K٢٢١٨

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
کتابخانه مرکزی ۱۳۷۰

دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش پلاسما

عنوان پایان نامه

تولید هارمونیک دوم پالس کوتاه لیزر در پلاسمای سرد مغناطیسی

استاد راهنما:

دکتر حسن رنجبرعسکری

استاد مشاور:

دکترسید مهدی بیضایی

دانشجو:

الهام وفایی‌نژاد

۱۳۸۹/۹/۱۴

شهریور ۱۳۸۶

۱۴۶۶۱۸

کلیه حقوق مادی مرتبط بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی
از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه ولی عصر (عج)
رفسنجان است.

مدیر تحصیلات تکمیلی
دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

دانشکده .علوم‌پایه

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک خانم الهام وفائی‌نژاد

تحت عنوان:

تولید هارمونیک دوم پالس کوتاه لیزر در پلاسمای سرد مغناطیسی

در تاریخ ۸۶/۶/۲۸ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه .عالی... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر حسن رنجبرعسکری استادیار گروه فیزیک امضاء

۲- استاد مشاور پایان‌نامه دکتر سیدمهدی بیضایی استادیار گروه فیزیک امضاء

۳- استاد داور داخل گروه محمد خان‌زاده دانشور گروه فیزیک امضاء

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر قنبری استادیار گروه فیزیک دانشگاه اصفهان امضاء

۵- نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی دکتر احمد صفاپور استادیار گروه ریاضی امضاء

در خرابات مغان نور خدا می بینم تو ببین وه که چه نوری ز کجا می بینم

حمد و ستایش بی کران خدای را که در گوشه گوشه زندگیم با پرتو لطف بی دریغش مرا حمایت کرد و خود را به من نشان داد تا شک تنها کلمه ای باشد محتاج معنی.

با سپاس فراوان از خانواده‌ی خوبم که با صبر و حوصله همواره پشتیبان من در تمامی مراحل زندگی بخصوص در امر تحصیل بوده‌اند،

و با تشکر از استاد فرهیخته‌ام جناب آقای دکترحسن رنجبر عسکری که با کمک‌های بی‌دریغ و بی‌دروغش نه تنها راهنمایی این پایان‌نامه را به‌عهده داشتند بلکه همانند چراغ روشنی مرا در رسیدن به دروازه های علم ومعرفت رهنمون ساختند.

از جناب آقای دکتر بیضایی به عنوان مشاور وهمچنین از آقایان دکتر قنبری و دکتر خانزاده که داوری این رساله را به عهده داشتند متشکرم،

و سپاسگذارم از زحمات و محبتهای بیشمارجناب آقای مهندس محمدباقر مرعشی که لطف بی‌چشمداشتش همواره شامل حالم بوده است.

همچنین سپاس و قدردانی فراوان دارم از خانواده‌ی محترم طلایی که با صفا و صمیمت کرمانی‌شان فضایی ساختند تا من کمتر ناملایمات غربت را تجربه کنم.

و در نهایت از دوستان عزیزم خانمها شراره ایزدنیا، ربابه فلاح نرگس و زکیه قادری و همه‌ی عزیزانی که مرا در این راه یاری کردند کمال تشکر را دارم.

الهام وفایی نژاد

شهریور ۱۳۸۶

صِله‌ای بس ناچیز

پیشکش سُرایندگان هستی‌ام

عزیز ترین‌هایم؛ پدر و مادرم

و تقدیم به نی نی چشمان تنها دارایی‌ام؛ برادرم احسان

و تقدیم به عزیزی

که تنهایی وغربت مرا سرشار از آرامش وجودش کرد .

چکیده

در اپتیک غیرخطی، کشف تولید هارمونیک‌های اپتیکی از بدو پیدایش میدان مسئله‌ای قابل ملاحظه بوده است. از جمله موضوعات درخور بحث در این زمینه، انتشار امواج الکترومغناطیس و تولید هارمونیک‌ها در محیط‌های غیرخطی مثل پلاسما است. انتشار امواج الکترومغناطیس در یک پلاسما با حضور میدان مغناطیسی در حالت‌های خطی به طرق مختلف بررسی شده است. در این پایان‌نامه تأثیر میدان مغناطیسی در تولید هارمونیک دوم یک پالس لیزر با قطبش خطی در محیط پلاسمای سرد همسانگرد مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا با ارائه تعریفی از پلاسما به معرفی محیط پلاسما، روش‌های تولید، چگونگی برهم‌کنش‌های میان ذرات پلاسما و ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌پردازیم. در ادامه با بیان معادلات حاکم بر محیط پلاسما، و معرفی مدل پلاسمای سرد، چگونگی انتشار امواج را در پلاسمای سرد مغناطیسی مورد مطالعه قرار می‌دهیم و سپس با استفاده از معادلات ماکسول و معادلات پلاسما، روابط کلی مربوط به میدان‌های هارمونیک اول و دوم را بر حسب کمیت‌های ماکروسکوپیک سرعت و چگالی الکترون به دست می‌آوریم. میدان مغناطیسی با اندازه ثابت وجهت‌های متفاوت در نظر گرفته شده و با استفاده از تئوری اختلال (به دلیل اثرات غیر خطی ضعیف) مؤلفه‌های میدان الکتریکی هارمونیک اول و دوم را تا مرتبه دوم اختلال را محاسبه کرده‌ایم و در نهایت با محاسبه ی بردار پوئینتینگ، تغییرات بردار پوئینتینگ هارمونیک‌های اول و دوم را با تغییردادن جهت میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار می دهیم.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
پیشگفتار	۱
فصل اول: ویژگی‌های عمومی پلاسما	۳
۱-۱ مبانی پلاسما	۳
۱-۱-۱ تعریف پلاسما	۳
۱-۱-۲ پلاسما به عنوان چهارمین حالت ماده	۴
۱-۱-۳ روش‌های تولید پلاسما	۴
۱-۱-۴ برهم‌کنش‌های میان ذرات و اثرات جمعی	۵
۱-۱-۵ برخی پدیده‌های بنیادی پلاسما	۶
۱-۱-۶ معیارهای لازم جهت تعریف پلاسما	۸
الف) طبیعت ماکروسکوپی خنثی	۸
ب)حفاظ دبای	۱۰
پ) فرکانس پلاسما	۱۲
۱-۱-۷ تابع دی الکتریک	۱۴
۱-۲ معادلات حاکم بر پلاسما	۱۵
۱-۲-۱ معادلات انتقال ماکروسکوپیک	۱۵
۱-۲-۲ تابع توزیع بولتزمن	۱۵
۱-۲-۳ چگالی تعداد ذرات و سرعت میانگین	۱۵
۱-۲-۴ معادله بولتزمن	۱۶
۱-۲-۵ معادله انتقال جرم	۱۷

عنوان	صفحه
۱-۲-۶ معادله انتقال تکانه	۱۸
۱-۲-۷ معادله انتقال انرژی	۱۹
۱-۲-۸ مدل پلاسمای سرد	۲۰
فصل دوم: امواج در پلاسمای سرد مغناطیسی	۲۲
۲-۱ امواج در پلاسما	۲۲
۲-۲ معادلات بنیادی تئوری مگنتویونیک	۲۳
۲-۳ حل امواج تخت و خطی سازی	۲۴
۲-۴ انتشار موج الکترومغناطیس در پلاسمای الکترونی همسانگرد	۲۵
۲-۴-۱ رابطه پاشندگی	۲۵
۲-۴-۲ پلاسمای بدون برخورد	۲۷
۲-۴-۳ میانگین زمانی بردار پوئینتینگ	۳۲
۲-۵ انتشار موج در پلاسمای سرد مغناطیسی	۳۳
۲-۵-۱ بدست آوردن رابطه پاشندگی	۳۴
فصل سوم: اپتیک غیر خطی و تولید هارمونیک‌ها	۳۹
۳-۱ پدیده‌های اپتیک غیر خطی	۳۹
۳-۲ تولید هارمونیک دوم	۴۰
فصل چهارم: تولید هارمونیک دوم در یک پلاسمای سرد مغناطیسی با میدان مغناطیسی ثابت	۵
۴-۱ معادلات انتقال و ماکسول درون پلاسما	۵۱
۴-۱-۱ معادلات حاکم بر هارمونیک‌های اول	۵۳
۴-۲ تحلیل معادلات خطی	۵۴

عنوان	صفحه
۴-۲-۱ رابطه پاشندگی مربوط به میدان‌هارمونیک اول	۵۴
۴-۲-۲ رابطه پاشندگی مربوط به میدان‌هارمونیک دوم	۵۷
۴-۲-۳ فرکانس‌های گسیل و بازتاب	۵۸
۴-۳ انتقال غیرخطی	۵۹
۴-۴ محاسبات عددی	۶۴
۴-۴-۱ مؤلفه‌های الکتریکی گسیل و بازتاب هارمونیک دوم	۶۴
۴-۵ نتایج محاسبات عددی	۶۶
فصل پنجم: بررسی وابستگی تولید هارمونیک دوم به جهت میدان مغناطیسی	
در پلاسمای سرد مغناطیسی	۶۸
۵-۱ معادلات کلی انتقال و ماکسول در پلاسما	۶۸
۵-۲ حل معادلات انتقال جرم و تکانه با استفاده از روش اختلال	۷۰
۵-۲-۱ حل معادلات کمیت‌های فیزیکی سرعت و چگالی هارمونیک اول به روش اختلال	۷۰
۵-۲-۱ حل معادلات کمیت‌های فیزیکی سرعت و چگالی هارمونیک دوم به روش اختلال	۷۲
۵-۳ حل معادلات ماکسول با استفاده از روش اختلال	۷۳
۵-۳ -۱ موج تخت	۷۴
۵-۳-۲ پالس گاوسی	۷۶
الف) حل معادلات میدان الکتریکی هارمونیک اول به روش اختلال	۷۸
ب) حل معادلات میدان الکتریکی هارمونیک دوم به روش اختلال	۸۲
۵-۴ محاسبه بردار پوئینتینگ	۸۴
۵-۵ محاسبات عددی و نمودارها	۸۵

عنوان	صفحه
فصل ششم: بحث و نتیجه‌گیری	۹۰
پیوست ۱	۹۲
پیوست ۲	۹۴

پیشگفتار

انتشار **پالس**‌های کوتاه لیزری و برهم‌کنش آن با محیط انتشار و مشاهده فرآیندهای غیرخطی در محیط **انتشار** از موضوعات اصلی تحقیقات در سال‌های اخیر بوده و پدیده‌های اپتیکی غیر خطی همانند **تولید** هارمونیک‌های دوم و بالاتر، اثر رامان و ... در محیط‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است[۱و۲].

در تاریخچه‌ی اپتیک غیرخطی، کشف تولید هارمونیک‌های اپتیکی از بدو پیدایش میدان مسئله‌ای قابل ملاحظه بوده است. این اثر کاربرد بسیاری در تبدیل منابع نور همدوس به طول موج‌های کوتاهتر دارد. یکی از کاربردهای تولید هارمونیک‌ها در اندازه‌گیری غیر خطیت پذیرفتاری اپتیکی و متمایزسازی پالس‌های کوتاه می‌باشد.

از جمله موضوعات درخور بحث، انتشار امواج الکترومغناطیس و تولید هارمونیک‌ها در محیط‌های غیرخطی مثل پلاسما است. انتشار امواج الکترومغناطیس در یک پلاسما با حضور میدان مغناطیسی در حالت‌های خطی به طرق مختلف بررسی شده است [۳و۴]. در پلاسمای همسانگرد فقط هارمونیک‌های فرد تولید می‌شود که در صورت از بین رفتن همسانگردی می توان هارمونیک‌های زوج نیز تولید نمود[۵].

در این پایان‌نامه تأثیر میدان مغناطیسی در تولید هارمونیک دوم یک پالس لیزر در محیط پلاسمای سرد همسانگرد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

درفصل اول با ارائه تعریفی از پلاسما به معرفی محیط پلاسما،روش‌های تولید، چگونگی برهم‌کنش‌های میان ذرات پلاسما و ویژگی‌های منحصر به فرد آن می‌پردازیم. در ادامه با بیان معادلات حاکم بر محیط پلاسما، مدل پلاسمای سرد را معرفی می‌کنیم.

در فصل دوم چگونگی انتشار امواج را در پلاسمای سرد مغناطیسی مورد مطالعه قرار می‌دهیم. و با حل معادلات حاکم، به یک رابطه‌ی پاشندگی کلی برای انتشار موج، در حالتی که میدان مغناطیسی ثابت $\vec{B}_0$ با بردار انتشار $\vec{k}$ زاویه θ می‌سازد، می‌رسیم.

در فصل سوم با توضیح مختصری از تولید پدیده‌های اپتیک غیر خطی در برخورد نور لیزر با محیط مادی به ارائه و توجیه ریاضی پدیده‌ی تولید هارمونیک دوم می‌پردازیم.

در فصل چهارم تولید هارمونیک دوم را در پلاسمای مغناطیسی (با میدان مغناطیسی ثابت) مطالعه می‌کنیم. با استفاده از معادلات ماکسول و معادلات پلاسما، روابط کلی مربوط به میدان‌های هارمونیک اول و دوم را بر حسب کمیت‌های ماکروسکوپیک سرعت و چگالی الکترون به دست می‌آوریم. به علت اثرات غیر خطی ضعیف جملات غیرخطی در معادلات به‌وجود می‌آیند، به همین دلیل با استفاده از تئوری اختلال روابط را برای اختلال‌های مختلف (تا مرتبه دوم) بازنویسی می‌کنیم، سپس این معادلات جدید را یک‌بار با استفاده از تبدیلات فوریه و لاپلاس حل می‌کنیم و نتایج عددی را به صورت نمودار ارائه می‌دهیم، و در ادامه با محاسبه بردار پوئینتینگ به تحلیل شار انرزی در جهت انتشار می‌پردازیم. بار دیگر معادلات را به روش تحلیلی با استفاده از روابط اختلال حل می‌کنیم و به‌طور مستقیم جواب‌های میدان هارمونیک اول و دوم را تا مرتبه دوم به دست می‌آوریم. با استفاده از نرم‌افزار mathematica نسبت دامنه میدان هارمونیک اول به دامنه موج ورودی و هم‌چنین مولفه‌ی z بردار پوئینتینگ را، در شرایط مختلف رسم می‌کنیم.

در نهایت در فصل پنجم با اعمال یک میدان مغناطیسی با اندازه ثابت و جهت متغیر در درون پلاسما تولید هارمونیک دوم مورد مطالعه قرار می‌گیرد، با این فرض که چشمه موج الکترومغناطیس دارای قطبش خطی در جهت x، بسامد زاویه‌ای ω_0 و عدد موج k_0 در جهت مثبت z درون پلاسما انتشار می‌یابد. به دلیل وجود اثرات غیر خطی ضعیف از تئوری اختلال استفاده می‌کنیم و میدان‌های الکتریکی هارمونیک اول و دوم را تا اختلال مرتبه دوم به دست می‌آوریم. در قسمت بعدی بردار پوئینتینگ را محاسبه می‌کنیم. و در نهایت با تغییر جهت بردار میدان مغناطیسی به تجزیه و تحلیل مؤلفه z بردار پوئینتینگ می‌پردازیم.

فصل اول

ویژگی‌های عمومی پلاسما

۱-۱ مبانی پلاسما

۱-۱-۱ تعریف پلاسما

کلمه پلاسما به منظور توصیف یک طیف گسترده از مواد به‌کار می‌رود که از لحاظ ماکروسکوپیکی خنثی می‌باشند و شامل تعداد زیادی برهم‌کنش میان الکترون‌های آزاد و اتم‌های یونیزه یا مولکول‌ها می‌باشد که به دلیل وجود نیروهای کولنی با برد طولانی، رفتار تجمعی از خود به نمایش می‌گذارند. با این وجود باید توجه داشت که همه محیط‌های دارای ذرات باردار را نمی‌توان پلاسما نامید، بلکه برای مجموعه‌ای از ذرات خنثی و باردار که ظاهراً رفتار پلاسمایی بروز می‌دهند حتماً باید شرایط و ملاک‌های خاصی برقرار باشد تا بتوان آنرا پلاسما نامید.

کلمه پلاسما برگرفته از یک کلمه یونانی به معنای یک چیز "ترکیب شده" یا "شکل گرفته" می‌باشد که برای اولین بار توسط تونکز[۱] و لانگمیر[۲] در سال ۱۹۲۹ جهت توصیف ناحیه درونی و دور از مرزهای یک گاز یونیزه تابان که توسط تخلیه الکتریکی درون یک لوله تولید شده بود، به‌کار گرفته شد. این گاز یونیزه حاصل از لحاظ الکتریکی کاملاً خنثی است[۴].

۱- Tonks
۲- Langmuire

۱-۱-۲ پلاسما به عنوان چهارمین حالت ماده

از یک دیدگاه علمی، مواد موجود در جهان به چهار صورت جامد، مایع، گاز و پلاسما طبقه‌بندی می‌شوند. فرق اساسی میان جامد، مایع و گاز در تفاوت میان نیروهای پیوستگی است که ذرات تشکیل دهنده آن‌ها را در کنار هم حفظ می‌کند. این نیروهای پیوستگی در جامدات نسبتاً قوی‌تر در مایعات ضعیف‌تر و در گازها به صورت ذاتی تقریباً وجود ندارد. عامل مهمی‌که موجب می‌شود یک ماده دلخواه متعلق به یکی از این سه حالت باشد، انرژی جنبشی کاتوره‌ای[۱] (انرژی گرمایی) اتم‌ها و مولکول‌های آن ماده است که به دمای آن ماده بستگی دارد. تعادل میان انرژی گرمایی ذرات و نیروهای پیوستگی بین ذرات تعیین کننده حالت ماده است.

با حرارت دادن یک ماده جامد یا مایع، اتم‌ها و مولکول‌ها انرژی جنبشی بیشتری کسب می‌کنند تا جایی که بتوانند بر انرژی پتانسیل پیوندی غلبه کنند. که این مسئله در نهایت به گذار فاز منجر می‌شود. گذار فاز در یک دمای ثابت و فشار معین اتفاق می‌افتد و مقدار انرژی لازم برای آن را "گرمای نهان" [۱] می‌نامند.

اگر انرژی کافی فراهم شود یک گاز مولکولی به تدریج به یک گاز اتمی تبدیل می‌شود که نتیجه برخوردهای میان ذراتی است که انرژی جنبشی گرمایی آن‌ها از انرژی پیوندهای مولکولی آن‌ها بیشتر است. در دماهای به حد کافی بالا نسبت اتم‌هایی که انرژی جنبشی کافی را در اثر برخورد، برای غلبه بر انرژی پیوندی الکترون‌های بیرونی‌ترین مدار به دست می‌آورند افزایش می‌یابد و در این شرایط گاز یونیزه یا پلاسما تولید می‌شود. اما باید توجه داشت که گذار از گاز به پلاسما از لحاظ ترمودینامیکی گذار فازِ محسوب نمی‌شود چون با افزایش تدریجی دما اتفاق می‌افتد.

۱-۱-۳ روش‌های تولید پلاسما

یکی از راه‌های تولید پلاسما افزایش دمای ماده است تا جایی که میزان قابل قبولی یونیزاسیون انجام گیرد. درجه یونیزاسیون و دمای الکترون، تحت شرایط تعادل ترمودینامیکی، به صورت نزدیکی با هم در ارتباطند. این ارتباط توسط معادله ساها[۳] مشخص می‌شود. روش‌های زیادی جهت تولید پلاسما در آزمایشگاه وجود دارند که بسته به روش تولید پلاسما، پلاسماها می‌تواند دارای چگالی کم یا زیاد و دمای بالا یا پائین باشد. هم‌چنین ممکن است پلاسما پایدار یا ناپایدار باشد. اکنون توصیف مختصری از معمول‌ترین فرآیندهای شناخته شده گرمایی، فوتویونیزاسیون[۴] و تخلیه الکتریکی در گازها ارائه

۱- Random Kinetic Energy
۲- Latent Heat
۳- Saha Equation
۴- Photoionization

می‌شود. در فرآیند فوتویونیزاسیون، یونیزاسیون به وسیله ی جذب فوتون‌هایی با انرژی برابر یا بیش از انرژی پتانسیل یونیزاسیون اتم انجام می‌گیرد. قسمتی از انرژی فوتون صرف یونیزاسیون و باقی مانده آن به صورت انرژی جنبشی جفت یون – الکترون ظاهر می‌شود. به عنوان مثال انرژی یونیزاسیون برای خارجی‌ترین الکترون اتم اکسیژن ۱۳/۶ ev می‌باشد که این یونیزاسیون به وسیله‌ی تابشی با طول موج کم‌تراز A° ۹۱۰ یعنی تابش در ناحیه فرابنفش، انجام می‌گیرد. به عنوان مثال لایه یونسفر در جو زمین یک پلاسمای خنثی ناشی از فرآیند فوتویونیزاسیون می‌باشد.

در تخلیه الکتریکی گازها، یک میدان الکتریکی درون گاز اعمال می‌شود این میدان سبب یونیزه شدن تعداد کمی از اتم‌ها و شتاب دادن به الکترون‌های آزاد می‌شود و سبب می‌گردد تا الکترون‌های انرژی لازم را برای یونیزاسیون اتم‌ها و یا مولکول‌ها به دست آورد. یکی از مشخصات این فرآیند این است که میدان الکتریکی اعمال شده انرژی مؤثرتری به الکترون‌های سبک نسبت به یون‌های سنگین می‌دهد. بنابراین دمای الکترون در تخلیه گازها معمولاً بیش از دمای یون‌ها می‌باشد زیرا انتقال انرژی گرمایی از الکترون‌ها به ذرات سنگین بسیار کند صورت می‌گیرد. هنگامی‌که منبع یونیزه کننده خاموش شود، به دلیل فرآیند بازترکیب، یونیزاسیون تا رسیدن به یک میزان تعادل که به دمای محیط بستگی دارد به تدریج کاهش می یابد. در آزمایشگاه عمل بازترکیب چنان به سرعت انجام می‌گیرد که پلاسما در کسر کوچکی از ثانیه ناپدید خواهد شد[۴].

۱-۱-۴ برهم‌کنش‌های میان ذرات و اثرات جمعی

خصوصیات یک پلاسما به طور عمده به برهم‌کنش‌های ذرات آن بستگی دارد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی که یک پلاسما را از سیالات معمولی یا جامدات متمایز می‌نماید، اثرات تجمعی پلاسما است. به علت برد بلند نیروهای الکترومغناطیسی هر ذره باردار درون پلاسما، با تعداد قابل توجهی از ذرات باردار دیگر، در هر لحظه برهم‌کنش دارد که این منجر به اثرات تجمعی[۱] مهمی می‌گردد. این اثرات باعث ایجاد پدیده‌های فیزیکی زیادی در درون پلاسما می‌شود. دینامیک یک ذره درون پلاسما به وسیله میدان‌های داخلی مربوط به خصوصیات و حرکات ذرات پلاسما و نیز میدان‌های خارجی موجود، تعیین می‌شود. عمده‌ترین برهم‌کنش‌های بین این ذرات از نوع الکترومغناطیسی می‌باشد. اثرات کوانتومی جز در برخی موارد مربوط به برخوردهای نزدیک قابل صرف نظر است. در یک پلاسما باید بین برهم‌کنش‌های میان ذرات باردار با برهم‌کنش‌های ذرات باردار – ذرات خنثی تمایز

۱-Collective Effect

قائل شد. یک ذره باردار به وسیله‌ی یک میدان الکتریکی با ذرات باردار دیگر برهم‌کنش دارد. این نیرو با عکس مجذور فاصله‌ی دو ذره بستگی دارد. از این گذشته هر ذره‌ی باردار متحرکی میدان مغناطیسی ایجاد می‌نماید که این میدان بر دیگر ذرات باردار نیرو وارد خواهد نمود. ذرات باردار و ذرات خنثی از طریق میدان‌های قطبش الکتریکی با یکدیگر برهم‌کنش می‌کنند که بر اثر این قطبش، به دلیل عبور یک ذره باردار از نزدیکی ذره خنثی، در ابرالکترونی این ذرات اغتشاش ایجاد می‌شود.

میدان مربوط به ذرات خنثی نیروهای کوتاه برد را نیز شامل می‌شود، به گونه‌ای که برهم‌کنش آن‌ها فقط در فواصل اتمی موثر است. این فواصل باید به اندازه‌ای کوچک باشند که الکترون‌های مداری بتوانند تحت تاثیر آن‌ها قرار گیرند. این موضوع در مواردی صادق است که فواصل بین مراکز ذرات دارای برهم‌کنش از مرتبه قطر آن‌ها باشد. در مواردی که ذرات دورتر باشند این نیروها تقریباً برابر صفر است.

این اثرات به طور قابل قبولی تنها به وسیله مکانیک کوانتومی توجیه می‌شوند. در بسیاری موارد این برهم‌کنش ها ممآن‌های دو قطبی القایی یا دائمی را در برمی‌گیرند. بر اساس ماهیت ذرات درون پلاسما می‌توان بین پلاسماهای یونیزه شده ضعیف و قوی تمایز قایل شد. در یک پلاسمای یونیزه شده ضعیف برهم‌کنش های ذرات باردار – ذرات خنثی بر برهم‌کنش‌های چندگانه کولن برتری دارد. هنگامی‌که میزان یونیزاسیون به حدی باشد که اثر برهم‌کنش های چندگانه کولن دارای برتری باشد، پلاسما یونیزه شده قوی است. با افزایش میزان یونیزاسیون در پلاسما، اهمیت برهم‌کنش های کولن نیز افزایش یافته به گونه‌ای که در یک پلاسمای کاملاً یونیزه، تمامی ذرات تابع اثرات برهم‌کنش چندگانه کولن می‌باشند[۶].

۱-۱-۵ برخی پدیده‌های بنیادی پلاسما

این واقعیت که برخی یا تمامی ذرات درون یک پلاسما دارای بار الکتریکی می‌باشند و از این رو قادرند با میدان‌های الکترومغناطیسی برهم‌کنش داشته باشند و هم‌چنین این میدان‌ها را ایجاد نمایند، منجر به‌ایجاد پدیده‌های جدیدی می‌گردد که در سیالات و جامدات وجود ندارند. به عنوان مثال وجود میدان‌های مغناطیسی جهت گرمادهی و محدودسازی پلاسما در تحقیقات گرما هسته‌ای کنترل شده، پدیده‌های جدیدی را به طور وسیع در پلاسما باعث می‌شوند. به منظور کشف تمام ویژگی‌های پدیده‌های پلاسما، رفتار پلاسما در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به دلیل تحرک‌پذیری[۱] بالای الکترون‌ها، پلاسماها عموماً رساناهای بسیار خوب جریان الکتریسته و گرما می‌باشند. پلاسماها به دلیل دارا بودن رسانندگی الکتریکی بالا- به جز تا حد معینی-

---

۱- Mobility

از میدان‌های الکترواستاتیکی پشتیبانی نمی‌نمایند (به جز در جهت عمود بر میدان مغناطیسی موجود که مانع از حرکت ذرات در این جهت می‌شود). وجود یک گردایان چگالی در پلاسما باعث می‌شود که ذرات از مناطق چگال‌تر به مناطق با چگالی کم‌تر پخش شوند، با وجودی که مسئله‌ی پدیده پخش در پلاسماهای غیرمغناطیسی تا حدودی شبیه به سیالات معمولی است با این وجود یک تفاوت اساسی وجود دارد. الکترون‌ها به علت جرم کم‌ترخود سریع‌تر از یون‌ها پخش می‌شوند و یک میدان الکتریکی قطبشی ناشی از جدایی بارها ایجاد خواهد شد. این میدان سبب افزایش پخش یون‌ها و کاهش پخش الکترون‌ها خواهد شد. از این رو میزان پخش الکترون‌ها و یون‌ها تقریباً یکسان خواهد بود. این نوع پخش، پخش دو قطبی[۱] نامیده می‌شود. هنگامی‌که یک میدان مغناطیسی خارجی وجود داشته باشد، پخش ذرات باردار از یک سو به سوی دیگر خطوط میدان کاهش می‌یابد که بیانگر این موضوع است که میدان‌های مغناطیسی در محدود سازی پلاسما مفید هستند. پخش ذرات از یک سو به سوی دیگر خطوط میدان مغناطیسی، زمانی که ضریب پخش رابطه‌ی معکوس با القای مغناطیسی B داشته باشد، پخش کلاسیکی[۲] نامیده می‌شود. در مقابل در پدیده‌ی پخش بوهم[۳] ضریب پخش رابطه‌ی معکوس با توان دوم B دارد. یک مشخصه‌ی مهم پلاسماها این است که قادرند پدیده‌های موجی زیادی را از خود بروز دهند. می‌توان از امواج عرضی الکترومغناطیسی با فرکانس بالا، امواج طولی الکترواستاتیک[۴] و در شرایط فرکانس پائین امواج آلفوئن[۵] و امواج مغناطوصوتی[۶] را نام برد. هر یک از مدهای انتشار امواج ممکن، به وسیله ی یک رابطه‌ی پاشندگی مشخص می‌گردد. این رابطه، یک رابطه‌ی عملگری بین ω(فرکانس موج) و k (عدد موج) و قطبش آن می‌باشد. مطالعه‌ی امواج در پلاسما، اطلاعات مهمی در زمینه‌ی خصوصیات پلاسما فراهم نموده و در زمینه مطالعات پلاسما دارای اهمیت بسیار است. فرآیندهای اتلافی در پلاسما، مانند برخوردها، میرایی دامنه موج را باعث می‌شود. این به آن معناست که انرژی از امواج به ذرات منتقل می‌شود. یک وضعیت تضعیف امواج که لزوماً غیربرخوردی است نیز در پلاسما وجود دارد که میرایی لانداو[۷] نامیده می‌شود. عامل میرایی لانداو عبارت است از به دام افتادن برخی ذرات پلاسما (آن ذراتی که با سرعت‌هایی نزدیک به سرعت فاز موج در حرکتند) در چاه پتانسیل موج و در نتیجه، انتقال انرژی از موج به ذرات می‌باشد. در نتیجه‌ی ناپایداری‌ها، می‌تواند مدهایی با افزایش دامنه نیز داشت که انتقال انرژی از ذرات پلاسما به میدان موج را باعث خواهد شد.

۱- Ambipolar Diffusion
۲- Classical Diffusion
۳- Bohm Diiffusion
۴- Electrostatic Plasma Waves
۵- Alfuen Waves
۶- Magnetosonic Waves
۷- Landau

پدیده‌های ناپایداری دارای اهمیت گسترده‌ای در شرایط فیزیکی و در فرآیندهای دینامیکی در پلاسما می‌باشند. وجود انواع زیادی از ناپایداری‌ها در یک پلاسما، به طور وسیعی محدودسازی یک پلاسمای با حرارت بالا را با مشکل مواجه می‌سازد. مطالعه‌ی این ناپایداری در تحقیقات گداخت گرما هسته‌ای کنترل شده، دارای ضرورت و اهمیت بسیاری می‌باشد. جنبه‌ی مهم دیگری که در رفتار پلاسما وجود دارد گسیل تابش می‌باشد. گسیل تابش مهم‌ترین ابزاری است که از آن می‌توان در بررسی خصوصیات پلاسما استفاده نمود. عواملی که باعث خواهند شد که پلاسماها تابش گسیل یا جذب کنند به دو دسته، تابش گسیل یافته از اتم‌ها یا مولکول‌ها و تابش ناشی از شتاب ذرات باردار تقسیم می‌شوند. در عین حال که در پلاسما عمل یونیزاسیون انجام می‌گیرد، فرآیندهای بازترکیب یون‌ها و الکترون‌ها و ایجاد ذرات خنثی نیز معمولاً در حال انجام است. در نتیجه انجام فرآیند بازترکیب اغلب تابش گسیل می‌یابد هم‌چنین هنگامی‌که ذرات برانگیخته شده در طی مراحل بازترکیب به حالت پایه باز می‌گردند، تابش گسیل می‌کنند. از طرف دیگر اگر به هر ذره باردار شتاب داده شود آن ذره، تابش گسیل می‌نماید. هرگاه که یک ذره باردار به وسیله یک برهم‌کنش برخوردی دارای شتاب منفی شود تابشی گسیل می‌کند که تابش ترمزی[1] نامیده می‌شود. چنانچه ذره قبل یا پس از برخورد غیر مقید باقی بماند این فرآیند، فرآیند تابش ترمزی آزاد – آزاد نامیده می‌شود. تابش گسیل یافته یا جذب شده در فرآیند تابش ترمزی می‌تواند دارای هر طول موجی باشد. چنانچه ذره باردار که در ابتدا غیر مقید باشد به وسیله‌ی ذره دیگری جذب شود با گسیل تابش همراه خواهد بود که این فرآیند تابش آزاد – مقید نامیده می‌شود. تابش سیکلوترونی که در پلاسماهای مغناطیسی اتفاق می‌افتد ناشی از نیروی جانب مرکز مغناطیسی است که باعث حرکت ذرات باردار در یک مسیر مارپیچ حول خطوط نیروی مغناطیس، می‌شود.

۱-۱-۶ معیارهای لازم جهت تعریف پلاسما

الف) طبیعت ماکروسکوپی خنثی

یک پلاسما در غیاب آشفتگی خارجی از لحاظ ماکروسکوپی و الکتریکی خنثی می‌باشد. به‌این معنا که در حالت تعادل و در غیاب نیروهای خارجی، یک حجم از پلاسما که به اندازه کافی بزرگ باشد که تعداد زیادی ذره در آن وجود داشته باشد و در عین حال در مقایسه با طول‌های مشخصه پلاسما (جهت تغییرات پارامترهای ماکروسکوپی مانند چگالی و دما) به اندازه کافی کوچک باشد، بارهای الکتریکی خالص صفر است. در درون پلاسما، میدان‌های باز میکروسکوپی، یکدیگر را

۱-Bremsstrahlung