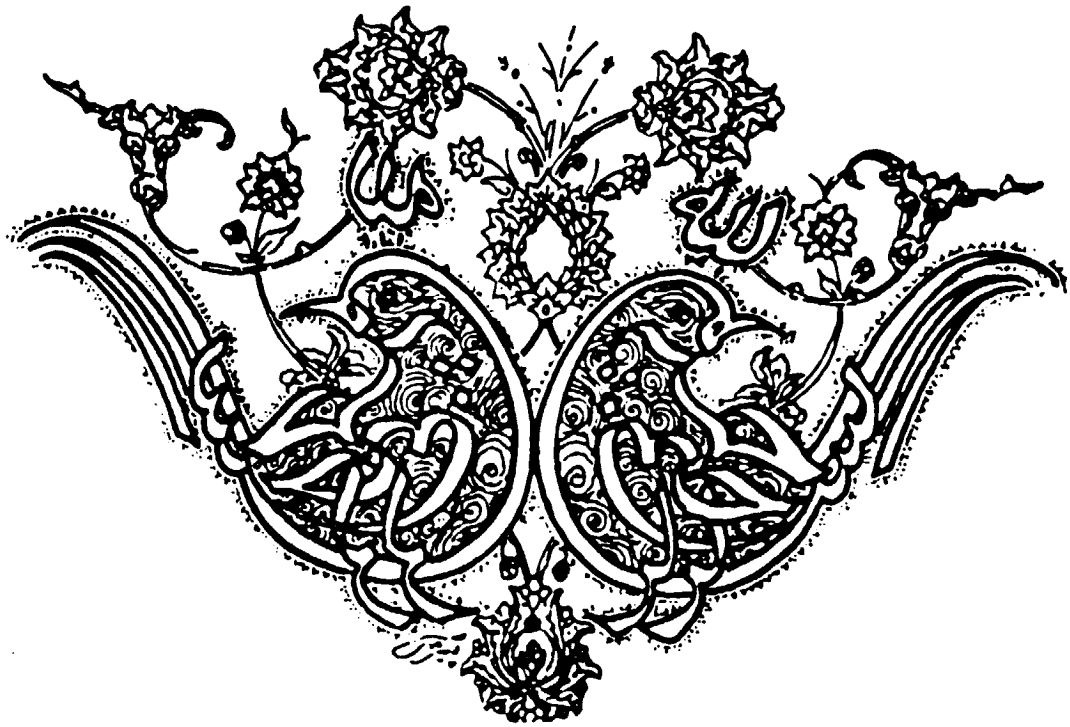


بنام آنکه دل پروانه اوست

۳۹۱۵۷

دانشگاه تربیت معلم

دانشکده علوم

گروه آموزشی فیزیک

عنوان پایان نامه:

بررسی تعادل پایدار و ناپایدار در پلاسما

نگارش:

نادر علی نژاد

تیر ۱۳۸۵

۳۹۱۵۷

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران

دانشگاه تربیت معلم تهران
دانشکده علوم (گروه فیزیک)
پایان نامه کارشناسی ارشد
موضوع :بررسی تعادل پایدار وناپایداری در پلاسما
استاد راهنما: دکتر حسن مهدیان
استاد مشاور : دکتر محمد حسین مجلس آرا
نگارش: قادر علی نژاد
تیرماه هشتاد

