

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۱۲۱۷۵



دانشگاه مازندران

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک هسته‌ای

موضوع:

مطالعه اثر ناخالصی ${}^6\text{Li}$ در محیط D/D در پلاسمای همجوشی
محصورسازی اینرسی

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدوی

استاد مشاور:

دکتر امید ناصر قدسی

اساتید داور:

دکتر فرشاد صحبت زاده

دکتر محسن نژاد اصغر

نام دانشجو:

بنت الهدی جلالی

شهریور ماه ۸۷

۱۱۳۸۶۵

کتابخانه مرکزی
سازمان اسناد و کتابخانه ملی

۱۳۸۸ / ۳ / ۲۵

سپاسگزاری

از تمامی عزیزانی که در به انجام رساندن این پایان‌نامه، اینجانب را یاری نموده‌اند، تشکر می‌نمایم. از استاد راهنمای گرامی آقای دکتر محمد مهدوی، که در طول این مدت از شخصیت علمی ایشان استفاده نموده‌ام، کمال تشکر را دارم. همچنین از جناب آقای دکتر امید ناصر قدسی که استاد مشاور من در این پایان‌نامه بوده‌اند، تشکر می‌نمایم. از اساتید گرامی جناب آقای دکتر فرشاد صحبت زاده و دکتر محسن نژاد اصغر که داوری جلسه دفاع اینجانب را بر عهده داشتند، و همچنین نماینده تحصیلات تکمیلی، جناب آقای دکتر علیرضا خصالی سپاسگزاری می‌نمایم.

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم به پاس عاطفه سرشارشان که چون شبچراغی می درخشند
و روحم را از تنهایی و ناامیدی رهایی بخشیدند.

چکیده

بهبود کردن مصرف سوخت‌های طراحی شده در سیستم‌های همجوشی، به خصوص در سیستم‌های همجوشی به روش محصورسازی اینرسی، (ICF) یکی از پارامترهای بسیار مهم در سیستم‌های همجوشی است. در این کار تحقیقاتی، معادلات دینامیکی حاکم بر یک سیستم همجوشی به روش محصورسازی اینرسی برای قرص سوخت D/D با ناخالصی ${}^6\text{Li}$ نوشته شده است. سپس وابستگی بهره سیستم به پارامترهای دما، چگالی و شعاع قرص با حل معادلات دینامیکی به روش رانگ-کوتای مرتبه چهارم بررسی شده است. محاسبات نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن دمای اولیه ۳۵ کیلو الکترون ولت و چگالی سوخت حدود ۵۰۰۰ گرم بر سانتی متر مکعب و نسبت ناخالصی ۰/۰۵ بهره ماکزیمم به دست می‌آید.

واژه‌های کلیدی: محصورسازی اینرسی، سطح مقطع همجوشی، پارامتر آهنگ همجوشی، اشتعال، تابش ترمزی، پراکندگی

کامپتون معکوس، انبساط مکانیکی

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: همجوشی هسته‌ای
۱	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- انرژی بستگی
۵	۳-۱- انواع برهمکنش‌های هسته‌ای
۶	۴-۱- تئوری برهمکنش همجوشی
۱۰	۵-۱- همجوشی به روش کاتالیزور میونی
۱۲	۶-۱- همجوشی به روش محصورسازی مغناطیسی (MCF)
۱۳	۷-۱- همجوشی به روش محصورسازی اینرسی (ICF)
۱۶	۸-۱- شعاع‌ها و سپرها در قرص سوخت
۲۰	فصل دوم: محاسبه‌ی پارامتر آهنگ همجوشی
۲۱	۱-۲- محاسبه‌ی فرمول وانگ برای سطح مقطع همجوشی
۲۷	۲-۲- نارسایی‌های فرمول وانگ و شعاع وابسته به انرژی
۳۰	۳-۲- پتانسیل حاکم بر سیستم
۳۲	۴-۲- روش پیشنهادی برای محاسبه‌ی سطح مقطع همجوشی
۳۵	۵-۲- پارامتر آهنگ همجوشی
۳۸	فصل سوم: دینامیک اشتعال
۳۸	۱-۳- معادله دینامیکی حاکم بر چگالی ذرات
۳۹	۲-۳- معادله تعادل انرژی
۴۱	۳-۳- تابش ترمزی

