



بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

محاسبه سطح مقطع همجوشی یون های سنگین در انرژی بالای سد کولنی

ایزدی وصفی غلامحسین*؛ فیروزآبادی محمد مهدی

دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده:

در برهمکنش همجوشی یون های سنگین دو گروه از فرآیندهای کلاسیکی و نیمه کلاسیکی (فرآیند تونل زنی) بررسی می شود. تغییرات سطح مقطع همجوشیدر انرژی بالای سد کولنی (کلاسیکی) رفتاری متفاوت از سطح مقطع همجوشی اندازه گیری شده تجربی نشان می دهد. این تفاوت رفتار ناشی از عوامل محدود کننده ای همچون پارامتر برخورد گریزینگ، تکانه زاویه ای بحرانی، یراست لاین استاتیکی و فاصله بحرانی می باشد. در این تحقیق چگونگی تاثیر هر یک از این عوامل در تصحیح روابط سطح مقطع همجوشی کلاسیکی (تئوری) به منظور انطباق با مقادیر اندازه گیری شده سطح مقطع همجوشی (تجربی) بررسی میشود.

کلید واژه: یون سنگین، همجوشی، سطح مقطع، پارامتر برخورد گریزینگ، یراست لاین استاتیکی

مقدمه:

همجوشی فرآیندی است که دو یا چند هسته برخوردکننده به همدیگر نزدیک می شوند تا یک هسته جدید و سنگین تر تشکیل شود. فرآیند همجوشی با تشکیل هسته مرکب از طریق غلبه بر سد کولنی یا پدیده تونل زنی همراه است که در نهایت هسته مرکب به محصولات نهایی واپاشی خواهد کرد.

سطح مقطع همجوشی (تجربی) از طریق میزان واپاشی هسته مرکب به محصولات نهایی تعیین می گردد. واپاشی هسته مرکب به محصولات نهایی از طریق فرآیند تبخیر یا فرآیند شکافتامکان پذیر می باشد. برای سیستم های سبکتر فرآیند تبخیر غالب است و میزان تولید باقیمانده تبخیر معیاری از اندازه سطح مقطع همجوشی می باشد (fusion-evaporation). برای سیستم های سنگین تر، فرآیند شکافت مد غالب واپاشی هسته مرکب می باشد و سطح مقطع همجوشی از طریق اندازه گیری سطح مقطع شکافت تعیین می گردد (fusion-fission) [۱].

بر اساس انرژی ذره فرودی دو گروه از فرآیندها قابل بررسی می باشد. اگر انرژی ذره فرودی بیشتر از ارتفاع سد کولنی باشد این گروه از فرآیندها را فرآیندهای کلاسیکی همجوشی می نامند و اگر انرژی ذره فرودی کمتر از ارتفاع سد کولنی باشد این گروه از فرآیندها را فرآیندهای نیمه کلاسیکی همجوشی می نامند که با پدیده تونل زنی همراه می باشد [۲]. در این تحقیق روابط سطح مقطع همجوشی یون های سنگین در رنج انرژی بالای سد کولنی



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

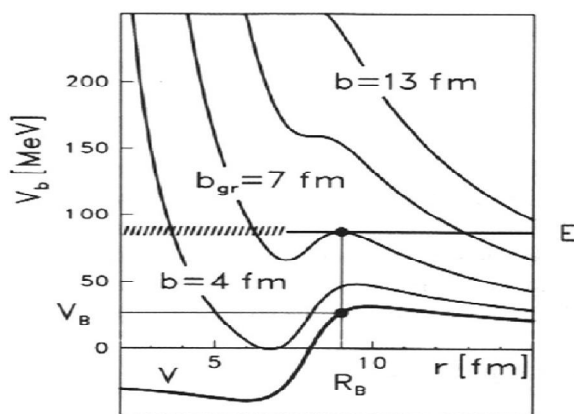
(کلاسیکی) محاسبه می گردد و با مقادیر اندازه گیری شده سطح مقطع حاصل از تحقیقات تجربی دیگران مقایسه می شود.