015982

تقدیم به : پدر و مادرم که اولین آموزگارانم بوده اند

همسر وفرزندانم که با صبوری در طول تحصیلم مرا یاری کردند

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول - مقدمه‌ای از فیزیک پلاسما	۱
۱ـ۱ـ تعریف فیزیک پلاسما	۲
۱ـ۲ـ حدوث در پلاسما	۲
۱ـ۳ـ خنثی وار بودن پلاسماها	٤
۱ـ٤ـ تعادل و فوق تعادل در پلاسما	۹
۱ـ۵ـ تعادل نسبی در پلاسما	۱۰
خلاصه مطالب فصل اول	۱۱
فصل دوم - پایداریها در پلاسما	
۲-۱- شیوه های محصور سازی پلاسما	۱۳
۲-۲- پایداری در پلاسمای سیال	۱٤
۲-۳- مسئله تعادل	۱۵
۲-٤- متدهای آنالیز پایداری	۱٦
۲-۵- تعادل هیدرو مغناطیسی	۱۸
۲-٦- تعریف ضریب ثابت β و T	۲۰
۲-۷- پایداری در سیال پلاسما که توسط میدان مغناطیسی بر ضد گرانش تقویت شده	۲۳
۲-۸- پایداری مغناطیسی محدود شده ، ملاحظات ترمودینامیکی (معاوضه ناپایداری)	۲۷
۲-۹- معادلات ماکروسکوپی برای مطالعه درپایداری در پایداری هیدرودینامیکی در پلاسمای محور شده مغناطیسی	۳۵

۱۳۸۰ /۱۱/ ۲۵

۲-۱۰- پایداری در یک سیال پلاسمای تقویت شده بر ضد نیروی گرانش توسط یک میدان مغناطیسی، تجزیه و تحلیل یک مد نرمال ٤١

۲-۱۱- خلاصه مطالب فصل ٤٦

فصل سوم ناپایداریها در پلاسما:

مقدمه - ناپایداریها ٤٨

۳-۱- طبقه‌بندی ناپایداریها در پلاسما ٤٨

۳-۲- ناپایداری ساختار فضایی ٤٩

۳-۳- ناپایداری سرعت فضایی ٤٩

۳-٤- ناپایداری الکترواستاتیک ٥٠

۳-٥- ناپایداری الکترومغناطسی ٥٠

۳-٦- دو جریان ناپایداری در فضای باردار شده موجها ٥٠

۳-۷- ناپایداری گرانشی ٥٦

۳-۸- ناپایداری فری - هوز در امواج آلفون ٦١

۳-۹- ناپایداری نوع پیچشی ٦٧

۳-۱۰- ناپایداری حلزونی ٦٩

۳-۱۱- مطالعه مدهای پیچشی و پارگی ٧١

۳-۱۲- خلاصه فصل

فصل چهارم توکامک (Tokamak) : ٧٢

٤-۱- مقدمه ٧٣

٤-۲- تعادل در توکامک

٤-٣- پایداری و ناپایداری هیدرومغناطیسی توکامک ٧٧

٤-٤- مروری بر مدهای مختلف موجود در توکامک ٧٨

٤-٥- بررسی گسیختگی های کوچک در آزمایشات توکامک ٧٩

٤-٦- معرفی توکامک IR - T1 ٨٢

الف - نوع گاز و سیستم خلاء ٨٢

ب - مرحله پیش یونش ٨٣

ج - پیچه های مغناطیسی چنبره ای ٨٣

د - پیچه های سیستم گرمایش اهمی ٨٤

ه - مرحله انفجار گاز و پیچه های میدان مغناطیسی عمودی ٨٤

پ - سیستمهای تشخیص الکترومغناطیسی در توکامک ٨٥

٤-٧- پروب دوگانه لانگمور ٨٥

٤-٨- پرتوهای ایکس در توکامک ٨٦

مراجع ٨٧

چکیده انگلیسی ٨٨

تقدیر و تشکر:

چمن عقل را خزانی اگر　　گلشن عشق را بهار توئی

عشق را گر پیمبری　　حسن را آفریدگار توئی

بر خود لازم و واجب می‌دانم در مقابل خدمات بی‌شائبه کلیه عوامل آموزشی و اداری دانشگاه تربیت معلم تهران سر تعظیم فرود آورم و خداوند متعال بسیار شاکرم که توفیق درک خدمت استادن ارجمند و بزرگوار را بر من ارزانی داشت و از زحمات دکتر حسن مهدیان به‌عنوان استاد راهنما که روزها و ماههای متوالی کمکم کرد و استاد ارجمندم آقای مجلس‌آرا به‌عنوان استاد مشاور که راهنمائیهای ارزنده ایشان چراغ راهمان بود و از زحمات دکتر ارژنگ ناجی به‌عنوان داور نهایت تشکر و قدردانی را دارم و از خداوند سلامتی و صحت وجود برای خود و خانواده محترمشان آرزو می‌نمایم.

خلاصه پایان‌نامه:

پلاسما را که معمولاً حالت چهارم ماده در نظر گرفته می‌شود قسمت اعظم از جهان آفرینش را در بر می‌گیرد. در این پایان‌نامه ضمن معرفی پلاسما و پارامترهای آن به مهمترین مسئله پلاسما یعنی محصورسازی پرداخته می‌شود.

دور روش اساسی برای محصورسازی پلاسما وجود دارد. روش مغناطیسی و روش لختی. در اکثر دستگاههای فیوژن از جمله توکامک از روش مغناطیسی استفاده می‌شود.

مسئله محصورسازی با دو قسمت تعادل و پایداری تقسیم می‌شود. تعادل، حالتی است که تمام نیروها در حال موازینه باشند. این تعادل را بسته به اینکه اختلال کوچک در پلاسما از بین برود یا تقویت شود پایدار یا ناپایدار می‌خوانند. فرم عمومی اختلال بصورت $\exp[(\omega t - \vec{k}.\vec{r})]$ نوشته می‌شود که در آن هر فرکانس ویژه ω، رشدنمایی داشته باشد و $I_m \omega > 0$ سیستم بطور نمایی ناپایدار است.

مهمترین روش نظری برای تعیین پایداری سیستم اصل انرژی است که در آن تغییر انرژی پتانسیل در اثر جابجایی‌های کوچک پلاسما تعیین علامت خواهد شد. اگر δW کوچکترین مقدار مثبت خود را داشته باشد سیستم پایدار است، اگر ناحیه خارجی پلاسما خلأ باشد هیچ قیدی وجود ندارد. وقتی ناحیه خارجی با پلاسمای بدون مقاومت جانشین شود قیود مرزی محیط و پلاسما مجدداً حذف و حالت شبیه حالت خلأ ـ پلاسما بشوند یا خیر، به ترتیب خارجی یا داخلی می‌نامند.

از بین ناپایداریهای پلاسما، شاید اکثر آنها که گاه منجربه نوسانات دندان اره‌ای و گسیختگی‌ها می‌شوند، ناپایداری پیچشی و ناپایداری پارگی می‌باشند.

ناپایداری پیچشی به هر دو حالت داخلی و خارجی وجود دارد و از ناپایداریهای ناشی از جریان است. پیچش خارجی با کاهش جریان موازی پایدار می‌شود و برای جریان‌های ثابت با ساختمان چنبره‌ای با سطح مقطع کوچک و دایره‌ای می‌توان به پایداری رسید. پیچش داخلی کلاً ضعیف‌تر است و در حقیقت برای

توکامک فقط مد m=1 داخلی وجود دارد که در آن نیز کاهش جریان و میزان کردن نسبت ظاهری پایدار می‌گردد.

ناپایداری پارگی نیز به مقاومت محدود پلاسما مربوط می‌شود و در جریان وقوع آن خطوط میدان مغناطیسی پاره شده و مجدداً به هم می‌پیوندند.

در این پایان‌نامه، مدهای پیچشی و پارگی به تفصیل در دستگاههای محصورسازی پلاسما بویژه توکامک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین چون این مدها در واقع مقدمه‌ای برای گسیختگی‌ها کوچک می‌باشد. با بررسی گسیختگی کوچک در توکامک نتیجه این ناپایداریها را بررسی کرده‌ایم، اما چون گسیختگی کوچک با تغییر اساسی در پارامترهای پلاسما همراه نیست و تنها روی منحنی شدت اشعه ایکس خروجی قابل مشاهده است تنها روش دقیق بررسی آن. روش توموگرافی است که این روش را برای داده‌های تجربی توکامک IR-T_1 بکار برده و نتایج را مورد تحلیل قرار داده‌ایم.

