷ با استفاده از واکنش کلسیم ۴۸ به‌عنوان پرتابه و هسته‌ی کالیفرنیم ۲۴۹ به‌عنوان هسته‌ی هدف، از طریق محاسبه سطح مقطع باقیمانده تبخیر بررسی شده است. ابتدا اثر پتانسیل هسته‌ای بر سطح مقطع گیراندازی و همچنین بر احتمال تشکیل هسته‌ی مرکب را مورد بررسی قرار داده‌ایم، سپس تأثیر پتانسیل هسته‌ای را بر سطح مقطع باقیمانده تبخیر با استفاده از نه نسخه پتانسیل مجاورت به صورت مجاورت ۷۷، مجاورت ۸۸، بروگلیا وینتر ۹۱، باس ۷۳، باس ۷۷، دنیسوف، کریستین وینتر ۷۶، GP77 و Guo2013 بررسی کرده‌ایم. مشخص شد که ترکیب $Ca^{249}Cf^{48}$ دارای بیشترین سطح مقطع باقیمانده تبخیر ۲۷۹ fb برای کانال n3 در پتانسیل مجاورت Guo2013 است. کمترین مقدار سطح مقطع باقیمانده تبخیر برای پتانسیل باس ۷۳ به دست می‌آید. نتایج به دست‌آمده از پتانسیل‌های GP77، Guo2013 و کریستین وینتر ۷۶ در مقایسه با سایر پتانسیل‌ها، تطابق بهتری با نتایج تجربی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: باقیمانده تبخیر، پتانسیل مجاورت، هسته‌های فوق سنگین

Evaporation residue cross section of the reaction $^{48}Ca+^{249}Cf$ using different versions of proximity potential

B. Sharifi, D. Naderi

Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Razi University, P.O. Code: 6714414971, Kermanshah, Iran

Abstract:

Formation of superheavy nuclei ^{297}Og using the reaction $^{48}Ca+^{249}Cf$ has been investigated via calculation of evaporation residue cross section. First, we have studied the effect of the nuclear potential on the capture cross section and also on the possibility of compound nucleus formation. Then, we investigated the influence of nuclear potential on the evaporation residue cross section using nine versions of proximity potential as Prox77, Prox88, BW91, Bass73, Bass77, Denisov, CW76, GP77 and Guo2013. It is found that the combination $^{48}Ca+^{249}Cf$ has the evaporation residue cross sections 279 fb for the 3n channel in proximity potential Guo2013. The lowest value of evaporation cross section is obtained for Bass73 potential. The results obtained from potentials Guo2013, GP77 and CW76 show better agreement with the experimental results in comparison with other potentials.

Keywords: Evaporation residue, Proximity potential, Superheavy nuclei

۱. مقدمه:

تلاش‌های علمی برای سنتز عناصر جدید فراتر از اورانیوم در دهه ۱۹۳۰ آغاز شد. در دهه‌های اخیر، تلاش‌های نظری و تجربی زیادی برای درک فرآیند همجوشی بین دو یون سنگین انجام شده است [۱-۳]. در بین پتانسیل‌های هسته‌ای، پتانسیل مجاورت از اهمیت بالایی برخوردار است، به طوری که این پتانسیل پدیدار شناختی رکن اصلی مدل‌های همجوشی ماکروسکوپی-میکروسکوپی است. در مدل پتانسیل مجاورت رابطه‌ی پتانسیل هسته‌ای معمولاً از دو قسمت تشکیل شده است؛ یک قسمت شامل هندسه و شکل دو هسته است و دیگری تابع جهانی است. تابع جهانی به فاصله جدایی بین هسته هدف و پرتابه بستگی دارد. این پتانسیل نسخه‌های متفاوتی دارد و برای محاسبه سطح مقطع همجوشی [۴]، واپاشی پروتون از هسته [۵]، واپاشی خوشه‌ای [۶] و نیمه‌عمر واپاشی آلفا [۷] استفاده شده است. در کار حاضر، نقش پتانسیل هسته‌ای را در تشکیل هسته فوق سنگین ^{297}Og با استفاده از نه پتانسیل مجاورت مختلف بررسی کرده‌ایم.

