دانشگاه پیام نور

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک هسته‌ای

دانشکده : علوم

گروه علمی : فیزیک

عنوان پایان نامه:

بررسی همجوشی سیستمهای سه جسمی ذرات سبک

استاد راهنما :

دکتر محمدرضا پهلوانی

استاد مشاور :

دکتر سعید محمدی

نگارش:

یاسر آقابایی سنگتابی

اسفند ماه ۱۳۸۷

تقدیم به:

پدرم

مظهر تلاش و امید

مادرم

مظهر عطوفت و ایثار

همسرم

مظهر عشق و وفاداری

از آقای دکتر محمدرضا پهلوانی که درانجام این پایان نامه از راهنمایی های ایشان بهره برده ام و از زحمات استاد مشاورآقای دکتر سعید محمدی و همچنین از آقای دکتر سید هاشم میری که داوری این اثر بعهده ایشان بوده است و همه افرادی که در نگارش این پایان نامه یاری ام کرده اند بخصوص آقای سید محمد متولی دانشجوی دکتری هسته ای در دانشگاه مازندران که بدون کمکهای ارزشمند ایشان نگارش این پایان نامه میسر نمی شد کمال تشکر را دارم.

نام خانوادگی دانشجو: آقابایی سنگتابی نام: یاسر

استاد راهنما: دکتر محمدرضا پهلوانی استاد مشاور: دکتر سعید محمدی

دانشکده: علوم رشته: فیزیک گرایش: هسته ای مقطع: کارشناسی ارشد

تاریخ دفاع: ۱۳۸۷/۱۲/۱۹ تعداد صفحات: ۷۰

عنوان پایان نامه: بررسی همجوشی سیستمهای سه جسمی ذرات سبک

کلید واژه ها: همجوشی هسته ای، سیستم های سه ذره ا ی، هامیلتونین ، مختصات فوق کروی بیضوی،پتانسیل آدیاباتیک .

چکیده:

سیستم های سه ذره ای در بسیاری از شاخه های فیزیک از جمله در همجوشی هسته ای مورد بررسی قرار می گیرند. در فرایند همجوشی، هسته های همجوشی کننده باید در فاصله ای نسبت به یکدیگر قرار گیرندکه نیروی جاذبه هسته ای قوی حاکم شود و حالت هسته مرکب بوجود آید و در نهایت، همجوشی هسته ای بوقوع بپیوندد. یکی از روش های مطرح همجوشی هسته ای، همجوشی از طریق کاتالیزور میونی می باشدکه بعداز تولید مولکول سه ذره ای میونی، فرایند همجوشی اتفاق افتاده و انرژی آزاد می شود. نخستین قدم در بررسی تئوری همجوشی در این سیستم های میونی، ارائه یک فرمولبندی جهت بررسی انواع واکنشهای صورت گرفته در این سیستم ها می باشدکه موضوع اصلی این کار تحقیقاتی می باشد. در اینجا ما با نوشتن هامیلتونین سیستم در فضای فوق کروی بیضوی و جداسازی متغیرها دراین مختصات، یک روش مناسب را ارائه داده ایم. در ادامه برهمکنش کولنی بین ذرات سیستم را بررسی کرده و پتانسیل آدیاباتیک، حالت مقید و سایر ویژگی های مهم حالت هسته مرکب سیستم سه ذره ای را بدست آورده ایم. روش ارائه شده و نتایج بدست آمده در این پایان نامه، پایه ای برای محاسبه ی سطح مقطع، آهنگ واکنش و سایرالمان های مهم مورد نیاز در راکتورهای همجوشی هسته ای می با شد.

امضا استاد راهنما

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه----------(۱)

فصل اول- مفاهیم بنیادی در همجوشی هسته ای ----------(۳)

۱-۱-مقدمه---------- (٤)

۱-۲- همجوشی هسته ای و امکان انجام آن ----------(۵)

۱- ۳- مفاهیم بنیادی متداول در همجوشی هسته ای ----------(۸)

فصل دوم- روشهای مختلف همجوشی هسته ای----------(۱۳)

۲-۱- مقدمه---------- ----------(۱٤)

۲ -۲- همجوشی به روش محصورسازی مغناطیسی (MCF) ----------(۱۵)

۲-۳- همجوشی به روش محصورسازی لختی (ICF) ---------- ----------(۲۰)

۲-٤- همجوشی به روش کاتالیزور میونی (μCF)----------(۲۲)

فصل سوم- روشهای مختلف مطالعه سیستم های سه ذره ای ---------- (۳۱)

۳-۱- مقدمه ----------(۳۲)

۳-۲- روش بورن– اپنهایمر ----------(۳۳)

۳-۳- روش تقریبی با استفاده از تکنیک وردشی ----------(۳۵)

۳- ٤- روش بسط آدیاباتیک در مختصات فوق کروی ----------(۳٦)

فصل چهارم- مطالعه سیستم سه- ذره ای میونی $d\ ^3He\mu$ درمختصات فوق کروی بیضوی---------- (٤٤)

٤ -۱- مقدمه ----------(٤۵)

٤ -۲- سیستم سه ذره ای میونی $d\ ^3He\mu$ ----------(٤٦)

٤–٣ مختصات فوق کروی بیضوی ----------(٥٢)

٤ -٤- شکل کلی هامیلتونین سیستم سه ذره ای درمختصات جدید ----------(٥٣)

٤ – ٥- محاسبه پتانسیل آدیاباتیک از طریق حل هامیلتونین آدیاباتیک برای

سیستم سه ذره ای میونی $d\ ^3He\mu$ ----------(٥٥)

فصل پنجم- جمع بندی و نتیجه گیری ---------- (٦٠)

مراجع ----------(٦٣)

فهرست شکل ها و نمودار ها

عنوان

صفحه

شکل ۱-۱- انرژی بستگی متوسط هر نوکلئون بر حسب A. ---------- (٦)

شکل ۱-۲- نمودار پتانسیل الکترواستاتیکی بر حسب فاصله بین هسته ای r . ----------(۷)

شکل ۱-۳- تقاطع دو شعاع ذره که واکنش همجوشی $a+b \to d+e$ را نشان می دهد. ----------(۱۱)

شکل ۲-۱- هندسه ساده آینه مغناطیسی ----------(۱۸)

شکل ۲-۲- طرح واره ای از سیستم محصور کننده مغناطیسی توکامک. ----------(۱۹)

شکل ۲-۳- مراحل مختلف فرایند همجوشی از طریق محصورسازی لختی. ----------(۲۱)

شکل ۳-۱- سه مجموعه مختلف از مختصات ژاکوبی برای سیستم سه ذره ای. ----------(۳۸)

شکل ٤-۱- سطح مقطع واکنش های همجوشی مختلف. ----------(٤۷)

شکل ٤-۲- طرح واره ای از فرایند های مختلف از لحظه ای که میون

در مخلوط $D_2 + {}^3He$ وارد می شود. ----------(٤۹)

شکل ٤-۳- تبدیل مجموعه های ژاکوبی مختلف به یکدیگر با پارامتر چرخش γ ---------- ---------(۵۱)

شکل ٤-٤- تصویر مختصات فوق کروی بیضوی (η,ξ) روی سطح یک کره. ----------(۵۳)

شکل ٤-۵- نمودار بار موثر C بر حسب متغیر های $2\gamma \le \eta \le 2\gamma$ و $2\gamma \le \zeta \le 2\pi - 2\gamma$. ----------(۵۵)

شکل ٤-٦- نمودار ثابت جداسازی A را بر حسب γ به ازای $N = n_\eta + n_\xi = 1,2$ و $m = 2$ --------(۵٦)

شکل٤-٧- نمودار ثابت نرمالیزاسیون بر حسب پارامتر چرخش γ برای حالت های

$(n_\eta, n_\eta)=(0,1)$ و $(n_\eta, n_\eta)=(0,2)$. ----------(٥٧)

شکل ٤-٨- تابع موج $\Phi_{n_\eta n_\xi}(\eta,\xi)$ برای حالت $n_\eta = 1$ و $n_\xi = 1$ و به ازاء $m = 2$. ----------(٥٨)

شکل ۴-۹- نمودار پتانسیل آدی‌اباتیک برای مولکول $d^3He\mu$ ----------(٥٩)

مقدمه

یکی از روشهای جایگزین درتولید انرژی در آینده، تولید انرژی از طریق فرایند همجوشی هسته ای می باشدکه به صورت طبیعی در خورشید وستارگان دیگر بوقوع می پیوندد. در طول چند دهه گذشته تلاشهای زیادی توسط دانشمندان و متخصصان جهان برای دستیابی به انرژی از این طریق صورت گرفته است و به همین دلیل امروزه، همجوشی هسته ای به یکی از جذاب ترین شاخه های تحقیقاتی در فیزیک تبدیل شده است. تا کنون چندین روش برای همجوشی پیشنهاد شده است که تحت عناوین همجوشی داغ و همجوشی سرد تقسیم بندی می شوند. یکی از این روشها، همجوشی به روش کاتالیزور میونی می باشد. تاکنون، تحیقات زیادی در زمینه همجوشی به روش کاتالیزور میونی هم به صورت آزمایشگاهی و هم به شکل تئوری انجام گرفته است. در تحقیقات تئوری در این زمینه ما با سیستم های سه ذره ای سبک روبرو خواهیم شد که باید بتوانیم دینامیک برهمکنش بین ذرات این سیستم ها را با استفاده از نظریه کوانتومی فرمولبندی کنیم. یکی از مهمترین فرایند های پایه و بنیادی در همجوشی، تشکیل حالت هسته مرکب در سیستم سه ذره ای به شکل یک مولکول میونی می باشد که بررسی ویژگی های این مولکول میونی هدف اصلی در این پایان نامه می باشد.

مسائل سه ذره ای یکی از قدیمی ترین مباحث طرح شده در فیزیک هسته ای می باشد و در عین حال کاربرد های زیادی در دیگر شاخه های فیزیک دارد. تاریخچه مطالعات اولیه در زمیته مسائل سه ذره ای تقریبا به دو قرن قبل و به کار های اویلر برمی گردد و در طول این مدت زمان به طور پیوسته یکی از مهمترین زمینه های تحقیقاتی مورد نظر محققان بوده است. درابتدای قرن بیستم، شکست نظریه کوانتش بوهر- زمرفیلد در توضیح صحیح حالت پایه اتم هلیوم موجب انگیزش دانشمندان جهت توسعه نظریه کوانتومی شد که توسط شرودینگر و هایزنبرگ فرمولبندی آن انجام گرفت. اما بعداز گذشت بیش از یک قرن از فرمولبندی نظریه کوانتومی، هنوز هم حل مسئله سه ذره ای یکی از دشوارترین مسائل در فیزیک به شمار می آید و تلاشهای زیادی جهت بهبود و ساده سازی در روشهای حل مسائل سه ذره ای صورت گرفته و تاکنون روشهای مختلف و متنوعی برای این منظور ارائه شده است که هرکدام دارای دقت و کاربرد خاص خودش می باشد.

معادله شرودینگر غیر نسبیتی مربوط به سیستم سه ذره ای درمختصات دکارتی دارای نه درجه آزادی می باشد و برای حل این معادله باید با نوشتن هامیلتونین سیستم در دستگاه مختصات مناسب، آنرا به چند زیر مسئله با درجات آزادی کمتر تقلیل دهیم. روش مورد استفاده ما در این پایان نامه، استفاده از روش بسط آدیاباتیک در مختصات فوق کروی بیضوی می باشد که جزو جدیدترین و دقیقترین روشها در این زمینه بحساب می آید.

دراین کارتحقیقاتی، ابتدادر فصل اول، یک تعریف مقدماتی برای همجوشی هسته ای را بیان کرده و اصطلاحات و مفاهیم بنیادی رایج در همجوشی را یادآوری می کنیم. در فصل دوم، انواع روشهای همجوشی هسته ای رابه اختصار توضییح می دهیم. در فصل سوم، به چند روش مهم جهت مطالعه سیستم های سه ذره ای اشاره کرده و در فصل چهارم، با ادامه کار در مختصات فوق کروی و جداسازی متغیر ها در مختصات فوق کروی بیضوی یک فرمولبندی کامل و کارآمد را برای مطالعه سیستم های سه ذره ای ارائه کرده و ویژگیهای مورد نظر و مهم این سیستم ها را بررسی می کنیم. در انتهای کار، یک جمع بندی و نتیجه گیری را در مورد کارهای انجام شده در این پایان نامه و نتایج بدست آمده خواهیم آورد و پیشنهاداتی را ارائه خواهیم کرد.

فصل اول:

مفاهیم بنیادی در همجوشی هسته ای

۱-۱ مقدمه:

بدست آوردن منابع انرژی یکی از اساسی ترین نیازهای بشراززمانهای دوربوده است وآرزوی دیرینه انسـان دستیابی به انرژی نامحدود و تمام نشدنی می باشد تا بتواند بر بحران انرژی غلبه کند. با کشف هستـه در اتم و سپس بررسی واکنش های هسته ای، دانشمندان افق های تازه ای را جهت بدست آوردن انرژی از طریق واکنش های هسته ای نمایان کردند که در ابتدا، کسب انرژی از طریق پدیده شکافت هسته ای نتیجه کار آنها بوده است که هم اکنون بخش مهمی از تولید انرژی در دنیا از طریق بکارگیری فرایند شکافت هسته ای از طریق راکتورهای هسته ای بدست می آید. نوع دیگری از واکنش های هسته ای که چند دهه است که متخصصان هستـه ای جهان را درگیر خود ساخته، فرایند همـجوشی هسته ای است. حیات در روی کره زمین مدیون وقوع اینگونه واکنش های هسته ای در خورشید می باشد. اگر بشر به دانش انجام این واکنش های هسته ای و تکنولوژی صنعتی مربوط به آن در سطح زمین دست یابد، دریاچه ای کوچک دارای مقدار زیادی سوخت هیدروژنی می باشد که می تواند برای قرنها، انرژی مورد نیاز بشررا تامین کند. با وجود تلاشهای چند دهه دانشمندان و تحقیقات زیادی که در این زمینه انجام شده است، هنوز راکتوری که بصورت کنترل شده واقتصادی از طریق این روش انرژی تولید کند، ساخته نشده است و این تکنولوژی هنوز در مرحله آزمایشی قرار دارد.

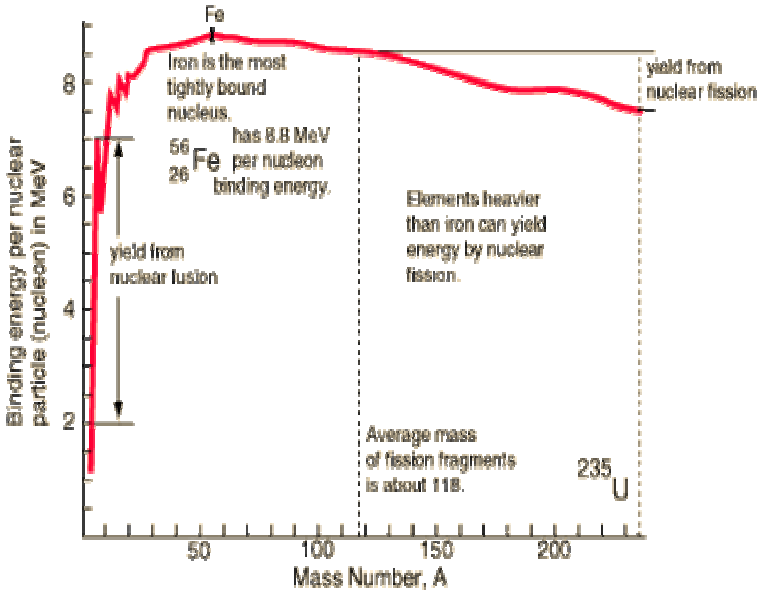
در این فصل، ابتدا در بخش۱-۲ یک تعریف مقـدماتی از همـجوشی هسته ای و امکان غلبه بر نیـروی دافعـه کولنی را ارائه می کنیم، سپس در بخش۱-۳ مفاهیم مهم کاربردی مورد نیاز در همجوشی را به صورت فهرست وار ذکر می کنیم.

۱-۲ همجوشی هسته ای و امکان انجام آن:

همانگونه که ذکر شد یکی از روشهای استخراج انرژی از فرایندهای هسته ای، همجوشی هسته ای می باشد. دوهسته مجزا در فاصله نسبتا زیاد از یکدیگر پایداری بیشتری نسبت به یک هسته بزرگ متشکل از دو ذره خواهد داشت و درنتیجه می توان گفت که یک هسته بزرگ هنگامی به پایداری می رسد که به دو قسمت مجزا شکافته می شود(شکافت هسته ای[۱])، در صورتیکه در همجوشی هسته ای تقریبا عکس این مطلب بوقوع می پیوندد و دو هسته کوچک در صورت تشکیل هسته بزرگتر به پایداری خواهند رسید. بنابراین بجای حرکت از هسته های خیلی سنگین مثل مورد شکافت، همانطور که در شکل۱-۱ نشان داده شده است می توان با شروع از هسته های سبک از منحنی انرژی بستگی بالا رفت و به طرف هسته های پایدار نزدیک شد. این فرآیند، همجوشی هسته ای[۲] نام دارد زیرا از همجوشی دو هسته سبک، یک هسته مرکب سنگین تر ایجاد می شود و انرژی آزاد می شود [۱].

فرآیند همجوشی از نقطه نظر تولید انرژی دارای چند مزیت واضح نسبت به شکافت هسته ای می باشد . اول اینکه هسته های سبک فراوانند و به راحتی قابل حصول و دوم اینکه محصولات نهایی همجوشی معمولا هسته های سبک پایدارند و نه هسته های سنگین پرتو زا. با وجود این مزایا، اشکال قابل توجه در همجوشی هسته ای این است که هسته های سبک قبل از آنکه بتوانند با یکدیگر ترکیب شوند، باید بر دافعه کولنی متقابل غلبه کنند، در صورتی که در پدیده شکافت که در اثر جذب نوترون ها درهسته های سنگین مانند اورانیوم حاصل می شود ، سد کولنی وجود ندارد و لذا درآن می توان از ذرات تابشی با انرژی های خیلی کم استفاده کرد که حتی با کاهش انرژی ذرات، سطح مقطع شکافت افزایش هم می یابد[۲] .

[1] . Nuclear Fission
[2] . Nuclear Fusion



شکل ۱-۱: انرژی بستگی متوسط هسته ها بر حسب A

برای وقوع فرآیند همجوشی، دو هسته سبک باید آنقدر به هم نزدیک شوند تا کنش متقابل صورت بگیرد و نیروهای جاذبه هسته ای قوی حاکم شود. درنتیجه، حالت هسته مرکب[1] بوجود آید و فرایند همجوشی هسته ای بوقوع بپیوندد. اما همانطورکه گفتیم یک مشکل اساسی برای وقوع این فرایند وجود دارد و آن وجود سد کولنی می باشد یعنی چون هسته ها دارای بار مثبت اند، بتدریج که هسته ها به یکدیـگر نزدیک می شوند، یکدیگر را بیشتر دفـع می کنند. در شکل۱-۲ این موضوع نشان داده شده است.

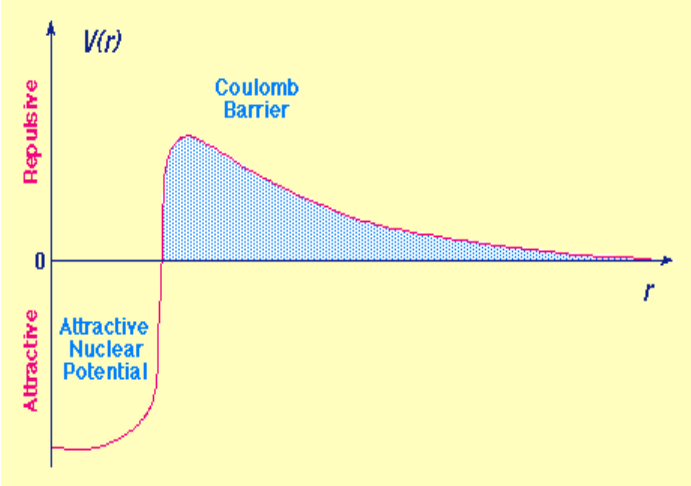
همانطور که می دانیم دو هسته با بار مشابه، به یکدیگر نیروی دافعه کولنی وارد می کنند و انرژی پتانسیل ناشی از این نیرو به ازای فاصله r دو ذره از هم به شکل زیر تعریف می شود [۲] :

$$U(r) = -\int_{\infty}^{r} F_c(r)dr = \frac{z_1 z_2 e^2}{4\pi \in_0 r} \qquad (۱-۱)$$

که در این فرمول $z_1 e$ و $z_2 e$ بارهای الکتریکی ذرات و r فاصله بین دو ذره و U انرژی پتانسیل می باشد. درنتیجه برای اینکه هسته ها درفاصله کافی برای انجام همجوشی هسته ای قرار گیرند باید انرژی اولیه آنها به قدری باشدکه بر نیروی دافعه الکترواستاتیکی که آنها را از هم جدا می کند غلبه کنند، و یا به

[1] . compound nucleus

بیان دیگربرای وقوع فرایند همجوشی هسته ای بین هسته ها، باید انرژی جنبشی ناشی از حرکت هسته ها از پتانسیل کولنی آنها بیشتر باشدکه یکی از راه های بالا بردن انرژی بین ذرات، افزایش دماست. چون دافعه الکتروستاتیکی بین هسته ها با افزایش بار الکتریکی هسته ها افزایش می یابد و بنابراین برای به حداقل رساندن این نیروها، معمولا هسته هایی با عدد اتمی کمتر(و در نتیجه بار الکتریکی کمتر) را برای همجوشی انتخاب می کنیم. در میان این عناصر، عنصر هیدروژن و ایزوتوپ های آن، کمترین عدد اتمی را دارا می باشند و بار الکتریکی هسته و ایزوتوپ های آن برابر یک می باشد. عنصر مناسب بعدی هلیوم و ایزوتوپ ها ی آن می باشندکه بار الکتریکی آن برابر دواست. با وجود فراوانی این عناصر درطبیعت، بدلیل محدودیت های ناشی از سد کولنی، معمولا همجوشی هسته ای نمی تواند به صورت طبیعی در روی کره زمین اتفاق بیفتد اما می توان انرژی مورد نیاز برای غلبه بر نیروی دافعه کولنی را فراهم کرد و درنتیجه، این عناصرگزینه های مناسبی برای بکارگیری بعنوان سوخت در نیروگاه هسته ای همجوشی آینده می باشند.



شکل ۱-۲: نمودار پتانسیل همجوشی بصورت تابعی از فاصله بین دوهسته

همانطورکه ذکر شد یکی از عناصر مهم در طبیعت جهت استفاده برای فرآیند همجوشی هسته ای، عنصر دوتریوم می باشد که به ازای هر6500 هیدروژن، یک دوتریوم در آب اقیانوسها وجود دارد که با استفاده از روشهای معمولی قابل جداسازی می باشد. فرآیند همجوشی هسته ای با اتم های دوتریوم، تریتیوم و هلیوم با استفاده از واکنشهای زیر قابل انجام است که با توجه به سطح مقطع همجـوشی بالا درآنها، از بهترین واکنش های پیشنهاد شده برای همجوشی می باشند :

$$D + D \rightarrow 3He + n + 3.47MeV \qquad (۲-۱)$$

$$D + D \rightarrow T + P + 4.03MeV \qquad (۳-۱)$$

$$D + T \rightarrow {}^{4}He + n + 17.6MeV \qquad (٤-۱)$$

$$D + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + P + 18.3MeV \qquad (٥-۱)$$

$$T + T \rightarrow {}^{4}He + 2n + 10.32MeV \qquad (٦-۱)$$

$$T + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + P + n + 12.09MeV \qquad (۷-۱)$$

$${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2P + 2.7MeV \qquad (۸-۱)$$

لازم به ذکر است که سوخت هایی که در راکتورهای هسته ای همجوشی مورداستفاده قرارمی گیرند باید قابل دسترس و فراوان باشند و همچنین دارای سطح مقطع همجوشی بالایی باشند. به این دلیل واکنشهای فوق بعنوان مهمترین واکنش های همجوشی هسته ای پیشنهاد می شود. باید گفت که چون عنصر ^{3}He در طبیعت فراوان تر از D و T می باشد این موضوع باعث توجه محققان به فرایند های همجوشی شامل این عنصر شده است.

۱-۳ مفاهیم بنیادی متداول در همجوشی هسته ای:

۱-۳-۱ غلبه بر سد کولنی[1] وپدیده تونل زنی:

برای وقوع همجوشی باید هسته های همجوشی کننده آنقدر به هم نزدیک شوند تا در فاصله ای از هم قرار گیرندکه نیروی جاذبه هسته ای بر نیروی دافعه کولنی غلبه کند وحالت هسته مرکب تشکیل شده و

[1] . Coulomb Barrier

آنگاه فرآیند همجوشی روی دهد. پتانسیل ناشی از دافعه کولنی دو هسته با بار الکتریکی که در فاصله r از یکدیگر قرار دارند به شکل زیر می باشد :

$$U(r) = -\int_{\infty}^{r} F_c(r)dr \qquad (۹-۱)$$

فاصله جدایی دو ذره برابر $r \geq r_a + r_b$ می باشد که r_a و r_b شعاع معادل دو ذره باردار است. برای هسته های با بارهای مشابه، انرژی پتانسیل در فاصله تماس $r = r_a + r_b$ را سد کولنی می نامیم. بنابراین

$$U_0 = \frac{z_1 z_2 e^2}{4\pi \in_0 (r_a + r_b)} \qquad (۱۰-۱)$$

اثر سد کولنی بر واکنش همجوشی خیلی شبیه به اثر سد کولنی در واپاشی آلفازا است. همانطور که اشاره کردیم، انرژی جنبشی ناشی از حرکت نسبی هسته ها باید از پتانسیل کولنی بیشتر باشد تا واکنش همجوشی هسته ای بین هسته ها امکان پذیر گردد. استثنایی که در این زمینه وجود دارد این است که براساس مکانیک کوانتمی، نزدیک شدن یک هسته به هسته دیگر در محدوده $r_a + r_b$ ، از طریق نفوذ در سد پتانسیل آن امکان پذیر خواهد بود. در اثر این پدیده که پدیده تونل زنی[1] نام دارد، امکان انجام همجوشی در انرژی‌های پایین تر نیز وجود دارد. اما باید توجه داشت که تعداد این واکنش ها دقیقاً تابعی از درجه جرارت خواهد بود.

۱-۳-۲ آهنگ همجوشی، سطح مقطع همجوشی و پارامتر سیگماوی:

[1] . Tunneling effect

منبع تولید انرژی در همـجوشی هسته ای، آهنگ واکنش همـجوشی هسته ای[2] است که اگر فقط یک نوع از فرآیند همـجوشی صورت گیرد و اگر این فرآیند با آهنـگ R_{fu} صورت گرفته و Q_{fu} واحـد انرژی آزاد شده باشد، درنتیجه چـگالی توان همـجوشی به شـکل زیرتعریف می شود:

$$P_{fu} = R_{fu} Q_{fu} \qquad (۱۱-۱)$$

که در آن R_{fu} ، تعداد واکنش بر متر مکعب ثانیه و Q_{fu} دارای واحد MeV بر واکنش است. واحد چگالی توان P_{fu} برابر $\mathrm{MeVm^{-3}}s^{-1}$ است که می توان آنرا به وات تبدیل کرد. بنابراین انرژی کل رها شده در طی فاصله زمانی t از معادله زیر بدست می آید:

$$E_{Fu} = \int_0^{\tau} P_{Fu}\, dt \qquad (۱۲-۱)$$

و در هر زمان داریم:

$$P_{Fu} = \frac{dE_{Fu}}{dt} \qquad (۱۳-۱)$$

مقدار انرژی بر حسب نوع واکنش همجوشی مشخص است و برای محاسبه آهنگ واکنش می توان از رابطه زیر استفاده کرد :

$$\mathrm{R_{Fu}} = \sigma_{\mathrm{ab}}(\mathrm{v_r})\,\mathrm{N_a N_b v_r} \qquad (۱۴-۱)$$

که در این رابطه $\mathrm{N_a}$ و $\mathrm{N_b}$ بترتیب چگالی ذرات همجوشی کننده نوع b,a می باشند که در شکل۱-۳ نشان داده شده است. $\mathrm{v_r}$ سرعت نسبی دو ذره و $\sigma_{\mathrm{ab}}(\mathrm{v_r})$ سطح مقطع واکنش می باشد. توجه شود که سطح مقطع به نوع ذرات واکنش دهنده و سرعت های نسبی آنها بستگی دارد. سطح مقطع دارای بعد سطح است و با واحد بارن[1] اندازه گیری می شود.

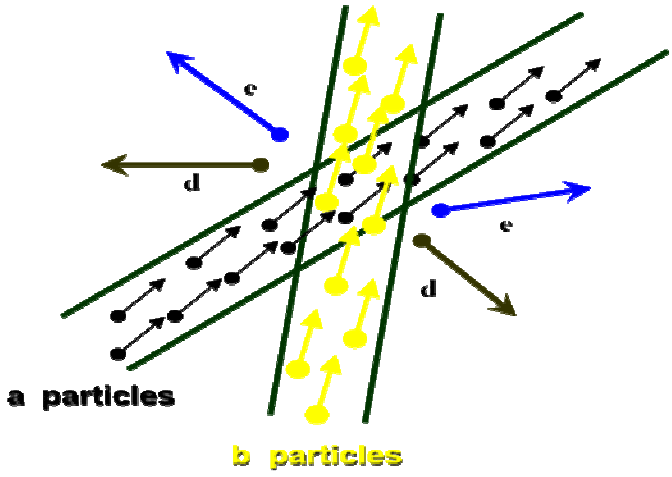
معادله چگالی آهنگ واکنش بسیار محدود است زیرا ما تمام ذرات را با سرعت ثابت و تک جهت در نظر گرفتیم. در حالی که در حالت کلی، ذرات دارای جهت های حرکت مختلف و دارای سرعت های

[2] . Fusion Rate
[1] . Barn

متفاوتی می باشند. در نتیجه، چگالی آهنگ واکنش برای دو نوع ذره a,b را می توان به شکل مختصر شده زیر نوشت:

$$R_{Fu} = N_a N_b \langle \sigma v \rangle_{ab} \qquad (۱-۱۵)$$

که در آن $\langle \sigma v \rangle_{ab}$، پارامتر آهنگ واکنش[2] نامیده می شود و در جداول هسته ای بصورت تابعی ازدما وجود دارد.



شکل ۱-۳: تقاطع دو شعاع ذره که واکنش همجوشی $a+b \rightarrow d+e$ را انجام می دهند.

۱-۳-۳ روش های رسیدن همجوشی هسته ای :

دارا بودن آهنگ واکنش همجوشی نسبتا زیاد، در جسمی به حد کافی کوچک و در شرایط کنترل شده و وسایل مربوطه که توان تولید شده را انتقال دهد مورد نظرطراحان راکتورهای همجوشی هسته ای است. در نتیجه برای دستیابی به این مطلوب، روش های همجوشی مختلفی ارائه شده و می شود. این شیوه ها که برای انجام همجوشی ارائه می شوند، در واقع راه حل هایی برای غلبه بر نیروی دافعه کولنی بین هسته ها می باشند. برای رفع مشکل سد کولنی معمولا دو راه حل عمومی پیشنهاد می شود:

[2] . Reaction Rate Parameter

۱-همجوشی داغ[1]

۲-همجوشی کاتالیزور میونی[2]

در همجوشی داغ بعنوان مثال، باید پلاسمای دوتریوم و تریتیوم تا یک درجه حرارت میانگین در حدود 10 KeV گرم شود تا اینکه کسری از آنها بتوانند درون سد کولنی نفوذ کرده و بدین شکل احتمال وقوع واکنش هسته ای را افزایش دهند. به همجوشی داغ، همجوشی گرما هسته ای[1] نیز می گویند. علاوه بر این ، برای افزایش آهنگ تعداد برخورد ها ، نیاز به چگالی های زیاد است. این شرایط برای دما وچگالی، باید در یک مدت زمانی مشخص تحت عنوان زمان محصورسازی ایجاد شود. بوجود آوردن این شرایط مستلزم بکار بردن تکنولوژی نسبتا پیچیده ای می باشد. دو روش عمده برای رسیدن به این هدف وجود دارد که تحت عنوانهای همجوشی محصورشدگی اینرسی، همجوشی محصورشدگی مغناطیسی، شناخته می شوند. راه عمومی دیگر برای همجوشی هسته ای، استفاده از ذره میون بعنوان کاتالیزور می باشدکه بر اساس کاهش سد کولنی می باشد که در دماهای پایین نیز می تواند بوقوع بپیوندد. در این روش با تزریق میون منفی در مخلوط سوخت، اتم های میونی تشکیل می شوندکه شعاع بوهر در آنها بسیارکوچکتر از شعاع اتم های هیدروژنی می باشد در نتیجه با تشکیل مولکول های میونی، هسته های تشکیل دهنده این مولکول بسیار نزدیک به یکدیگر قرار می گیرند و در نتیجه فرآیند همجوشی هسته ای بین هسته ها بوقوع می پیوندد. میون آزاد شده می تواند واکنش های بعدی را هم کاتالیز کند. این روشهای انجام همجوشی را به اختصار در فصل بعد توضیح خواهیم داد.

---

[1] . Hot Fusion
[2] . Muon Catalyzed Fusion
[1] . Thermonuclear Fusion