

۱۶ و ۱۷ شهریور ماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

بررسی روند تغییر شکل هسته‌ها در انرژی‌های زیر سدی برای سیستم‌های همجوشی $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Mo}$ و $^{36}\text{S}+^{90}\text{Zr}$

رمضانی*، مرتضی - ناصر قدسی، امید

دانشگاه مازندران، بابلسر، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده

در این مقاله با استفاده از محاسبات جفت شدگی کانالها (Coupled-Channel (CC) به محاسبه سطح مقطع همجوشی در واکنش-های $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Mo}$ ، $^{36}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ پرداخته‌ایم. محاسبات پتانسیل برهمکنشی را براساس مدل دابل-فولدینگ اصلاح شده انجام داده‌ایم. نتایج حاصل از این بررسی یک روند افزایشی بین پارامتر پخشیدگی (a_{rep}) در تابع چگالی ماده هسته‌ای با انرژی (E_{lab}/A_p) را پیش بینی می‌کند.

کلید واژه: واکنش‌های همجوشی یون- سنگین، پارامتر پخشیدگی، مدل دابل- فولدینگ اصلاح شده.

مقدمه

یکی از کمیت‌های مورد اساسی در محاسبه سطح مقطع واکنش‌های همجوشی یون سنگین، محاسبه پتانسیل برهمکنشی بین هسته‌های هدف و پرتابه می‌باشد. از طرفی با توسعه و پیشرفت در تجهیزات آزمایشگاهی و استفاده از تکنیک‌های جدید آشکارسازی، سطح مقطع واکنش‌های همجوشی در انرژی‌های عمیق زیر سدی اندازه‌گیری شده است. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که مدل‌های تئوری نظیر AW حتی با اعمال تصحیحات مربوط به درجات آزادی ذاتی هسته‌ها یعنی اثرات Coupled Channels (CC) قادر به توصیف سطح مقطع‌های تجربی در انرژی‌های زیر سدی، نیستند [۱]. در واقع به کاهش ناگهانی مقادیر سطح مقطع‌های آزمایشگاهی نسبت به سطح مقطع‌های تئوری در انرژی بسیار پایین، پدیده fall off گفته می‌شود. محققان این پدیده را به یک عامل بازدارنده (hindrance) در فرآیندهای همجوشی نسبت دادند، و با استفاده از مدل DF و اصلاح آن از طریق اعمال اثرات معادله حالت ماده هسته‌ای توانستند این پدیده را توجیه کنند [۲ و ۳]. ما در این مقاله با بدست آوردن پتانسیل‌های اصلاح شده DF برای هر سطح مقطع آزمایشگاهی در انرژی‌های عمیق زیر سدی در واکنش‌های $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Mo}$ ، $^{36}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ به یک روند معنی دار درباره تغییر شکل هسته‌های هدف و پرتابه در انرژی‌های عمیق زیر سدی رسیدیم. از طرفی مقادیر سطح مقطع تجربی واکنش‌های ذکر شده را از مرجع [۴ و ۵] استخراج کردیم.

۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴، دانشگاه یزد

روش کار

یکی از ابزارهای لازم برای مشخص کردن پدیده fall off در واکنش‌های همجوشی، بررسی فاکتور S در آن واکنش می‌باشد، که به شکل زیر تعریف می‌شود،

$$\sigma \exp(2\pi\eta) = S(E) \quad (1)$$

در این رابطه E و $\eta = e^2 Z_1 Z_2 / \hbar(2E)^{1/2}$ به ترتیب انرژی مرکز جسم و پارامتر سامرفیلد می‌باشند [۶]. دیده می‌شود که مقادیر تجربی S در انرژی‌های بسیار پایین‌تر از سد کولنی یک ماکزیمم دارد.

برای محاسبه پتانسیل برهمکنشی از مدل اصلاح شده DF استفاده کردیم، در این مدل اثرات مغز دافعه با استفاده از فرم پیشنهادی $U_{rep}(r) = V_{rep} \delta(r)$ مدل‌سازی شده است [۲]. آنچه که در مدل‌سازی مغز دافعه با استفاده از فرم پیشنهادی فوق مهم است بدست آوردن ثابت V_{rep} می‌باشد که بدین منظور از معادله حالت هسته‌ای (EOS) استفاده کرده‌ایم. از طرفی بر اثر همپوشانی توزیع‌های چگالی هسته‌های هدف و پرتابه، انرژی سیستم به اندازه ΔU افزایش می‌یابد،

$$\Delta U = 2A_P [\varepsilon(2\rho_0, \delta) - \varepsilon(\rho_0, \delta)] \quad (3)$$

در این رابطه A_P و δ و $\varepsilon(\rho_0, \delta)$ به ترتیب عدد جرمی هسته کوچکتر در سیستم‌های نامتقارن، پارامتر فزونی نسبی نوترون و انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون می‌باشد. برای محاسبه انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون $\varepsilon(\rho_0, \delta)$ از مدل توماس فرمی استفاده کرده‌ایم [۷]. از طرفی با بسط معادله حالت حول چگالی اشباع (ρ_0) و تعریف ضریب تراکم ناپذیری می‌توان ارتباط بین افزایش انرژی و اثرات مغز دافعه را به صورت زیر بدست آورد

$$\Delta U(0) \approx (A/9) K \quad (4)$$

در نتیجه پتانسیل هسته‌ای کل در $r=0$ (محلی که همپوشانی کامل توزیع چگالی اتفاق می‌افتد) به صورت زیر تعریف می‌شود

$$U_N(0) = U_{N \text{ attr}}(r) + U_{N \text{ rep}}(r)$$

که در محاسبه پتانسیل هسته‌ای جاذبه در $r=0$ (محلی که همپوشانی کامل توزیع چگالی اتفاق می‌افتد) از انتگرال DF استفاده می‌شود

$$U_{N \text{ attr}}(r) = \int dr_1 \int dr_2 \rho_1(r_1) \rho_2(r_2) v_{cent}(r_1, r_2) \quad (5)$$

در این رابطه $\rho_i(r_i)$ تابع توزیع چگالی دو پارامتری فرمی برای هسته‌های هدف (یا پرتابه) است

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

$$\rho_i(r_i) = \rho_0 / (1 + \exp((r - R_{0i}) / a_{0i})) \quad (۶)$$

در این رابطه R_{0i} و a_{0i} به ترتیب شعاع میانگین و پارامتر پخشیدگی سطح هسته می‌باشد. پارامترهای شعاع و پخشیدگی سطح برای هریک از هسته‌های ^{28}Si ، ^{94}Mo ، ^{36}S و ^{90}Zr در جدول ۱ لیست شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای شعاعی R_0 و پخشیدگی a مربوط به هسته‌های ^{28}Si ، ^{94}Mo ، ^{90}Zr و ^{36}S [۸].

هسته	$R_0(\text{fm})$	$a(\text{fm})$
^{28}Si	۳/۱۴	۰/۵۳۷
^{94}Mo	۵/۰۴۶	۰/۵۲۸
^{90}Zr	۴/۹۷۵	۰/۵۲۲
^{36}S	۳/۴۸۰	۰/۵۳۰

از طرفی برای محاسبه پتانسیل مغز دافعه هسته‌ای در $r = 0$ (محلی که همپوشانی کامل توزیع چگالی اتفاق می‌افتد) نیز از انتگرال DF استفاده می‌شود

$$v_{\text{rep}}(r_2)(r_1)\rho_2 = \int dr_1 \int dr_2 \rho_1(r) U_{N \text{ rep}}(r_1, r_2) \quad (۵)$$

در این رابطه $\rho_i(r_i)$ تابع توزیع چگالی دو پارامتری فرمی برای هسته‌های هدف (یا پرتابه) است

$$\rho_i(r_i) = \rho_0 / (1 + \exp((r - R_{0i}) / a_{\text{rep}})) \quad (۶)$$

در این رابطه R_{0i} و a_{rep} به ترتیب شعاع میانگین و پارامتر پخشیدگی سطح هسته‌های هدف و پرتابه می‌باشد. برای اینکه اثرات مربوط به پخشیدگی سطح هسته‌های هدف و پرتابه در حین برهمکنش در محاسبات لحاظ شوند، پارامتر پخشیدگی مربوط به این هسته‌ها را در مدل‌سازی اثرات مغز دافعه به عنوان یک پارامتر آزاد و به شکل a_{rep} تعریف می‌کنیم.

