

مطالعه توزیع چگالی پرتابه های هاله ای در واکنش های همجوشی یون های سنگین با روش مونت کارلو

محمد محمودی^۱، علی اکبر رجبی

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک هسته ای

چکیده

در این مقاله سطح مقطع همجوشی واکنش های ${}^6\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$ و ${}^8\text{He} + {}^{197}\text{Au}$ با استفاده از روش مونت کارلو و پتانسیل نوکلئون-نوکلئون از نوع $M3Y$ در انرژی های نزدیک سد همجوشی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می دهند با در نظر گرفتن آرایش فضایی مناسب برای ساختار هاله ای هسته ی پرتابه و انتخاب مناسبی از پارامترها برای توزیع چگالی ماده هسته ای هر یک از قسمت های مغزی و هاله ی هسته ی پرتابه، روش مونت کارلو قادر به توصیف سطح مقطع همجوشی برای واکنش های مختلف و در محدوده گسترده ای از انرژی می باشد. همچنین با تنظیم دقیق پارامترهای متناظر با قسمت هاله می توان توافق بهتری را بین محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی و داده های آزمایشگاهی برقرار نمود.

کلید واژه

هسته های هاله ای، روش مونت کارلو، سطح مقطع همجوشی

مقدمه

در سال های اخیر بررسی مکانیسم واکنش های همجوشی شامل پرتابه های هاله ای نظیر ${}^6\text{He}$ ، ${}^8\text{He}$ ، ${}^{11}\text{Be}$ و ${}^{11}\text{Li}$ مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است [۱، ۲]. سوال اساسی در بسیاری از این بررسی ها تاثیر فرآیند های «شکست^۱»، «انتقال^۲»، ساختار فضایی هسته های هاله ای و گسترش شعاعی توزیع ماده هسته ای بر روی سطح مقطع همجوشی در انرژی های مختلف می باشد. در این بررسی ها، سعی شده است محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی در توافق بهتری با مقادیر تجربی باشد. یکی از مدل های موجود جهت بررسی تحلیلی

¹ - break up

² - transfer

سطح مقطع همجوشی، « مدل نفوذ از سد یک بعدی^۳ » می باشد [۳]. در این مدل، سد همجوشی توسط پتانسیل کولنی و هسته ای بین سیستم پرتابه و هدف توصیف می گردد. تعدادی از محققین، پتانسیل هسته ای بین هسته های پرتابه و هدف را توسط روش « فولدینگ دوگانه^۴ » با استفاده از پتانسیل نوکلئون - نوکلئون از نوع M3Y با لحاظ نمودن اثرات مربوط به انرژی و چگالی محاسبه نموده اند [۴]: محاسبه پتانسیل بین سیستم پرتابه و هدف در فرمالیسم فولدینگ دوگانه منجر به حل یک انتگرال ۶ بعدی مطابق رابطه زیر می گردد.

$$V_F(R) = \int d\vec{r}_p \int d\vec{r}_t \rho_p(\vec{r}_p) \rho_t(\vec{r}_t) v_{pt}(\vec{S}, \rho_p, \rho_t, E_p) \quad (1)$$

فاصله بین دو نوکلئون برهم کنشی به شعاع های \vec{r}_t و \vec{r}_p به ترتیب از هسته های پرتابه و هدف می باشد. \vec{R} برداری است، که مرکز جرم های دو هسته پرتابه و هدف را به هم متصل می کند. ρ_t و ρ_p به ترتیب توزیع چگالی هسته های پرتابه و هدف بوده و با شرایط $\int \rho_i(\vec{r}_i) d\vec{r}_i = A_i$ بهنجار می گردند. E_p انرژی به ازای هر نوکلئون هسته پرتابه می باشد.

حل دقیق انتگرال فولدینگ بسیار مشکل است. معمولاً این انتگرال ۶ بعدی با استفاده از تبدیل فوریه به حاصل ضرب سه انتگرال یک بعدی تقریب زده می شود. علاوه بر این، محاسبه اثرات وابسته به چگالی در محاسبه پتانسیل کل بین سیستم پرتابه و هدف به ویژه برای پرتابه های هاله ای، محاسبات تحلیلی فرمالیسم فولدینگ دوگانه را پیچیده می کند. از این رو در پژوهش های واکنش یون های سنگین، جستجوی روش هایی که بتوانند سریع تر و دقیق تر پتانسیل کل بین سیستم پرتابه و هدف را محاسبه نمایند بسیار سودمند است. برای این هدف ما در این مقاله شبیه سازی به روش مونت کارلو را که قبلاً برای محاسبه پتانسیل کل بین دو هسته کروی فشرده استفاده کرده ایم [۵]، به منظور محاسبه پتانسیل کل بین سیستم پرتابه و هدف با پرتابه هاله ای گسترش داده ایم.