۴۴	۴-۳- کار مکانیکی
۴۵	۵-۳- اثر کامپتون معکوس
۴۷	۶-۳- بهره سیستم
۴۸	فصل چهارم: محاسبات و نتیجه گیری
۵۰	۱-۴- مهم ترین فرایندها در محیط مورد نظر
۵۲	۲-۴- حل معادلات دینامیکی
۵۵	۳-۴- شرط اشتعال
۵۸	۴-۴- تغییرات زمانی دمای یون ها و الکترون ها
۵۹	۵-۴- تغییرات زمانی چگالی ذرات مختلف برهمکنش کننده
۶۱	۶-۴- بررسی اثر برهمکنش های لیتیوم-۶
۶۲	۷-۴- منحنی بهره
۶۳	۸-۴- بررسی اثر کامپتون معکوس روی پارامترهای مختلف
۶۷	۹-۴- نتیجه گیری و پیشنهادات
۶۸	پیوست
۶۸	پیوست الف: برنامه کامپیوتری
۹۴	منابع

فهرست اشکال

صفحه	شکل
۴	شکل ۱-۱: انرژی بستگی هر نوکلئون بر حسب عدد جرمی
۹	شکل ۲-۱: انرژی پتانسیل بر حسب فاصله‌ی بین دو هسته باردار با انرژی مرکز جرم ϵ
۱۵	شکل ۳-۱: انفجار یک قرص کروی به روش محصورسازی اینرسی
۲۳	شکل ۱-۲: نمایش شعاع قله R_B و ارتفاع آن V_B ، و همچنین نقاط تونل زنی با انرژی تغییر می‌کند.
۳۰	شکل ۲-۲: تغییرات $R(E)$ بر حسب انرژی برای سیستم $^{16}O + ^{208}Pb$
۳۴	شکل ۳-۲: نمودار سطح مقطع برهمکنش $^3He/{}^6Li$ بر حسب انرژی مرکز جرم
۳۵	شکل ۴-۲: نمودار سطح مقطع همجوشی برهمکنش $^{12}C/{}^6Li$
۳۶	شکل ۵-۲: آهنگ برهمکنش $^3He/{}^6Li$ بر حسب دما
۴۲	شکل ۱-۳: تابش ترمزی
۵۱	شکل ۱-۴: نمودار پارامتر آهنگ همجوشی بر حسب دما برای واکنش‌های مختلف
۵۳	شکل ۲-۴: نمودار پارامتر آهنگ همجوشی بر حسب دما برای واکنش‌های موردنظر با استفاده از روش ارائه شده
۵۷	شکل ۳-۴: نمودار شرایط اشتعال
۵۸	شکل ۴-۴: چگونگی تغییرات زمانی دمای یون، دمای الکترون و دمای تابش، در $X=0.05$
۵۹	شکل ۵-۴: تغییرات چگالی یونی ذرات مختلف شرکت‌کننده در برهمکنش‌های موردنظر
۶۰	شکل ۶-۴: تغییرات زمانی چگالی تریتیوم
۶۱	شکل ۷-۴: چگونگی تغییرات دمای یون بر حسب زمان و بررسی برهمکنش‌های $D/{}^6Li$ و ${}^3He/{}^6Li$ بر آن
۶۲	شکل ۸-۴: چگونگی تغییرات دمای الکترون بر حسب زمان و بررسی برهمکنش‌های $D/{}^6Li$ و ${}^3He/{}^6Li$ بر آن
۶۳	شکل ۹-۴: چگونگی تغییرات بهره بر حسب پارامتر ρR در X های مختلف
۶۴	شکل ۱۰-۴: نمودار تغییرات T_B بر حسب دمای الکترون
۶۵	شکل ۱۱-۴: تغییرات زمانی چگالی تریتیوم و بررسی اثر کامپتون معکوس
۶۵	شکل ۱۲-۴: تغییرات زمانی دمای الکترون و تأثیر اثر کامپتون معکوس