روش کار

برای اولین تخمین از سطح مقطع همجوشی کلاسیکی فرض می شود که پرتابه و هدف تنها از دو روش پراکندگی کشسان یا تشکیل هسته مرکب (انجام فرآیند همجوشی) با همدیگر برهمکنش کنند. پرتابه تحت تاثیر پتانسیل کولنی $E \frac{b^2}{r^2}$ و پتانسیل هسته ای $V(r)$ حرکت می کند. برای پارامتر برخورد b ، پتانسیل موثر به صورت رابطه (۱) تعریف می شود.

$$V = \quad (1)$$

اگر انرژی پرتابه برابر با پتانسیل موثر باشد، در اینصورت پارامتر برخورد متناسب با این انرژی، پارامتر برخورد گریزینگ (grazing) و فاصله شعاعی متناظر با این پارامتر، شعاع سد (R_B) نامیده می شود. اگر پارامتر برخورد بزرگتر از پارامتر برخورد گریزینگ باشد $(b > b_{gr})$ ، پرتابه توسط سد برگشت داده می شود و اگر پارامتر برخورد کوچکتر از پارامتر برخورد گریزینگ باشد $(b < b_{gr})$ ، پرتابه بر سد غلبه می کند و به داخل سد کشیده می شود و توسط نیروهای هسته ای جذب شده و با هدف همجوشی می کند.



شکل ۱- پتانسیل هسته ای $V(r)$ و پتانسیل موثر $V_b(r)$ برای برهمکنش $^{18}O + ^{58}Ni$ به ازای مقادیر مختلف پارامتر برخورد b پارامتر برخورد گریزینگ که به عنوان پارامتر محدود کننده برای آغاز فرآیند همجوشی شناخته می شود توسط رابطه (۳) تعیین می گردد.

E

b



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

پرتابه هایی با پارامتر برخورد بین b و $b+db$ را در نظر بگیرید که به سمت هدف در حرکتند. اگر $b_{gr} < b$ ، پرتابه ها وارد هسته شده و فرآیند همجوشی رخ می دهد. با انتگرال گیری از امان سطح مقطع همجوشی $(2\pi bdb)$ در بازه انتگرال گیری $b(b_{gr} \leq b)$ ، سطح مقطع همجوشی کل به صورت رابطه (۴) تعیین می گردد.

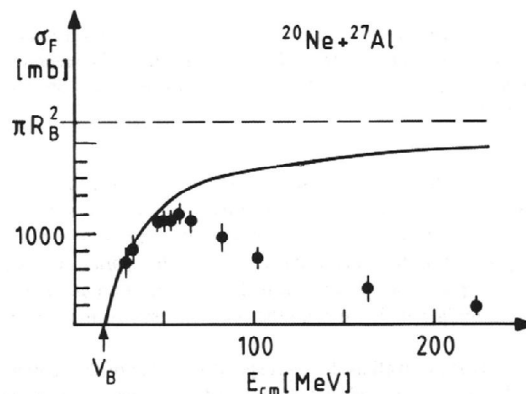
σ

با جایگزینی مقدار پارامتر برخورد گریزینگ، اولین رابطه برای سطح مقطع همجوشی کلاسیکی به صورت رابطه (۵) به دست می آید [۳، ۴، ۵].

σ

نتایج

با رسم نمودار سطح مقطع همجوشی کلاسیکی برحسب انرژی در شکل (۲) و مقایسه با نمودار تجربی سطح مقطع همجوشی (نقطه های توپر) برای برهمکنش $^{20}\text{Ne} + ^{27}\text{Al}$ مشاهده می شود که نمودارهای تئوری و تجربی تا انرژی خاصی بر هم منطبق و از آن انرژی به بعد مقادیر تجربیکاهش می یابد.



شکل ۲ - سطح مقطع همجوشی کلاسیکی برهمکنش $^{20}\text{Ne} + ^{27}\text{Al}$ به عنوان تابعی از انرژی [۶]

فرآیند همجوشی با تشکیل هسته مرکب شناخته می شود. از یک مقدار خاص تکانه زاویه ای که به آن تکانه زاویه بحرانی (L_{crit}) می گویند هسته مرکب دیگر تشکیل نخواهد شد. به عبارتی از بین تمام پرتابه هایی که به داخل هسته راه پیدا می کنند آن هایی منجر به فرآیند همجوشی می شوند که پارامتر برخورد آن ها کوچکتر از یک مقدار بحرانی $b_{crit} = L_{crit}/k$ باشد.

از بین پارامتر برخورد گریزینگ (b_{gr}) و پارامتر برخورد بحرانی (b_{crit}) هر کدام که کوچکتر باشند منجر به فرآیند همجوشی می شود. بنابراین با اعمال محدودیت تکانه زاویه ای بحرانی، رابطه سطح مقطع همجوشی کلاسیکی به صورت رابطه (۶) نشان داده خواهد شد.



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

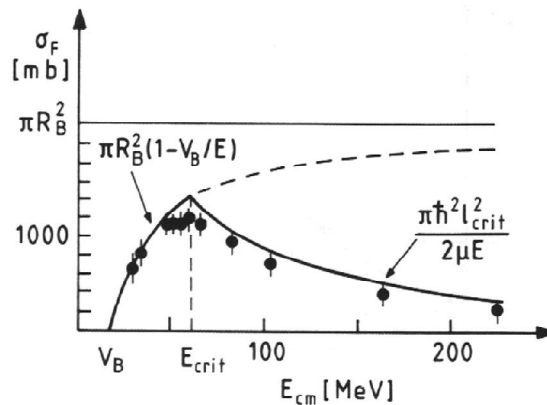
۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

σ

بیان رابطه سطح مقطع همجوشی بر حسب انرژی بحرانی (E_{crit})، که در این انرژی $b_{gr} = b_{crit}$ می باشد توسط رابطه (۸) نشان داده می شود [۳].

$$b_{crit}^2 = l_{crit}^2 / K^2 = h^2 l_{crit}^2 / 2\mu E$$

با رسم نمودار سطح مقطع همجوشی بر حسب انرژی در شکل (۳) و مقایسه با نمودار تجربی سطح مقطع (نقاط توپر) برای برهم کنش $^{20}\text{Ne} + ^{27}\text{Al}$ مشاهده می شود که انطباق خوبی بین نمودارهای سطح مقطع به دلیل اعمال محدودیت تکانه زاویه ای بحرانی برقرار می گردد.



شکل ۳-تاثیر تکانه زاویه ای بحرانی بر سطح مقطع همجوشی کلاسیکی برای برهمکنش $^{20}\text{Ne} + ^{27}\text{Al}$ اگر نمودار انرژی بر حسب تکانه زاویه ای رسم شود مشاهده می گردد که تمام هسته های سنگین یا نیمه سنگین در بالای یک نمودار قرار می گیرند که به این نمودار، نمودار یراست لاین (yrast-line) می گویند و به صورت رابطه (۹) بیان می گردد.

E

همچنین اگر نمودار انرژی هسته های مرکب بر حسب تکانه زاویه ای رسم شود، نمودار رسم شده به نمودار population معروف است و به صورت رابطه (۱۰) بیان می شود.

E



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

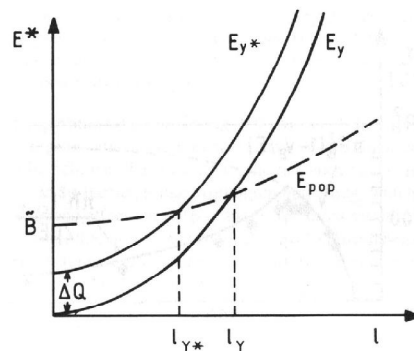
در حالت واقعی، هسته های مرکب در حالت برانگیخته قرار دارند به همین دلیل به نمودار یراست لاین مقدار انرژی برانگیختگی ΔQ نیز اضافه می شود که نمودار به دست آمده به نمودار یراست لاین استاتیکی معروف است. این نمودار موازی با نمودار یراست لاین رسم می شود و به صورت رابطه (۱۱) بیان می گردد.

E

تکانه زاویه ای (L_{y^*}) از طریق تقاطع نمودار انرژی یراست لاین استاتیکی و نمودار population به دست می آید. اگر (L_{y^*}) کوچکتر از مینیمم (L_{gr}, L_{crit}) باشد ($L_{y^*} < \min(L_{gr}, L_{crit})$)، سطح مقطع همجوشی کلاسیکی با اعمال محدودیت تکانه زاویه ای یراست لاین استاتیکی به صورت رابطه (۱۲) نشان داده می شود

σ

که $E^* = E + Q$ می باشد (E انرژی حالت پایه، E^* انرژی برانگیختگی و Q -value، Q واکنش است) [۷،۳]



شکل ۴- نمودارهای انرژی یراست لاین E_y ، یراست لاین استاتیکی E_{y^*} و نمودار انرژی population [۶]

عامل محدود کننده دیگری وجود دارد که ناشی از برهمکنش های مستقیم و غیر کشسان عمیق می باشد که قبل از تشکیل هسته مرکب در فاز تماس اتفاق می افتند و تاثیرات کانال ورودی نامیده می شوند.

تا کنون فرآیند همجوشی تحت شرطی که پارامتر برخورد آن $b < \min(b_{gr}, b_{crit}, b_{y^*})$ باشد بررسی شد. اینک فرآیند همجوشی تحت شرایطی که هسته ها همپوشانی کافی داشته باشند و فاصله نسبی آن ها کوچکتر از فاصله بحرانی d باشد بررسی می شود. انرژی E_d انرژی است که در این انرژی، پتانسیل موثر در فاصله بحرانی d برابر با پتانسیل موثر در شعاع سد R_B باشد ($V_b(R_B) = V_b(d)$). اگر $E < E_d$ باشد پرتابه بر سد غلبه می کند و فرآیند همجوشی با پارامتر برخورد b_{gr} رخ می دهد. اگر $E > E_d$ باشد پرتابه بر سد بیرونی به شعاع d غلبه می کند و فرآیند همجوشی با پارامتر برخوردی متناظر با شعاع سد d رخ می دهد.

سطح مقطع همجوشی کلاسیکی با اعمال محدودیت فاصله بحرانی d بصورت رابطه (۱۳) می باشد [۹،۸،۳].

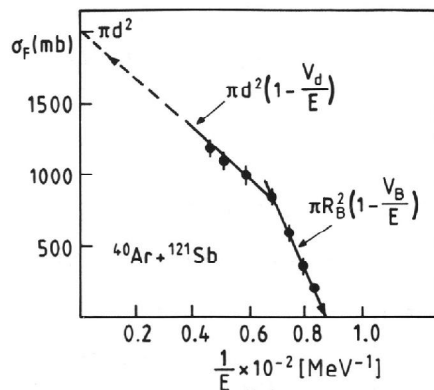
$$\sigma_F = \begin{cases} \pi R_B^2 (1 - \dots) \\ \pi R_B^2 (1 - \dots) \end{cases}$$



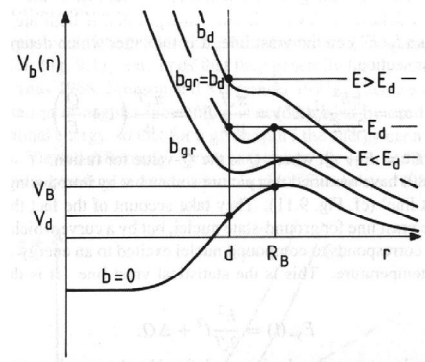
بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ و دانشگاه اصفهان

شکل (۶) نمودار سطح مقطع همجوشی کلاسیکی بر حسب عکس انرژیو انطباقش با مقادیر سطح مقطع اندازه گیری شده تجربی برای برهمکنش $^{40}\text{Ar} + ^{121}\text{Sb}$ را نشان می دهد.



شکل ۶- تاثیر فاصله بحرانی در سطح مقطع همجوشی برای برهمکنش $^{40}\text{Ar} + ^{121}\text{Sb}$



شکل ۵- فاصله بحرانی d و رخداد فرآیند

همجوشی با سه انرژی متفاوت ذره فرودی [۶]

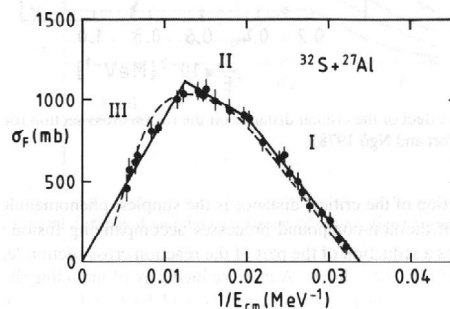
تغییر رفتار سطح مقطع همجوشی کلاسیکی یون های سنگین نسبت به سطح مقطع اندازه گیری شده تجربی به انرژی پرتابه و نوع برهمکنش بین پرتابه و هدف بستگی دارد. بر اساس انرژی پرتابه و پارامترهای برخورد مختلف به طور کلی سه منطقه انرژی متمایز قابل شناسایی می باشد.

منطقه I: $(E < E_d)$: در این منطقه سطح مقطع همجوشی کلاسیکی برابر با سطح مقطع کل برهمکنش می باشد که از طریق پارامتر برخورد گریزینگ و رابطه $\sigma_F(E) = \pi R_B^2 (1 - \frac{V_B}{E})$ تعیین می گردد.

منطقه II: $(E_d < E < E_{crit})$: در این منطقه علاوه بر فرآیند همجوشی فرآیندهای غیر کشسان نیز اتفاق می افتد و سطح مقطع همجوشی توسط فاصله بحرانی d و رابطه $\sigma_F(E) = \pi d^2 (1 - \frac{V_d}{E})$ تعیین می گردد.

منطقه III: $(E > E_{crit})$: در این منطقه فرآیند همجوشی توسط تکانه زاویه ای بحرانی (L_{crit}) محدود شده است و سطح مقطع همجوشی توسط رابطه $\sigma_F = \frac{\pi h^2}{2\mu E} l_{crit}^2$ تعیین می گردد.

پارامتر برخورد گریزینگ بعنوان عامل محدودکننده برای آغاز همجوشی، مناطق شامل برهمکنش های کشسان و همجوشی را از دیگر مناطق شامل برهمکنش های غیر کشسان و مستقیم (علاوه بر همجوشی) جدا می کند





بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۸ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

شکل ۷- وابستگی انرژی سطح مقطع همجوشی برای برهمکنش $^{32}\text{S} + ^{27}\text{Al}$ [۶]

منابع

- [1] Yoshihiro Aritomo, Masahisa Ohta. Analysis of Fusion–Fission Process with Neutron Evaporation in Superheavy Mass Region. Acta Phys. Hung. A 19/1–2 85–86 (2004).
- [2] Yu. A. Pozdnyakov. Calculation of the Energy Dependence of the Fusion Cross Section and Total Cross Sections for Peripheral Reactions on the Basis of an Analysis of Data on Elastic Heavy-Ion Scattering. Physics of Atomic Nuclei, Vol. 70, No. 9, pp. 1547–1560 (2007).
- [3] D. Allan Bromkey. Treatise on Heavy-Ion Science. Plenum, New York-London, 734, (1984).
- [4] L.F. Canto, P.R.S. Gomes, J. Lubian, M.S. Hussein. Reaction mechanisms in heavy ion fusion. EPJ Web of Conferences 17, 01001 (2011).
- [5] H. Paetz gen. Schieck. "Heavy-Ion (HI) Reactions" Nuclear Reactions, 882, 221-229, (2014).
- [6] P. Frobrich, R. Lipperheide. Theory of Nuclear Reactions. Oxford, United States, 476, (1996).
- [7] T. Matsuse and A. Arima. "Statistical Yrast Line" in Heavy-Ion Fusion Reactions. Physical Review, Vol 45, No 3, 165-168, (1980).
- [8] T. Matsuse and A. Arima. Critical distance in fusion reactions. Physical Review, Vol 26, No 5, 2338-2341, 1982
- [9] R. Schmidt. Critical distance for fusion and fusion barriers of Very Heavy Ion Collision. Atomic Nuclei. 325. 239-240. (1986).