روش کار

در مدل نیمه کلاسیکی SBPM پتانسیل کل به صورت زیر تعریف می شود [۳].

$$V_l(r) = V_N(r) + V_C(r) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} = V_o(r) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu r^2} \quad (2)$$

³- Single Barrier Penetration Model

⁴- Double Folding

با V_c, V_N و l به ترتیب پتانسیل های هسته ای، کولنی و تکانه نسبی بین هسته های پرتابه و هدف می باشند، با استفاده از این پتانسیل سطح مقطع کل همجوشی بر حسب انرژی پرتابه در دستگاه مرکز جرم مطابق رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\sigma(E) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{\pi \hbar^2}{2\mu E} (2l+1) [1 + \exp(\int_{r_{l1}}^{r_{l2}} \sqrt{\frac{8\mu}{\hbar^2} (V_l(r) - E)} dr)]^{-1} \quad (3)$$

در این رابطه μ جرم کاهش یافته سیستم پرتابه و هدف و r_{l1} و r_{l2} نقاط بازگشت پاره موج l ام در انرژی E می باشند.

در این مقاله، جمله $V_o(r)$ در رابطه (۲) توسط روش مونت کارلو محاسبه شده است، بدین گونه که هسته های پرتابه و هدف به صورت توده ای از نوکلئون ها، با چگالی برابر با توزیع ماده هسته ای در فضای داخل هسته تولید شده اند. در روش مونت کارلو آرایش فضایی نوکلئون ها به گونه ای است که با در نظر گرفتن پتانسیل DDM3Y1-Paris [۶] و کولنی بین نوکلئون ها انرژی کل هسته در حالت پایه و هم چنین پارامتر « جذر میانگین مجذور شعاع » با مقادیر حاصل از تجربه سازگار باشد. در شبیه سازی هسته هدف، نوکلئون ها با توزیع ماده هسته ای در فضای داخل یک کره تولید شده اند. اما هسته پرتابه که دارای ساختار هاله ای می باشد، فضای آن شامل دو قسمت مغزی و هاله در نظر گرفته شده است، به عبارتی ρ_p در رابطه (۱) به صورت $\rho_p(r) = \rho_c(r) + \rho_h(r)$ لحاظ می گردد. که اندیس های c و h بیانگر مغزی و هاله می باشند. از این رو نوکلئون های هر یک از قسمت های مغزی و هاله با توزیع ماده هسته ای متفاوت تولید شده اند. برای این منظور نوکلئون های قسمت مغزی مشابه هسته هدف در داخل یک کره با توزیع چگالی به صورت $\rho_c(r) = \rho_{oc} \exp(-\alpha \frac{r^2}{R_c^2})$ تولید شده اند. R_c ، پارامتر جذر میانگین شعاع قسمت مغزی می باشد. اما برای تولید نوکلئون های هاله دو فرمالیسم مختلف مطابق رابطه های زیر پیشنهاد شده است.

$$\rho_h(r) = \rho_{oh} \exp(-\beta \frac{r^2}{R_h^2}) \quad (4)$$

$$\rho_h(r) = \rho_{oh} \left(\frac{r}{R_h} \right)^2 \exp\left(-\beta \frac{r^2}{R_h^2}\right) \quad (5)$$

R_c ، پارامتر جذر میانگین شعاع قسمت هاله می باشد. پارامترهای ρ_{oc} و ρ_{oh} با شرایط بهنجارش محاسبه می گردند. در شبیه سازی قسمت هاله چنانچه از توزیع چگالی رابطه (۴) استفاده گردد، نوکلئون های هاله در داخل

کره ای که با کره قسمت مغزی هم مرکز است تولید می گردند. شعاع این کره بزرگتر از شعاع قسمت مغزی می باشد. اگر از رابطه (۵) استفاده شود، نوکلئون های های قسمت هاله در داخل پوسته کروی شکل که با کره قسمت مغزی هم مرکز است تولید می گردند. بخشی از پوسته کروی با قسمت مغزی همپوشانی دارد و شعاع داخلی آن طوری انتخاب می گردد که در آن شعاع، چگالی قسمت مغزی ۹۰ درصد مقدار بیشینه اش باشد. پس از شبیه سازی هسته های هدف و پرتابه، می توان پتانسیل هسته ای را بر حسب فاصله بین پرتابه و هدف و با جمع بندی بر روی تمامی پتانسیل های دو نوکلئون برهم کنشی هسته های پرتابه و هدف با استفاده از برهم کنش موثر نوکلئون- نوکلئون وابسته به انرژی و چگالی از نوع BDM3Y1-Paris طوری بدست آورد، که بتواند داده های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی را توصیف نماید.

نتایج

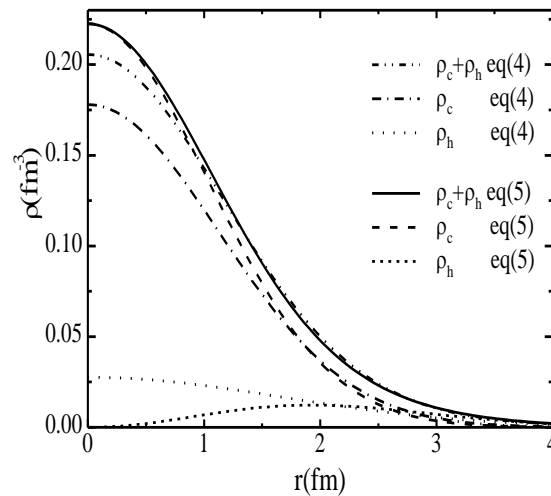
در این مقاله سطح مقطع همجوشی واکنش های ${}^6\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$ و ${}^8\text{He} + {}^{197}\text{Au}$ در انرژی های نزدیک سد همجوشی از طریق شبیه سازی به روش مونت کارلو مطالعه شده است. هسته های پرتابه ${}^6\text{He}$ و ${}^8\text{He}$ از نوع هاله می باشند، از این رو نوکلئون های موجود در سطح آن ها چندان مقید نیستند؛ بنابراین احتمال رخداد فرآیندهایی مانند، فرآیند شکست و انتقال برای آنها نسبت به هسته های مقید قوی مانند ${}^4\text{He}$ بیشتر است. این فرآیندها روی سطح مقطع همجوشی موثرند. به منظور ساده سازی محاسبات، ما از تاثیر فرآیند های شکست و انتقال و تغییر شکل هسته ها در حین واکنش چشم پوشی کرده ایم. هر یک از هسته های پرتابه را شامل دو قسمت مغزی و هاله در نظر گرفته ایم. قسمت مغزی آنها هسته ${}^4\text{He}$ ، یعنی شامل دو پروتون و دو نوترون در نظر گرفته شده است. قسمت هاله ${}^6\text{He}$ شامل دو نوترون و ${}^8\text{He}$ شامل چهار نوترون در نظر گرفته شده است. برای محاسبه پتانسیل هسته ای از برهم کنش موثر نوکلئون- نوکلئون وابسته به چگالی و انرژی از نوع BDM3Y1-Paris استفاده نموده ایم، پارامترهای مورد نیاز از مرجع [۶] اقتباس شده است. نیز توزیع دو پارامتری فرمی برای چگالی پروتون ها و نوترون های هسته های هدف استفاده شده اند؛ پارامترهای آن از نتایج حاصل از مدل « هارتری- فوک^۵ » به دست آمده است [۷]. برای محاسبه پارامترهای اولیه توزیع چگالی قسمت مغزی که برای دو واکنش مورد بررسی هسته ${}^4\text{He}$ می باشد. واکنش ${}^4\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$ را مورد بررسی قرار داده ایم، پارامترهای توزیع چگالی هسته پرتابه را تنظیم پذیر گرفته ایم. پارامترهای α و R_C را طوری تنظیم کرده ایم، که محاسبات تحلیلی سطح

⁵ - Hartree - Fock

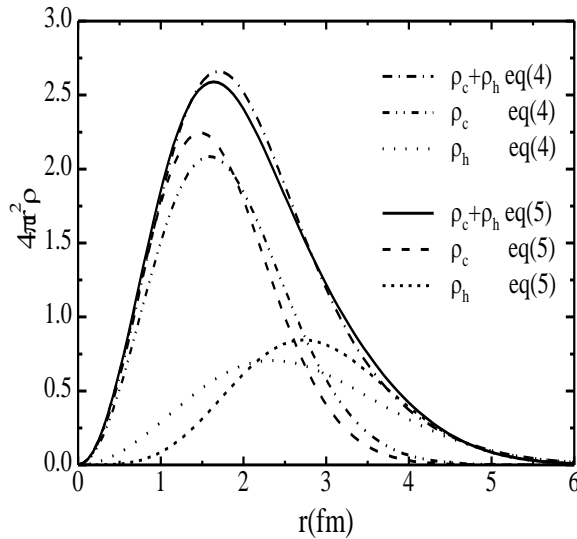
مقطع همجوشی در توافق مناسب با مقادیر تجربی باشد. این محاسبات برای مقادیر مختلف پارامترها آنقدر تکرار می شوند تا کمیت $\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\sigma_{th} - \sigma_{ex})^2}{(\Delta\sigma_{ex})^2}$ به کمتر از ۰/۰۱ برسد. مجموعه ای از مقادیر که از آنالیز دقیق واکنش همجوشی ${}^4\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$ برای پارامترهای چگالی هسته ${}^4\text{He}$ به دست آمده است، در جدول (۱) گزارش شده است، مقادیر تجربی سطح مقطع همجوشی از مرجع [۱] استخراج شده اند. همچنین هر یک از تابع های توزیع چگالی رابطه های (۴) و (۵) را برای توزیع چگالی قسمت هاله هسته های پرتابه به طور مجزا به کار برده ایم، در این آنالیز پارامترهای β و R_h را مشابه تنظیم اولیه پارامترهای قسمت مغزی طوری تنظیم کرده ایم، که محاسبات تحلیلی سطح مقطع همجوشی در توافق مناسب با مقادیر تجربی باشد. علاوه بر این با توجه به این که چگالی قسمت مغزی در هر یک از هسته های هاله ای با توجه به برهم کنش قسمت های مغزی و هاله با چگالی هسته ${}^4\text{He}$ متفاوت است، در تنظیم پارامترهای چگالی هسته پرتابه، اندکی پارامترهای اولیه مغزی را که از آنالیز واکنش ${}^4\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$ به دست آمده است، تغییر داده ایم. مجموعه ای از مقادیر که از آنالیز دقیق دو واکنش همجوشی ${}^6\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$ و ${}^8\text{He} + {}^{197}\text{Au}$ برای پارامترهای چگالی هسته های هاله ای ${}^6\text{He}$ و ${}^8\text{He}$ به دست آمده اند، در جدول (۱) گزارش شده است، مقادیر تجربی سطح مقطع همجوشی از مراجع [۱، ۸] استخراج شده اند. همچنین نمودارهای توزیع چگالی و تعداد نوکلئون در واحد طول شعاع هسته که از آنالیز دقیق واکنش همجوشی ${}^6\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$ برای هر یک از قسمت های مغزی و هاله هسته پرتابه ی ${}^6\text{He}$ به دست آمده اند، به ترتیب در شکل های (۱) و (۲) رسم شده اند. مطابق این شکل ها، شعاع توزیع نوکلئون های هاله ی متناظر با رابطه (۵) نسبت به رابطه (۴) گسترش بیشتری یافته است. اما شعاع توزیع نوکلئون های کل هسته برای دو رابطه مورد نظر تقریباً یکسان است.

جدول ۱. پارامترهای توزیع چگالی ماده هسته ای حاصل از آنالیز دقیقی واکنش های مورد مطالعه.