نتایج

ابتدا با استفاده از مدل اصلاح شده DF (MDF) که در آن اثرات مغز دافعه در برهمکنش‌های نوکلئونی مدل‌سازی شده است پتانسیل برهمکنشی کل را در پارامترهای پخشیدگی متفاوت برای واکنش‌های $^{36}\text{S} + ^{90}\text{Zr}$ ، $^{28}\text{Si} + ^{94}\text{Mo}$ محاسبه کردیم (نتایج مربوط به این پتانسیل را با M3Y+Rep نمایش داده‌ایم) (شکل ۱ را مشاهده نمایید). همانطور که مشاهده

۱۶ و ۱۷ شهریور ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

می‌کنید عمق فرورفتگی های این پتانسیل با افزایش پارامتر پخشیدگی a_{rep} کم می‌شود. وجود این تغییرات در نواحی داخلی سد موجب کاهش سطح مقطع‌های همجوشی ناشی از این پتانسیل $M3Y+Rep$ در انرژی‌های کم می‌شود (شکل ۲ را مشاهده نمایید).

در ادامه با نمایش انرژی به ازای عدد جرمی هسته‌های پرتابه (E_{lab}/A_p) نسبت به پارامتر پخشیدگی (a_{rep}) به یک روند افزایشی در واکنش‌های مورد بررسی می‌رسیم که نشان می‌دهد که تغییر شکل هسته‌ها در انرژی‌های زیر سدی مهم می‌باشند و یک روند افزایشی دارند. در جدول زیر پارامتر پخشیدگی و انرژی برحسب عدد جرمی هسته پرتابه واکنش-های $^{36}S+^{90}Zr$ و $^{28}Si+^{94}Mo$ لیست شده است.

جدول ۲: پارامترهای پخشیدگی a_{rep} و E_{lab}/A_p بدست آمده مربوط به مدل دابل فولدینگ اصلاح شده را برای واکنش‌های $^{36}S+^{90}Zr$ و $^{28}Si+^{94}Mo$

هسته	E_{lab}/A_p	a_{rep} (fm)
$^{36}S+^{90}Zr$	۲/۸۷	۰/۴۵۰
$^{36}S+^{90}Zr$	۲/۸۹	۰/۴۵۱
$^{28}Si+^{94}Mo$	۳/۰۱	۰/۴۵۳
$^{28}Si+^{94}Mo$	۳/۱۶	۰/۴۶۲

بحث و نتیجه‌گیری

با تحلیل واکنش‌های $^{36}S+^{90}Zr$ و $^{28}Si+^{94}Mo$ به نتایج زیر رسیدیم.

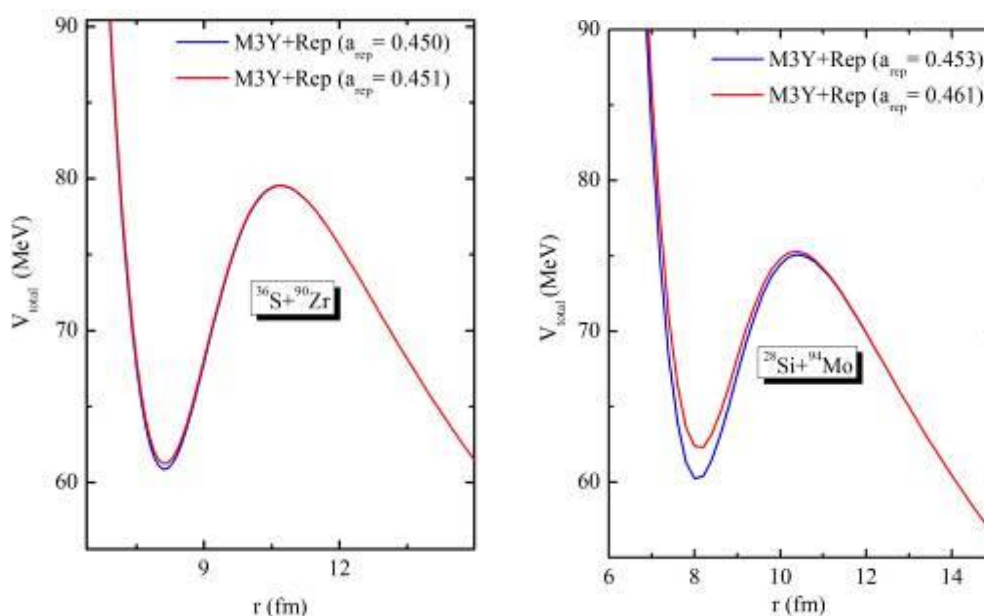
۱- پتانسیل مدل دابل-فولدینگ قادر به توصیف سطح مقطع‌های همجوشی در انرژی‌های زیر سدی نمی‌باشد، اما با اضافه کردن تصحیحات حاصل از اثرات تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای به پتانسیل مدل دابل - فولدینگ (MDF) به دلیل توجیه سطح مقطع‌ها در انرژی‌های عمیق زیر سدی یک پتانسیل نسبتاً واقعی و خوبی برای سیستم‌های برهمکنشی حاصل می‌شود (شکل ۲ را مشاهده کنید)

۲- تغییر شکل هسته‌ها در انرژی‌های زیر سدی می‌تواند مهم باشد. زیرا با مشاهده شکل ۳ به این نتیجه می‌رسیم که در انرژی‌های عمیق زیر سدی، با افزایش انرژی در سیستم‌های همجوشی، با افزایش تغییر شکل در آن سیستم مواجه می‌شویم.

مراجع

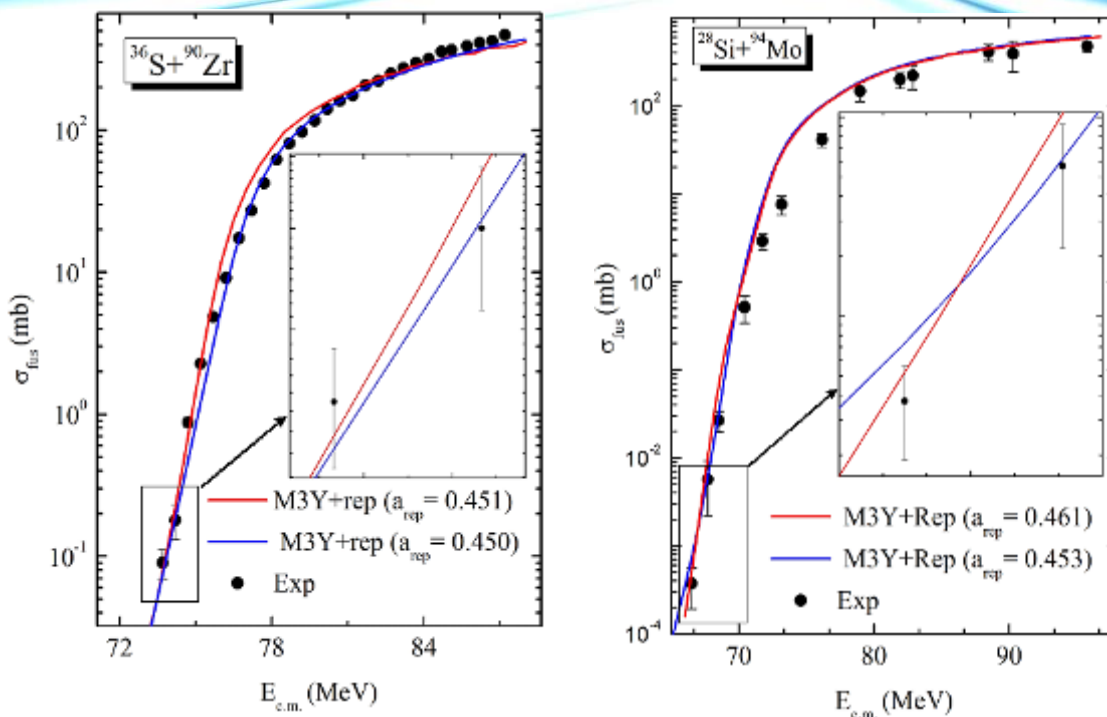
- [1] C. L. Jiang *et al.*, "Influence of nuclear structure on sub-Barrier Hindrance in Ni+Ni Fusion"; Phys. Rev. Lett. **93**, 012701 (2004).
- [2] Ş. Mişicu and H. Esbensen, "Signature of shallow potentials in deep sub-barrier fusion reaction"; Phys. Rev. **C 75**, 034006 (2007).
- [3] M. Ramezani and O. N. Ghodsi, "Analysis of the fusion excitation functions for the $^{28}\text{Si}+^{94,100}\text{Mo}$ systems"; Phys. Rev. **C 89**, 034006 (2014).
- [4] A. M. Stefanini, L. Corradi, A. M. Vinodkumar *et al.*, Phys. Rev. **C 62**, 14601 (2000).
- [5] D. Ackerman *et al.*, "Cross sections and average angular momenta in the fusion of $^{28}\text{Si}+^{94,100}\text{Mo}$ and $^{58,64}\text{Ni}+^{64}\text{N}$ "; Nucl. Phys. **A 609**, 91 (1996)
- [6] E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, and F. Hoyle, Rev. Mod. Phys. **29**, 547 (1957).
- [7] W. D. Myers and W. J. Swiatecki, "Nuclear equation of state"; Phys. Rev. **C 57**, Number 6 (1998).
- [8] H. de Vries, C. W. deJager, and C. dr Vries, "Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering"; At. Data Nucl. Data Tables **36**, 495 (1987)

شکل ها



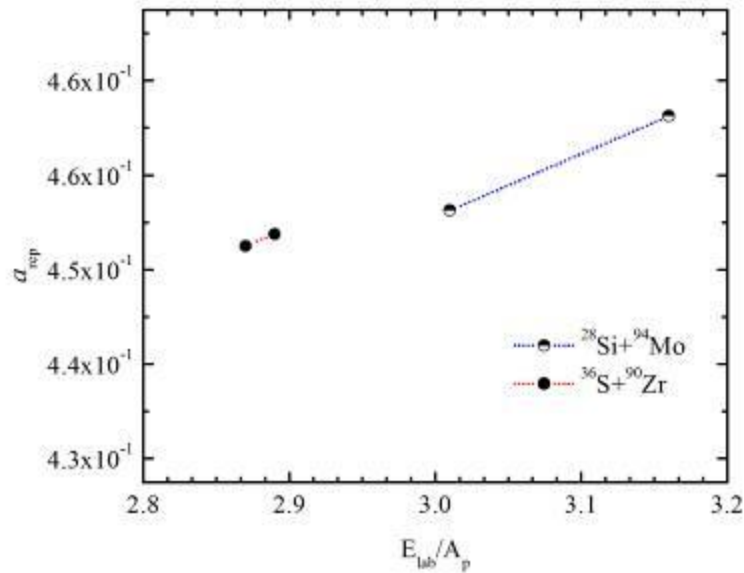
شکل ۱: پتانسیل‌های برهمکنشی مبتنی بر $M3Y+Rep$ بر حسب پارامترهای پخشیدگی (a_{rep}) متفاوت، برای واکنش‌های $^{36}\text{S}+^{90}\text{Zr}$ ، $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Mo}$

۱۳۹۴ و ۱۴۰۱ شماره ۱ و ۲



شکل ۲: مقایسه نتایج حاصل برای سطح مقطع‌های همجوشی ناشی از پتانسیل‌های $M3Y+Rep$ با اعمال اثرات CC با مقادیر آزمایشگاهی [۵ و ۴].

۱۳۹۴ و ۱۶ اسفندماه ۱۳۹۵
دانشگاه یزد



شکل ۴: نتایج حاصل برای انرژی به ازای عدد جرمی هسته‌های پرتابه (E_{lab}/A_p) نسبت به پارامتر پخشیدگی (a_{rep}) حاصل برای واکنش‌های $^{28}\text{Si}+^{94}\text{Mo}$ و $^{36}\text{S}+^{90}\text{Zr}$