۲. روش کار:

انرژی پتانسیل بین هسته‌ی هدف و پرتابه از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + V_P + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} \quad (1)$$

در این رابطه Z_1 و Z_2 عدد اتمی پرتابه و هدف، r فاصله بین مراکز پرتابه و هدف و l تکانه زاویه‌ای است. V_P نیز پتانسیل هسته‌ای مجاورت است که در این کار شکل‌های مختلفی برای آن در نظر گرفته می‌شود.

۱.۲. پتانسیل GP77:

همان‌طور که اشاره شد، پتانسیل بین دو هسته را می‌توان شامل حاصل ضرب بخش وابسته به شکل هسته و قسمت تابع جهانی در نظر گرفت. پتانسیل GP77 با رابطه زیر بیان می‌شود [۸]

$$V_{GP77} = 4\pi\gamma b \left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \Phi(z/b) \quad (2)$$

تابع جهانی و مقادیر C_1, C_2, γ و b در مرجع [۸] ارائه شده‌اند.

۲.۲. پتانسیل کریستین وینتر (CW76):

کریستین وینتر با استفاده از داده‌های پراکندگی الاستیک یون‌های سنگین، پتانسیل زیر را پیشنهاد کرده‌اند

$$V_{CW76}(r) = -50 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \exp\left(-\frac{r - R_1 - R_2}{0.63}\right) \quad (3)$$

در این رابطه داریم $R_i = 1.233A_i^{1/3} - 0.978A_i^{-1/3}$ [۹].

۳.۲. پتانسیل بروگلیا وینتر ۹۱:

در این پتانسیل از فرمول‌بندی وودز-ساکسون برای محاسبه پتانسیل بین دو هسته استفاده شده و رابطه‌ی زیر بدست آمده است

$$V_{BW91}(r) = -16\pi \frac{R_1 R_2 \gamma a}{R_1 + R_2} \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r - R_0}{a}\right)} \quad (4)$$

پارامترهای مختلف این رابطه در مرجع [۱۰] ارائه شده است.

۴.۲. پتانسیل باس ۱۹۷۳:

باس با استفاده از اطلاعات بر اساس مدل قطره مایع رابطه‌ی زیر را برای پتانسیل هسته-هسته ارائه کرد

$$V_{Bass73}(r) = \frac{da_s A_1^{1/3} A_2^{1/3}}{R_{12}} \exp\left(-\frac{r - R_{12}}{d}\right) \quad (5)$$

برای این رابطه داریم $R_{12} = 1.07(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ ، $d = 1.35$ fm و $a_s = 17$ MeV [۱۱].

۵.۲. پتانسیل باس ۱۹۷۷:

در این پتانسیل تابع جهانی و همچنین دیگر ضرایب به صورت زیر اصلاح گردیده‌اند.

$$V_{Bass77}(r) = -\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left[A \exp\left(\frac{r - R_1 - R_2}{d_1}\right) + B \exp\left(\frac{r - R_1 - R_2}{d_2}\right) \right]^{-1} \quad (6)$$

برای این پتانسیل داریم $d_1 = 3.30$ fm، $d_2 = 0.65$ fm، $A = 0.030$ MeV⁻¹fm، $B = 0.0061$ MeV⁻¹fm [۱۲].

۶.۲. پتانسیل Guo2013:

Guo و همکارانش پتانسیل هسته-هسته را با استفاده از بررسی برهمکنش نوکلئون-نوکلئون به وسیله مدل دابل فولدینگ مورد بررسی قرار داده‌اند. شکل کلی آن شبیه به پتانسیل GP77 است با این تفاوت که تابع جهانی آن به شکل $\phi(\xi) = \frac{P_1}{1 + \exp(\frac{\xi + P_2}{P_3})}$ است [۱۳] است که در آن $\xi = \frac{r - R_1 - R_2}{b}$ و مقادیر P_1 ، P_2 و P_3 به ترتیب برابر ۱/۱۳، ۰/۸۵۴ و ۱/۱۳ می باشند.

۷.۲. پتانسیل Prox77:

رابطه‌ی کلی پتانسیل برای نسخه ی Prox77 دارای شکل زیر است:

$$V_{Prox77}(R) = 4\pi\gamma b \bar{R} \phi(s) \quad (7)$$

در این رابطه داریم $\bar{R} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ و $\gamma = \gamma_0(1 - k_s I^2)$ با $k_s = 1.826$ و $\gamma_0 = 0.957$ MeV/fm² [۱۴].

۸.۲. پتانسیل Prox 88:

همان پتانسیل Prox77 است با این تفاوت که داریم $k_s = 2.3$ و $\gamma_0 = 1.2496$ MeV/fm².

۹.۲. پتانسیل دنیسوف:

دنیسوف با ارزیابی پتانسیل‌های ۷۱۴۰ واکنش یون-یون در فاصله‌های مختلف در محدوده‌ی نقطه تماس، پتانسیل هسته‌ای زیر را بدست آورد.

$$V_{Denisov}(r) = -1.989843 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \varphi(r - R_1 - R_2 - 2.65) \times \left[1 + 0.003525139 \left(\frac{A_1}{A_2} + \frac{A_2}{A_1} \right)^{3/2} - 0.4113263(I_1 + I_2) \right] \quad (8)$$

تابع جهانی این پتانسیل و دیگر کمیت‌ها در مرجع [۱۵] آورده شده است.

سطح مقطع باقیمانده تبخیر حاصل ضرب سطح مقطع گیراندازی، احتمال تشکیل هسته مرکب و احتمال بقا در برابر شکافت است و با رابطه زیر مشخص می‌شود

$$\sigma_{ER}(E) = \sigma_{Cap} P_{CN} W_{Sur} \quad (9)$$

سطح مقطع گیراندازی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۶]

$$\sigma_{cap} = \frac{R_0^2 \hbar \omega_0}{2E} \ln \{ 1 + \exp[2\pi(E - E_0)/\hbar \omega_0] \} \quad (10)$$

در این رابطه R_0 ، E_0 و $\hbar \omega_0$ به ترتیب شعاع سد، ارتفاع سد و انحنای سد می‌باشند. احتمال تشکیل هسته‌ی مرکب به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$P_{CN} = \frac{\exp(-c(x_{eff} - x_{thr}))}{1 + \exp\left[\frac{E_B^* - E^*}{\Delta}\right]} \quad (11)$$

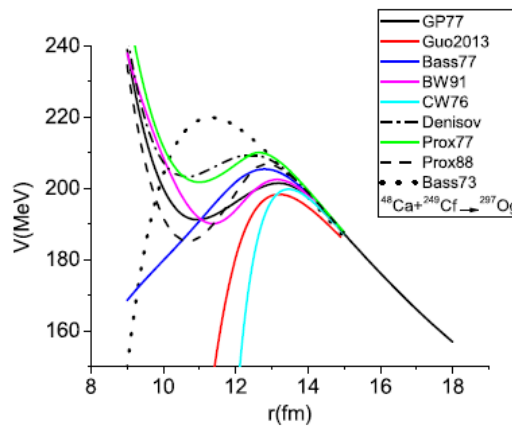
در این رابطه E_B^* انرژی برانگیختگی هسته‌ی مرکب برای حالتی است که انرژی پرتابه در دستگاه مرکز جرم با انرژی کولنی و مجاورت برابر است. احتمال بقا در برابر شکافت با رابطه زیر مشخص می‌شود

$$W_{Sur} = \quad (12)$$

$$P_{xn}(E_{CN}^*) \prod_{i=0}^{i_{max}=x} \left(\frac{\Gamma_n}{\Gamma_n + \Gamma_f} \right)_{i,E^*}$$

کمیت‌ها و پارامترهای مختلف مربوط به روابط (۱۱) و (۱۲) در مرجع [۱۶] آورده شده است.

۳. نتایج:

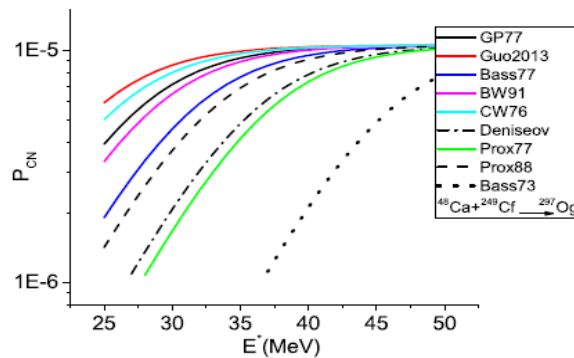


شکل ۱: تغییرات انرژی پتانسیل برحسب فاصله برای پتانسیل‌های مجاورت مختلف

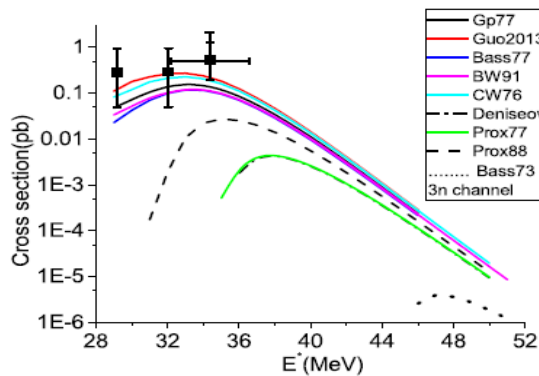
در شکل ۱ تغییرات انرژی پتانسیل برحسب فاصله برای پتانسیل‌های مجاورت مختلف رسم شده است. نسخه‌های مختلف پتانسیل مجاورت از نظر تابع جهانی و یا پارامترهای مربوط به هندسه و شکل دو هسته‌ی برهمکنش کننده با هم متفاوت هستند. مقادیر حداکثر و حداقل سد همجوشی به ترتیب مربوط به پتانسیل‌های Bass73 و Guo2013 است. بیشترین مقدار شعاع سد مربوط به پتانسیل مجاورت CW76 است، درحالی‌که کمترین مقدار برای پتانسیل Bass73 بدست می‌آید. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، با افزایش شعاع سد، ارتفاع سد کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پتانسیل‌های GP77، Guo2013 و CW76 بالاترین مقادیر شعاع سد را دارند.

تغییرات احتمال تشکیل هسته مرکب با انرژی برانگیختگی در شکل ۲ نشان داده شده است. در انرژی‌های بالاتر، نتایج به دست آمده برای احتمال همجوشی تقریباً نزدیک به هم هستند. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، حداکثر احتمال همجوشی در پتانسیل مجاورت Guo2013 به دست آمده است. پتانسیل‌های مجاورت GP77 و CW76 در موقعیت‌های بعدی قرار دارند. کمترین مقدار سطح مقطع برای Bass73 در کانال‌های 3n و 4n به دست آمده است. توافق

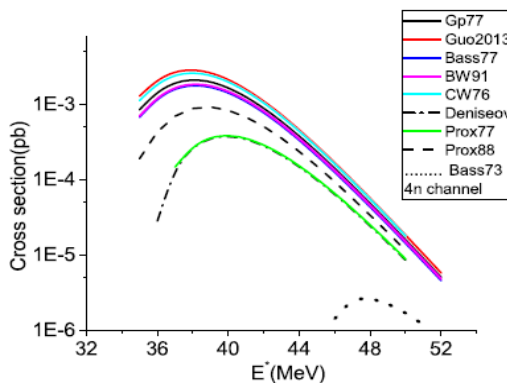
بین داده‌های تجربی و نتایج به‌دست‌آمده بر اساس پتانسیل‌های Guo2013 و CW76 و GP77 بهتر از سایر نسخه‌های پتانسیل مجاورت است. پتانسیل Guo2013 این مزیت را دارد که داده‌های تجربی ارتفاع سد را بازتولید کند. به‌عبارت‌دیگر، تابع جهانی پتانسیل مجاورت Guo2013 به‌طور کلی می‌تواند ارتفاع سد کولنی را برای واکنش‌های همجوشی محاسبه کند. در واقع این پتانسیل می‌تواند مقادیر پارامترهای سد را به‌ویژه برای مواردی که هنوز اندازه‌گیری‌ها انجام نشده است، تخمین بزند.



شکل ۲: تغییرات احتمال تشکیل هسته‌ی مرکب برحسب انرژی برای پتانسیل‌های مجاورت مختلف.



شکل ۳: تغییرات سطح مقطع باقیمانده تبخیر کانال 3n برحسب انرژی برای پتانسیل‌های مجاورت مختلف. مربع‌های توپر داده‌های تجربی هستند [۱۷،۱۸].



شکل ۴: تغییرات سطح مقطع باقیمانده تبخیر کانال 4n برحسب انرژی برای پتانسیل‌های مجاورت مختلف

به‌طور کلی می‌توان گفت برای گیراندازی پرتابه توسط هسته‌ی هدف دو پارامتر ارتفاع سد و شعاع سد بسیار تأثیرگذار هستند. هرچه ارتفاع سد پتانسیل کمتر و شعاع آن بیشتر باشد احتمال گیراندازی و در نتیجه تشکیل هسته مرکب افزایش یافته و در نهایت می‌تواند سطح مقطع باقیمانده تبخیر را افزایش دهد. پتانسیل‌های مجاورت Guo2013، CW76

و GP77 به ترتیب دارای کمترین ارتفاع سد و بیشترین شعاع پتانسیل هستند. در نتیجه بیشترین سطح مقطع باقیمانده تبخیر را نتیجه می‌دهند و هم‌خوانی بهتری با داده‌های تجربی دارند.

۴. بحث و نتیجه‌گیری:

تأثیر پتانسیل هسته‌ای را بر سطح مقطع باقیمانده تبخیر، برای واکنش $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Cf}$ ، با استفاده از نه نسخه‌ی پتانسیل مجاورت بررسی کرده‌ایم. شعاع سد، ارتفاع سد و انحنای پتانسیل سه کمیتی هستند که مقادیر آنها در نسخه‌های مختلف پتانسیل مجاورت، متفاوت است. می‌توان نتیجه گرفت که پتانسیل هسته‌ای نقش مهمی در این فرآیند دارد. محاسبات نشان می‌دهد که پتانسیل مجاورت Guo2013 بیشترین سطح مقطع باقیمانده تبخیر را نتیجه می‌دهد. این پتانسیل به دلیل داشتن ارتفاع سد کم و شعاع سد زیاد، نسبت به دیگر پتانسیل‌ها احتمال تشکیل هسته‌ی مرکب بیشتری دارد و در نتیجه سطح مقطع باقیمانده تبخیر آن نیز بزرگ‌تر خواهد بود.

۵. مراجع:

1. B. B. Back, H. Esbensen, C. L. Jiang, and K. E. Rehm, *Rev. Mod. Phys.* 86, 317 (2014).
2. K. Hagino, and N. Takigawa, *Prog. Theor. Phys.* 128, 1016 (2012).
3. X. J. Bao, Y. Gao, J. Q. Li, and H. F. Zhang, *Phys. Rev. C* 91 011603(R) (2015).
4. R. Kumar, *Phys. Rev. C* 84, 044613 (2011).
5. K. P. Santhosh and I. Sukumaran, *Phys. Rev. C* 96, 034619 (2017).
6. R. Kumar, *Phys. Rev. C* 86, 044612 (2012).
7. V. Zanganeh and N. Wang, *Nucl. Phys. A* 929, 94 (2014).
8. J. Blocki, J. Randrup, W. J. Swiatecki, and C. F. Tsang, *Ann. Phys. (NY)* 105, 427 (1977).
9. P. R. Christensen and A. Winther, *Phys. Lett. B* 65, 19 (1976).
10. A. Winther, *Nucl. Phys. A* 594, 203 (1995).
11. R. Bass, *Phys. Lett. B* 47, 139 (1973); *Nucl. Phys. A* 231, 45 (1974).
12. R. Bass, *Phys. Rev. Lett.* 39, 265 (1977).
13. C. L. Guo, G. L. Zhang, and X. Y. Le, *Nucl. Phys. A* 897, 54 (2013).
14. J. G. Deng, X. H. L., J. L. Chen, J. H. Cheng, and X. J. Wu, *Eur. Phys. J. A* 55, 58 (2019).
15. V. Y. Denisov, *Phys. Lett. B* 526, 315 (2002).
16. D. Naderi and B. Sharifi, *Chin. Phys. C* 45, 094105 (2021).
17. Yu. Ts. Oganessian, et al., *Phys. Rev. C* 83, 054315 (2011).
18. Yu. Ts. Oganessian, et al., *Rep. Prog. Phys.* 78, 36301 (2015).