هسته	مغزی		هاله		رابطه	واکنش
	$R_c(\text{fm})$	α	$R_h(\text{fm})$	β		
^4He	۱/۵۲	۱/۵۳	-	-	-	$^4\text{He} + ^{64}\text{Zn}$
^6He	۱/۹۴	۱/۴۵	۲/۸۹	۱/۵۱	(۴)	$^6\text{He} + ^{64}\text{Zn}$
	۱/۸۲	۱/۴۷	۳/۰۶	۲/۵۱	(۵)	
^8He	۱/۶۷	۱/۵۱	۳/۰۴	۱/۴۷	(۴)	$^8\text{He} + ^{197}\text{Au}$
	۱/۴۳	۱/۵۶	۳/۱۳	۲/۴۸	(۵)	



شکل (۱): توزیع چگالی قسمت های مغزی و هاله ی هسته ی ^6He . نمودارهای خط تیره نقطه ، خط تیره نقطه نقطه و نقطه به ترتیب متنظر با چگالی کل ، چگالی مغزی و هاله مطابق رابطه (۴) و نمودارهای توپر ، خط تیره و خط تیره کوتاه به ترتیب متنظر با چگالی کل ، چگالی مغزی و هاله مطابق رابطه (۵) می باشند.



شکل (۲): تعداد نوکلئون در واحد طول شعاع هسته برای قسمت های مغزی و هاله ی هسته ی هاله ای ${}^6\text{He}$. نمودارهای خط تیره نقطه، خط تیره نقطه نقطه و نقطه به ترتیب متناظر با چگالی کل، چگالی مغزی و هاله مطابق رابطه (۴) و نمودارهای توپر، خط تیره و خط تیره کوتاه به ترتیب متناظر با چگالی کل، چگالی مغزی و هاله مطابق رابطه (۵) می باشند.

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده ایم که روش به کار گرفته شده برای محاسبه پتانسیل بین سیستم پرتابه و هدف بر اساس شبیه سازی به روش مونت کارلو از قابلیت های لازم برای محاسبه پتانسیل مورد نیاز در محاسبه سطح مقطع همجوشی واکنش های شامل پرتابه هاله ای برخوردار می باشد. با استفاده از روش مونت کارلو، می توان آرایش فضایی مناسبی برای ساختار هسته های هاله ای در نظر گرفت و اثرات مربوط به توزیع چگالی هر یک از قسمت های هاله و مغزی را روی پتانسیل کل بین سیستم پرتابه و هدف و سطح مقطع همجوشی متناظر با آن مطالعه نمود. در حالی که لحاظ کردن اثرات مربوط به چگالی مانند گسترش شعاعی نوکلئون های هر یک از قسمت های مغزی و هاله در محاسبات تحلیلی مانند روش فولدینگ دوگانه با تقریب زیاد همراه می باشد. با توجه به قابلیت روش مونت کارلو در مطالعه پتانسیل هسته ای و امکان لحاظ نمودن آرایش فضایی مناسب برای هسته های هاله ای بدون استفاده از تقریبی خاص، این روش به عنوان شیوه ای متفاوت در کنار روش فولدینگ دوگانه جهت مطالعه پتانسیل هسته ای در واکنش های یونهای سنگین شامل پرتابه هاله ای پیشنهاد می شود.

مراجع

- [1] V. Scuderi, A. Di Pietro, et al. , Fusion and direct reactions for the system ${}^6\text{He} + {}^{64}\text{Zn}$, *Phys. Rev. C* , **84** , 064604 (2011) .
- [2] P.R.S. Gomes, et al. , Fusion of two-neutron halo nuclei, *Phys. Lett. B* , **695** , 320-323 (2011) .
- [3] M.Beckerman, Sub-barrier Fusion, *Rep. Prog. Phys.* , **51** , 1047-1103 (1988) .
- [4] I. I. Gontchar, et al. , Double folding nucleus-nucleus potential applied to heavy-ion fusion reactions, *Phys. Rev. C* , **69** , 024610 (2004) .
- [5] O.N. Ghodsi, M. Mahmoodi, and J. Ariai, Calculation of complete fusion cross sections by Monte Carlo method , *Phys. Rev. C* , **75** , 034605 (2007) .
- [6] M.E. Brandan, G.R.Satchler, Interaction between light heavy-ions, *Phys. Rep.* , **285** , 143-243 (1997) .
- [7] H. Nakada, Hartree-Fock approach to nuclear matter, *Phys. Rev. C* , **68** , 014316 (2003) .
- [8] A. Lemasson, A. Shrivastava, et al., Tunneling of the Most Neutron-Rich Nucleus , *Phys. Rev. Let.* , **103** , 232701 (2009).