



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

اثرات نسبیتی مراتب بالا در پراکندگی رامان القایی

در برهم کنش های لیزر- پلاسما

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

حسین کریمی

استاد راهنما

دکتر اکبر پروازیان

۱۳۹۲



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک هسته‌ای آقای حسین کریمی

تحت عنوان

اثرات نسبیتی مراتب بالا در پراکندگی رامان القایی

در برهم کنش‌های لیزر-پلاسما

در تاریخ ۹۲/۱۰/۱۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتراکبر پروازیان

۲- استاد مشاور پایان نامه دکترا سید ظفرالله کلاتری

۳- استاد داور دکترا محمد حسن علامت ساز

۴- استاد داور دکترا احمد شیرانی

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده دکترا مجتبی اعلائی

خداوند متعال را شاکرم که بار دیگر بر بنده خویش منت نداد و در به پایان رساندن برگی دیگر از دفتر زندگی ام، همچون گذشته مرایاری فرمود.

از پروردگارم شکر کنم که بدی هایم را مانع بیشتر قدم ساختن و مرایاری فرمود تا بیشتر خوش شدن خویش را بشناسم و در صد دفع تعالیسم بر آیم.

از پدر و مادرم مهربانم سپاسگذارم، آن دو که همواره مشوق من در امر تحصیل بوده اند و هر چه که دارم، داشته ام و نخواهم داشت اول از فضل خدا و سپس از لطف و زحمات بی دریغ آن هاست.

از خواهران و برادرانم شکر کنم، آن ها که لحظه ای حمایت های خویش را از من دریغ نداشتند و همواره مشوق من در پی سودن این راه بوده اند.

از استاد راهنمای پایان نامه جناب آقای دکتر پروازیان کمال شکر و قدردانی را دارم، چرا که ایشان راهنمای راهی بودند که به آن علاقه مندم و امیدوارم این استاد عزیز همیشه در تمامی مراحل زندگی موفق و مؤید باشند.

از سایر اساتید گروه هسته ای دانشکده فیزیک، جناب آقای دکتر کلاستری استاد مشاور پایان نامه، و همچنین جناب آقای دکتر شیرانی و جناب آقای دکتر علامت ساز که زحمت داورسی این پایان نامه را بر عهده داشته اند کمال شکر و قدردانی را دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،  
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق  
موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه  
صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

شهدای جهاد علمی

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
هشت	فهرست مطالب
۱	چکیده
	فصل اول : مقدمه‌ای بر فیزیک پلاسما و همجوشی کنترل شده
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ همجوشی
۴	۳-۱ سوخت $D - T$ ، گزینه مناسب برای همجوشی
۶	۴-۱ معیار لاژسون
۸	۵-۱ پلاسما
۸	۱-۵-۱ تعریف پلاسما
۹	۲-۵-۱ پارامترهای پلاسما
۱۱	۳-۵-۱ معیارهای پلاسما
۱۱	۶-۱ نظریه‌های توصیفی پلاسما
۱۲	۱-۶-۱ توصیف سیالی
۱۲	۲-۶-۱ توصیف جنبشی
	فصل دوم : راکتورهای همجوشی
۱۴	۱-۲ مقدمه
۱۵	۲-۲ محصور سازی مغناطیسی پلاسما



- ۱-۲-۲ محصور سازی مغناطیسی پلاسما بوسیله آینه‌های مغناطیسی ..... ۱۶
- ۲-۲-۲ محصور سازی مغناطیسی پلاسما بوسیله توکامک‌ها ..... ۲۵
- ۳-۲ توکامک‌های تحقیقاتی ..... ۲۷
- ۴-۲ پارامترهای اصلی توکامک ..... ۳۰
- ۱-۴-۲ نسبت شعاع اصلی به شعاع فرعی ..... ۳۰
- ۲-۴-۲ پارامتر بتا ..... ۳۰
- ۳-۴-۲ فاکتور ایمنی ..... ۳۱
- ۴-۴-۲ Z مؤثر ..... ۳۳
- ۵-۲ روش‌های گرمایش در توکامک‌ها ..... ۳۴
- ۱-۵-۲ گرمایش بوسیله تزریق ذرات خنثی ..... ۳۴
- ۲-۵-۲ گرمایش تشدید سیکلوترونی الکترونی ..... ۳۵
- ۳-۵-۲ گرمایش تشدید سیکلوترونی یونی ..... ۳۵
- ۴-۵-۲ گرمایش تشدید هیبرید پائین ..... ۳۶
- ۵-۵-۲ گرمایش اهمی ..... ۳۶
- ۶-۵-۲ تزریق ذرات باردار ..... ۳۶
- ۷-۵-۲ برهم کنش پرتو با پلاسما ..... ۳۶
- ۸-۵-۲ ناپایداری پارامتری ..... ۳۶