فصل اول

مقدمه‌ای از فیزیک پلاسما

فیزیک پلاسما مطالعه جمع تعداد زیاد ذرات باردار شده است، بطوریکه نیروهای کلمبی با برد بلند فاکتوری برای تعیین خواص استاتیکی است ولی در دانسیته به قدر کافی پایین، بطوریکه نیروی مربوط به ذرات خیلی بهم چسبیده، خیلی کمتر از نیروهای کلبمی با برد بلند اعمال شده توسط ذرات بسیار دور می‌باشد و در اصل مطالعه گازهای یونیزه با دانسیته کم می‌باشد.

بخشی از فیزیک پلاسما استفاده در فیوژن گرما هسته‌ای است که دارای واکنشهای حرارت‌زا با پتانسیل بسیار بالا می‌باشد. برخلاف بمب هیدروژنی در این فرآیند انرژی با آهنگی کاملاً کنترل شده و آهسته آزاد می‌شود. در مطالعات مربوط به فیوژن، فیزیک هسته‌ای و فیزیک پلاسما مکمل هم می‌شوند گرچه پس از سپری شدن مدت زیاد از مطالعات بسیار فشرده در کشورهای مختلف هنوز از اهداف علمی فاصله زیادی داریم یعنی هنوز ایستگاههای قدرت با راکتورهای فیوژنی در حد آزمایشگاهی باقی مانده ولی دورنمایی مطالعات در این زمینه‌ها بسیار روشن است.

به نظر می‌رسد مطالعات موفق در آینده ایجاد جریان الکتریکی بوسیله عبور دادن پلاسما داغ در میدان مغناطیسی است که این عمل مشابه با جایگزین کردن میله‌های مسی دوران کننده در ژنراتورهای معمولی بوسیله عبور دادن گاز با توان رسانایی بسیار بالا باشد.

فیزیک پلاسما شامل جنبه‌های عمومی معروف از فیزیک، مکانیک کلاسیک، الکترومغناطیس، مکانیک آماری غیر نسبیتی است، بسیاری از خواص ذرات پلاسما نتیجه اندر کنش نیروهای کلمبی با برد بلند است. بنابراین خواص کلی بسیاری از ذرات، اندرکنش همزمان ذرات می‌باشد.

۱ـ۱ـ پلاسما چیست؟

پلاسما گاز شبه خنثی متشکل از ذرات باردار و خنثی است که رفتار دسته جمعی دارند. واژه مبهم پلاسما نخستین‌بار در سال ۱۹۲۷ بوسیله لانگمیر[1] ارائه شد. واژه پلاسما در اصل واژه یونانی Plasso به معنی قالب و سرشت و یا ترکیب می‌باشد. لانگمیر طی تحقیقات خود در رابطه با تخلیه الکتریکی بخار جیوه در فشار پایین متوجه خصوصیات یکنواخت الکتریکی و اپتیکی شد که بیانگر حالت خاص و جدیدی از ماده نوین که ذرات تشکیل دهنده آن بصورت خاص با هم ترکیب شده‌اند بود.

گرچه حدود ۹۹ درصد از جهان بطور طبیعی پلاسماست. بعلت بالا بودن دانسیته و پایین بودن درجه حرارت پلاسما طبیعی روی زمین بسیار کم است. در طبقات بالای جو پلاسما در دماهای خیلی بالا رخ می‌دهد. رعد و برق آسمان – شفق قطبی – جرقه‌های طویل میان ابرها و زمین و پرتوهای پخش نور حتی در آسمان بدون ابر نمونه‌هایی از پلاسماهای طبیعی پر شدت و ضعیف می‌باشند.

پلاسما در اصل گاز یونیزه است اما هر گاز یونیزه پلاسما نیست.

اگر یک محیط پلاسما را در نظر بگیریم و نیرویی را به ذرات پلاسما اعمال کنیم، خود پلاسماست که با پذیرش آن نیرو اثری جدید را برای کل پلاسما بوجود می‌آورد یعنی خود پلاسما برای خود تعیین کننده و تصمیم گیرنده است، پس هر جایی از پلاسما روی بقیه جاهای دیگر اثر می‌گذارد. پس اگر اثری روی اتم i ام اعمال شود این اثر به همه جاهای پلاسما منتقل می‌شود. (رفتار دسته جمعی)

۱ـ۲ـ چگونگی پیدایش پلاسما

می‌دانیم که اجسام جامد با گرفتن گرما تبدیل به مایع و مایع بر اثر گرما به گاز تبدیل می‌شوند که سه حالت معمولی اجسام است، حال اگر گازی را حرارت دهیم تا الکترونهایی از اتم جدا شوند در آن صورت

1- Lngmuir

به‌محیط یونیزه می‌رسیم که در حالت خاصی که در تعریف پلاسما بیان کردیم همان پلاسما می‌شود. در یک درجه حرارت مطلق و غیرصفر هر گازی دارای تعدادی اتم یونیزه شده بصورت یونهای مثبت و منفی و خنثی است. اگر غلظت یونها به حدی رسیده باشد که حرکت یونها را محدود نمایید، باافزایش غلظت یونها این محدودیت‌ها طبق فرمول ساها:

$$\frac{n_i}{n_n} = 2/4 \times 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-\frac{u_i}{kT}}$$

افزایش می‌یابد که در غلظتهای به حد کافی بالا بخاطر برخوردها و ترکیب مجدد، حجمهای ماکروسکپیک خنثی پدید می‌آیند، یعنی الکترونهای آزاد شده از اتم توسط اتمهای دیگر جذب شده و خنثی می‌شوند یعنی $\frac{n_i}{n_n}$ با افزایش n_i کاهش می‌یابد.

n_i : چگالی ذرات یونیزه

n_n : چگالی ذرات خنثی

u_i : مقدار انرژی که برای آزاد شدن یک الکترون از مدار آخر لازم است.

T : درجه حرارت بر حسب کلوین

K : ثابت بولتزمن

اگر مقادیر فوق را برای شرایط دمای ۲۷ درجه سانتیگراد یک اطاق قرار دهیم نسبت $\frac{n_i}{n_n} = 10^{-122}$ خواهد بود و این نشانگر اینست که در دماهای معمولی ظاهر شدن پلاسما تقریباً محال است. وجود پلاسما بستگی به دما و عکس چگالی ذرات یونیزه دارد.

طبیعی‌ترین روش برای تولید پلاسما، حرارت دادن به گاز تا حدی که میانگین انرژی ذرات با انرژی یونیزاسیون اتمها و مولکولها گاز قابل مقایسه باشند. در چنین شرایطی گاز به پلاسما تبدیل می‌شود.

پلاسما می‌تواند در دمای کمتر از ۱۰۰۰۰۰ درجه کلوین ایجاد شود به شرطی که دانسیته به قدر کافی پایین و ترکیب مجدد تکرار نشود.

چگونگی پیدایش پلاسما

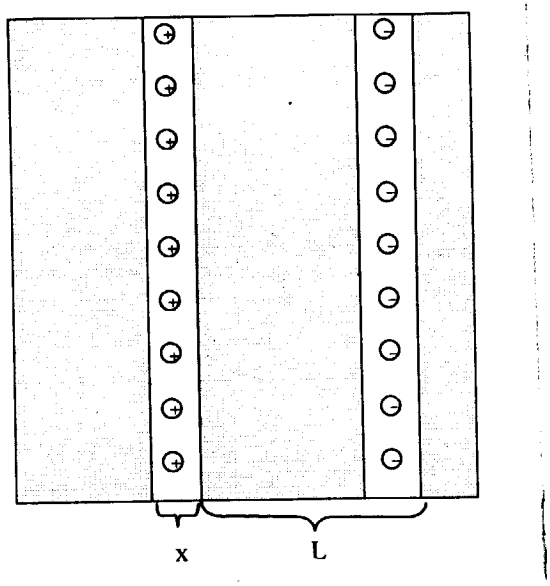
حالت پلاسما در وضعیت تعادل با دانستن غلظتها و دما کاملاً مشخص می‌شود. درجه حرارت چنین پلاسمایی نه تنها انرژی میانگین بلکه چگونگی توزیع سرعتهای ذرات را نیز مشخص می‌کند. با دانستن غلظت و دمای پلاسما می‌توان درجه یونیراسیون غلظت یونها، اتمهای تحریک شده، نوترونها و غیره را بدست آورد، البته همواره می‌توان پلاسما را در وضعیت تعادل در نظر گرفت. در موارد خاص پلاسمای موجود در آزمایشگاه که از تخلیه گازی بوجود آمده است از حالت تعادل فاصله زیادی دارد. در چنین وضعیتهایی معمولاً به تعادل نسبی، تعادلی که در آن توزیع سرعتهای ذرات باردار و اتمها ماکسوئلی است اشاره می‌شود که در آخر این فصل به تفصیل بحث شده است ولی توجه به این نکته ضروری است، دمایی که توزیع ماکسوئلی سرعت را بیان می‌دارد برای الکترونها و ذرات سنگین‌تر متفاوت است. برای این پلاسما غیرهمدما، دمای الکترون T_e و دمای یون T_I بصورت مجزا تعریف می‌شوند. در حالت کلی برای پلاسمایی که در وضعیت تعادل قرار ندارد توزیع سرعتهای ذرات باردار ممکن است ضرورتاً غیر ماکسوئلی باشد. انرژی میانگین ذرات کاتوره‌ای طبق رابطه $W = \frac{3}{2}KT$ است، صحبت می‌شود.

طبیعتاً برای دستیابی به اطلاعات جامعی از چگونگی رفتار پلاسما در وضعیت غیرتعادل صرفاً داشتن انرژی میانگین (درجه حرارت) اجزاء کافی نیست بلکه باید چگونگی توزیع سرعتهای ذرات نیز معلوم باشند.

۱ـ۳ـ خنثی وار بودن پلاسماها

در حجم‌های ماکروسپیک پلاسما در حالت خنثی است، چون بار فضایی مثبت الکترونها در حال توازنند که حالت میانگین در حجمهای به قدر کافی بزرگ و در زمانهای بسیار طولانی است. ابعاد مکانی و فواصل زمانی باعث توازن در پلاسما در نتیجه خنثی بودن آنست. برای تعیین مقیاس فضایی تفکیک بارها

لایه‌ای صفحه‌ای شکل از الکترونها در حجم خنثی پلاسما در نظر می‌گیریم و تغییر مکان جزئی می‌دهیم تـا لایه‌هایی از بارهای مثبت و منفی ایجاد شود.



شکل (۱ـ۳ـ۱) محیط پلاسمایی را که یونهای (+) و الکترونها به اندازه L جابجا شده‌اند را نشان می‌دهد

میدان الکتریکی این لایه $E = \frac{\delta}{\varepsilon_0}$ و δ دانسیته ذرات است:

$$E = \frac{n_e eX}{\varepsilon_0} \qquad (۱ـ۳ـ۱)$$

X جابجایی بارها، e بـار الکـترون، n_e غلظـت الکترونـها و Φ پتانسـیل الکـتریکی ایجـاد شـده و L ضخامت لایه موردنظر می‌باشد. (۱ـ۳ـ۲)

$$\phi = El = \frac{n_e eXL}{\varepsilon_0} \qquad (۱ـ۳ـ۲)$$

در صورتی وضعیت خنثی ایجاد می‌شود که $e\phi < T_e, T_i$ باشد، در غیر اینصورت حرکت ذرات تحـت اثر میدان الکتریکی، به سرعت وضعیت خنثی را برقرار می‌سازد. ($x=L$) با گذاشتن مقدر $e\phi$ در این نامساوی و با فرض X=L ، بدست می‌آوریم که $\frac{n_e e^2 L^2}{\varepsilon_0}$ و یا

$$L < \sqrt{\frac{T\varepsilon_0}{n_e e^2}} \qquad (۱ـ۳ـ۳)$$

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران