



محاسبه سطح مقطع همجوشی یون های سنگین در انرژی های نزدیک و زیر سد کولنی

نادری، داریوش* - اکبری، سعیده

دانشگاه رازی، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

چکیده:

در کار حاضر با استفاده از مدل کولنی و مجاورت، سطح مقطع همجوشی را برای برخورد هسته پرتابه و هدف محاسبه کرده ایم. محاسبات برای سیستم های $^{32}_{16}S + ^{24}_{12}Mg$ و $^{32}_{16}S + ^{26}_{12}Mg$ در انرژی های بالاتر و پایین تر از سد کولنی انجام شده است. سطح مقطع همجوشی را برای حالتی که پرتابه و هدف کروی هستند و برای حالتی که هسته هدف تغییر شکل یافته می باشد مورد بررسی قرار داده ایم. همخوانی بین نتایج تجربی و تئوری در انرژی های پایین تر از سد با در نظر گرفتن تغییر شکل هدف و پرتابه نسبت به حالت کروی افزایش می یابد.

کلید واژه: سطح مقطع همجوشی، سد کولنی، تغییر شکل

Calculation of heavy ions fusion cross section in near and below the Coulomb barrier

Naderi, Dariush; Akbari, Saeidh

Abstract

In the present work, we have calculated the fusion cross section for colliding projectile and target nucleus using the Coulomb and proximity model. Calculations are done for the systems $^{32}_{16}S + ^{24}_{12}Mg$ and $^{32}_{16}S + ^{26}_{12}Mg$ at energies larger and lower than Coulomb barrier. We have studied the fusion cross section for spherical and deformed projectile and target nuclei. With considering deformation of target and projectile the agreement between experimental and theoretical results increases at energies lower than barrier.

Keywords: fusion cross section, Coulomb barrier, deformation



مقدمه :

یکی از موضوعات مهم و جذاب در فیزیک هسته‌ای بررسی واکنش‌های همجوشی یون‌های سنگین در انرژی‌های نزدیک و زیر سد کولنی است که بصورت تجربی و نظری انجام گرفته است [۱]. در بررسی واکنش‌های همجوشی یون سنگین، برهمکنش بین هسته‌ی هدف و پرتابه را می‌توان بصورت مجموع دافعه کولمبی، پتانسیل گریز از مرکز و پتانسیل جاذبه هسته‌ای در نظر گرفت. این برهمکنش تابعی از فاصله میان مراکز جرم هسته‌ها برخوردار است. پتانسیل کل در فاصله‌ای به مقدار بیشینه می‌رسد که نیروهای دافعه و جاذبه یکدیگر را متعادل می‌کنند. این پتانسیل را بعنوان سد کولمبی می‌شناسیم و انرژی حرکت نسبی باید بر این سد غلبه کند تا هسته‌ها بتوانند با هم همجوشی انجام دهند.

با استفاده از مدل نفوذ یک بعدی از سد می‌توان برای بسیاری از واکنش‌ها سطح مقطع همجوشی را در بالای سد بدست آورد. در زیر سد نتایج تجربی نسبت به نتایج این مدل مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند. برای توجیح این اختلاف پارامترهای مانند تغییر شکل، ارتعاش [۲] و کانال‌های انتقال نوکلئون [۳] در نظر گرفته شده است.

در کار حاضر برای واکنش‌های $^{32}_{16}S + ^{24}_{12}Mg$ و $^{32}_{16}S + ^{26}_{12}Mg$ سطح مقطع همجوشی را در نزدیکی و پایین سد محاسبه کرده و اثر تغییر شکل هسته‌ها را بررسی کرده ایم.

محاسبات تئوری :

سد برهمکنش برای دو هسته برخوردی به شرح زیر است

$$V = V_C + V_p(z) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} \quad (1)$$

که در آن Z_1 و Z_2 عددهای اتمی پرتابه و هدف هستند، r فاصله بین مراکز پرتابه و هدف، Z فاصله بین سطوح نزدیک پرتابه و هدف، l تکانه زاویه‌ای و μ جرم کاهش یافته هدف و پرتابه است. $V_p(z)$ پتانسیل مجاورت به شرح زیر است [۴]

$$V_p(z) = 4\pi\gamma b \bar{R} \phi \left[\frac{z}{b} \right] \quad (2)$$

که در آن کمیت \bar{R} با توجه به مرجع [۴] محاسبه می‌شود. ضریب کشش سطح هسته بصورت زیر تعریف می‌شود

$$\gamma = 0.9517[1 - 1.7826(N - Z)^2/A^2] \quad (۳)$$

تابع جهانی به شرح زیر است [۵]

$$\phi(\xi) = \begin{cases} -4.41 \exp(-\xi/0.7176), & \xi \geq 1.9475 \\ -1.7817 + 0.9270\xi + 0.01696\xi^2 - 0.05148\xi^3 & 0 \leq \xi \leq 1.9475 \\ -1.7817 + 0.9270\xi + 0.0143\xi^2 - 0.09\xi^3 & \xi \leq 0 \end{cases} \quad (۴)$$

که در آن $\xi = \frac{Z}{b}$ و پارامتر پخش شدگی سطح هسته $b \approx 1$ می باشد. پتانسیل کولنی از رابطه زیر بدست می آید [۶]

$$V_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} + 3Z_1 Z_2 e^2 \sum_{\lambda, i=1,2} \frac{1}{2\lambda+1} \frac{R_i^\lambda}{r^{\lambda+1}} Y_\lambda^{(0)}(\alpha_i) \left[\beta_{\lambda i} + \frac{4}{7} \beta_{\lambda i}^2 Y_\lambda^{(0)}(\alpha_i) \delta_{\lambda,2} \right] \quad (۵)$$

که در آن β پارامتر تغییر شکل چارقطبی و $\lambda = 2$ است. همچنین داریم

$$R_{0i} = 1.28 A_i^{1/3} - 0.76 + 0.8 A_i^{-1/3} \text{ fm} \quad (۶)$$

و

$$R_i(\alpha_i) = R_{0i}(1 + \sum_{\lambda} \beta_{\lambda i} Y_\lambda^0(\alpha_i)) \quad (۷)$$

α زاویه بین شعاع و محور تقارن هسته است. با استفاده از رابطه زیر سطح مقطع همجوشی محاسبه می شود [۷]

$$\sigma = \frac{\hbar\omega}{2} R_B^2 \frac{1}{E} \ln \left\{ \frac{1 + \exp[2\pi\{E - V(R_B)\}/\hbar\omega]}{1 + \exp\left[2\pi\left\{E - V(R_B) - \left(\frac{R_C}{R_B}\right)^2 - [E - V(R_C)]\right\}/\hbar\omega}\right]} \right\} \quad (۸)$$

که در اینجا داریم $R_{B,c} = r_{B,c}(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ با $r_B = 1.4 \text{ fm}$ و $r_c = 1.0 \text{ fm}$ در انرژی های پایین تر از

سد، همجوشی دو هسته از طریق تونل زنی از سد می تواند رخ دهد. سطح مقطع همجوشی بصورت زیر محاسبه

می شود

$$\sigma = \frac{\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{l_c} (2l + 1) P \quad (9)$$

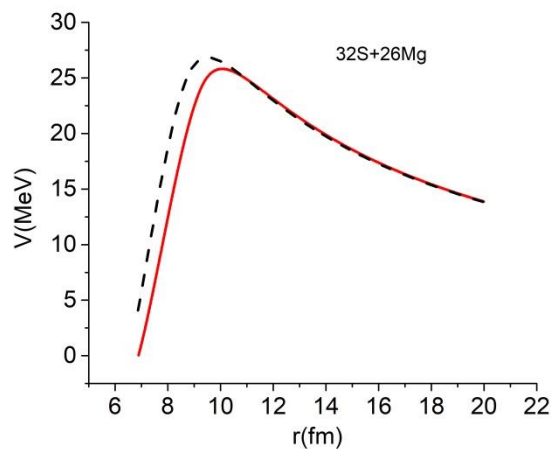
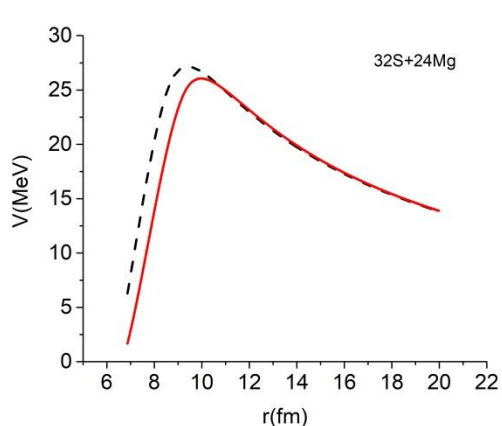
که در آن $k = \sqrt{\frac{2\mu E}{\hbar^2}}$ و $l_c = R_a \sqrt{2\mu(E_{CM} - V_{(R_a, l=0)})}/\hbar$ اولین نقطه تونل زنی و E_{CM} انرژی پرتابه در دستگاه مرکز جرم است. با استفاده از تقریب WKB احتمال نفوذ با رابطه زیر تعیین می شود

$$P = \exp\left\{-\frac{2}{\hbar} \int_a^b \sqrt{2\mu(V - E)} dz\right\} \quad (10)$$

حدود انتگرال با معادله $V(a) = V(b) = E$ تعریف می شوند.

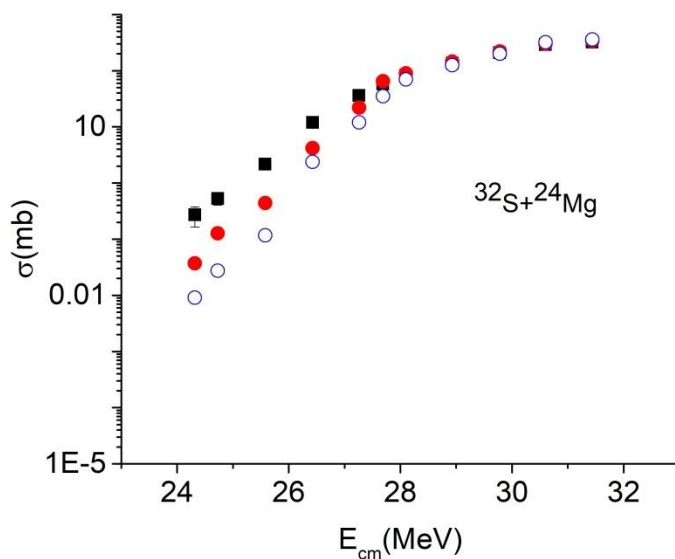
نتایج :

برای بررسی این مدل دو واکنش ${}^{32}_{16}S + {}^{26}_{12}Mg$ و ${}^{32}_{16}S + {}^{24}_{12}Mg$ را در نظر گرفته و محاسبات مربوط به سطح مقطع را انجام داده ایم. نتایج در شکل های ۱ تا ۴ نشان داده شده است. در شکل ۱ تغییرات انرژی پتانسیل برحسب فاصله دو هسته از هم رسم شده است. هسته های ${}^{26}_{12}Mg$ و ${}^{24}_{12}Mg$ به ترتیب دارای پارامترهای تغییر شکل چارقبی ۰/۳ و ۰/۲۷۵ می باشند. از این شکل مشخص می شود که پارامتر تغییر شکل باعث کاهش



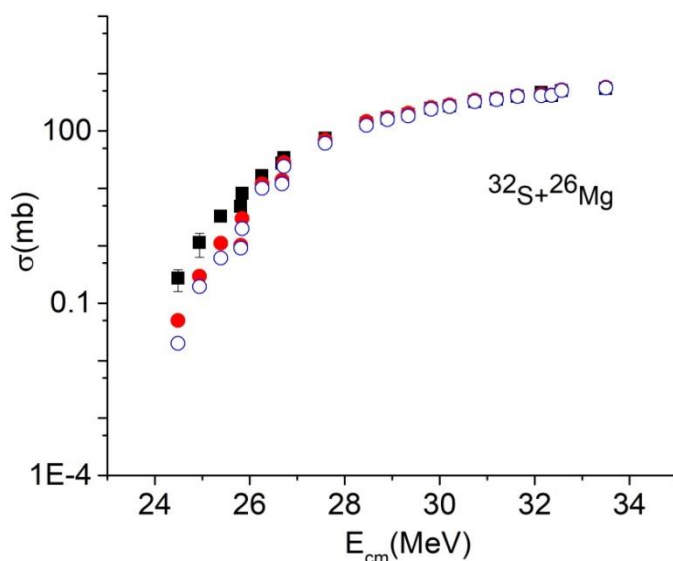
شکل ۱: تغییرات انرژی پتانسیل برحسب فاصله هسته هدف و پرتابه از هم برای دو سیستم $^{32}\text{S} + ^{26}\text{Mg}$ و $^{32}\text{S} + ^{24}\text{Mg}$ برای

حالت $l = 0$. منحنی های خط چین و پررنگ به ترتیب نتایج مربوط به حالت کروی و تغییر شکل یافته می باشند.



شکل ۲: تغییرات سطح مقطع همجوشی با انرژی برای سیستم $^{32}\text{S} + ^{24}\text{Mg}$. مربع های توپر، دایره های توپر و دایره های توخالی

به ترتیب مربوط به نتایج تجربی [۸]، نتایج تئوری برای حالت کروی و حالت غیر کروی می باشند.



شکل ۳: مشابه با شکل ۲ ولی برای سیستم $^{32}_{16}\text{S} + ^{26}_{12}\text{Mg}$.

ضخامت سد و افزایش احتمال عبور از سد می شود. با توجه به اینکه سطح مقطع با احتمال عبور از سد رابطه مستقیم دارد، تغییر شکل هسته ها باعث افزایش سطح مقطع همجوشی می شود. همچنین با در نظر گرفتن تغییر شکل هسته ها محل سد نیز تغییر می کند. برای واکنش $^{32}_{16}\text{S} + ^{24}_{12}\text{Mg}$ محل سد در حالت کروی و غیر کروی به ترتیب در فاصله $9/41\text{fm}$ و $10/05\text{fm}$ و برای سیستم $^{32}_{16}\text{S} + ^{26}_{12}\text{Mg}$ محل سد به ترتیب در فاصله $9/52\text{fm}$ و $10/07\text{fm}$ قرار می گیرند. در شکل ۲ سطح مقطع همجوشی برای واکنش $^{32}_{16}\text{S} + ^{24}_{12}\text{Mg}$ در دو حالت کروی و غیر کروی رسم کرده ایم. در بالای سد نتایج تئوری و تجربی همخوانی خوبی دارند اما برای انرژی های زیر سد نتایج تجربی بزرگتر از محاسبات تئوری هستند. همانطور که در قسمت مقدمه نیز اشاره شد پارامتر های مانند تغییر شکل، ارتعاش و کانال های انتقال نوکلئون بر روی این اختلاف تاثیر گذارند. در حالتی که تغییر شکل هسته ها

را در محاسبات تئوری در نظر گرفته ایم همخوانی بین نتایج تئوری و تجربی در انرژی های زیر سد بهتر شده است.

در شکل ۳ محاسبات را برای سیستم $^{32}_{16}S + ^{26}_{12}Mg$ انجام داده و نتایج را با داده های آزمایشگاهی مقایسه کرده ایم. نتایج مشابهی با شکل ۲ بدست آمده است. برای سیستم $^{32}_{16}S + ^{26}_{12}Mg$ در مقایسه با سیستم $^{32}_{16}S + ^{24}_{12}Mg$ سطح مقطع بدست آمده بزرگتر است.

بحث و نتیجه گیری:

با توجه به سیستم های در نظر گرفته شده و محاسباتی که برای آنها انجام شده است می توان نتیجه گرفت که در انرژی های پایین تر از سد نتایج تئوری و تجربی همخوانی کمتری دارند. پارامتر تغییر شکل می تواند بر روی نتایج تاثیر داشته باشد. این پارامتر باعث افزایش احتمال عبور از سد، تغییر محل سد کولنی و در نتیجه باعث افزایش سطح مقطع می شود. همچنین ترکیب هسته هدف و پرتابه نیز می تواند بر روی نتایج موثر باشد.

مراجع:

- [1] R. K. Puri and R. K. Gupta, " Fusion barriers using the energy-density formalism: Simple analytical formula and the calculation of fusion cross sections", Phys. Rev. C 45, 1837 (1992) .
- [2] A. M. Stefanini, G. Fortuna, A. Tivelli, W. Meczynski, S. Beghini, C. Signorini, S. Lunardi and M. Morando, " Sub-barrier fusion of $^{28,30}_{14}Si$ with $^{58,62,64}_{28}Ni$ ", Phys. Rev.C 30, 2088 (1984).
- [3] A. Iwamoto, P. Moller, J. R. Nix and H. Sagawa, "Collisions of deformed nuclei: A path to the far side of the superheavy island", Nucl. Phys. A 596, 329 (1996).
- [4] R. K. Gupta, N. Singh, and M. Manhas, "Generalized proximity potential for deformed, oriented nuclei", Phys. Rev. C 70, 034608 (2004).
- [5] K. P. Santhosh and V. Bobbyjose, " Heavy-ion Fusion Cross Sections of ^{32}S on $^{90,96}Zr$ Targets Using Coulomb and Proximity Potential", Jour. Nucl. Phys., Mat. Sci., Rad. and Appl. 2, 1 (2017).
- [6] N. Malhotra, and R. K. Gupta, "Proximity potential for deformed, oriented collisions and its application to $^{238}U+^{238}U$ ", Phys Rev.C 31, 1179 (1985).



[7] D. Glas and U. Mosel, "Limitation on complete fusion during heavy-ion collisions" Phys. Rev. C 10, 2620 (1974).

[8] G. M. Berkowitz, et al., "Fusion near and below the barrier for the systems $^{32,34}\text{S}+^{24,25,26}\text{Mg}$ and $^{32}\text{S}+^{27}\text{Al}$ ", Phys. Rev. C 28, 667 (1983).