



تأثیر برانگیختگی های چند فونونی روی سطح مقطع همجوشی واکنش $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ در انرژی های نزدیک سد کولنی با استفاده از پتانسیل اپتیکی در کانالهای کوپل شده

قمبری، میترا*^(۱) - صادقی، حسین^(۲) - فریدون نژاد، راحله^(۳)

اراک ، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده:

سطح مقطع همجوشی برای واکنش یون سنگین $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ با استفاده از پتانسیل اپتیکی با روش کانال های جفت شده مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر برانگیختگی چندگانه فونون های هشت قطبی در ^{96}Zr و نیز در هسته پرتابه ^{40}Ca روی سطح مقطع در نظر گرفته شده. سطح مقطع همجوشی این واکنش با داده های تجربی موجود با در نظر گرفتن و بدون در نظر گرفتن اثرات کانال های جفت شده مقایسه شده است. کانالهای جفت شده باعث افزایش سطح مقطع همجوشی زیر سد کولنی می شود و نیز با افزایش برانگیختگی های چند فونونی هسته هدف و پرتابه، سطح مقطع به داده های تجربی نزدیک تر می شود.

coupled-channel calculation- fusion cross section-heavy ion fusion

کلمات کلیدی:

مقدمه :

در سالهای اخیر سطح مقطع همجوشی یونهای سنگین در انرژی های نزدیک سد کولنی علاقه بسیاری از فیزیکدانان را به خود جلب نموده است [۱]. داده های تجربی در کنار مطالعات تئوری نشان می دهند که جفت شدگی حرکات نسبی هسته های پرتابه و هدف به حرکات درونی هسته ای بشدت روی واکنشهای همجوشی در این انرژی ها تأثیر می گذارد [۲]. واکنشهای همجوشی زیر سد کولنی مثال خوبی از پدیده ی تونل زنی کوانتومی در حضور جفت شدگی های هسته ای می باشد [۳]. همجوشی واکنش های یون سنگین می تواند اطلاعاتی در مورد انرژی تولیدی ستاره ها و سنتز هسته ای بدهد و همچنین بینش جدیدی در دینامیک واکنش ها و ساختار هسته ای ارائه می دهد [۴]. از آنجایی که اثر انتقال نوترونی روی همجوشی باعث بزرگتر شدن سطح مقطع می شود و این امر ناشی از مثبت بودن مقدار Q مؤثر برای انتقال نوترون است، با انتخاب هسته ^{96}Zr از بین ایزوتوپهای این اثر را بخاطر کوچک بودنش حذف می کنیم زیرا مقدار Q برای این هسته منفی است [۵]. با استفاده از محاسبات کانالهای جفت شده که از پتانسیل موهومی استفاده می کند، جفت شدگی هایی را در نظر می گیریم که شامل برانگیختگی های یک، دو و سه فونونی هسته هدف و همچنین یک و دو فونونی هسته پرتابه باشند.



روش کار :

برای واکنشهای همجوشی یون سنگین یک تقریب مؤثر، تقریب isocentrifugal است که در این تقریب اندازه حرکت زاویه ای حرکت نسبی هر کانال با اندازه حرکت زاویه ای کل J جایگزین می شود [۶ و ۷]. بنابراین معادلات کانالهای جفت شده به صورت زیر در می آیند [۳]:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{d^2}{dr^2} + \frac{J(J+1)\hbar^2}{2\mu r^2} + V_N^{(0)}(r) + \frac{Z_p Z_T e^2}{r} - E + \varepsilon_n \right] \varphi_n(r) + \sum_m V_{nm}(r) \varphi_m(r) = 0 \quad (1)$$

در رابطه بالا μ جرم کاهش یافته هسته ها ، r مؤلفه شعاعی حرکت نسبی، E انرژی مرکز جرم ورودی و ε_n انرژی برانگیختگی کانال n ام می باشد. V_{nm} عناصر ماتریسی هامیلتونین جفت شده است که شامل مؤلفه های هسته ای و کولنی است. $V_N^{(0)}$ پتانسیل هسته ای در کانال ورودی می باشد که قسمت شعاعی آن بصورت Woods-Saxon است. هامیلتونی جفت شده هسته ای را برای این پتانسیل می توان بصورت رابطه زیر نوشت:

$$V_N(r, \hat{O}) = -\frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_0 - \hat{O}}{a_0}\right)} + i \frac{-W_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_w - \hat{O}}{a_w}\right)} \quad (2)$$

که \hat{O} عملگر جفت شدگی ارتعاشی یا چرخشی می باشد، $R_0 = r_0(A_p^{1/3} + A_T^{1/3})$ و $R_w = r_w(A_p^{1/3} + A_T^{1/3})$ ، a_0, a_w پارامترهای پراکندگی برای قسمت موهمی و حقیقی، V_0, W_0 عمق پتانسیل می باشند. به عنوان مثال برای هسته ی هدفی که دارای مد چرخشی است این عملگر مانند رابطه زیر تعریف می شود:

$$\hat{O} = \beta_2 R_T Y_{20} + \beta_4 R_T Y_{40} \quad (3)$$

در این رابطه β_2 و β_4 پارامترهای تغییر شکل چهارقطبی و شانزده قطبی، R_T برابر $r_{coup} A_T^{1/3}$ است که در آن A_T عدد جرمی هسته هدف است. در حالتی که هسته هدف دارای مد ارتعاشی باشد عملگر \hat{O} به شکل زیر در می آید:

$$\hat{O} = \frac{\beta_\lambda}{\sqrt{4\pi}} R_T (a_{\lambda 0}^\dagger + a_{\lambda 0}) \quad (4)$$

در جفت شدگی چرخشی λ ضریب چند قطبی مد ارتعاشی است و همچنین $a_{\lambda 0}^\dagger$ و $a_{\lambda 0}$ به ترتیب عملگرهای خلق و فناء فونون می باشند. با استفاده از کد CCFULL [۳] ویژه توابع و ویژه مقادیر این عملگر و همچنین عناصر ماتریسی هسته ای هامیلتونی جفت شده با قطری کردن ماتریس \hat{O} بدست می آید. برای اطلاعات بیشتر مرجع [۳] مطالعه شود. بنابراین حال می توان سطح مقطع همجوشی هسته مرکب تشکیل شده را بدست آورد:

$$\sigma_{fus}(E) = \frac{\pi}{k^2} \sum_J (2J+1) P_J(E) \quad (5)$$



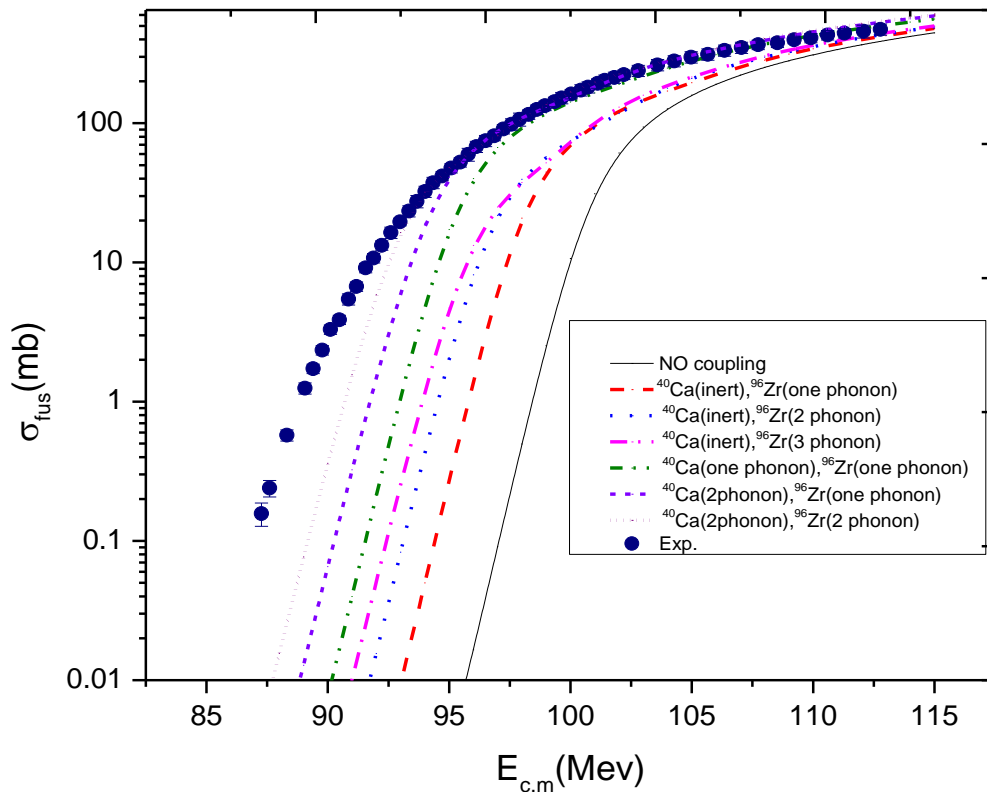
که $P_j(E) = \sum_n |T_n^j|^2$ و T_n^j ضریب انتقال است که با در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب بدست می‌آید.

نتایج :

در این بخش نتایج محاسبات کانال‌های جفت شده با استفاده از کد CCFULL برای بدست آوردن سطح مقطع همجوشی واکنش $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ آورده شده است. ابتدا هم هسته هدف و هم پرتابه بدون هیچ گونه مد تجمعی در نظر گرفته می‌شوند (بدون جفت شدگی)، سپس با اضافه کردن حالات تجمعی به هسته هدف سطح مقطع مجدداً بدست می‌آید و در نهایت این حالات به هسته پرتابه نیز اضافه می‌گردد. هسته هدف ^{96}Zr ترازهای ارتعاشی با پارامتر تغییر شکل $\beta = 0.285$ را داراست و برای زیر ترازهای 3^- (هشت قطبی) تک فونون، دو فونون و سه فونون محاسبات انجام شده است. همچنین هسته پرتابه ^{40}Ca با پارامتر تغییر شکل $\beta = 0.402$ و زیر تراز 3^- (تک فونون و دو فونون) در نظر گرفته شده است [۸]. جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده پتانسیل اپتیکی را نشان می‌دهد. نتایج مربوط به محاسبات سطح مقطع در شکل ۱ برای انرژی‌های نزدیک سد کولنی کشیده شده است. این شکل تأثیر محاسبات کانالهای جفت شده را در انرژی‌های زیر سد کولنی نشان می‌دهد. از آنجایی که ارتفاع سد کولنی برای این واکنش از محاسبات مربوطه برابر $V_b = 100.28 \text{ MeV}$ است [۳]، حالات ارتعاشی روی سطح مقطع همجوشی در انرژی‌های زیر سد کولنی تأثیر می‌گذارد و باعث بالا رفتن سطح مقطع همجوشی می‌شود. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود بالا رفتن سطح مقطع همجوشی به برانگیختگی فونونی نیز بسیار حساس است و هرچه تعداد فونونها بیشتر می‌شود نتایج به داده‌های تجربی نزدیک تر می‌شود. همچنین اگر حالات ارتعاشی هسته پرتابه و برانگیختگی‌های فونونی آن را به محاسبات اضافه کنیم باز شاهد تطابق بهتری با داده‌های تجربی هستیم. پس می‌توان نتیجه گرفت که جفت شدگی حالت‌های هشت قطبی علاوه بر هسته هدف در هسته پرتابه نیز بسیار مهم است و منجر به افزایش سطح مقطع همجوشی و نزدیک تر شدن آن به داده‌های تجربی می‌شود.

جدول شماره (۱). پارامترهای پتانسیل اپتیکی مورد استفاده در این کار [۹]

سیستم	$V_0 (MeV)$	$r_0 (fm)$	$a_0 (fm)$	$W_0 (MeV)$	$r_w (fm)$	$a_w (fm)$
$^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$	۸۷	۱,۱۳	۰,۷	۴۰	۱,۱	۰,۲



شکل شماره (۱). نمودار سطح مقطع همجوشی برای واکنش $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ در انرژی‌های نزدیک سد کولنی با استفاده از روش کانالهای جفت شده. خط مشکی حالت بدون جفت شدگی را برای این واکنش نشان می‌دهد و خطوط بعد از آن به ترتیب افزایش تعداد فونونها در هسته هدف و پرتابه جفت شدگی‌های ارتعاشی را نشان می‌دهند. داده‌های تجربی از مرجع [۱۰] گرفته شده است.

بحث و نتیجه‌گیری :

سطح مقطع همجوشی واکنش $^{40}\text{Ca} + ^{96}\text{Zr}$ با استفاده از روش کانالهای جفت شده در انرژی‌های نزدیک سد کولنی بدست آمده است. با در نظر گرفتن جفت شدگی‌های ارتعاشی شاهد افزایش سطح مقطع در انرژی‌های زیر سد کولنی هستیم و نیز با اضافه کردن برانگیختگی‌های چند فونونی به هسته‌های هدف و پرتابه نتایج به داده‌های تجربی نزدیک‌تر می‌شود و می‌توان گفت که حالات ارتعاشی و نیز تعداد فونونها در هسته پرتابه هم باید در نظر گرفته شود تا تطابق خوبی با داده‌های تجربی ایجاد شود.



مراجع :

- [1] M. Dasgupta, et al., Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 48, 401 (1998).
- [2] M. Beckerman, Rep. Prog. Phys. 51 (1988) 1047; Phys. Rep. 129,145 (1985).
- [3] K. Hagino, N. Rowley, A.T. Kruppa,, Computer Physics Communications, 123, 143 (1999).
- [4] A. B. Balantekin and N. Takigawa, Review of Modern Physics, 70, pp. 77-100, 1998.
- [5] H. Esbensen and A. M. Stefanini, Phys. Rev. C 89, 044616 (2014).
- [6] K. Hagino, N. Takigawa, A.B. Balantekin, J.R. Bennett, Phys. Rev. C 52, 286 (1995).
- [7] R. Lindsay, N. Rowley, J. Phys. G 10, 805 (1984).
- [8] A. M. Stefanini et al., Phys. Lett. B 728, 639 (2014).
- [9] G. Scamps and K. Hagino, Phys. Rev. C 92, 054614 (2015).
- [10] H. Timmers, L. Corradi, A.M. Stefanini et al., Phys. Lett. B 399, 35 (1997).