بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه بیرجند

دانشکده علوم

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد فیزیک - اتمی

مطالعه امواج فرکانس پایین در یک پلاسمای غباری ناهمگن

استادراهنما:

دکتر محمد خراشادیزاده

استاد مشاور:

دکتر علیرضا نیکنام

نگارش:

فریبا رشیدی‌تل‌گه

زمستان ۱۳۹۳

تقدیم به

برترین موهبت های زندگی ام

پدر و مادر عزیزم

به پاس مهر صادقانه، عشق بی پایان و رنج بی منتهایشان در گشایش و آسایش من

سپاس

سپاس و ستایش بی قیاس مخصوص پروردگار یکتاست که یگانه است و یگانه در یگانگی، منان است و منت نهاده است و آن چه در دست من است همه از منت اوست، او که لطف بی-نهایتش همواره راهنما و راه گشایم بوده است.

این پژوهش به پاس راهنمایی و همدلی این عزیزان به سرانجام رسیده است:

- استاد بزرگوار و عزیزم جناب آقای دکتر سید محمد خراشادیزاده، همراه بی دریغ این پایان نامه، که بی شک راهنمایی های شایسته و مستمر ایشان همواره گره گشا و امید آفرین برای ادامه کار بوده است.
- استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر علیرضا نیکنام، که راهنمایی ها و کمک های ایشان در طول این پروژه بسیار ارزشمند بوده است.
- از اساتید محترم جناب آقای دکتر کاظم نفیسی و جناب آقای دکتر محمد مهدی فیروزآبادی به جهت قبول داوری این مجموعه کمال تشکر و سپاسگذاری را دارم.
- همراهی و همدلی خواهر عزیزم ، راهنمایی های بی دریغ دوست عزیزم خانم راستبود که همواره مشوق من بودند و محبت و زحماتشان برایم فراموش نشدنی است. سپاس فراوان از راهنمایی های گره گشای آقای دکتر سلحشور و آقای طاهری، دوستان خوبم خانم عبداللهی و خانم عباسی، خانم دکتر شگفته، خانم ملک قاسمی و خانم مؤمن زاده که دلگرمی-هایشان همواره امید بخش و راه گشا بوده است.

... نسبت به همه آن ها حق شناس و عمیقا سپاس گزارم.

بررسی امواج فرکانس پایین در یک پلاسمای غباری ناهمگن

به وسیله‌ی:

فریبا رشیدی تل‌گه

چکیده:

این پایان‌نامه از ۶ فصل تشکیل شده است. فصل اول به معرفی مفاهیم اساسی و کاربردی پلاسمای غباری اختصاص دارد. در فصل دوم، رابطهٔ پاشندگی امواج فرکانس پایین مانند امواج صوتی_غباری و امواج یونی_صوتی غباری مورد تحقیق قرار می‌گیرد.

در فصل سوم، رابطهٔ پاشندگی امواج صونی_غباری منتشر شونده در پلاسمای غباری ناهمگن را با توجه به حضور نیروی قطبش و یون‌های غیر حرارتی بررسی می‌کنیم. آنچه مشاهده می‌کنیم این است که رابطهٔ پاشندگی به طور قابل توجهی به وسیلهٔ یون‌های غیر حرارتی و نیروی قطبش ناشی از وجود گرادیان در چگالی، تغییر داده می‌شود. سرعت فاز امواج صوتی_غباری با افزایش نیروی قطبش کاهش و با افزایش یون‌های غیر حرارتی، افزایش می‌یابد.

در فصل چهارم، تاثیر برخوردهای یون_غبار، بر رابطهٔ پاشندگی موج صوتی_غباری منتشر شونده در پلاسمای غباری ناهمگن با حضور نیروی قطبش و یون‌های غیر حرارتی مورد بحث قرار می‌گیرد. برخوردهای یون_غبار بخش‌های حقیقی و موهومی فرکانس را تحت تاثیر قرار می‌دهند. با افزایش برخوردهای یون_غبار بخش حقیقی فرکانس کاهش می‌یابد و بخش موهومی فرکانس میرایی بیشتری خواهد داشت.

در فصل پنجم، رابطهٔ پاشندگی امواج یونی_صوتی غباری در پلاسمای غباری ناهمگن را با توجه به حضور نیروی قطبش مورد بررسی قرار می‌دهیم. وجود ناهمگنی در پلاسمای غباری بخش‌های حقیقی و موهومی فرکانس امواج یونی_صوتی غباری را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

فصل اول :مفاهیم اساسی و کاربردی پلاسمای غباری ۴

۱-۱- پلاسمای غباری ۵

۱-۲- مشخصه‌های پلاسمای غباری ۶

۱-۲-۱- شرط شبه خنثایی ۷

۱-۲- ۲- حفاظ دبای ۷

۱-۲-۳- پارامتر کوپل شدگی ۹

۱-۲-۴- فرکانس‌های مشخصه ۹

۱-۳- باردار شدن دانهٔ غبار ۱۱

۱-۴- نیروهای مـؤثر بر پلاسمای غباری ۱۳

۱-۴-۱- نیروی کشش یونی ۱۳

۱-۴-۲- نیروی رانش خنثی‌ها ۱۶

۱-۴-۴- نیروی ثقلی ۱۷

۱-۴-۵- نیروی الکتریکی و نیروی قطبش ۱۸

۱-۵- پلاسمای غباری در فضا ۱۹

۱-۵-۱ دنباله دارها ۲۰

۱-۵-۲- فضای بین ستارهای ۲۰

۱-۵-۳- حلقه‌های سیارهای ۲۱

۱-۵-۴- اتمسفر زمین ۲۱

فصل دوم : امواج فرکانس پایین در پلاسمای غباری ۲۲

۲-۱- مقدمه ۲۳
۲-۱-۱- موج صوتی_غباری ۲۴
۲-۱-۲- موج یونی-صوتی غباری ۲۸
فصـــل سوم: بررسی اثر نیروی قطبش و یون‌های غیر حرارتی بر انتشار امواج صوتی_غباری در پلاسمای غباری ناهمگن ۳۱
۳-۱- مقدمه ۳۱
۳-۲- معادلات اساسی ۳۳
۳-۳- معادله پاشندگی ۳۴
۳-۴- پتانسیل وابسته به امواج صوتی_غباری ۳۶
۳-۵- نمودارهای مربوط به رابطهٔ پاشندگی ۳۸
۳-۶ – مشخصات بخش اختلالی چگالی غباری ۴۱
فصـــل چهارم : اثر برخورد یون_غبار بر موج صـــوتی_غباری منتشر شونده در پلاسمای غباری ناهمگن ۴۵
۴-۱- مقدمه ۴۶
۴-۲- معادلات اساسی ۴۷
فصـل پنجم : بررســی نســبت پاشــندگی امواج یونی_صوتی غباری در پلاسمای غباری ناهمگن تحت اثر نیروی قطبش ۵۱
۵-۱- مقدمه ۵۲
۵-۳- معادله پاشندگی ۵۴
فصل ششم بحث و نتیجه‌گیری ۵۸
بحث و نتیجه‌گیری ۵۹
پیشنهادات ۶۰
منابع ۶۱

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱. ۱. دنباله دار ۲۰

شکل ۱. ۲ . ابرهای شب تاب ۲۲

شکل ۲. ۱. تصویر موج صوتی_غباری [۱۷]. ۲۵

شکل ۳. ۱. نقش نیروی قطبش بر رابطهٔ پاشندگی $\left(\omega/\omega_{Pd}\right)$ به عنوان تابعی از $k\lambda_{Dm}$ برای انتشار امواج صوتی-غباری در پلاسمای ناهمگن. R=0.6 (نمودار قرمز رنگ)، R=0.4 (نمودار سبز رنگ)، R=0.2 (نمودار بنفش رنگ)، R=0 (نمودار آبی رنگ)، با پارامترهای فیزیکی $\sigma_4=0.04$، $\sigma_3=0.57$ و $\alpha_i=0.2$. ۳۹

شکل ۳. ۲. اثر یونهای غیر حرارتی بر نسبت پاشندگی $\left(\omega/\omega_{Pd}\right)$ به عنوان تابعی از $k\lambda_{Dm}$ برای انتشار امواج صوتی-غباری در پلاسمای ناهمگن. $\alpha=0$ (نمودار قرمز رنگ)، $\alpha=0.1$ (نمودار سبز رنگ)، $\alpha=0.2$ (نمودار آبی رنگ)، $\alpha=0.3$ (نمودار بنفش رنگ)، با پارامترهای فیزیکی $\sigma_4=0.04$، $\sigma_3=0.57$ و $R=0.6$. ۴۰

شکل ۳. ۳. تغییرات سرعت فاز(v_{Ph}) با R و α_i با پارامترهای فیزیکی $\sigma_3=0.57$، $\sigma_4=0.04$ [۱۲]..... ۴۱

شکل ۳. ۴. بررسی سرعت فاز تحت افزایش تعداد الکترونهای ساکن روی ذرات غبار (Z_d) و افزایش نسبت چگالی عددی الکترون تعادلی به چگالی عددی یون تعادلی ($\sigma_3=n_{e0}/n_{i0}$) با پارامترهای فیزیکی $\alpha=0.2$، $\sigma_4=0.82$. ۴۱

شکل ۳. ۵. تغییرات N_d با پارامتر قطبش (R) و پارامتر تعیین کنندهٔ جمعیت یونهای سرد (α_i) با پارمترهای فیزیکی $n=0.43$، $W=0.7$، $X=1$، $\sigma_3=0.57$، $\sigma_4=0.04$ و $\sigma_2=0.001$ [۱۲]..... ۴۳

شکل ۳. ۶. تغییرات N_d با مقادیر متفاوت پارامتر σ_3 و پارامتر σ_2 با پارمترهای فیزیکی $n=0.43$، $W=0.7$، $X=1$، $\sigma_4=0.04$، $R=0.6$و $\alpha_i=0.2$. ۴۴

شکل ۳. ۷. تغییرات N_d با مقادیر متفاوت پارامترهای σ_4 و W با پارامترهای فیزیکی $\sigma_3=0.57$، $\sigma_2=0.001$، $n=0.43$ و $X=1$. ۴۴

شـــکـل ۴. ۱. بررســـی بخش حقیقی فرکـانس با توجه به اعمال مقادیر متفاوت برخوردهای یون_غبار. $\upsilon_{di}/2\omega_{Pd}=0$(نمودار قرمز رنـگ)، $\upsilon_{di}/2\omega_{Pd}=0.02$(نمودار ســـبز رنـگ)، $\upsilon_{di}/2\omega_{Pd}=0.05$(نمودار نارنجی رنگ)، $\upsilon_{di}/2\omega_{Pd}=0.07$(نمودار آبی رنگ) با پارامترهای فیزیکی $R=0.6$، $\sigma_4=0.04$، $\sigma_3=0.57$..... ۴۹
شـــکـل ۴. ۲. بررســـی بخش موهومی فرکانس با توجه به اعمال مقادیر متفاوت برخوردهای یون_غبار. $\upsilon_{di}/2\omega_{Pd}=0$(نمودارقرمز رنگ)، $\upsilon_{di}/2\omega_{Pd}=0.077$(نمودار ســـبز رنگ)، $\upsilon_{di}/2\omega_{Pd}=0.085$(نمودار آبی رنـگ)، $\upsilon_{di}/2\omega_{Pd}=0.095$(نمودار بنفش رنـگ) با پارامترهای فیزیکی $R=0.6$، $\sigma_4=0.04$، $\sigma_3=0.57$. ۵۰
شـــکل ۵. ۱. تاثیر افزایش ناهمگنی بر بخش حقیقی فرکانس. $k_n=3$(نمودار قرمز رنگ)، $k_n=6$(نمودار سبز رنگ)، $k_n=10$(نمودار آبی رنگ). ۵۶
شـــکـل ۵. ۲. تغییرات بخش موهومی فرکـانس با توجه افزایش ناهمگنیها. $k_n=0$(نمودار قرمز رنگ)، $k_n=7$(نمودار سبز رنگ)، $k_n=10$(نمودار آبی رنگ). ۵۷

مقدمه

پلاسما گاز طبیعی ماکروسکوپیک شبه خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد و حالت چهارم ماده نامیده می‌شود. حدود ۹۹ درصد از جهان اطراف ما از پلاسما ساخته شده است. این تخمین هرچند ممکن است دقیق نباشد ولی تخمین معقولی است از این واقعیت که ستارگان بیشترین جرم عالم را تشکیل می‌دهند و به دلیل دمای بالایشان در حالت پلاسما قرار دارند، با این وجود مقدار کمی از آن در زمین است، زیرا دمای کم زمین و اتمسفر نزدیک آن از به وجود آمدن پلاسما به طور طبیعی جلوگیری می‌کند.

حال اگر ذرات کوچک جامد که به ذرات غبار معروف هستند به سیستم پلاسما وارد شوند، پلاسمای غبار آلود تشکیل می‌شود. ذرات غبار معمولا بسیار پر جرم ($m_d = 10^6 - 10^{18} m_p$) و باردار ($q_d = 10^3 - 10^4 e$) و اندازهٔ آن‌ها از مرتبهٔ نانو متر تا میکرو متر است و بسته به محیط‌های پلاسمای اطرافشان می‌توانند به صورت مثبت یا منفی باردار شوند. به عبارت دیگر پلاسمای غباری، پلاسمای چند مؤلفه‌ای متشکل از الکترون‌ها، یون‌ها، ذرات خنثی و ذرات غبار می‌باشد. اندازه و شکل این ذرات متفاوت است مگر اینکه ساخته دست بشر در آزمایشگاه باشند. جنس این ذرات ممکن است رسانا یا از تکه‌های یخ باشد، بار الکتریکی آن‌ها نیز به اندازه دانه، ترکیبات آن‌ها و پلاسمای پیرامون آن‌ها بستگی دارد.

وجود این تعداد ذرات غبار باردار مثبت و منفی در گاز پلاسما منجر به ایجاد خواص ویژه‌ای در آن می‌شود. به دلیل سنگینی دانه‌های غبار باردار شده، دینامیک پلاسمای غبار آلود متفاوت است و اثرات فیزیکی متناظر آن‌ها به طور اساسی از سیستم پلاسمای الکترون_یون معمولی متمایز هستند. در پلاسمای غباری در اثر اختلال خارجی به دلیل اندرکنش ذرات غبار با الکترون‌ها و یون‌ها و خود ذرات غبار، مدهای جدیدی در آن منتشر می‌شوند. وجود دانه‌های غبار باردار رفتار جمعی پلاسما را تغییر می‌دهد و نیز باعث تغییراتی در پارامترهایی چون چگالی، پتانسیل و ... در پلاسما می‌شود، به عبارتی این مؤلفهٔ اضافی باعث افزایش پیچیدگی سیستم می‌شود، به همین جهت به آن پلاسمای پیچیده نیز می‌گویند.

مانند بسیاری از شاخه‌های علوم دیگر، روش مطالعهٔ خواص پلاسما نیز از روش مشاهده و آزمایش و یا روش‌های تحلیلی مبتنی بر اصول فیزیک است که در نهایت برهم کنش این دو روش به منظور رد یا تأیید

یکدیگر، باعث گسترش دامنهٔ این رشته شده است، مطالعهٔ پلاسمای غبار آلود بیان کننده یکی از شاخه‌های در حال رشد فیزیک پلاسما است.

البته علی رغم پیشرفت‌های سریع سال‌های نخست پس از کشف پلاسما، به تدریج روند درک واقعی از پلاسما کندتر شده، زیرا آنچه در پلاسما رخ می‌دهد رفتارهای کاملا پیچیده است که به سادگی نمی‌توان آن را پیش بینی کرد. بنابراین بدون مختل کردن و روش‌های اندازه گیری، امکان مطالعهٔ سیستم‌های پلاسمایی وجود ندارد. دلایل اهمیت پلاسمای غباری را می‌توان به صورت زیر دسته بندی کرد:

۱. پلاسمای نجومی در بسیاری از موقعیت‌ها با ذرات غبار همراه است. برای نمونه ظهور پلاسمای غبار در شفق بین الطلوعین، سحابی جبار، ابرهایی تابشی، فضای بین ستاره‌ای و بین سیاره‌ای، حلقه‌های زحل و ... مشاهده شده است. تقریبا تعداد باور نکردنی از عکس‌های نجومی گرفته شده توسط فضا پیماها و تلسکوپ فضایی هایل مؤید این است که فضای خارج از زمین مملوء از پلاسماهای غباری است.

۲. نمونه‌های جدید زیادی از پلاسمای غباری در محیط‌های زمینی وجود دارد، گاز خروجی موشک، فضای اگزوز شاتل، راکتورهای هسته‌ای، ریز تراشه‌های کامپیوتری، کریستال‌های پلاسمایی و ... مثال‌های قابل ذکر هستند.

۳. به عنوان کالا در صنعت: این ذرات می‌توانند چگال شوند و در پلاسماهای مورد استفاده برای ساخت قطعات میکرو الکترونیک رشد کنند، همچنین این ذرات می‌توانند سطوح پردازش شده را آلوده کنند و بازدهی را کاهش دهند، زیرا هنگامی که قطعات نیمه رسانا با ابعاد کوچک در فرکانس‌های بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند، در آن‌ها دو قطبی‌های بسیار کوچک نوسانی ظاهر می‌شوند که توان اتلافی ناشی از این دو قطبی‌ها باعث ایجاد محدودیت در کارایی قطعات می‌شود. همچنین در لیزرهای گازی در عادی‌ترین پمپاژ لیزر، یعنی وارونه کردن جمعیت حالاتی که منجر به تقویت نور می‌شود، پلاسما ایجاد می‌شود. بنابراین کنترل این گونه پلاسماها در آزمایشگاه موضوع مهمی به منظور بهبود کیفیت نیمه رسانا یا ریز تراشه‌های کامپیوتری است.

حضور دانه‌های غبار باردار به طور قابل توجهی مدهای نرمال پلاسما را تغییر می‌دهد، امواج جمعی در پلاسمای غباری به دلیل رابطهٔ گسترده‌شان در محیط‌های کیهانی و اختر فیزیکی، توجه زیادی را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده‌اند.

یکی از مباحث مهم در پلاسما بحث ناهمگنی در پلاسما می‌باشد. در واقع زمانیکه در پلاسما گرادیان چگالی وجود داشته باشد، پلاسما دیگر یکنواخت نیست. در این زمان نیروی قطبش متناسب با گرادیان چگالی برای به حساب آوردن تغییر شکل غلاف در شرایطی که ذره غبار در معرض میدان الکتریکی غیر صفر قرار دارد، ایجاد می‌شود.

بررسی رابطهٔ پاشندگی امواج فرکانس پائین تحت اثر نیروهای متفاوت در پلاسمای غباری ناهمگن از اهمیت بالایی برخوردار است. رابطهٔ پاشندگی امواج منتشر شونده در پلاسما تحت اثر نیروی قطبش دستخوش تغییراتی می‌گردد که در این پایان‌نامه تغییرات رابطهٔ پاشندگی امواج فرکانس پایین تحت اثر این نیرو مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل اول این پایان نامه، ابتدا مروری کلی بر مفاهیم اساسی و کاربردی پلاسمای غباری خواهیم داشت. در فصل دوم به بررسی امواج فرکانس پایین منتشر شونده در پلاسمای غباری می‌پردازیم.

در فصل سوم به بررسی رابطهٔ پاشندگی امواج صوتی_غباری در پلاسمای غباری ناهمگن تحت تاثیر اثر نیروی قطبش می‌پردازیم و سپس در فصل چهارم تغییر رابطهٔ پاشندگی این امواج را با توجه به در نظر گرفتن برخوردهای یون_غبار مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در فصل پنجم به بررسی رابطهٔ پاشندگی امواج یونی_صوتی غباری در پلاسمای غباری ناهمگن می-پردازیم و تاثیر ناهمگنی را بر بخش‌های حقیقی و موهومی فرکانس، مورد بررسی قرار می‌دهیم و در خاتمه نتایج را مورد بحث قرار می‌دهیم.

فصل اول

مفاهیم اساسی و کاربردی پلاسمای غباری

۱- مفاهیم اساسی و کاربردی پلاسمای غباری

۱-۱- پلاسمای غباری

عبارت حالت چهارم ماده که اغلب برای توصیف حالت پلاسما استفاده می‌شود، اولین بار در سال ۱۸۷۹ به وسیله کروکز[1] به منظور توصیف محیط یونیزه ایجاد شده در تخلیه گازی، ابداع شد. در سال ۱۹۲۹ تونگ و لانگمیور[2] ازلفظ پلاسما برای توصیف ناحیه داخلی یک گاز یونیزه که به وسیله تخلیه الکتریکی در یک لامپ ایجاد شده بود، استفاده کردند.

زمانی که جامدی را گرم می‌کنند، دستخوش گذار فازی می‌شود و ماده به حالت مایع تبدیل می‌شود. اگر مایع گرم‌تر شود دستخوش گذار فازی به حالت گازی می‌گردد. اضافه کردن انرژی بیشتر به یونش تعدادی از اتم‌های گاز منجر می‌شود. بیشتر مواد در دمای بالای ۱۰۰۰۰۰ درجه کلوین در حالت یونیده وجود دارند. این حالت یونیده مواد، حالت چهارم نامیده می‌شود [۱].

در فضای اطراف ما ذرات ریزی وجود دارند که ما آن‌ها را ذرات غبار می‌نامیم. برهم کنش بین ذرات غبار و پلاسما باعث ایجاد ناحیه تحقیقاتی جالبی در فیزیک شده است که پلاسمای غباری[3] نامیده می‌شود. پلاسمای غباری به عنوان پلاسمای یون_الکترون معمولی ولی حاوی ذرات اضافی که باردار شده و ابعاد آن‌ها میکرون یا زیر میکرون است تعریف شده است. این ذرات غبار به دلیل مجموعه‌ای از جریان‌های یون و الکترون از پلاسمای زمینه می‌توانند باردار شوند، بنابراین بار غبار، متغیر دینامیکی دیگری محسوب می‌شود که پلاسمای غباری را از پلاسمای یون_الکترون معمولی تمیز می‌دهد. وجود این جزء اضافی از ذرات ماکرو، در پلاسمای غباری، پیچیدگی این مجموعه را نسبت به پلاسمای معمولی افزایش می‌دهد. به این دلیل است که پلاسمای غبار آلود به پلاسمای مختلط منتسب شده است.

1 Crookes
2 Tonks and Langmuir
3 Dusty plasma

پلاسماهای غبار آلود، گازهای اندک یونیزه شده حاوی یون‌ها، الکترون‌ها، دانه غبار باردار شده و مولکول-های گازی خنثی می‌باشند که کاملا کم دما هستند. ذرات غبار دارای جرم بزرگ در حدود 10^9 برابر جرم پروتون و اندازه‌ای در حدود نانو متر تا میکرو متر می‌باشند [۲].

غبار و پلاسماهای غباری تقریبا در همه جای فضا حضور دارند. آن‌ها در حلقه‌های سیاره‌ای، دم ستاره-های دنباله دار، ابرهای بین سیاره‌ای و بین ستاره‌ای و مگنتوسفر زمین حضور دارند. پلاسماهای غباری در مجاورت ماهواره‌های مصنوعی و ایستگاه‌های فضایی یافت می‌شوند.

در پلاسماهای همگن، کمیت‌های تعادلی ثابت در نظر گرفته می‌شوند، ولی در واقعیت در فضا و پلاسما-های آزمایشگاهی حات‌های تعادلی غیر یکنواخت هستند و در چنین مواردی کمیت‌های تعادلی به صورت فضایی تغییر می‌کنند. سیستم پلاسمای غباری با داشتن گرادیان در چگالی عددی و دما، غیر یکنواخت است، در چنین شرایطی به پلاسما، پلاسمای غباری ناهمگن گفته می‌شود.

برای فهم بهتر ویژگی‌های پلاسمای غباری برخی از خصوصیات اصلی آن را به اختصار مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۲- مشخصه‌های پلاسمای غباری

یک پلاسما دارای ذرات غبار را می‌توان بر اساس ترتیب قرارگیری تعدادی از طول‌های مشخصه آن، غبار در پلاسما یا پلاسمای غباری بنامیم. شعاع ذره غبار (r_d)، شعاع دبای پلاسما (λ_d) و فاصله میانگین بین ذرات غبار (a) سه مشخصه طولی اساسی در پلاسمای غباری هستند. حالت $r_d << \lambda_d << a$ (که در آن ذرات باردار به صورت مجموعه ای از ذراتی که به صورت مجزا پوشیده شده‌اند، مطرح هستند) مربوط به غبار در پلاسما می‌باشد و حالت $r_d << a << \lambda_d$ (که در آن ذرات باردار در رفتارهای جمعی مشارکت دارند) مربوط به پلاسمای غباری می‌باشد.

برخی مشخصه‌های اصلی پلاسمای غباری، خنثایی ماکروسکوپیکی، غلاف دبای، فرکانس‌های مشخصه و پارامتر جفت شدگی کولنی است که به منظور درک بهتر پلاسمای غباری این عبارات را به اختصار بررسی می‌کنیم [۳].

۱-۲-۱- شرط شبه خنثایی

در پلاسمای غباری نیز مانند پلاسمای الکترون_یون هنگامی که هیچ اختلالی نداریم، پلاسما از لحاظ ماکروسکوپی خنثی است.[1] این به این معنی است که در تعادلی بدون حضور نیروهای خارجی، بار الکتریکی خالص ایجاد شده در پلاسمای غباری صفر است. شرط خنثی بودن بار تعادلی در پلاسمای غباری را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$q_i n_{i0} - e n_{e0} + q_d n_{d0} = 0 \qquad (۲-۱)$$

n_{i0}، n_{e0} و n_{d0} به ترتیب چگالی تعادلی یون‌ها، الکترون‌ها و ذرات غبار هستند. q_i بار یون است که برای یون‌های یک بار یونیده مقدار e می‌باشد و $q_d = z_d e$ ($q_d = -z_d e$) بار ذرهٔ غبار مثبت (منفی) است، که z_d تعداد بار قرار گرفته بر سطح ذره غبار است [۳].

در بسیاری از پلاسماهای آزمایشگاهی و فضایی، طی فرایند باردار شدن دانهٔ غبار، اغلب الکترون‌های پلاسمای زمینه روی سطح غبار قرار می‌گیرند، در نتیجه چگالی الکترونی پلاسمای غباری کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان گفت یک پلاسمای یون_غبار داریم که $n_{e0} \prec\prec z_d n_{d0}$ است و شرط شبه خنثائی به صورت $n_{i0} \approx z_d n_{d0}$ می‌باشد.

اکنون موقعیت پلاسمای الکترون_غبار را در نظر می‌گیریم، ذرات غبار به صورت مثبت باردار می‌شوند. در واقع طی فرایند باردار شدن دانه‌های غبار از طریق گسیل الکترون ثانویه یا گسیل فوتونی، الکترون‌ها به قدر کافی از سطح دانه غبار بیرون انداخته می‌شوند. در این شرایط $n_{i0} \prec\prec z_d n_{d0}$ است و شرط خنثائی به صورت $n_{e0} \approx z_d n_{d0}$ می‌باشد [۴].

۱-۲- ۲- حفاظ دبای

یکی از مشخصه‌های اساسی رفتار پلاسما توانایی آن در پوشش دادن پتانسیل یک ذره باردار یا هر پتانسیل غیر صفر است. این مشخصه مقیاسی از طول (به نام حفاظ دبای[2]) ایجاد می‌کند که در آن دیگر ذرات پلاسما تحت تأثیر میدان الکتریکی ناشی از این ذره باردار قرار دارند.

فرض می‌کنیم با وارد کردن یک گلوله باردار درون پلاسمای غباری، میدان الکتریکی در محیط ایجاد شود. این گوی، ذرات با بار مخالف را جذب می‌کند به گونه‌ای که ابری از ذرات با بار مخالف، گوی را احاطه

1 Macroscopic neutrality
2 Debye shielding

می‌کنند، اگر پلاسما سرد باشد و هیچ گونه حرکت حرارتی نداشته باشیم، همان مقدار باری را که در گوی داشتیم در ابر نیز داریم. در واقع عمل حفاظ شدگی کامل است و اجازه نفوذ میدان الکتریکی به داخل پلاسما و خارج از ابر داده نمی‌شود.

اگر دما محدود باشد، ذراتی که در لبهٔ ابر قرار دارند (جایی که میدان الکتریکی ضعیفی وجود دارد) دارای انرژی کافی برای فرار از پتانسیل الکترواستاتیک می‌باشند. لبه ابر در شعاعی که انرژی پتانسیل تقریباً معادل با انرژی حرارتی K_BT است، قرار دارد. K_B ثابت بولتزمن و T دمای انواع ذرات است. عمل حفاظ شدگی در این صورت کامل نیست و پتانسیل الکتریکی از مرتبه k_BT/Q وارد پلاسما می‌شود.

برای محاسبه ضخامت تقریبی این ابر باردار (حفاظ) فرض می‌کنیم که پتانسیل $\Phi(r)$ در مرکز ابر $\Phi_0(r=0)$ باشد و نسبت جرم غبار به جرم یون به قدری بزرگ باشد که جرم ذرات غبار مانع حرکت آن‌ها شود و ذرات غبار تنها یک زمینه یکنواخت از بارهای منفی ایجاد می‌کنند. الکترون‌ها و یون‌ها دارای تعادل ترمودینامیکی محلی هستند و چگالی آن‌ها به این صورت تعریف می‌شود:

$$n_e = n_{e0}\exp(\frac{e\phi}{K_BT_e}) \qquad (۲-۱)$$

$$n_i = n_{i0}\exp(-\frac{e\phi}{K_BT_e}) \qquad (۳-۱)$$

n_{e0} و n_{i0} چگالی الکترون و یون دور از ابر هستند. معادله پواسون را به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\nabla^2\Phi = 4\pi[en_e - en_i - q_d z_d] \qquad (۴-۱)$$

با فرض ساکن بودن ذرات غبار، چگالی ذره غبار (n_d) در داخل و خارج از ابر یکسان است. با قرار دادن بسط الکترونی روابط (۱-۲) و (۱-۳) در رابطهٔ (۱-۴) با فرض اینکه $e\Phi/k_BT_e \prec\prec 1$ و $e\Phi/k_BT_i \prec\prec 1$ است خواهیم داشت [۳]:

$$\nabla^2\Phi = \left[\frac{1}{\lambda^2{}_{De}} + \frac{1}{\lambda_{Di}{}^2}\right]\Phi \qquad (۵-۱)$$

$$\lambda_{De} = \left(\frac{k_BT_e}{4\pi n_{e0}e^2}\right) \qquad \text{شعاع دبای الکترون}$$

$$\lambda_{Di} = \left(\frac{k_BT_i}{4\pi n_{i0}e^2}\right) \qquad \text{شعاع دبای یون}$$

شعاع دبای پلاسمای غباری را از معادله (۱-۵) بدست می‌آوریم:

$$\lambda_D = \frac{\lambda_{De}\lambda_{Di}}{\sqrt{\lambda_{De}^2 + \lambda_{Di}^2}} \qquad (۶-۱)$$

۱-۲-۳- پارامتر کوپل شدگی

قرار داشتن ذرات در حالت جفت شدگی قوی یا ضعیف، از جمله ملاحظات مهمی است که در زمینه تحلیل پلاسماهای غباری حائز اهمیت است. تخصیص عبارات جفت شدگی قوی یا ضعیف به این موضوع که انرژی پتانسیل میانگین ناشی از برهم کنش های نزدیک‌ترین ذرات همسایه کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از انرژی حرارتی‌شان باشد، مربوط می‌شود. برای یک پلاسما بدون ذرات غبار، الکترون‌ها و یون‌ها در حالتی هستند که انرژی برهم کنش میانگین از انرژی حرارتی میانگین کوچک‌تر است.

ذرات غبار در یک پلاسمای غباری بارهای قابل توجهی را می‌توانند بدست بیاورند، در نتیجه انرژی پتانسیل میانگین ناشی از برهم کنش‌های نزدیک‌ترین همسایه افزایش می‌یابد. احتمال پیدا کردن غبار در حالت کوپل شدگی قوی به وسیله پارامتر کوپل شدگی[1] کولنی مشخص می‌شود. این پارامتر به صورت نسبت انرژی پتانسیل کولنی بین ذره‌ای به انرژی حرارتی ذرات تعریف می‌شود [۵].

$$\Gamma = \frac{q^2}{dT_d}\exp(-\kappa) \qquad (۷-۱)$$

d فاصله میانگین بین ذرات است، $\kappa = d/\lambda_D$ و $q = z_d e$ می‌باشد.

زمانی که برهم کنش الکترواستاتیک از انرژی حرارتی بیشتر باشد یعنی زمانی که $\Gamma \succ 1$ باشد، سیستم کوپل شدهٔ قوی است. سیستمی از بارهای نقطه‌ای با برهم کنش کولنی خالص، ساده ترین مورد می‌باشد که به اصطلاح پلاسمای یک مولفه‌ای نامیده می‌شود. تبلور بلورها زمانی که Γ از یک مقدار بحرانی $\Gamma_c = 168 \pm 2$ بیشتر شود اتفاق می‌افتد. در واقع ذرات غبار در یک شبکه منظم که کریستال کولنی یا کریستال غباری نامیده می‌شود، قرار می‌گیرند [۶].

پلاسمای غباری با کوپل شدگی قوی به منظور بررسی شکل گیری و دینامیک کریستال‌های غباری در تخلیه‌های پلاسمای غباری دما پایین ایجاد می‌شود. همچنین در آزمایش‌های انفجار لیزری و نیز در سیستم‌های کلوییدی یافت می‌شود [۲].

۱-۲-۴- فرکانس‌های مشخصه

مانند پلاسمای یون_الکترون معمولی، یکی از خواص مهم پلاسمای غبار آلود ثبات خنثائی بار فضائی ماکروسکوپیکی سیستم است. زمانی که پلاسما به طور آنی از حالت تعادل مختل شده، اثر میدان بار فضای

1 Coupling parameter

داخلی، حرکت‌های جمعی ذرات را افزایش می‌دهد تا خنثائی بار، حالت اولیهٔ خود را حفظ کند. حرکت‌های جمعی آن‌ها با فرکانس طبیعی نوسان‌ها مشخص شده که به فرکانس پلاسما (ω_p) [1]مشهور است. فرکانس چنین نوساناتی به جرم و بار ذره بستگی دارد.

در اینجا می‌خواهیم فرکانس پلاسمای غبار آلود غیر مغناطیسی سرد را بررسی کنیم. نوسان‌های الکترواستاتیکی یون‌ها، الکترون‌ها یا ذرات غبار به دلیل میدان بار فضای داخل سیستم می‌باشد که با معادله پیوستگی قابل توصیف است.

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \nabla \cdot (n_j v_j) = 0 \qquad (۸-۱)$$

معادله تکانه را به این صورت می‌نویسیم:

$$\frac{\partial v_j}{\partial t} + (v_j \cdot \nabla) v_j = -\frac{q_j}{m_j} \nabla \Phi \qquad (۹-۱)$$

معادله پواسون را نیز به این شکل داریم:

$$\nabla^2 \Phi = -4\pi \sum_j q_j n_j \qquad (۱۰-۱)$$

فرض می‌کنیم دامنهٔ نوسانات به قدری کوچک باشد که بتوان از جملات شامل توان های بالاتر دامنه صرف نظر کرد (نظریهٔ خطی معتبر باشد)، همچنین در حالت تعادل تمام ذرات پلاسما در سکون هستند و هیچ میدان تعادلی نداریم. با خطی سازی معادلات بالا و ترکیب آن‌ها به معادله زیر می‌رسیم:

(۱۱-۱)

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla^2 \phi + 4\pi \sum_s \frac{n_{s0} {q_s}^2}{m_s} \nabla^2 \phi = 0$$

از معادله بالا در کل فضا دو بار تحت شرایط مناسب انتگرال می‌گیریم، $\frac{\partial}{\partial t}$ را با $\frac{d}{dt}$ تعویض می‌کنیم و معادلهٔ بالا را به این شکل باز نویسی می‌کنیم:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \phi + \omega_P^2 \phi = 0 \qquad (۱۲-۱)$$

$$\omega_P^2 = \sum_j \frac{4\pi n_{j0} q_j^2}{m_j} = \sum_j \omega_{Pj}^2 \qquad (۱۳-۱)$$

که ω_{pj} فرکانس پلاسما مربوط به ذرهٔ j را نشان می‌دهد.

در واقع با توجه به معادلهٔ (۱-۱۲) می‌توان گفت که پتانسیل بار فضای داخل سیستم با فرکانس ω_p نوسان می‌کند. هنگامی که ذرات پلاسما از نقطه تعادلشان جا به جا می‌شوند، میدان بار فضائی ایجاد

1 Plasma frequency

می‌شود تا با کشیدن ذرات به عقب باعث ایجاد مجدد خنثائی پلاسما گردد. اما ذرات به دلیل لختی شان از حد خارج می‌شوند و دوباره به موقعیت اولیه شان توسط میدان بار فضائی با قطبش مثبت بر می‌گردند. الکترون‌ها حول یون‌ها با فرکانس پلاسمائی الکترونی $\omega_{pe}=\left(4\pi n_{e0}e^2/m_e\right)^{1/2}$ و یون‌ها حول ذرات غبار با فرکانس پلاسمای یونی $\omega_{pi}=\left(4\pi n_{i0}e^2/m_i\right)^{1/2}$ و ذرات غبار حول موقعیت تعادل خودشان با فرکانس پلاسمای غباری $\omega_{pd}=\left(4\pi n_{d0}z_d^2e^2/m_d\right)^{1/2}$ نوسان می‌کنند [۳].

۱-۳- باردار شدن دانهٔ غبار

ذرات غبار به صورت الکتریکی توسط برهم کنش با پلاسمای زمینه، باردار می‌شوند و باعث پیدایش گونهٔ سوم ذرهٔ باردار در پلاسما می‌شوند. افزایش این گونه در پلاسما سبب ایجاد رفتارهای جدید می‌گردد. ذرات غبار، بار و جرم نسبتاً متفاوتی از یون‌ها و الکترون‌ها دارند.

روش‌های زیادی برای باردار کردن دانه‌های غبار امکان پذیر است. بمباران الکترونی روش معمول جهت باردار کردن ذرات غبار در آزمایشگاه است. اثر فوتوالکتریک یونی یا واپاشی پرتوزا نیز می‌توانند روش‌های مؤثری باشند که در فضای حقیقی و موقعیت‌های نجومی حائز اهمیت می‌باشند. اثر فوتوالکتریک یونی به غبار بار مثبت می‌دهد چون باعث می‌شود الکترون‌ها دانهٔ غبار را ترک کنند. طی فرآیند واپاشی پرتوزا دانه‌های غبار، قطبشی را در برابر ذراتی که در فرآیند واپاشی ساطع می‌شوند ایجاد می‌کنند. در گسیل ذره آلفا، بار ذرات غبار منفی می‌شود.

در فرایند بمباران الکترونی، ذرات غبار به صورت منفی باردار می‌شوند. الکترون‌ها نسبت به یون‌ها سبک تر و معمولا گرم‌تر هستند، در نتیجه سرعت حرارتی بزرگ‌تری نسبت به یون‌ها دارند، از اینرو زمانی که دانهٔ غبار وارد پلاسما می‌شود، در ابتدا در معرض شار بزرگی از الکترون‌های برخوردی نسبت به یون‌های برخوردی قرار می‌گیرد و باعث می‌شود ذرات غبار بار منفی پیدا کنند. این بارهای منفی سرانجام به اندازه کافی بزرگ می‌شوند تا بتوانند الکترون‌های برخوردی را دفع کنند. در نهایت شار الکترون‌های ورودی کم می‌شود. از طرفی بار منفی ذرات غبار به یون‌های موجود در پلاسما شتاب می‌دهد، به این ترتیب شار یون‌ها در غبار نیز زیاد می‌شود. در نتیجه بار خالص روی ذرات غبار به تعادل می‌رسد. این یک تعادل دینامیکی است، زیرا باعث ادامه داشتن شارش از پلاسما به ذرات غبار می‌گردد [۶].

بار دانه غبار را با q_d نشان می‌دهند که این بار روی دانه غبار به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$\frac{dq}{dt}=\sum_j I_j \qquad (۱۴-۱)$$