دانشگاه بیرجند
دانشکده علوم
گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک
گرایش اتمی و مولکولی (فیزیک پلاسما)

عنوان:

شتاب دادن ذرات پلاسمای غباری توسط بیم یونی

استاد راهنما:
دکتر سید محمد خراشادی‌زاده

استاد مشاور:
دکتر علیرضا نیکنام

پژوهشگر:
فرشته سبزی‌نژاد

شهریور ماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

سپاسگزاری

حمد و سپاس بی‌کران خداوندگارم را که مرا آموختن آموخت.

با تقدیر و تشکر فراوان از استاد راهنمای ارجمندم، جناب آقای دکتر خراشادی‌زاده که روشنگر راهم بوده‌اند، به خاطر صبر و حوصله و دقت نظر و حمایت‌های بی‌دریغشان خاضعانه سپاسگزارم و از درگاه احدیت آرزوی توفیق روزافزون برایشان دارم. از استاد مشاور عالیقدر این پایان‌نامه جناب آقای دکتر نیکنام به خاطر ارائه راهنمایی‌های خردمندانه و ارزنده‌شان صمیمانه قدردانی می‌نمایم. از اساتید محترم جناب آقای دکتر پژوهش و جناب آقای دکتر نفیسی که زحمت داوری این پایان‌نامه را پذیرفتند، بسیار متشکرم.

همچنین خود را مدیون محبت‌های صادقانه دوستان بسیار عزیزم خانم‌ها الهام راست‌بود و لمیبه حق‌طلب می‌دانم.

تقدیم به

والا ترین گنجینه‌های زندگیم؛

پدر و مادرم

چکیده

در این پژوهش، خصوصیات پلاسمای غباری و کاربردهای فراوان آن، رفتار ذرات غبار در محیط پلاسمای غباری، نیروهای وارد بر ذرات غبار، امواج موجود در پلاسمای غباری و رابطه پاشندگی آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از معرفی اجمالی تعدادی از ناپایداری‌های سیستم پلاسمای غباری، با استفاده از روش سیالی، اثرات برخوردی در پلاسمای غباری بررسی شده است. پاسخ پلاسمای غباری به میدان مغناطیسی خارجی، با استفاده از معادلات MHD ارائه شده است. نشان داده شده است که حضور ذرات غبار، سبب ایجاد جفت شدگی بین امواج مختلف در پلاسمای غباری مغناطیده می‌شود. در بررسی اثرات گرمایی در پلاسمای غباری، محدوده دمایی ذرات غبار، با مقایسه داده‌های آزمایشگاهی و نتایج رابطه پاشندگی، استخراج شده است. نشان داده شده است که ذرات غبار، دمای بسیار زیادی در مقایسه با سایر مولفه‌های پلاسما دارند و این دما با افزایش فشار گاز خنثی در پلاسما، کاهش می‌یابد. معادله پاشندگی سیستم بیم پلاسمای الکترون- پوزیترون با استفاده از تبدیلات لورنتس تانسور گذردهی دی الکتریک استخراج شده است. آهنگ رشد و آستانه پیشرفت ناپایداری، تحت شرط تشدید چرنکوفی و سیکلوترونی برای الکترون‌ها و پوزیترون‌ها محاسبه شده است. این نتیجه حاصل شده است که بیم الکترونی نسبیتی، تحت برهمکنش چرنکوفی و سیکلوترونی، می‌تواند پوزیترون‌ها را شتاب دهد.

پس از بیان ضرورت شناخت روش‌های مناسب برای انتقال ذرات غبار از محیط و یا کنترل میزان موجودی آنها، شتاب ذرات غبار باردار به کمک بیم یونی، با استفاده از تبدیلات لورنتس تانسور گذردهی دی الکتریک و معادله پاشندگی برای سیستم بیم پلاسمای یون- غبار مورد مطالعه قرار گرفته است. وابستگی ماکزیمم آهنگ رشد ناپایداری به پارامترهای پلاسما و قدرت میدان مغناطیسی، به همراه رسم نمودارهای مربوطه در دو بخش بیم یونی انرژی پایین و بیم یونی انرژی بالا نشان داده شده است.

فهرست مطالب

فصل اول: پلاسمای غباری **۱**

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ پلاسمای غباری چیست؟ ۳

۱-۳ مشخصه‌های ذرات غبار ۴

۱-۴ خصوصیات پلاسماهای غباری ۷

۱-۴-۱ شرط شبه خنثایی ۷

۱-۴-۲ حفاظ دبای ۷

۱-۴-۳ فرکانس‌های مشخصه ۹

۱-۴-۴ پارامتر جفت‌شدگی کولنی ۱۱

۱-۵ کاربردهای غبار و پلاسمای غباری ۱۱

۱-۵-۱ پلاسمای غباری و فضا ۱۲

۱-۵-۱-۱ حلقه‌های سیارات ۱۲

۱-۵-۱-۲ دنباله‌دارها ۱۴

۱-۵-۲ پلاسمای غباری و صنعت ۱۶

۱-۵-۲-۱ صنعت نیمرساناها ۱۶

۱-۵-۲-۲ همجوشی ۱۸

۱-۵-۳ پلاسماهای غباری در آزمایشگاه‌ها ۱۹

۱-۶ بوجود آمدن ذرات غبار در پلاسما ۲۰
۱-۶-۱ ماشین Q اصلاح شده ۲۲
۱-۷ باردار شدن ذرات غبار ۲۳
۱-۷-۱ جمع‌آوری الکترون‌ها و یون‌ها از پلاسما ۲۳
۱-۷-۲ گسیل الکترون ثانویه ۲۵
۱-۷-۳ فتو امیشن ۲۶
۱-۷-۴ واپاشی رادیواکتیویته ۲۷
۱-۸ نیروهای وارد بر ذره غبار ۲۷
۱-۸-۱ نیروی گرانش ۲۸
۱-۸-۲ نیروی الکتریکی ۲۸
۱-۸-۳ نیروهای کششی ۲۹
۱-۸-۴ نیروی ترموفورزی ۳۰
۱-۸-۵ نیروی اصطکاک ۳۱

فصل دوم: ناپایداری‌ها و اثرات آن در پلاسمای غباری ۳۲

۲-۱ مقدمه ۳۳
۲-۲ امواج در پلاسمای غباری ۳۴
۲-۲-۱ توصیف سیالی پلاسمای غباری ۳۴
۲-۲-۲ موج صوتی غباری (DA) ۳۵
۲-۲-۳ موج یونی- صوتی غباری (DIA) ۳۸
۲-۲-۴ امواج خطی در پلاسماهای غباری با جفت‌شدگی قوی ۳۹
۲-۳ ناپایداری‌های پلاسمای غباری ۴۰
۲-۳-۱ ناپایداری جریانی ۴۰
۲-۳-۲ ناپایداری دو جریانی ۴۱

۲-۳-۳ ناپایداری جریانی یونی- غباری بونمن ۴۲
۲-۳-۴ ناپایداری رایلی- تیلور ۴۲
۲-۳-۵ ناپایداری کلوین- هلمهولتز ۴۳
۲-۳-۶ ناپایداری خود گرانشی ۴۴
۲-۳-۷ ناپایداری یونی- صوتی غباری ۴۵
۲-۳-۸ ناپایداری الکترواستاتیک سیلکوترونی یونی (EIC) ۴۵
۲-۴ اثر برخوردها در پلاسمای غباری ۴۵
۲-۴-۱ امواج DIA ۴۶
۲-۴-۲ امواج DA ۴۷
۲-۴-۳ نتیجه‌گیری ۴۸
۲-۵ اثر میدان مغناطیسی خارجی در پلاسمای غباری ۴۹
۲-۵-۱ امواج الکترواستاتیکی ۴۹
۲-۵-۲ امواج الکترومغناطیسی ۵۱
۲-۵-۲-۱ امواج هیدرومغناطیسی ۵۳
۲-۵-۳ مدهای مخلوط: دینامیک غبار ۵۵
۲-۵-۴ نتیجه‌گیری ۵۸
۲-۶ اثرات حرارتی در پلاسمای غباری ۵۹

فصل سوم: شتاب دادن پوزیترون‌ها توسط بیم الکترونی نسبیتی ۶۳

۳-۱ مقدمه ۶۴
۳-۲ خصوصیات الکترومغناطیسی و معادله پاشندگی عمومی در پلاسمای همگن ۶۵
۳-۳ معادلات اساسی برای شتاب دادن ذرات باردار در پلاسما ۷۰
۳-۴ معادله پاشندگی شتاب دادن پوزیترون‌ها توسط بیم الکترونی نسبیتی ۷۲
۳-۴-۱ تشدید چرنکوفی برای پوزیترون‌ها و الکترون‌ها ۷۵

۳-۴-۲ تشدید چرنکوفی برای پوزیترون‌ها و تشدید سیکلوترونی برای الکترون‌ها ۷۶
۳-۴-۳ تشدید سیکلوترونی برای پوزیترون‌ها و تشدید چرنکوفی برای الکترون‌ها ۷۷
۳-۴-۴ تشدید سیکلوترونی برای پوزیترون‌ها و الکترون‌ها ۷۸
۳-۵ نتایج ۷۹

فصل چهارم: شتاب دادن ذرات غبار در پلاسمای غباری توسط بیم یونی ۸۳

۴-۱ مقدمه ۸۴
۴-۲ معادله پاشندگی شتاب دادن ذرات غبار توسط بیم یونی انرژی پایین ۸۶
۴-۲-۱ تشدید چرنکوفی برای ذرات غبار و یون‌ها ۸۹
۴-۲-۲ تشدید چرنکوفی برای ذرات غبار و تشدید سیکلوترونی برای یون‌ها ۹۱
۴-۲-۳ تشدید سیکلوترونی برای ذرات غبار و تشدید چرنکوفی برای یون‌ها ۹۱
۴-۲-۴ تشدید سیکلوترونی برای ذرات غبار و یون‌ها ۹۱
۴-۳ نتایج ۹۲
۴-۳-۱ وابستگی ماکزیمم آهنگ رشد به قدرت میدان مغناطیسی ۹۴
۴-۳-۲ وابستگی ماکزیمم آهنگ رشد به چگالی ذرات غبار ۹۶
۴-۴ معادله پاشندگی شتاب دادن ذرات غبار توسط بیم یونی انرژی بالا ۹۸
۴-۴-۱ تشدید چرنکوفی برای ذرات غبار و یون‌ها ۹۸
۴-۴-۲ تشدید چرنکوفی برای ذرات غبار و تشدید سیکلوترونی برای یون‌ها ۹۹
۴-۴-۳ تشدید سیکلوترونی برای ذرات غبار و تشدید چرنکوفی برای یون‌ها ۱۰۰
۴-۴-۴ تشدید سیکلوترونی برای ذرات غبار و یون‌ها ۱۰۱
۴-۵ نتایج ۱۰۲
۴-۵-۱ وابستگی ماکزیمم آهنگ رشد به قدرت میدان مغناطیسی ۱۰۳
۴-۵-۲ وابستگی ماکزیمم آهنگ رشد به چگالی ذرات غبار ۱۰۵
منابع و مراجع ۱۰۸
پیوست: محاسبه معادله پاشندگی سیستم یون- غبار و حل آن ۱۱۲

فهرست شکل‌ها

۱- ۱ حلقه‌های سیاره زحل[۸] ۱۳

۱- ۲ دنباله‌دار Kohoutek ۱۵

۱- ۳ کهکشان Sombrero و کهکشان گردابی(Whirlpool)[۸] ۱۵

۱- ۴ ذرات غبار تشکیل شده در طی رسوب‌گیری پلاسمایی ویفرهای سیلیکون[۴۱] ۱۷

۱- ۵ سحابی عقاب (Eagle Nebula)[۱۵] ۲۱

۱- ۶ مثالی از ذرات کربن رشد یافته در یک پلاسما[۵۲] ۲۲

۱- ۷ دیاگرام ماشین Q شامل استوانه پلاسما و توزیع‌کننده غبار[۴] ۲۲

۱- ۸ تعادل بین نیروی الکتریکی و نیروی گرانش در تخلیه الکتریکی rf[۸] ۲۹

۲- ۱ موج DA[۱۵] ۳۷

۲- ۲ مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مقادیر تئوری در پنج دمای متفاوت[۳۷] ۶۱

۲- ۳ مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با مقدار تئوری با در نظر گرفتن برخوردها[۳۸] ۶۲

۳- ۱ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای الکترون- پوزیترون[۵۱] ۸۰

۳- ۲ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای الکترون- پوزیترون[۵۱] ۸۰

۳- ۳ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای الکترون- پوزیترون[۵۱] ۸۱

۳- ۴ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای الکترون- پوزیترون[۵۱] ۸۱

۳- ۵ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای الکترون- پوزیترون[۵۱] ۸۲

۴- ۱ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۹۴

۴- ۲ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۹۴
۴- ۳ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۹۴
۴- ۴ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۹۴
۴- ۵ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۹۵
۴- ۶ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۹۵
۴- ۷ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۹۶
۴- ۸ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۹۶
۴- ۹ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۹۶
۴- ۱۰ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۹۶
۴- ۱۱ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۹۷
۴- ۱۲ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۹۷
۴- ۱۳ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۱۰۳
۴- ۱۴ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۱۰۳
۴- ۱۵ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۱۰۴
۴- ۱۶ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۱۰۴
۴- ۱۷ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۱۰۴
۴- ۱۸ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم در پلاسمای یون- غبار به قدرت میدان مغناطیسی ۱۰۴
۴- ۱۹ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۱۰۵
۴- ۲۰ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۱۰۵
۴- ۲۱ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۱۰۶
۴- ۲۲ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۱۰۶
۴- ۲۳ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۱۰۶
۴- ۲۴ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۱۰۶
۴- ۲۵ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۱۰۶
۴- ۲۶ وابستگی آهنگ رشد ماکزیمم به پارامترهای پلاسمای یون- غبار ۱۰۶

فهرست جداول

۱-۱ نیروهای خارجی وارد بر ذره غبار[۸] ۳۱
۱-۲ شرایط آزمایش توماس[۳۷] ۶۱
۲-۲ اندازه‌گیری‌های دمای غبار در موج صوتی- غباری[۴۰] ۶۲
۱-۳ وابستگی آهنگ رشد به پارامترهای پلاسما و قدرت میدان مغناطیسی در پلاسمای الکترون- پوزیترون[۵۱] ۷۹
۱-۴ وابستگی آهنگ رشد به پارامترهای پلاسما و قدرت میدان مغناطیسی در پلاسمای یون- غبار برای بیم یونی انرژی پایین ۹۲
۲-۴ وابستگی آهنگ رشد به پارامترهای پلاسما و قدرت میدان مغناطیسی در پلاسمای یون- غبار برای بیم یونی انرژی بالا ۱۰۲

فصل اول

پلاسمای غباری

۱-۱ مقدمه

واژه پلاسما از لغت یونانی plasso، به معنی هر چیز قالب‌ریزی شده یا ساخته شده است. این واژه اولین بار توسط لانگمور[1] در سال ۱۹۲۳ م. در مطالعه تخلیه الکتریکی گازها معرفی شد و به همین دلیل تعریف اولیه پلاسما مربوط به گاز یونیزه است. واژه پلاسما به گاز یونیزه‌ای اطلاق می‌شود که همه یا بخش قابل توجهی از اتم‌های آن یک یا چند الکترون از دست داده و به یون‌های مثبت تبدیل شده باشند. یا به گاز یونیزه کاملی که تعداد الکترون های آزاد آن تقریبا برابر با تعداد یون‌های مثبت آن باشد، پلاسما گفته می‌شود. پلاسما، متداول‌ترین حالت ماده در عالم هستی است (۹۹٪)، یعنی به صورت گاز الکتریسیته‌داری است با اتم‌هایی که به یون‌های مثبت و الکترون‌های منفی تجزیه شده‌اند. همین‌که جو زمین را ترک می‌کنیم، با پلاسمایی مواجه می‌شویم که از کمربندهای تابشی وان‌آلن و بادهای خورشیدی تشکیل شده است. از طرف دیگر، پلاسما در زندگی روزمره به چند نمونه محدود می‌شود: آذرخش، فروغ ملایم شفق شمالی، گاز داخل لامپ فلوئورسان یا چراغ نئون و یونیدگی مختصری در خروجی موشک. محیط زندگی ما آن ۱٪ جهان است که در آن پلاسما به طور طبیعی یافت نمی‌شود.

پلاسما گاز شبه خنثایی از ذرات باردار و خنثی است که رفتار جمعی از خود نشان می‌دهد. منظور از رفتار جمعی، حرکت‌هایی است که نه تنها به شرایط موضعی بلکه به حالت پلاسما در ناحیه‌های دور نیز بستگی دارد (به دلیل نیروی بلند برد کولنی). به دلیل همین رفتار جمعی پلاسما از اثرات خارجی متأثر نمی‌شود.

شرط شبه خنثایی نیز بیانگر آن است که پلاسما آنقدر خنثی است که می‌توان فرض کرد $n_i \approx n_e \approx n$ که در آن، n چگالی مشترک است و چگالی پلاسما نامیده می‌شود، ولی آنقدر خنثی نیست که همه نیروهای الکترومغناطیسی مورد توجه صفر باشند.

[1] - Langmuir

اگر به پلاسما، ذراتی ریز (غبار) با اندازه نانو یا میکرون اضافه شود پلاسمای غباری بوجود می‌آید. حضور ذرات غبار می‌تواند مدهای ارتعاشی پلاسما را به حد قابل توجهی تغییر داده و مدهای جدیدی نیز بوجود آورد.

در این فصل، پس از معرفی پلاسمای غباری و کاربردها و مظاهر گسترده و وسیع آن در عالم هستی، روش‌های بوجود آمدن ذرات غبار و چگونگی باردار شدن آنها را بیان می‌کنیم و سپس به بررسی رفتار ذرات و دینامیک آنها در محیط پلاسمای غباری می‌پردازیم.

۱-۲ پلاسمای غباری چیست؟

اولین بار لانگمور در سال ۱۹۲۳ م. در سخنرانی خود به اثر جالب پخش شدن بخار تنگستن در پلاسما اشاره و اولین مشاهده آزمایشگاهی از ذرات غبار را ثبت کرد. اما تحقیقات جدی روی پلاسمای غباری، از سال ۱۹۹۰ م. آغاز شد.

به مخلوطی از یون‌ها، الکترون‌های آزاد و اتم‌های خنثی، به همراه ذرات غبار باردار، پلاسمای غباری می‌گویند. چنین سیستمی با نام‌های دیگری، مثل "پلاسمای مرکب (کمپلکس)[۲]"، "پلاسمای کلوئیدی[۳]"، "پلاسمای چگال با فاز پاشنده" و "پلاسمای دمای پایین" نیز شناخته می‌شود. پلاسماهای غباری، دمای پایینی دارند و از لحاظ الکتریکی، به طور کامل یا جزئی یونیزه هستند[۴].

ذرات غبار و پلاسمای غباری در جهان ما و در منظومه شمسی، همه جا وجود دارند؛ مثلا در نزدیکی اتمسفر زمین و مزوسفر به شکل نانوذرات آئروسل[۴] و ذرات یخ ناخالص، در حلقه‌های غبار سیارات (مثل زحل[۵] و نپتون[۶])، در اتمسفر مریخ[۷] به شکل پاره‌های غبار[۸]، در انتهای کمای ستاره‌های دنباله‌دار، بر سطح ماه (ناشی از برهمکنش‌های بادهای خورشیدی و ماه)، در محیط‌های نجومی (به شکل غبار بین

2- complex Plasma
3- colloidal plasmas
4- aerosol
5- Saturn
6- Neptune
7- Martian
8- dust devils

ستاره‌ای، داخل و اطراف خوشه‌های کهکشان‌ها)، در کره زمین در خروجی سفینه‌های فضایی و موشک‌ها، در پلاسماهای پردازشی مورد استفاده در صنعت (مثل ریز تراشه‌ها) و پلاسماهای غباری تولید شده در آزمایشگاه‌ها (مثل تخلیه‌های الکتریکی).

پلاسمای غباری همچنین در مجاورت قمرهای مصنوعی و ایستگاه‌های فضایی و در دستگاه‌های هسته‌ای حرارتی با محدودیت مغناطیسی یافت می‌شود[۵].

حتی آتش که حدود ۸۰ سال قبل به عنوان حالت چهارم ماده معرفی شده بود، به دلیل حضور ذرات بسیار ریز ($\sim 100\ \mathring{A}$) از کربن نسوخته (دوده)، قابل توجیه است[۴].

در اغلب موارد، پلاسما با ذرات غبار همزیست است. این ذرات ممکن است به بزرگی یک میکرون باشند؛ آنها خنثی نیستند و اینکه از لحاظ الکتریکی منفی یا مثبت باشند به پارامترهای پلاسمای دربرگیرنده آنها بستگی دارد. مثل دما، غلظت الکترون، غلظت یون و ... .

حضور گسترده پلاسماهای غباری در عالم هستی و خصوصیات فیزیکی بی‌نظیر آن مثل سادگی تولید، مشاهده و کنترل پارامترها، قابلیت اندازه‌گیری‌ها در سطح جنبشی و نیز خصوصیات غیرمعمول آن مثل عدم ثبات بار ذره غبار، آزادی سیستم‌های پلاسمایی، اتلاف بالا، سازماندهی و تشکیل ساختارهای منظم، دانشمندان عرصه‌های مختلف علوم را به بررسی روز افزون این شاخه از فیزیک، علاقمند کرده است.

۱-۳ مشخصه‌های ذرات غبار

ذرات غبار انواع مختلفی دارند و حضور آنها در پلاسما، منجر به پدیده‌های متفاوتی می‌شود. تقریبا هر ماده ناخالصی در محیط پلاسما را می‌توان به عنوان غبار در نظر گرفت. غبارها علاوه بر اندازه، در شکل-گیری شبکه‌های کریستالی، خواص شیمیایی (خالص یا مرکب بودن)، شکل (کروی، استوانه‌ای، فراکتال) و خواص فیزیکی (دی‌الکتریک، رسانا، نیمرسانا) با هم تفاوت دارند. ذرات غبار جرم زیادی دارند- بیلیون-ها بار سنگین‌تر از پروتون‌ها- و محدوده اندازه‌های آنها از نانومتر تا میلیمتر است. ذرات غبار، ممکن است فلزی، رسانا یا نیمرسانا باشند یا از ذرات یخ تشکیل شده باشند.

ذرات غبار هر اندازه و شکلی که داشته باشند (مگر اینکه ساخت دست بشر باشند)، وقتی از دور مشاهده می‌شوند، می‌توانند به عنوان ذرات نقطه‌ای در نظر گرفته شوند[۴].

ذرات غبار براساس اندازه به چهار دسته کلی تقسیم می‌شوند:

۱- نانو ذرات: معمولا در ابتدای تولید غبار در پلاسما، نانو ذرات بوجود می‌آیند. تولید این ذرات معمولا به منزله شکل‌گیری هسته (Nucleation) برای اتم‌های موجود در پلاسماست. نانو ذرات از نظر شکل بسیار نامنظم بوده و در صورت غیرخنثی بودن، بار بسیار کوچکی (در حد چند بار الکترون) حمل می‌کنند. چگالی نانوذرات در حد $۱۰^{۸} cm^{-۳}$ بوده و به خاطر جرم بسیار کمی که دارند، اثر نیروی گرانش آنها در برابر نیروی لورنتس، قابل صرف‌نظر کردن است.

۲- ذرات متوسط: نانو ذره‌ها معمولا در محیط پایدار نیستند و با برخورد به یکدیگر، تشکیل دسته‌ها و خوشه‌هایی می‌دهند که آنها را به عنوان ذرات متوسط می‌شناسیم. ابعاد این دسته‌ها می‌تواند تا حدود صد نانومتر هم باشد و به خاطر سطح مقطع برخورد بزرگتر با الکترون‌های پلاسما، می‌توانند باری در حد ده تا چند صد الکترون داشته باشند، چگالی این ذرات در حد $۱۰^{۶} cm^{-۳}$ است.

۳- ذرات بزرگ: بیشتر پدیده‌هایی که در آزمایشگاه مشاهده شده‌اند، به خاطر حضور این ذرات پلاسما هستند که ابعادی در حد میکرون دارند و معمولا از بیرون به محیط پلاسما وارد می‌شوند. این ذرات می‌توانند بار زیادی (ده تا صد هزار میکرو کولن) حمل کنند و به همین دلیل، نیروها و برهمکنش‌های کولنی، در تعریف دینامیک آنها مهمند. پدیده‌هایی مثل تشکیل شبکه‌های پایدار بلوری، که به آن کریستال کولن هم گفته می‌شود، در ذرات بزرگ دیده می‌شوند.

۴- ذرات بسیار بزرگ: در توصیف پدیده‌های کیهان شناسی، اجسامی در ابعاد متر و کیلومتر هم، به صورت غبار در نظر گرفته می‌شوند؛ مثل برخی از سحابی‌ها[۶۸].

سه مقیاس طولی مشخصه برای محیط پلاسمای غباری می‌توان در نظر گرفت: r_d شعاع ذره غبار، λ_D: طول دبای پلاسما (صفحه ۷) و a: فاصله متوسط بین ذره‌های غبار. اگر $r_d \ll \lambda_D < a$ باشد، ذرات غبار به عنوان مجموعه‌ای از ذرات ایزوله حفاظدار در نظر گرفته می‌شوند ("غبار در پلاسما"[۹] و اگر $r_d \ll a < \lambda_D$ باشد، ذرات غبار باردار، در رفتارهای جمعی شرکت می‌کنند و "پلاسمای غباری[۱۰]" داریم[۴و۷].

[9] - dust in plasma

[10] - dusty plasma

بارزترین تفاوت بین پلاسمای غباری و پلاسمای معمولی، بار زیاد ذره غبار است: $q_d=(10^3...10^5)e$. ذرات غبار به دلیل شار بزرگتر الکترون‌ها نسبت به یون‌ها، بار منفی بزرگی بدست می‌آورند و می‌توانند برهم اثر بگذارند. برهمکنش بین ذرات غبار با زمینه الکترون‌ها و یون‌ها، استتار می‌شود. ذرات غبار با یون‌های منفی تفاوت دارند، از این لحاظ که بارشان یک کمیت ثابت نیست. تفاوت دیگر، نسبت کوچک بار به جرم ذرات غبار (q_d/m_d) است. یک ذره غبار با شعاع $1\mu m$، دارای بار $q_d \sim 10^3$ و جرم m_d $\sim 10^{-11}$g است. این بدان معنی است که نسبت بار به جرم برای مولفه غبار، فوق‌العاده کوچک است[۲۴].

ذرات غبار، منابع باز ترکیب برای الکترون‌ها و یون‌های پلاسما (و اغلب برای الکترون‌ها) هستند (مثل گسیل الکترون ثانویه). این نشان می‌دهد که مولفه‌های غبار می‌توانند تاثیر قابل توجهی روی تعادل یونیزاسیون پلاسما داشته باشند. علاوه براین، به دلیل ماهیت تصادفی فرآیندهای باردار کردن ذرات غبار، این ذرات، همیشه نوسان بار داشته و معمولا بار ثابتی ندارند و از آنجا که همواره در حال برهمکنش با پلاسمای اطرافشان هستند، می‌توان بار آنها را تابعی از شرایط پلاسما دانست. در واقع اندرکنش غبارها با ذرات پلاسماست که خصوصیات منحصر به فرد پلاسماهای غباری را رقم می‌زند. مثلا در یک پلاسمای تخلیه الکتریکی آزمایشگاهی، برهمکنش غبارها با شار یونی در نزدیکی الکترودها باعث می‌شود که غبارها در دام دنباله ناشی از یکدیگر افتاده و دو غبار با بار همنام، یکدیگر را جذب کنند، چیزی که از دیدگاه الکترودینامیکی استاندارد در خلا به هیچ وجه امکان‌پذیر نیست[۶۸].

حضور ذرات غبار باردار، نه تنها امواج فرکانس پایین پلاسما را اصلاح می‌کند، بلکه انواع جدیدی از امواج غباری فرکانس پایین را نیز وارد می‌کند.

۱-۴ خصوصیات پلاسماهای غباری

۱-۴-۱ شرط شبه خنثایی[۱۱]

از لحاظ ماکروسکوپی، زمانی که هیچ اختلال خارجی (مثلا توزیع بار خارجی) وجود نداشته باشد، یک پلاسمای غباری، همانند یک پلاسمای الکترون- یون خنثی است. به عبارتی در حالت تعادل، اگر هیچ نیروی خارجی وجود نداشته باشد، بار الکتریکی خالص در پلاسمای غباری صفر است. لذا، در حالت تعادل، شرط شبه خنثایی به صورت زیر بیان می‌شود:

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

که در آن n_{s0} چگالی غیراختلالی گونه s (معادل e برای الکترون‌ها، i برای یون‌ها، و d برای ذرات غبار) می‌باشد. $q_i = z_i e$ بار یون است (در حالت سکون $z_i = ۱$) و $q_d = z_d e$ برای ذره غبار مثبت و $q_d = -z_d e$ برای ذره غبار منفی که e اندازه بار الکترون و z_d تعداد بار روی سطح ذره غبار است. مثلا وقتی یک ذره غبار باری معادل با هزار تا چند هزار برابر بار الکترون بدست آورد، $z_d n_{d0}$ را می توان با n_{i0} مقایسه کرد حتی اگر $n_{d0} \langle\langle n_{i0}$ باشد.

۱-۴-۲ حفاظ دبای[۱۲]

قدیمی‌ترین کار با پلاسما توسط لانگمور و تانکس[۱۳] در دهه ۱۹۲۰ م. انجام شد. غلاف اطراف الکترود موجود در لوله خلا، به صورت یک لایه تاریک قابل رویت بود. اینجا بود که پدیده حفاظ کشف شد[۱].

یکی از مشخصات اساسی پلاسما، توانایی آن برای دفع پتانسیل‌های الکتریکی است که به آن اعمال می‌شود.

---

[11] - Macroscopic neutrality

[12]- Debye shielding

[13] - Tonks

برای محاسبه ضخامت تقریبی حفاظ دبای، پتانسل ابر $\Phi_s(r)$را در مرکز $(r=o)$، برابر Φ_{so} فرض می‌کنیم. و نسبت m_d/m_i را آنقدر بزرگ در نظر می‌گیریم که اینرسی ذرات غبار، از حرکات آنها جلوگیری کند. الکترون‌ها و یون‌ها را در تعادل ترمودینامیکی موضعی فرض می‌کنیم به طوریکه چگالی-های تعداد آنها یعنی n_e و n_i، از توزیع بولتزمن پیروی کنند. به صورت:

$$n_e = n_{eo}\exp\left(\frac{e\Phi}{k_B T_e}\right) \qquad (۲-۱)$$

و

$$n_i = n_{io}\exp\left(-\frac{e\Phi}{k_B T_i}\right) \qquad (۳-۱)$$

که n_{eo} و n_{io} ، به ترتیب چگالی‌های تعداد الکترون و یون، دور از ابر و k_B ثابت بولتزمن و T_s دمای گونه-های s پلاسماست. ذرات غبار سنگین، فقط یک زمینه یکنواخت از بارهای منفی را تشکیل می‌دهند. معادله پوآسون:

$$\nabla^2\Phi_s = 4\Pi(e n_e - e n_i - q_d n_d) \qquad (۴-۱)$$

که n_d چگالی تعداد ذره غبار است. بر طبق فرض، چگالی تعداد ذره غبار در داخل و خارج ابر یکسان است؛ یعنی: $q_d n_d = q_d n_{do} = e n_{eo} - e n_{io}$. با جایگزینی (۱-۲) و (۱-۳) در معادله (۱-۴) و با فرض $\frac{e\Phi_s}{k_B T_e} \langle\langle 1$ و $\frac{e\Phi_s}{k_B T_i} \langle\langle 1$ ،داریم:

$$\nabla^2\Phi_s = \left(\frac{1}{\lambda_{D_e}^2} + \frac{1}{\lambda_{D_i}^2}\right)\Phi_s \qquad (۵-۱)$$

که $\lambda_{Di} = \sqrt{k_B T_i / 4\Pi\, n_{i0} e^2}$ و $\lambda_{De} = \sqrt{k_B T_e / 4\Pi\, n_{e0} e^2}$ شعاع دبای الکترونی و یونی هستند. البته ممکن است دو تقریب قبل، در ناحیه $r=0$ معتبر نباشد. در هر صورت، این ناحیه- شیت یا پوشش- که پتانسیل خیلی سریع در آن افت می‌کند، در ضخامت ابر سهیم نیست. با فرض $\Phi_s = \Phi_{s0}\exp(-r/\lambda_D)$، از معادله (۱-۵) شعاع دبای پلاسمای غباری به صورت زیر بدست می‌آید:

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

λ_Dضخامت پوشش یا فاصله حفاظ است. اگر ذرات غبار به طور منفی باردار شده باشند، $n_{e0} \langle\langle n_{i0}$ و $T_e \geq T_i$ لذا $\lambda_{De} \rangle\rangle \lambda_{Di}$ است و در نتیجه $\lambda_D \cong \lambda_{Di}$. یعنی ضخامت پوسته در پلاسمای غباری، عموما