۶۶

شکل ۴-۱۳: تغییرات زمانی دمای یون و تأثیر اثر کامپتون معکوس

۶۶

شکل ۴-۱۴: اثر کامپتون معکوس بر منحنی بهره

لیست علائم و اختصارات

μ CF(Muon Catalized Fusion)

همجوشی به روش کاتالیزور میونی

MCF(Magnetic Confinement Fusion)

همجوشی به روش محصورسازی مغناطیسی

ICF(Inertial Confinement Fusion)

همجوشی به روش محصورسازی اینرسی

فصل اول - همجوئی هسته‌ای

۱-۱- مقدمه

انرژی مهم‌ترین و اساسی‌ترین عامل هر فعالیتی اعم از صنعتی، کشاورزی، عمرانی و غیره می‌باشد. لذا با توجه به منابع تولید و ظرفیت‌های موجود آن در طبیعت، یکی از مهم‌ترین مسائل مورد بحث در جهان امروزی است. انسان در طول حیات خود بر روی کره زمین، جهت تأمین نیازهای خود همواره استفاده از انرژی را مدنظر داشته است. افزایش جمعیت و پیشرفت تکنولوژی باعث بالا رفتن مصرف انرژی می‌شود که این دستیابی به منابع جدید انرژی را ضروری می‌سازد. زیرا استفاده از انرژی آب‌های جاری بسیار محدود است و فقط در نواحی خاصی از جهان در دسترس می‌باشد. ذخایر سوخت‌های فسیلی نیز روبه اتمام است. پس انتظار می‌رود کمبود انرژی با سوخت‌های هسته‌ای تأمین شود.

بیش از نیم قرن است که راکتورهای شکافت هسته‌ای به‌کار افتاده‌اند. مهم‌ترین واکنش شکافت که در نیروگاه‌های شکافت هسته‌ای حرارتی کنونی صورت می‌گیرد، شکافت ایزوتوپ اورانیوم یعنی ^{235}U از طریق جذب نوترون کند یا حرارتی است. این واکنش مدت‌های مدیدی است که به صورت کنترل شده در نیروگاه‌های هسته‌ای حرارتی انجام می‌شود و تنها عامل محدود کننده آن مقدار کل ^{238}U موجود در زمین است. مقدار ذخایر اورانیوم در معادن موجود حدود 10×10^6 کیلوگرم برآورد شده است. تنها 0.72% درصد اورانیوم طبیعی را ^{235}U و بقیه آن را ^{238}U تشکیل می‌دهد. با توجه به بازدهی 30% تا 40% درصدی چنین نیروگاه‌های هسته‌ای حرارتی از طریق راکتورهای آب سبک فقط $10 \times 10^6 \times 7/35$ ژول، انرژی الکتریکی از این مقدار اورانیوم به‌دست می‌آید. با افزایش مصرف انرژی الکتریکی در جهان منابع اورانیوم کشف شده فعلی نمی‌تواند پاسخگوی این مصرف در دراز مدت باشد. در حالی‌که فراوانی عناصر سبک که می‌توانند از طریق همجوشی انرژی تولید کنند، دانشمندان را به سمت ساخت راکتورهای همجوشی سوق داد. دوتریوم به‌طور طبیعی در اقیانوس‌ها حدود 0.3% درصد وجود دارد (حدود 40 گرم دوتریم در یک تن آب).

تریتیوم رادیواکتیو است و مقدار آن در طبیعت خیلی کمتر از دوتریوم می‌باشد یعنی 0.1% گرم در هر تن آب دریا، اما به آسانی می‌توان آن را با بمباران لیتیوم با نوترون در یک راکتور هسته‌ای تولید کرد. ذخیره قابل دسترس دوتریوم برای تأمین همه نیازهای انرژی تا یک بیلیون سال و همچنین لیتیوم برای یک میلیون سال کافی است [۱۲].

۱-۲- انرژی بستگی^۱

با توجه به رابطه‌ی جرم-انرژی اینشتین، هرگاه جرم کل محصولات نهایی از جرم کل هسته‌های برهمکنش کننده کمتر باشد یک برهمکنش هسته‌ای گرمازا است، که در آن انرژی زیر آزاد می‌شود:

$$Q = \left(\sum_i m_i - \sum_f m_f \right) c^2 \quad (1-1)$$

و متناسب با اختلاف جرم آن‌ها است.

در اینجا نماد m جرم و شاخصه‌های i و f به ترتیب محصولات اولیه و نهایی را نشان می‌دهد و c سرعت نور می‌باشد.

برهمکنش‌های گرمازا را می‌توان با توجه به جرم و انرژی بستگی هریک از هسته‌ها توجیه کرد. جرم m یک هسته با عدد اتمی Z و عدد جرمی A با جمع جرم کل Z پروتون و $A - Z$ نوترون متفاوت است لذا داریم:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m \quad (2-1)$$

که در این جا m_p و m_n به ترتیب جرم پروتون و جرم نوترون هستند. برای هسته‌های پایدار Δm مثبت است و می‌تواند مقدار انرژی‌ای، مساوی با انرژی بستگی:

$$B = \Delta mc^2 \quad (3-1)$$

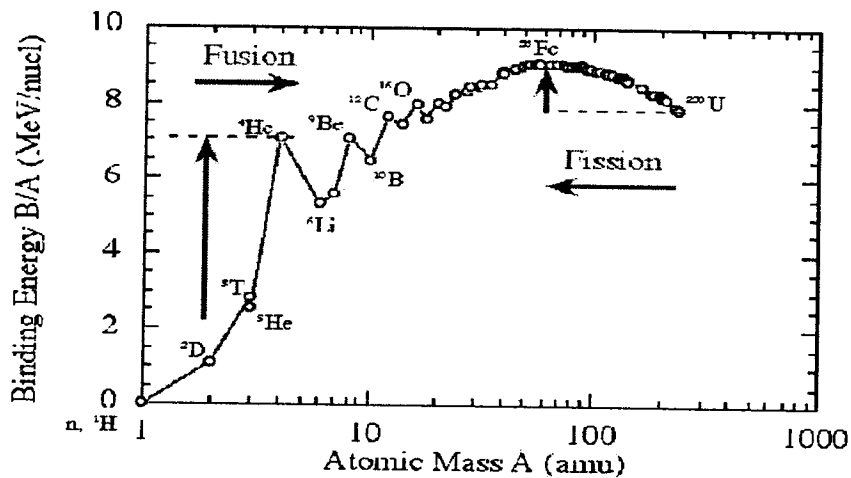
برای جدا کردن هسته‌ها به پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل دهنده تهیه کند.

^۱ Binding Energy

میزان Q یک برهمکنش هسته‌ای می‌تواند بر حسب اختلاف بین انرژی‌های بستگی اولیه و نهایی هسته-های برهمکنش‌کننده نوشته شود:

$$Q = \sum_f B_f - \sum_i B_i \quad (1-4)$$

توجه کنید که داده‌های جرم‌های هسته‌ای و انرژی بستگی توسط واپسترا^۱ و آیودی^۲ در سال ۱۹۹۵ منتشر شد. یک کمیت به‌ویژه مفید، میانگین انرژی بستگی به ازای هر نوکلئون می‌باشد شکل (۱-۱). میانگین انرژی بستگی که برای $A=1$ برابر صفر است. برای هسته‌های هیدروژن به سرعت با افزایش A رشد می‌کند و به یک مقدار ماکزیمم پهن $8/7$ مگا الکترون-ولت در حدود $A=56$ می‌رسد و سپس به کندی کاهش پیدا می‌کند. برای سنگین‌ترین هسته‌ها میانگین انرژی بستگی $8/5$ مگا الکترون-ولت می‌باشد. با توجه به بحث بالا، هرگاه محصولات نهایی برهمکنش میانگین انرژی بستگی بزرگتری نسبت به هسته‌های برهمکنش‌کننده داشته باشند، برهمکنش گرمازا است.



شکل (۱-۱) تغییرات انرژی بستگی بر نوکلئون بر حسب عدد جرمی [۳].

¹ Wapstra
² Audi

۱-۳- انواع برهمکنش‌های هسته‌ای

برهمکنش‌های هسته‌ای شامل برهمکنش‌های شکافت و همجوشی می‌باشند. چنانچه در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، برهمکنش شکافت وقتی پدیدار می‌شود که در آن هسته‌های سنگین به پاره‌های کوچکتر شکافته شوند و برای برهمکنش همجوشی، دو هسته سبک برای تشکیل هسته‌های سنگین‌تر با هم ترکیب می‌شوند.

همجوشی هسته‌ای را می‌توان به عنوان فرایند عکس شکافت هسته‌ای دانست، یعنی فرایندی که در آن دست‌کم یکی از محصولات واکنش هسته‌ای از هر یک از مواد شرکت‌کننده در واکنش سنگین‌تر است. همجوشی هسته‌ای در مواردی که جرم کل هسته‌های محصول از جرم کل مواد شرکت‌کننده در واکنش کمتر باشد منجر به رهایی انرژی خواهد شد. این شرط برای هسته‌های سبک با عدد جرمی A_1 و A_2 که برای آن‌ها $A_1 + A_2 < 60$ باشد همیشه برقرار است.

پیشرفت‌های علم فیزیک هسته‌ای که امکان تولید انرژی هسته‌ای را از طریق شکافت هسته‌های سنگین مثل اورانیوم مطرح ساخت، منجر به تحقیقات وسیعی در زمینه تولید انرژی هسته‌ای از طریق شکافت گردید، به طوری که سرانجام در سال ۱۹۴۲ اولین راکتور هسته‌ای ساخته شده [۴] و سرآغاز راه جدیدی برای تولید انرژی کنترل شده از منابع سوخت هسته‌ای قرار گرفت.

راکتورهای شکافت هسته‌ای نیز مشکلات خود را به همراه داشتند. از آن جمله، منابع محدود اورانیوم، مسئله دفع پسماند‌های سوخت این راکتورها که بسیار رادیواکتیو هستند و دارای طول عمر زیاد می‌باشند، نگهداری آن‌ها و این که در حوادث احتمالی، نشت پسماندهای خطرناک، لطمات جبران‌ناپذیری می‌تواند

به سلامت انسان‌ها و محیط زیست وارد کند و بالاخره قابل کنترل نبودن راکتورهای شکافت بعد از وقوع حادثه مواردی هستند که می‌توان نام برد [5].

در زمینه فرآیند همجوشی هسته‌ای، فرایندی که بتواند واکنش همجوشی را به صورت کنترل شده، مداوم و ارزان در اختیار بشر قرار دهد، کشف نشده‌است، منتهی تحقیقات وسیعی در این زمینه انجام شده و یا در حال انجام است و نتایج امیدوارکننده‌ای هم تا کنون حاصل گردیده است.

دلیل اینکه راکتورهای شکافت خیلی زودتر به نتیجه رسیدند و چند دهه‌ای است که مورد استفاده قرار گرفته‌اند، این است که در فرآیند شکافت هسته‌ای نوترون که بدون بار است باید با هسته‌های سنگین مثل ^{235}U ، ^{239}Pu و ^{235}U و غیره برخورد کند و تشکیل هسته مرکب دهد و سپس هسته مرکب متلاشی می‌شود. نوترون‌ها با هر انرژی قادر به نفوذ در هسته‌ها هستند، حتی برای هسته‌های شکافت‌پذیر، سطح مقطع این فرآیند برای نوترون‌های کم‌انرژی بیشتر است [6].

۱-۴- تئوری برهمکنش همجوشی

در برهمکنش‌های همجوشی، دو هسته X_1 و X_2 برای تشکیل هسته سنگین X_3 و یک ذره سبک‌تر X_4 ، با هم ترکیب می‌شوند. برای بیان این واکنش از نمایش استاندارد زیر استفاده می‌کنیم:



یا:



انرژی آزاد شده در برهمکنش بین محصولات همجوشی به طور عکس با نسبت جرمی آنها توزیع می‌شود که از پایداری انرژی و تکانه ناشی می‌شود. اگر سرعت هسته‌های برهمکنش کننده در سیستم آزمایشگاهی را به ترتیب با v_1 ، v_2 و سرعت نسبی آنها را با $v = v_1 - v_2$ نشان دهیم، انرژی مرکز جرم سیستم هسته‌های برهمکنش کننده را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} m_r v^2 \quad (7-1)$$

که $v = |v|$ و

$$m_r = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (8-1)$$

جرم کاهش یافته سیستم است.

پدیده همجوشی در هسته‌ها ممکن است به وسیله تونل‌زنی کوانتومی صورت گیرد [7]، ولی احتمال انجام این فرآیند بسیار کم است و لذا برای عملی ساختن همجوشی هسته‌ای و انجام آن، بایستی پهنای سد کولنی را که به وسیله هسته‌ها به وجود آمده، به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. برای این منظور بایستی هسته‌ها به هم نزدیک شوند تا از سد کولنی ایجاد شده به وسیله خود عبور کنند و در برد نیروهای هسته‌ای قوی که از نوع جاذبه می‌باشند قرار گرفته و احتمال همجوشی را افزایش دهند. این عمل با دادن انرژی مورد نیاز به هسته‌ها صورت می‌پذیرد.

چنین وضعیتی با نموداری از رفتار شعاعی انرژی پتانسیل یک سیستم دو هسته‌ای، در شکل (۲-۱) نشان داده شده است، معلوم می‌شود که در فاصله‌های بزرگتر از r_n پتانسیل لزوماً کولنی و دافعه است.

$$V_c(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (9-1)$$

$$r_n \cong 1.44 \times 10^{-13} (A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) \quad (10-1)$$

r_n برحسب سانتیمتر و تقریباً برابر با مجموع شعاع دو هسته است.

در معادله‌های بالا Z_1 و Z_2 عدد اتمی، A_1 و A_2 عدد جرمی هسته‌های برهمکنش‌کننده‌اند و e بار الکترون می‌باشد. در مسافت‌های $r < r_n$ دو هسته نیروی جاذبه هسته‌ای را احساس می‌کنند. که با یک پتانسیل با عمق ۳۰-۴۰ مگا الکترون-ولت مشخص می‌شود. با استفاده از روابط (۹-۱) و (۱۰-۱) ارتفاع سد کولنی را می‌توان به صورت زیر پیدا کرد:

$$V_b \cong V_c(r_n) = \frac{Z_1 Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}} \text{MeV} \quad (11-1)$$

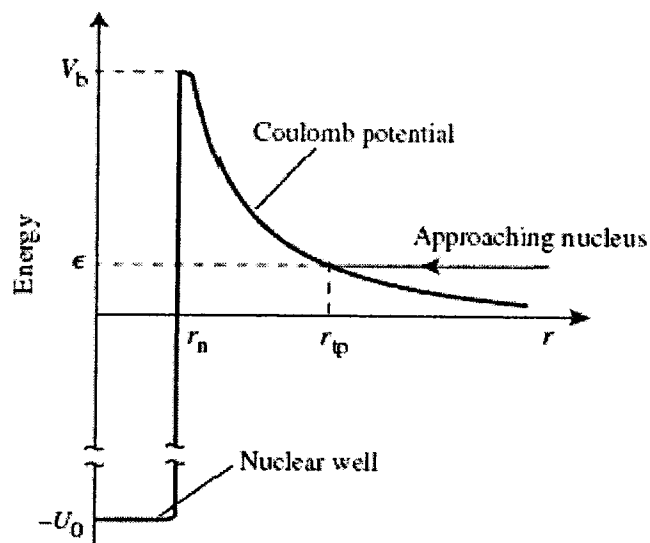
که از مرتبه‌ی یک میلیون الکترون-ولت است.

با توجه به مکانیک کلاسیک، تنها هسته‌ای می‌تواند از سد پتانسیل کولنی عبور کند که انرژی آن بیشتر از این مقدار باشد تا تماس حاصل شود. در عوض، دو هسته با انرژی نسبی $\varepsilon < V_b$ می‌تواند به هسته دیگر، تنها با نقطه‌ی چرخشی کلاسیکی^۱ بیشتر از:

$$r_{tp} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\varepsilon} \quad (12-1)$$

نزدیک شود.

¹ Classic Rotational



شکل (۲-۱): انرژی پتانسیل بر حسب فاصله‌ی بین دو هسته باردار با انرژی مرکز جرم [V]

به هر حال مکانیک کوانتومی، انجام چنین برهمکنش‌های همجوشی مابین هسته‌ها با انرژی کمتر از بزرگترین ارتفاع سد ممکن را برای تونل زدن از سد پتانسیل با پهنای محدود، اجازه می‌دهد.

در فرآیند همجوشی هسته‌ای، هسته‌های همجوشی کننده دارای بار مثبت هستند و نیروی دافعه کولنی بین آنها مانع اصلی در نزدیک شدن این هسته‌ها تا مرز نیروهای جاذبه هسته‌ای است. برای رفع این مشکل دو راه پیشنهاد شده است:

۱- همجوشی سرد^۱ (همجوشی به روش کاتالیزور میونی)

۲- همجوشی داغ^۲

^۱ Cold Fusion

^۲ Hot Fusion

۱-۵- همجوشی به روش کاتالیزور میونی^۱ (μCF)

ایده همجوشی به روش کاتالیزور میونی اولین بار توسط فرانک^۲ و در سال ۱۹۴۷ مطرح شد [۸]. در سال ۱۹۹۱ ساخاروف^۳ اساس مطالعه روی همجوشی کاتالیزور میونی را در تشکیل مولکول مقید میونی و اثر کوانتومی تونل زنی تشخیص داد [۹] و بیان کرد که با تشکیل یک مولکول میوندار سریعاً همجوشی صورت می‌گیرد.

کشف آزمایشگاهی همجوشی کاتالیزور میونی توسط الوارز^۴ و همکارانش در برکلی در سال ۱۹۵۶ صورت گرفت [۱۰].

فرایند همجوشی به روش کاتالیزور میونی بر اساس بی اثر کردن سد کولنی و نیروهای دافعه کولنی استوار است. برای بی اثر کردن سد کولنی بین هسته های همجوشی کننده و نزدیک کردن آن ها به هم باید از ذره‌ای استفاده کرد که به جای الکترون اتمی بنشیند و شعاع مدار بوهر آن کوچکتر از شعاع مدار بوهر اتم هیدروژن باشد تا هسته مورد نظر بدون بار شده و بتواند فاصله هسته‌ای خود را با دیگر هسته ها کم کرده و احتمال همجوشی را افزایش دهد. پس این ذره باید دارای خصوصیات زیر باشد:

نسبت به الکترون دارای جرم بزرگتر، دارای بار منفی و دارای طول عمر بزرگتری نسبت به دیگر ذرات پیشنهادی باشد.

میون منفی ذره‌ای است که بار آن منفی و برابر با بار الکترون، جرم آن حدود ۲۰۷ برابر جرم الکترون و طول عمر آن حدود ۲/۲ میکروثانیه می‌باشد.

¹ Muon Catalized Fusion

² F.C. Frank

³ A.D. Sakharov

⁴ L.W. Alavares