### فصل سوم : امواج در پلاسما

- ۱-۳ مقدمه ..... ۳۷
- ۲-۳ روش کلی در بدست آوردن روابط پاشندگی ..... ۳۸
- ۳-۳ اصطلاحات در بحث امواج ..... ۴۰

- ۴-۳ مدهای نوسانی در پلاسما ..... ۴۱
- ۴-۳ ۱- نوسان‌های پلاسما ..... ۴۱
- ۴-۳ ۲- امواج الکترونی پلاسما ..... ۴۲
- ۴-۳ ۳- امواج صوتی یونی ..... ۴۳
- ۴-۳ ۴- نوسان‌های الکترواستاتیک الکترونی عمود بر  $B$  ..... ۴۵
- ۴-۳ ۵- امواج الکترواستاتیک یونی عمود بر  $B$  ..... ۴۶
- ۴-۳ ۶- بسامد آمیخته پائین ..... ۴۸
- ۵-۳ ۵- امواج الکترومغناطیسی در پلاسما ..... ۴۸
- ۵-۳ ۱- امواج الکترومغناطیسی در پلاسمای غیر مغناطیسی  $B_0 = 0$  ..... ۴۸
- ۵-۳ ۲- امواج الکترومغناطیسی عمود بر  $B_0$  ..... ۴۹
- ۵-۳ ۳- تانسور دی‌الکتریک پلاسما و رابطه پاشندگی برای موج با زاویه فرودی  $\theta$  ..... ۵۲
- ۵-۳ ۴- رابطه پاشندگی برای امواج الکترومغناطیسی با فرکانس پائین در پلاسما (امواج آلفون) ..... ۵۶
- ۶-۳ ۶- برهم‌کنش موج-موج ..... ۵۹
- ۶-۳ ۱- نیروی محرکه وزنی ..... ۵۹
- ۶-۳ ۲- نوسانگرهای جفت شده و پدیده زنش ..... ۶۱
- ۶-۳ ۳- جفت‌شدگی بسامد و انواع تبدیل مد در پلاسما ..... ۶۲
- ۶-۳ ۴- آستانه ناپایداری ..... ۶۶
- ۶-۳ ۵- سازوکار فیزیکی ..... ۶۷
- ۷-۳ ۷- برهم‌کنش موج-ذره ..... ۶۸
- ۷-۳ ۱- میرائی لاندائو ..... ۶۹

۷۵..... ۲-۷-۳ معنای میراثی لاندائو.....

#### فصل چهارم: بررسی روش شبیه‌سازی ذره در جعبه

۷۷..... ۱-۴ مقدمه.....

۷۸..... ۲-۴ اصول شبیه‌سازی.....

۸۰..... ۳-۴ شبیه‌سازی یک بعدی پلاسما در حالت الکترواستاتیک.....

۸۳..... ۴-۴ معادلات میدان.....

۸۵..... ۵-۴ تخصیص بار و درونیابی نیرو.....

۸۷..... ۶-۴ مدل گسسته شبیه‌سازی.....

۸۹..... ۷-۴ بی بعد سازی کمیت‌ها.....

۹۱..... ۸-۴ حل معادله پوآسون.....

۹۳..... ۹-۴ برنامه شبیه‌سازی *XOOPIC*.....

۹۴..... ۱-۹-۴ الگوریتم برنامه *OOPIC* و معادلات شبیه‌سازی مورد استفاده در آن.....

۹۵..... ۲-۹-۴ ساختار کلی فایل ورودی در برنامه *XOOPIC*.....

#### فصل پنجم: شبیه‌سازی

۹۷..... ۱-۵ مقدمه.....

۹۸..... ۲-۵ پراکندگی رامان القایی.....

۱۰۱..... ۳-۵ فایل ورودی به منظور شبیه‌سازی پراکندگی رامان القایی.....

۱۰۲..... ۴-۵ شبیه‌سازی پراکندگی رامان القایی با استفاده از برنامه *XOOPIC*.....

۱۱۱..... ۵-۵ بررسی پراکندگی رامان القایی تحت تأثیر جملات غیرخطی مرتبه بالاتر.....

۱۱۱..... ۱-۵-۵ دینامیک موج.....

۲-۵-۵ معادلات تحول زمانی امواج جفت شده در پراکندگی رامان القایی ..... ۱۱۲

۳-۵-۵ تحلیل عددی پراکندگی رامان القایی تحت تأثیر جملات غیرخطی مرتبه بالاتر ..... ۱۱۶

۶-۵ نتیجه گیری ..... ۱۲۲

۷-۵ پیشنهادات ..... ۱۲۳

مراجع ..... ۱۲۴

## چکیده

راکتورهای همجوشی، ماشین‌هایی برای استخراج انرژی هسته‌ای می‌باشند. در این راکتورها هسته‌های عناصر سبک در طی یک واکنش همجوشی هسته‌ای به هسته سنگین‌تر تبدیل می‌شوند که این واکنش با تولید انرژی همراه است. محاسبات نشان می‌دهند که به منظور داشتن راکتوری بهینه، سوخت همجوشی باید دارای دمایی از مرتبه  $10^8$  میلیون درجه سانتی‌گراد و چگالی‌ای از مرتبه  $10^{23}$  ذره بر مترمکعب باشد. بنابراین، مسئله گرم کردن و محصورسازی سوخت همجوشی، اساسی‌ترین و مهم‌ترین موضوع در این راکتورها می‌باشد. در راکتورهای کروی از میدان‌های مغناطیسی به منظور محصورسازی سوخت همجوشی که به صورت پلازما است، استفاده می‌شود. همچنین از امواج الکترومغناطیسی (پالس لیزر) به منظور افزایش دمای سوخت همجوشی استفاده می‌شود. نرخ انتقال انرژی از پالس لیزر به پلازما که یک پارامتر تعیین‌کننده در بهره‌انرژی راکتور می‌باشد، همواره یکی از موضوعات مهم در بررسی این راکتورها بوده است. گستره وسیعی از برهم‌کنش‌ها در اثر برخورد پالس لیزر با پلازما همجوشی ممکن است رخ دهد. یکی از این برهم‌کنش‌ها ناپایداری‌های پارامتری است که در آن، پالس لیزر سبب تهییج یکی از مدهای نوسانی پلازما می‌شود و بدین ترتیب انرژی لیزر به پلازما انتقال می‌یابد. ناپایداری‌های پارامتری، دارای انواع مختلفی می‌باشد که ما از آن میان پراکندگی رامان القایی را بررسی کردیم. در پراکندگی رامان القایی ورود پالس لیزر به پلازما، سبب تهییج یک موج الکترواستاتیک الکترونی و یک موج الکترومغناطیسی پراکنده شده می‌شود. در این پراکندگی شرایط تطبیق فرکانسی حایز اهمیت می‌باشد. چراکه تنها زمانی پراکندگی رامان القایی رخ می‌دهد که موج الکترومغناطیسی پراکنده شده با پالس لیزر ورودی دچار زنش شود. زنش ایجاد شده بین این دو موج سبب ایجاد نیروی محرکه‌ای می‌شود که در نهایت سبب گسیل یک موج لانگمیر در پلازما می‌شود. موج با انتشار در داخل پلازما سبب گیراندازی الکترون‌ها در دامنه خود شده و بدین ترتیب انرژی به ذرات پلازما منتقل می‌شود. ما در این پایان‌نامه سعی کردیم تا ناپایداری پراکندگی رامان القایی را برای شرایط پلازمایی موجود در یک راکتور کروی شبیه‌سازی کنیم. این شبیه‌سازی با استفاده از برنامه *xoopic* صورت گرفت و نتایج به‌دست آمده نشان دهنده انتشار یک موج لانگمیر در پلازما بود. همچنین نرخ انتقال انرژی به ذرات پلازما در این حالت محاسبه گردید. در مرحله بعدی سعی کردیم تا با در نظر گرفتن جملات نسبی غیر خطی مرتبه بالا در معادلات شبیه‌سازی، تأثیر این جملات را در پراکندگی رامان القایی مورد بررسی قرار دهیم. در نظر گرفتن این جملات در محاسبات نشان دهنده کاهش انتقال انرژی به پلازما در حضور اثرات نسبی است. همچنین اثرات ناشی از تغییر دمای پلازما در نرخ رشد ناپایداری پراکندگی رامان القایی مورد مطالعه قرار گرفت. در این حالت نیز کاهش انرژی منتقل شده به پلازما در صورت کاهش دمای آن مشاهده شد.

## فصل اول

### مقدمه‌ای بر پلاسما و همجوشی کنترل شده

#### ۱- مقدمه

نگاهی به روند رو به رشد در مصرف انرژی همواره موجبات این نگرانی را فراهم کرده است که آینده بشر، با اکتفا به منابع کنونی تولید انرژی، بسیار سخت و غیر قابل تصور خواهد بود. طبق بررسی‌های صورت گرفته، عرضه انرژی در دنیا بین سال‌های ۱۹۷۱ تا ۲۰۰۱ از مقدار ۵۰۱۲ به ۱۰۰۲۹ *Mtoe*<sup>۱</sup> و تولید انرژی الکتریکی از ۵۲۲۴ به ۱۵۴۶۷ *TWh* افزایش پیدا کرده است. همچنین انتظار می‌رود این مقادیر تا سال ۲۰۲۰ به ترتیب ۲٪ و ۲۷٪ رشد داشته باشند [۱]. برخی از پیش بینی‌ها حاکی از افزایش دوبرابری نیاز به انرژی تا سال ۲۱۰۰ می‌باشد. بنابراین، نه تنها کمبود منابع کنونی انرژی، انسان را به ایجاد یک منبع انرژی جایگزین ترغیب می‌کند، بلکه آلودگی‌های زیست محیطی این منابع، امروزه بیش از هر زمان دیگری، زندگی انسان‌ها و گونه‌های جانوری را مورد خطر قرار داده است. همچنین لازم به ذکر است که منابع انرژی تجدید پذیر از قبیل انرژی خورشیدی و نیروگاه‌های بادی نیز، نمی‌توانند پاسخگوی نیاز مصرفی بشر باشند. به عنوان مثال برای تأمین برق مصرفی شهر بوستون با استفاده از توربین‌های بادی، به یک مزرعه تولید انرژی، با مساحتی در حدود ۴۵۰ مایل مربع، احتیاج می‌باشد که مساحت آن چیزی در حدود ۸ مرتبه بیشتر از مساحت خود شهر است. همچنین برای تأمین نیاز برق این شهر با استفاده از انرژی خورشیدی، به ۵۰ مایل مربع سلول خورشیدی احتیاج می‌باشد که علیرغم هزینه بالای

---

<sup>۱</sup> Million tonnes oil equivalent

آن، تنها می‌تواند جوابگوی نیاز کنونی این شهر به انرژی باشد. لذا دست یابی به انرژی‌ای که نه تنها از لحاظ منابع جوابگوی نیاز بشر باشد، بلکه از لحاظ زیست محیطی نیز آلودگی‌های کمتری را به همراه داشته باشد، مورد توجه بوده و خوشبختانه همجوشی هسته‌ای به عنوان راهکاری برای برون رفت از این بحران مطرح گردیده است [۲]. سوخت مصرفی در راکتورهای همجوشی به صورت پلاسما می‌باشد. چرا که دمای لازم برای انجام همجوشی بسیار زیاد بوده و از مرتبه چند میلیون درجه سانتی‌گراد می‌باشد. یکی از روش‌های مورد استفاده برای افزایش دمای سوخت همجوشی تا این مقدار استفاده از امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. این امواج با ورود به داخل پلاسما گستره وسیعی از برهم‌کنش‌ها را سبب می‌شوند که غیرقابل اجتناب می‌باشد. هدف از بررسی این برهم‌کنش‌ها نیز مطالعه آن‌ها به منظور بهینه‌سازی راکتورهای همجوشی است. ما قصد داریم در این پایان‌نامه، پراکندگی رامان القایی را مورد بررسی قرار دهیم. این پراکندگی ناشی از برهم‌کنش پالس لیزر با پلاسمای همجوشی می‌باشد. بدین منظور، ابتدا در فصل یک مختصری در مورد فیزیک پلاسما و همجوشی هسته‌ای صحبت می‌کنیم؛ در فصل دوم نیز راکتورهای همجوشی را معرفی کرده و اساس کار آن‌ها را شرح می‌دهیم. در فصل سوم، بحث امواج در پلاسما را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و در فصل چهارم مبانی شبیه‌سازی پلاسما با استفاده از روش ذره در جعبه را بیان می‌کنیم. نهایتاً در فصل پنجم پراکندگی رامان القایی را، برای شرایط موجود در یک راکتور همجوشی شبیه‌سازی کرده و نتایج حاصل از آن را بیان می‌کنیم.

## ۱-۲ همجوشی

اساس واکنش‌های هسته‌ای بر این حقیقت استوار است که جرم هسته یک اتم برابر مجموع جرم نوکلئون‌های آن نمی‌باشد؛ بلکه این مقدار برای یک هسته با عدد اتمی  $Z$  دارای اختلافی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M_Z \quad (1 - 1)$$

این مقدار تفاوت، از تبدیل جرم به انرژی ناشی می‌شود و در واقع مقدار انرژی است که صرف قرار گرفتن نوکلئون‌ها در کنار یکدیگر می‌شود. این انرژی همان انرژی بستگی هسته است و مقدار آن برابر است با:  $BE = \Delta c^2$ . هر واکنش هسته‌ای که در طی آن انرژی بستگی به ازاء هر نوکلئون افزایش پیدا کند، با تبدیل جرم به انرژی همراه است. در واکنش همجوشی هسته‌ای، دو هسته سبک با یکدیگر ترکیب شده و هسته مرکب را تشکیل می‌دهند که در حالت برانگیخته خود قرار دارد. واپاشی هسته مرکب به فرآورده‌های واکنش با تولید انرژی همراه است که ناشی از اختلاف جرم هسته‌های اولیه و هسته‌های نهایی می‌باشد. شکل نمادین این واکنش به صورت زیر است:



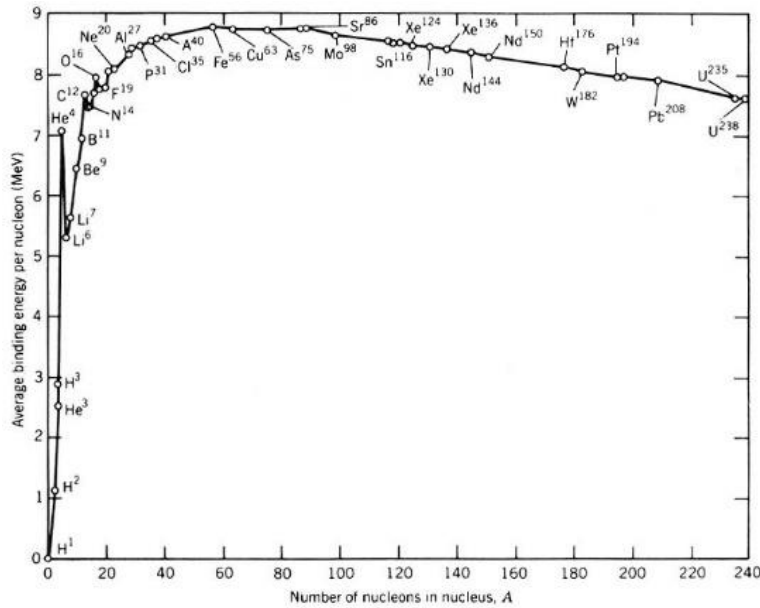
اختلاف جرم بین هسته‌های اولیه و نهایی تبدیل به انرژی جنبشی فرآورده‌ها می‌شود که این مقدار انرژی، طبق رابطه مشهور انیشتین قابل محاسبه است:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = [(m_a + m_b) - (m_c + m_d)]c^2 \quad (۳-۱)$$

در واقع در فرآیند همجوشی، انرژی آزاد شده، تفاوت انرژی بستگی هسته سنگین و هسته‌های سبک تر است. با توجه به شکل ۱-۱ می‌بینیم که همجوشی هسته‌ای، مادام که هسته نهایی سنگین تر از  $A = 60$  نباشد، می‌تواند انرژی آزاد کند.

### ۱-۳ سوخت D-T، گزینه مناسب برای همجوشی

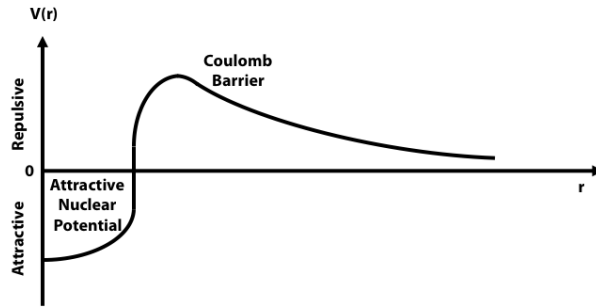
برای انجام همجوشی، هسته‌ها باید در فاصله بسیار نزدیک از یکدیگر قرار گیرند تا نیروی کوتاه‌برد هسته‌ای وارد عمل شده و سبب انجام واکنش هسته‌ای شود. اما نیروی دافعه کولنی مانع از این می‌شود که ذرات در حالت عادی با یکدیگر



شکل ۱-۱ نمودار متوسط انرژی بستگی هر نوکلئون به هسته بر حسب عدد جرمی

همجوشی داشته باشند. چرا که برای عبور از این سد پتانسیل کولنی (مطابق شکل ۱-۲) و انجام همجوشی ذرات باید دارای انرژی از مرتبه  $10^8$  تا  $10^9$  MeV باشند که معادل با دمایی از مرتبه  $10^8$  تا  $10^9$  درجه کلوین می‌باشد؛ بنابراین برای انجام همجوشی افزایش دمای سوخت تا ۱۰ میلیون درجه کلوین ضروری می‌باشد. هر چه بار هسته‌ها کمتر باشد نیروی دافعه کولنی کمتر بوده و انرژی آستانه برای انجام همجوشی نیز کمتر می‌باشد. پس تا اینجا هیدروژن و ایزوتوپ‌های آن می‌توانند گزینه مناسبی به عنوان سوخت همجوشی باشند. اما علاوه بر این موضوع، آهنگ انجام واکنش نیز یکی از موضوعات مهم در راکتورهای همجوشی می‌باشد. چراکه توان تولیدی راکتور در ارتباط مستقیم با آهنگ واکنش هاست.





شکل ۱-۲ سد پتانسیل کولنی در برابر هسته‌ها

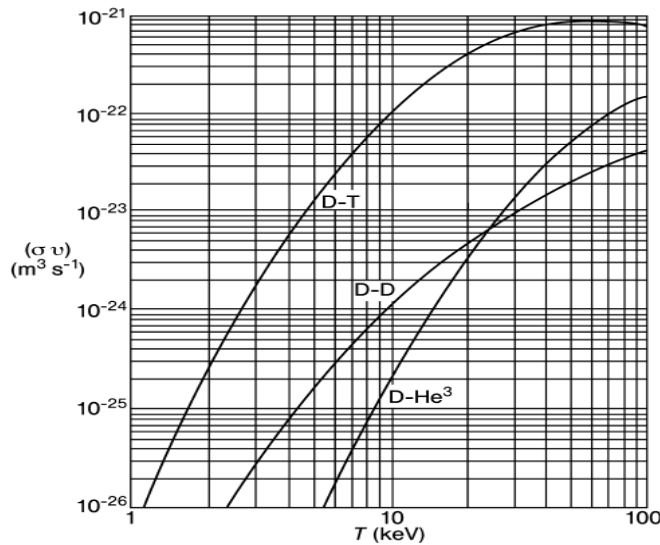
آهنگ انجام واکنش همجوشی بین دو گونه یونی که در داخل پلاسمای گرما هسته‌ای اتفاق می‌افتد، با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle_f = n_1 n_2 \int_{v_1 v_2} f_1(v_1) f_2(v_2) |v_1 - v_2| \sigma_f(|v_1 - v_2|) d^3 v_1 d^3 v_2 \quad (۴ - ۱)$$

که در آن  $v$  سرعت،  $n$  چگالی و  $f$  تابع توزیع سرعت مربوط به هر یک از گونه‌های یونی می‌باشد. همچنین در رابطه فوق پارامتر  $\sigma_f$  معرف سطح مقطع انجام واکنش همجوشی است. تابع توزیع سرعت یون‌ها در بسیاری از موارد با استفاده از یک توزیع ماکسولی به صورت

$$f_{max} = \left( \frac{m_i}{2\pi k T_i} \right)^{3/2} e^{-(m_i v^2) / 2k T_i} \quad (۵ - ۱)$$

بیان می‌شود که در آن  $T_i$  و  $m_i$  به ترتیب دما و جرم گونه یونی  $i$  می‌باشد. در یک پلاسمای گرما هسته‌ای شامل یون‌های سبک، برخورد‌های کولنی سبب می‌شود که همه گونه‌های یونی توزیع سرعت یکسانی را داشته باشند. بنابراین پارامتر  $\langle \sigma v \rangle_f$  که معرف آهنگ انجام واکنش‌های همجوشی می‌باشد، تنها به صورت تابعی از دمای سوخت در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱-۳ پارامتر  $\langle \sigma v \rangle_f$  برحسب دما برای سه واکنش مهم در راکتورهای همجوشی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است در دماهای زیر مقدار آستانه آهنگ واکنش ناچیز است. همچنین نموداری که در دمای به نسبت پائین دارای بیشترین مقدار پارامتر  $\langle \sigma v \rangle_f$  می‌باشد مربوط به واکنش دوتریم (D) و تریتم (T) است. این امر سبب شده که سوخت D-T به عنوان سوختی مناسب برای راکتورهای همجوشی در نظر گرفته شود.



شکل ۱-۳ نرخ واکنش‌های همجوشی بر حسب دما

لازم به ذکر است که تعداد واکنش‌های همجوشی زیاد می‌باشد، اما به دلیل انرژی آستانه بالا، این واکنش‌ها مناسب برای استفاده در راکتورهای گداخت نمی‌باشند و تنها ایزوتوپ‌های هیدروژن و از آن میان سوخت  $D - T$  به دلایل ذکر شده مناسب می‌باشد. در جدول ۱-۱ تعدادی از واکنش‌های همجوشی به همراه انرژی آستانه و انرژی تولیدی شان آورده شده است. همچنین برای واکنش  $D-D$ ، دو شاخه همجوشی معرفی شده با احتمال یکسانی صورت می‌پذیرد.

جدول ۱-۱ واکنش‌های مورد علاقه در راکتورهای همجوشی

Reaction	Thermonuclear energy release		Threshold energy	
	MeV		K	keV
$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$ (14.1 MeV)	17.6		$4.5 \times 10^7$	4
$D + D \rightarrow \begin{cases} T + p \\ {}^3\text{He} + n \end{cases}$ (2.4 MeV)	4.0		$4.0 \times 10^8$	35
	3.25			
$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	18.2		$3.5 \times 10^8$	30

#### ۱-۴ معیار لاؤسون

پلازما باید به قدر کافی گرم باشد تا انرژی تولید شده به واسطه همجوشی از انرژی صرف شده برای گرم کردن پلازما بیشتر باشد. معیاری برای سنجش این فرآیند معیار لاؤسون می‌باشد که مشخص کننده حداقل شرایط لازم در پلازما برای بهینه بودن یک راکتور همجوشی است. معیار لاؤسون را می‌توان با صرف نظر کردن از تعدادی از اثرات مهم به صورت زیر نوشت:

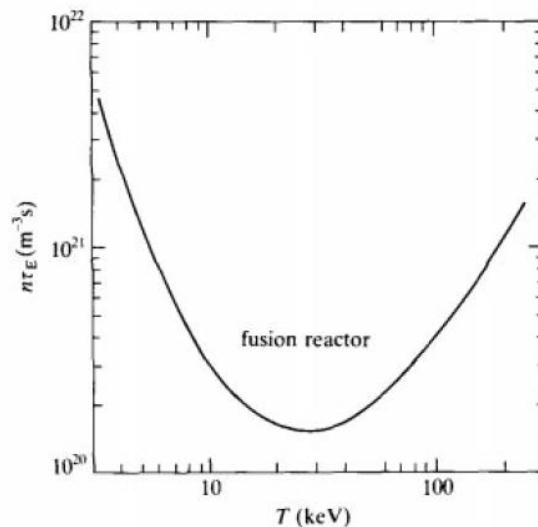
$$\left(\frac{1}{4}n^2\langle\sigma v\rangle_f E_\alpha\right)\tau_E > 3nkT \quad (۶-۱)$$

در رابطه فوق  $\tau_E$  زمان محصور سازی پلاسما است و همچنین  $E_\alpha$  برابر با  $3/5 \text{ MeV}$  می باشد که در واقع متوسط انرژی جنبشی ذره  $\alpha$  تولیدی از برهمکنش D-T است که صرف گرمایش پلاسما می شود. همچنین  $(n_D = n_T = \frac{1}{2}n)$  چگالی یون بر واحد حجم می باشد که در پلاسما D-T با چگالی الکترون بر واحد حجم برابر است.

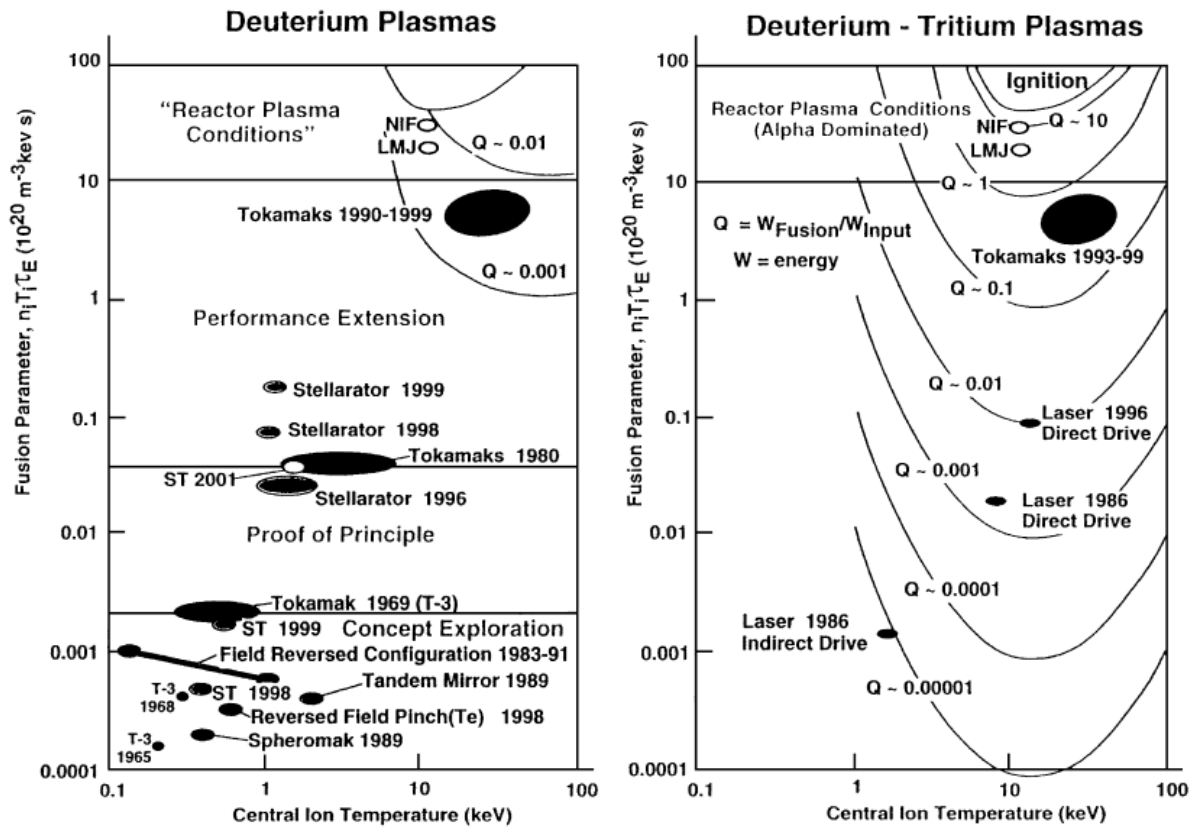
با در نظر گرفتن پلاسما همجوشی در دمای  $10 \text{ keV}$  معیار لاؤسون به صورت زیر خلاصه می شود:

$$n\tau_E > 1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \quad (۷-۱)$$

در واقع لاؤسون نشان داد که اگر بخواهیم انرژی تولید شده ناشی از ذرات  $\alpha$  بیشتر از انرژی تلف شده در پلاسما باشد باید پلاسما دما و چگالی بالایی داشته باشد و در دمای  $10 \text{ keV}$ ، حاصل ضرب زمان محصور سازی در چگالی پلاسما، باید از حدود  $10^{20}$  بزرگتر باشد. در شکل ۱-۴ نواحی مطلوب تولید انرژی مشخص شده است. در واقع راکتورهایی در این نواحی کار می کنند می توانند بازده مثبت داشته باشند. معیاری برای سنجش بهینه بودن یک راکتور گداخت، پارامتر  $Q$  می باشد که در حقیقت برابر با مقدار انرژی تولیدی راکتور به مقدار انرژی مصرفی آن می باشد. در شکل ۱-۵ پارامتر  $Q$  برای برخی از راکتورهای گداخت آورده شده است که مشخص کننده پیشرفت های صورت گرفته در راکتورهای گداخت بر حسب زمان می باشد [۳].



شکل ۱-۴ نواحی مطلوب تولید انرژی در راکتورهای گداخت.



شکل ۱-۵ پیشرفت های صورت گرفته در راکتورهای گداخت به منظور بهینه کردن آن‌ها.

### ۱-۵ پلاسما

با توجه به اینکه سوخت همجوشی در دمای  $10 \text{ keV}$  به صورت پلاسما می‌باشد، مسئله گرم کردن و نگهداری چنین پلاسمایی باعث رشد سریع علم فیزیک پلاسما از سال ۱۹۵۲ بوده است و شناخت پلاسما و رفتارهای آن، به جزء جدایی ناپذیر در تحقیقات گداخت هسته‌ای تبدیل شده است.

#### ۱-۵-۱ تعریف پلاسما

هر گاز یونیده را نمی‌توان پلاسما نامید. اما برخی از معیارهای اساسی وجود دارند که می‌توانند مشخص کننده یک گاز یونیده پلاسما باشد. در هر حال یک تعریف مفید به صورت زیر وجود دارد:

پلاسما گاز شبه خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد.