



## تحلیل پدیده‌ی بازدارنده‌ی همجوشی با استفاده از فرمالیزم پتانسیل مجاورت

رضا، قرائی\*؛ امید، ناصر قدسی

دانشگاه مازندران، گروه فیزیک هسته‌ای

### چکیده

با بکارگیری نسخه‌ی اصلی پتانسیل مجاورت به تحقیق درباره‌ی رفتار مقادیر آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی برحسب انرژی مرکز جرم در واکنش‌های  $^{28}\text{Si} + ^{100}\text{Mo}$ ،  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Fe}$  و  $^{62}\text{Ni} + ^{62}\text{Ni}$  پرداخته‌ایم. برای محاسبه‌ی مقادیر تئوری این کمیت از دیدگاه جفت‌شدگی کانال‌ها شامل جفت‌شدگی حالت‌های برانگیخته‌ی ۳<sup>+</sup> و ۳<sup>-</sup> هسته‌های هدف و پرتابه استفاده کرده‌ایم. مقایسه نتایج تئوری سطح مقطع همجوشی حاصل از پتانسیل Proxv با داده‌های متناظر آزمایشگاهی آشکار می‌سازد که فرمالیزم پتانسیل مجاورت در محدوده‌ی انرژی‌های زیر سدی نیاز به اصلاحات اساسی دارد. برای دستیابی به این هدف از اثرات اصلاحی ضریب انرژی سطحی  $\gamma$  و دمای هسته‌ی مرکب استفاده کرده‌ایم. علاوه بر این، نقش برانگیختگی‌های متقابل و دو فونونی را نیز در مقادیر تئوری سطح مقطع همجوشی مورد بررسی قرار داده‌ایم. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که پتانسیل Proxv پس از اعمال اثرات اصلاحی مذکور قادر خواهد بود پدیده‌ی کاهش ناگهانی مقادیر آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی را در واکنش‌های مورد نظر بخوبی بازتولید کند.

**کلید واژه:** واکنش همجوشی، پدیده‌ی بازدارنده‌ی همجوشی، پتانسیل مجاورت، اثرات ضریب انرژی سطحی، اثرات دمای هسته‌ی مرکب

### مقدمه

در طول فرآیند برخورد دو هسته سنگین، رقابت میان کانال‌های غیرالاستیک یا شبه شکافت می‌تواند به عنوان یک محدودیت در مقابل فرآیند همجوشی در نظر گرفته شود. در مقابل جفت‌شدگی میان درجات آزادی ذاتی هسته‌های هدف و پرتابه و همچنین کانال انتقال نوکلئون باعث افزایش مقادیر سطح مقطع همجوشی خواهد شد [۱]. هر چند باید اشاره کرد که وجود چنین رقابت‌هایی فقط برای واکنش‌های شامل هسته‌های واقعاً سنگین امکان‌پذیر است. در سالهای اخیر با پیشرفت دیدگاه‌های آزمایشگاهی، محدودیت دیگری برای سطح مقطع‌های همجوشی این بار در محدوده‌ی انرژی‌های کاملاً پایین‌تر از سد کولنی شناسایی شده است. نتایج مطالعات تئوری مختلف در زمینه‌ی واکنش‌های همجوشی یون-سنگین نشان می‌دهد مادامیکه توابع برانگیختگی همجوشی تا حد میکرو- و نانو-بارن کاهش یابند، مدل‌های پتانسیل استاندارد نظیر اکیوز-ویتتر [۲] حتی با وجود اعمال اثرات جفت-شدگی کانال‌ها (CC) قادر به بازتولید داده‌های آزمایشگاهی سطح مقطع نمی‌باشند [۳،۴]. در حقیقت، با مقایسه مقادیر تئوری و تجربی سطح مقطع همجوشی در می‌یابیم که در



محدوده‌ی انرژی‌های زیر سد کولنی داده‌های آزمایشگاهی بصورت ناگهانی کاهش می‌یابند. از این رخداد بعنوان "پدیده‌ی بازدارنده‌ی همجوشی" یاد می‌شود. نتایج مطالعات انجام شده در مرجع [۵] پیشنهاد می‌کند که اثرات تراکم‌ناپذیری ماده‌ی هسته‌ای را می‌توان بعنوان یک مفهوم فیزیکی برای توصیف این پدیده در نظر گرفت. در حقیقت، شبیه‌سازی این ویژگی در برهم‌کنش‌های نوکلئون-نوکلئون باعث ظهور یک فروفتگی کم عمق در نواحی داخلی پتانسیل‌های میکروسکوپیکی نظیر مدل وایچش-دوگانه [۶] می‌شود. این پدیده نیز به نوبه‌ی خود باعث بازتولید داده‌های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی در حد انرژی‌های خیلی پایین‌تر از سد کولنی خواهد شد [۵]. حال از آنجاییکه که براساس مرجع [۷]، تراکم‌ناپذیری ماده‌ی هسته‌ای بعنوان یکی از خواص ذاتی فرمالیزم پتانسیل مجاورت برشمرده می‌شود، از اینرو تحلیل پدیده‌ی بازدارنده‌ی همجوشی با استفاده از این پتانسیل می‌تواند بعنوان یک موضوع تحقیقاتی بدیع مورد بررسی قرار گیرد. در مطالعه‌ی حاضر، فرمالیزم پتانسیل مجاورت را با محاسبات CC همراه کرده‌ایم تا از طریق آن‌ها به تحلیل رفتار سطح مقطع‌های همجوشی در محدوده‌ی انرژی‌های کم برای واکنش‌های  $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$  و  $^{58}\text{Ni}+^{54}\text{Fe}$ ،  $^{28}\text{Si}+^{100}\text{Mo}$  بپردازیم.

## روش کار

همانطوریکه در بخش قبل هم بدان اشاره شد در این تحقیق از نسخه‌ی اصلی پتانسیل مجاورت، یعنی Prox77، برای محاسبه‌ی بخش هسته‌ای پتانسیل برهم‌کنشی کل استفاده شده است. بطورکلی، براساس نظریه‌ی نیروهای مجاورت پتانسیل هسته‌ای  $V_N(r)$  بین دو هسته‌ی برخوردکننده را می‌توان بصورت زیر تعریف کرد

(۱)

$$V_N^{\text{Prox.77}}(r) = 4\pi\gamma b\bar{R}\Phi\left(\frac{s}{b}\right)\text{MeV},$$

که در آن شعاع انحنای متوسط  $\bar{R}$  و فاصله‌ی جدایی دو سطح برهم‌کنشی به ترتیب براساس رابطه‌ی (۲) مراجع [۸] و [۹] تعریف کرد. علاوه بر این مقدار پارامتر ضخامت سطح  $b$  برابر ۱ fm در نظر گرفته می‌شود. در رابطه‌ی فوق  $\gamma$  ضریب انرژی سطحی می‌باشد که از طریق تعریف زیر به پارامتر عدم تقارن  $A_s$  وابسته می‌شود،

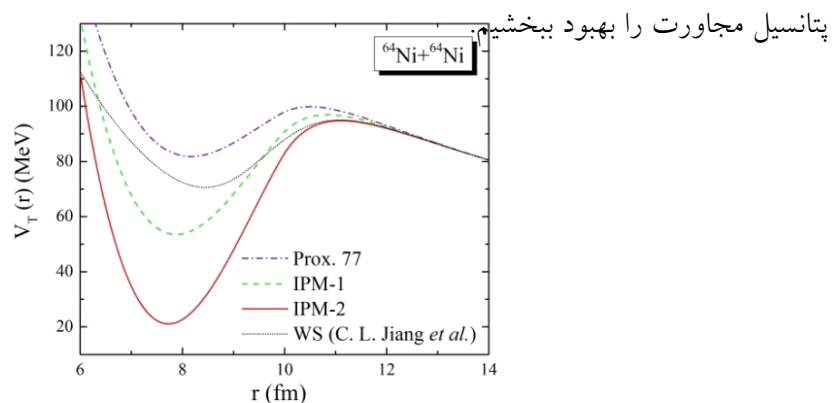
$$\gamma = \gamma_0(1 - k_s A_s^2). \quad (2)$$

که پارامترهای قابل تنظیم  $\gamma_0 = 0.9517 \text{ MeV/fm}^2$  و  $k_s = 1.7826$  با مقادیر معلوم داده شده در نسخه‌ی اصلی پتانسیل مجاورت به ترتیب ثابت‌های انرژی و عدم تقارن سطحی نامیده می‌شوند. علاوه بر این، در این دیدگاه تابع جهانی  $\Phi(\xi=s/b)$  به شکل زیر پارامترسازی شده است،

$$\Phi(\xi) = \begin{cases} -\frac{1}{2}(\xi - 2.54)^2 - 0.0852(\xi - 2.54)^3 & \text{for } \xi \leq 1.2511 \\ -3.437 \exp(-\xi/0.75) & \text{for } \xi \geq 1.2511 \end{cases} \quad (3)$$

ج

با استفاده از فرمالیزم معرفی شده در بخش فوق قادر خواهیم بود پتانسیل برهم‌کنشی کل را از طریق مجموع دو جمله‌ی کولنی و هسته‌ای محاسبه کنیم. در شکل ۱، بعنوان نمونه نتایج مربوط به این پتانسیل برای واکنش همجوشی  ${}^{64}\text{Ni}+{}^{64}\text{Ni}$  نمایش داده شده است. با مقایسه پتانسیل برهم‌کنشی حاصل از مدل Prox۷۷ با نتایج مبتنی بر فرم استاندارد پتانسیل وودس-سکسون (WS)، که در مرجع [۱۰] گزارش شده است، بخوبی می‌توان دریافت که در واکنش مذکور سد کولنی تولید شده توسط پتانسیل مجاورت به مراتب بالاتر از نوع WS می‌باشد. در چنین شرایطی نیاز است تا با افزایش قدرت پتانسیل هسته‌ای و در نتیجه کاهش ارتفاع سد، نتایج



شکل ۱: پتانسیل برهم‌کنشی کل براساس نسخه‌های مختلف پتانسیل مجاورت معرفی شده در متن برای واکنش  ${}^{64}\text{Ni}+{}^{64}\text{Ni}$ .

در مطالعه‌ی حاضر برای دستیابی به هدف بهبود نتایج حاصل از نسخه‌ی اصلی پتانسیل مجاورت دو مسیر را دنبال کرده‌ایم: الف) افزایش قدرت ضریب کشش سطحی  $\gamma$  (ب) اعمال اثرات دمایی  $T$  هسته‌ی مرکب. همانطوریکه در بخش قبل هم بدان اشاره شد، در تعریف ضریب انرژی سطحی، ثابت‌های  $\gamma$  و  $k_s$  پارامترهای قابل تنظیمی هستند که در سالهای اخیر با استفاده از مطالعات سیستماتیک مختلف مقادیر متنوعی برای آنها گزارش شده است. در نخستین مرحله‌ی اعمال اصلاحات در مورد پتانسیل Prox۷۷، با استفاده از مجموعه‌ی  ${}^{64}\text{Ni}+{}^{64}\text{Ni}$  در مرجع [۱۱] گزارش شده‌اند، نسخه‌ی اصلاح شده‌ی IPM-۱  $\gamma = 1,460,734 \text{ MeV/fm}^2$  و  $k_s = 4,0$  که در مرجع [۱۱] گزارش شده‌اند، نسخه‌ی اصلاح شده‌ی IPM-۱ را معرفی کرده‌ایم که ارتفاع سد حاصل از آن نسبت به نسخه‌ی اصلی پتانسیل مجاورت بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد، شکل ۱ را ملاحظه نمایید. در مورد بخش دوم اصلاحات نیز باید اشاره کرد که تاکنون برای اعمال اثرات دمایی هسته‌ی مرکب در فرمالیزم پتانسیل مجاورت دیدگاه‌های متفاوتی ارائه شده است. اخیراً، با استفاده از مطالعه‌ی سیستماتیک رفتار دمایی ضریب انرژی سطحی  $\gamma$  بر روی بازه‌ی وسیعی از سیستم‌های همجوشی مورد بررسی قرار گرفته که منجر به معرفی فرم تعمیم یافته‌ی از این ضریب بصورت زیر شده است

[۱۲]

$$\gamma(T) = \gamma(T = 0) \left[ 1 - \frac{T - T_B}{T_B} \right]^{3/2}, \quad (4)$$



که در آن  $\gamma(T=0) = 1,460,734(1-4,0A_s^2)$  و علاوه بر این براساس معادله‌ی (۱۵) مرجع [۱۲]،  $T_B$  دمای متناظر با انرژی سد کولنی می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر نتایج حاصل از پتانسیل اصلاح شده‌ی  $IPM-1$  از طریق رابطه‌ی دمایی فوق را با  $IPM-2$  نامگذاری کرده‌ایم. همانطوریکه در شکل ۱ هم قابل مشاهده است، پتانسیل‌های حاصل از مدل‌های  $IPM-2$  و  $WS$  در محدوده‌ی نزدیک سد کولنی کم‌ترین اختلاف را با یکدیگر دارند. در ادامه‌ی مباحث تحلیلی این مقاله قصد داریم به بررسی رفتار سطح مقطع‌های همجوشی برای واکنش‌های انتخابی با استفاده از هر یک از نسخه‌های پتانسیل مجاورت معرفی شده بپردازیم. اخیراً داده‌های آزمایشگاهی سطح مقطع همجوشی مربوط به این واکنش‌ها بصورت جداگانه اندازه‌گیری شده و تا حد نانو-بارن کاهش یافته‌اند [۱۳, ۱۰, ۷]. لازم به ذکر است برای انجام محاسبات تئوری مربوط به این کمیت از دیدگاه جفت‌شدگی کانال‌ها (CC) [۱۴] استفاده کرده‌ایم. در جدول ۱، لیستی از مقادیر متناظر با مشخصات حالت‌های برانگیخته‌ی چهار قطبی و هشت قطبی هسته‌های هدف و پرتابه که در محاسبات سطح مقطع همجوشی لحاظ شده‌اند، وجود دارد.

جدول ۱: مقادیر انرژی برانگیختگی  $E^*$  و پارامترهای تغییر شکل  $\beta_\lambda$  برای حالت‌های برانگیخته هسته‌های مختلف

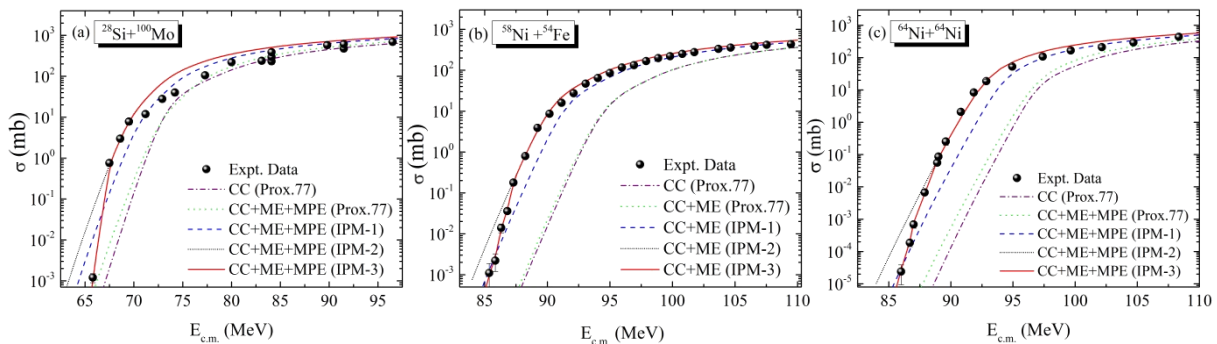
Nucleus	$\lambda^\pi$ [۱۵, ۱۶]	$E^*$ (MeV)	$\beta_\lambda$
$^{28}\text{Si}$	$2^+$	1.7790	0.4070
	$2ph(2^+)$	4.6900	0.2400
	$3^-$	6.8790	0.4010
$^{54}\text{Fe}$	$2^+$	1.4082	0.1950
	$3^-$	4.7820	0.1150
$^{58}\text{Ni}$	$2^+$	1.4540	0.1828
	$3^-$	4.4750	0.1980
$^{64}\text{Ni}$	$2^+$	1.3458	0.1790
	$2ph(2^+)$	2.6920	0.1850
	$3^-$	3.5600	0.2010
	$2^+$	0.5356	0.2309
$^{100}\text{Mo}$	$2^+$	1.0020	0.2440
	$3^-$	1.9080	0.2180
	$2ph(3^-)$	3.8160	0.2300
	$2^+$	0.5356	0.2309

مقایسه‌ی مقادیر محاسبه شده‌ی سطح مقطع همجوشی برای هر سه واکنش  $^{28}\text{Si} + ^{100}\text{Mo}$ ،  $^{58}\text{Ni} + ^{54}\text{Fe}$  و  $^{64}\text{Ni} + ^{64}\text{Ni}$  با مقادیر متناظر آزمایشگاهی آنها در شکل ۲ نشان می‌دهد که پتانسیل Proxv حتی پس از در نظر گرفتن اثرات اصلاحی CC توانایی بازتولید داده‌های تجربی سطح مقطع را در واکنش‌های مذکور ندارند. برای بهبود نتایج حاصل از این مدل، در ابتدا به بررسی نقش برانگیختگی‌های متقابل (ME) و چند فونونی (MPE) پرداخته‌ایم. داده‌های ورودی مربوط به ویژگی‌های ساختاری حالت‌های دو فونونی چهارقطبی و هشت قطبی هسته‌های مختلف در جدول ۱ لیست شده‌اند. براساس نتایج ارائه شده در شکل ۲ ملاحظه می‌شود





که اعمال این اثرات باعث افزایش مقادیر سطح مقطع همجوشی در انرژی‌های زیر سدی می‌شود. در ادامه برای دستیابی به نتایج قابل قبول‌تر از طریق دیدگاه‌های معرفی شده در فوق، به بررسی اثرات اصلاحی ضریب انرژی سطحی  $\gamma$  و دمای  $T$  هسته‌ی مرکب بر روی مقادیر محاسبه شده‌ی سطح مقطع همجوشی پرداخته‌ایم. علیرغم اینکه اعمال همزمان این دو اثر، تحت عنوان پتانسیل IPM-۲، تأثیر قابل توجهی را بر روی بهبود توافق میان مقادیر تئوری و تجربی سطح مقطع در انرژی‌های کم دارد اما همانطوریکه از شکل ۲ هم قابل مشاهده است، این مدل اصلاح شده هنوز در بازتولید داده‌های آزمایشگاهی در محدوده‌ی انرژی‌های خیلی پایین‌تر از سد کولنی ناموفق می‌باشد.



شکل ۲- مقایسه‌ی مقادیر تئوری سطح مقطع همجوشی مبتنی بر مدل‌های مختلف Prox77, IPM-1, IPM-2 و IPM-3

IPM-۳ با داده‌های متناظر آزمایشگاهی در واکنش‌های الف)  $^{28}\text{Si}+^{100}\text{Mo}$ ، ب)  $^{58}\text{Ni}+^{54}\text{Fe}$  و ج)  $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$ .

نتایج مطالعات تئوری انجام شده در زمینه‌ی تحلیل پدیده‌ی بازدارنده‌ی همجوشی ثابت می‌کند که عمق پتانسیل تأثیر قابل توجهی را بر روی توصیف این پدیده در حد انرژی‌های کم دارد [۵]. از طرفی، در تعریف ضریب انرژی سطحی  $\gamma$ ، ثابت  $\gamma_0$  پارامتر قابل تنظیمی است که مستقیماً بر روی عمق پتانسیل تأثیرگذار خواهد بود. در چنین شرایطی سعی کرده‌ایم تا با تنظیم این ثابت، داده‌های آزمایشگاهی واکنش‌های مورد بررسی را در بازه‌ی انرژی بمبارانی متناظر با پدیده‌ی کاهش ناگهانی سطح مقطع همجوشی با دقت کافی پیش‌بینی کنیم. در این بین فرم اصلاح شده‌ی ضریب  $\gamma_0$  برای محدوده‌ی انرژی  $E \leq E_s$  که  $E_s$  انرژی شروع پدیده‌ی بازدارنده‌ی همجوشی می‌باشد، را بصورت زیر معرفی می‌کنیم،

(۵)

پس از اعمال این وابستگی دمایی، بر روی ضریب  $\gamma_0$  تعریف شده  $\gamma_0 = 2.886 \frac{T}{T_s}$  [۵]، می‌توان نتایج قابل قبولی را برای رفتار مقادیر تئوری سطح مقطع همجوشی در هر سه واکنش مورد بررسی بدست آورد، شکل ۲ را ملاحظه نمائید. لازم به ذکر است که نتایج پتانسیل IPM-۲ که با اثرات اصلاحی ضریب وابسته به دمای  $\gamma_0(T)$  همراه شده است را بصورت IPM-۳ نام‌گذاری کرده‌ایم.



## بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به مطالعه پدیده‌ی کاهش ناگهانی مقادیر سطح مقطع همجوشی در حد انرژی‌های خیلی پایین‌تر از سد کولنی برای واکنش‌های  $^{28}\text{Si}+^{100}\text{Mo}$ ،  $^{58}\text{Ni}+^{54}\text{Fe}$  و  $^{64}\text{Ni}+^{64}\text{Ni}$  پرداخته‌ایم. برای این منظور، نتایج پتانسیل Prox77 را در چهار مرحله زیر اصلاح نموده‌ایم: (۱) اعمال اثرات مربوط به برانگیختگی‌های متقابل و همچنین دو فوفونی در هسته‌های برهم‌کنشی، (۲) اعمال اثرات ضریب کشش سطحی (۳، ۷) اعمال اثرات دمای T هسته‌ی مرکب و (۴) بررسی رفتار وابسته به دمای پارامتر ۷۰. نتایج محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که پتانسیل IPM-3 که شامل همه‌ی اصلاحات فوق می‌باشد، قادر خواهد بود پدیده‌ی بازدارنده‌ی همجوشی را در واکنش‌های فوق با دقت قابل قبولی بازتولید کند، شکل ۲ را ملاحظه نمائید. در ادامه‌ی این کار قصد داریم برای دستیابی به یک نتیجه جامع‌تر به مطالعه‌ی سیستماتیک پدیده‌ی بازدارنده‌ی همجوشی با استفاده از دیدگاه ارائه شده بپردازیم.

## مراجع

- [۱] M. Dasgupta, *et al.*, *Annul. Rev. Nucl. Part. Sci.* ۴۸, ۴۰۱ (۱۹۹۸).
- [۲] Ö. Akyüz and A. Winther, *Heavy-Ion Reactions*, edited by R. A. Broglia, C. H. Dasso, and R. Ricci (North Holland, Amsterdam, ۱۹۸۱).
- [۳] G. Montagnoli, *et al.*, *Phys. Rev.C* ۸۲, ۰۶۴۶۰۹ (۲۰۱۰).
- [۴] A. M. Stefanini, *et al.*, *Phys. Rev. C* ۸۲, ۰۱۴۶۱۴ (۲۰۱۰).
- [۵] S. Misiu and H. Esbensen, *Phys. Rev. Lett.* ۹۶, ۱۱۲۷۰۱ (۲۰۰۶); *Phys.Rev.C* ۷۵, ۰۳۴۶۰۶ (۲۰۰۷).
- [۶] G. R. Satchler and W. G. Love, *Phys. Rep.* ۵۵, ۱۸۳ (۱۹۷۹).
- [۷] J. Blocki, J. Randrup, W. J. Swiatecki and C. F. Tsang, *Ann. Phys. (NY)* ۱۰۵, ۴۲۷ (۱۹۷۷).
- [۸] I. Dutt and R. K. Puri, *Phys. Rev.C* ۸۱, ۰۶۴۶۰۹ (۲۰۱۰).
- [۹] W. D. Myers and W. J. Swiatecki, *Phys. Rev. C* ۶۲, ۰۴۴۶۱۰ (۲۰۰۰).
- [۱۰] C. L. Jiang, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* ۹۳, ۰۱۲۷۰۱ (۲۰۰۴).
- [۱۱] P. Möller and J. R. Nix, *Nucl. Phys. A* ۲۷۲, ۵۰۲ (۱۹۷۶).
- [۱۲] M. Salehi and O. N. Ghodsi, *Chin. Phys. Lett.* ۳۰, ۰۴۲۵۰۲ (۲۰۱۳).
- [۱۳] D. Ackermann, *et al.*, *Nucl. Phys. A* ۶۰۹, ۹۱ (۱۹۹۶).
- [۱۴] K. Hagino, N. Rowley and A. T. Kruppa, *Comput. Phys. Commun.* ۱۲۳, ۱۴۳ (۱۹۹۹).
- [۱۵] S. Raman, C. W. Nestor, Jr. and P. Tikkanen, *At. Data Nucl. Data Tables* ۷۸, ۱ (۲۰۰۱).
- [۱۶] R. H. Spear, *At. Data Nucl. Data Tables* ۴۲, ۵۵ (۱۹۸۹).