



دانشگاه بیرجند

دانشکده علوم

گروه فیزیک

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

عنوان:

رشته‌ای شدن پلاسمای غباری حامل جریان

استاد راهنما:

دکتر سید محمد خراشادی زاده

استاد مشاور:

دکتر علیرضا نیکنام

نگارش:

طیبه حق طلب

بهمن ماه ۱۳۸۹

قدردانی و سپاس:

حمد و سپاس خداوند بلند مرتبه را که فرصتی عنایت فرمود تا برگی از عظمت خلقت و آفرینش را مطالعه نمایم و پله ای دیگر از مدارج علمی را بیامیم که این خود نیز راهی به سوی اوست. اکنون بر خود لازم می دانم تا مراتب سپاس و قدردانی خود را از بزرگوارانی به جا آورم که در این مسیر یاری نمودند:

استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر سید محمد خراشادی زاده و استاد مشاور ارجمندم جناب آقای دکتر علیرضا نیکنام که بارها بنمودهای دلسوزانه شان راهنمایی این تحقیق را تقبل نمودند و در تمامی مراحل آن مرا یاری نمودند. به پاس زحمات بی دریغشان بهت راهنمای خردمندان در تمام مراحل انجام کار از حضرت حق جل و علا سعادت و موفقیت ایشان را آرزو مندم و امیدوارم بهواره بر توفیقشان پیفزاید.

از اساتید محترم جناب آقای دکتر کاظم نصیبی و جناب آقای دکتر رضا پژوهش به جهت تلاش های دلسوزانه، و قبول زحمت داوری این مجموعه کمال تشکر و سپاسگذاری را دارم. عمرشان مستدام و بهرویشان روز افزون باد.

در خاتمه از تمام عزیزان و بزرگوارانی که مشوق و راهنمای من بوده اند، خانواده عزیزم که در این مدت همراهم بودند و تمامی دوستانم نهایت سپاس و قدردانی را دارم و برایشان سعادت و بهروزی آرزو مندم .

تقدیم به:

پدر و مادر بزرگوارم

که هر چه دارم حاصل تربیت مشفقانه و دعای خیر آنهاست.

چکیده

این پایان نامه از چهار فصل تشکیل شده است. فصل اول به معرفی پلاسمای غباری و مجموعه فرآیندهای آن اختصاص دارد. در فصل دوم، رشته‌ای شدن غیرخطی پلاسمای حامل جریان و پلاسمای غباری حامل جریان بر خوردی و غیرنسبیتی در ناحیه فرکانس پخشی مورد تحقیق قرار می‌گیرد. حالت‌های ایستای میدان مغناطیسی که به طور تناوبی قرار گرفته‌اند، به وسیله‌ی معادله لینارد توضیح داده می‌شود. تحول فضایی و زمانی میدان الکتریکی و مغناطیسی و تغییرات چگالی الکترونی در نواحی خطی و غیرخطی بررسی می‌شود. مکانیسم تشکیل رشته مطرح شده و اثرات حرارتی، برخوردی و تأثیر جرم یونها در آهنگ رشد رشته‌ها و همچنین زمان اشباع در پلاسمای حامل جریان مورد بحث قرار می‌گیرد. در فصل سوم، اثرات حرارتی ذرات باردار در رشته‌ای شدن پلاسمای غباری حامل جریان در ناحیه فرکانسی صوتی - غباری با استفاده از رسانندگی تبدیل یافته‌ی لورنتس و تانسور گذردهی دی-الکتریک پلاسمای غباری، در چارچوب آزمایشگاه بررسی شده است. به دست آوردن رابطه پاشندگی و در نظر گرفتن ناپایداری رشته‌ای شدن، زمان تشکیل ساختار رشته‌ای شدن و آستانه‌ی این ناپایداری نیز تعیین می‌گردد. به علاوه، نشان داده شده است که لایه‌های جریان به رشته‌های جریانی مجزا تقسیم می‌شود.

در فصل چهارم، رشته‌ای شدن موج صوتی - غباری حامل جریان، در یک پلاسمای غباری بر خوردی همراه با نوسانات بار غبار با استفاده از نظریه سیالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین نشان داده شده است، ناپایداری رشته‌ای شدن هنگامی تشکیل می‌شود که تعداد الکترون‌های آزاد کاهش یافته و نیروی کشش یونی قوی باشد. به عبارتی دیگر، در مراحل اولیه تشکیل حفره در جایی که نیروی کشش یونی بر نیروی الکتریکی غالب است، ناپایداری رشته‌ای شدن پدیدار می‌شود. همچنین زمان تشکیل ساختار رشته‌ای شدن و آستانه پیشرفت این ناپایداری نیز به دست آمده است.

فهرست مطالب

۱	مقدمه‌ای بر پلاسمای غباری	۱
۲	مقدمه	۱.۱
۲	مشخصه‌های پلاسمای غباری	۲.۱
۳	خنثی بودن ماکروسکوپی (شرط شبه خنثی بودن)	۱.۲.۱
۴	حفاظ دبابی	۲.۲.۱
۶	فرکانس‌های مشخصه	۳.۲.۱
۹	پارامتر جفت شده کولنی	۴.۲.۱
۹	پلاسمای غباری در فضا	۳.۱
۱۱	فرآیندهای باردار شدن دانه‌های غبار	۴.۱
۱۲	برهمکنش دانه‌های غبار با ذرات گازی پلاسما	۱.۴.۱
۱۵	نشر ثانویه الکترون و نشر فوتونی	۲.۴.۱
۱۶	نیروهای وارد بر دانه‌های غبار	۵.۱
۱۷	نیروی گرانشی	۱.۵.۱
۱۷	نیروی الکتریکی	۲.۵.۱
۱۸	نیروی کشش خنثی	۳.۵.۱
۱۹	نیروی کشش یونی	۴.۵.۱
۲۰	نیروی ترموفورزی	۵.۵.۱

۶.۵.۱	نیروی فشار تابشی	۲۱
۶.۱	کاربردهای پلاسمای غباری	۲۲
۱.۶.۱	کریستال غباری	۲۲
۲.۶.۱	صنعت نیمرسانا	۲۳
۳.۶.۱	پلاسمای همجوشی	۲۴
۷.۱	امواج در پلاسمای غباری	۲۵
۱.۷.۱	موج صوتی-غباری (<i>DAW</i>)	۲۶
۲.۷.۱	موج یونی - صوتی غباری (<i>DIAW</i>)	۲۹
۲	رشته‌ای شدن غیرخطی پلاسمای غباری بر خوردی حامل جریان	۳۳
۱.۲	ناپایداری رشته‌ای شدن	۳۴
۲.۲	رشته‌ای شدن غیرخطی پلاسمای حامل جریان	۳۶
۳.۲	معادلات حاکم بر ساختار غیرخطی در پلاسمای غباری حامل جریان	۴۱
۴.۲	ناپایداری رشته‌ای شدن در پلاسمای غباری بر خوردی حامل جریان	۴۵
۵.۲	تحول فضایی و زمانی ناپایداری رشته‌ای شدن در پلاسمای حامل جریان	۴۸
۳	رشته‌ای شدن صوتی - غباری پلاسمای غباری حامل جریان	۵۳
۱.۳	مقدمه	۵۴
۲.۳	معادلات اساسی در رشته‌ای شدن پلاسمای غباری	۵۵
۳.۳	معادله پاشندگی رشته‌ای شدن صوتی - غباری پلاسمای حامل جریان	۵۷
۴.۳	رشته‌ای شدن صوتی-غباری پلاسمای حامل جریان در حد طول موج کوتاه	۶۰
۵.۳	رشته‌ای شدن صوتی - غباری پلاسمای حامل جریان در حد طول موج بلند	۶۳
۴	رشته‌ای شدن موج صوتی - غباری در پلاسمای بر خوردی	۶۴
۱.۴	مقدمه	۶۵

۶۶	حفره‌های غباری	۲.۴
۶۸	فرمول بندی موج صوتی - غباری در پلاسمای برخوردی	۳.۴
۷۱	رابطه پاشندگی موج صوتی - غباری در پلاسمای برخوردی	۴.۴
۷۳	مد ناپایدار	۵.۴
۷۵	ناپایداری رشته‌ای شدن موج صوتی - غباری در پلاسمای برخوردی	۶.۴

۵ بحث و نتیجه گیری ۷۸

لیست تصاویر

۱۰	دنباله دار هالی - بوپ.	۱.۱
۱۱	باردار شدن دانه غبار	۲.۱
۱۳	برخورد گذری ذره j پلاسما، با یک دانه غبار باردار هنگامی که $q_j q_d < 0$ است [۱].	۳.۱
۱۶	نیروهای خارجی وارد بر ذرات غبار [۳].	۴.۱
۱۹	نیروی کشش یونی	۵.۱
۲۶	موج صوتی - غباری [۶].	۶.۱
۳۲	موج یونی - صوتی (خط پر). موج یونی - صوتی غباری (خط چین).	۷.۱
۳۴	مدهای وایبل، دو جریانی و رشته‌ای شدن [۸].	۱.۲
۳۷	مدل ورقه‌ای پلاسمای حامل جریان [۱۲, ۱۵].	۲.۲
۴۸	مقاطع عرضی فضایی و زمانی میدان مغناطیسی $B(x, t)$ [۱۲].	۳.۲
۴۹	مقاطع عرضی میدان مغناطیسی بدون بعد در زمان‌های مختلف $B(x)$ [۱۲].	۴.۲
۴۹	مقاطع عرضی $B(x)$ در رژیم خطی (خطوط نقطه چین) و غیر خطی (خطوط توپر) [۱۴].	۵.۲
۵۰	مقاطع عرضی فضایی و زمانی تغییرات چگالی الکترونی $\delta n/n$ [۱۲].	۶.۲
۵۰	مقاطع عرضی تغییرات چگالی الکترونی بدون بعد، در زمان‌های مختلف [۱۲].	۷.۲
۵۱	تغییرات چگالی الکترونی در رژیم خطی (خطوط نقطه چین) و غیر خطی (خطوط توپر)	۸.۲
۵۱	مقاطع عرضی فضایی و زمانی میدان الکتریکی $E(x, t)$ [۱۲].	۹.۲
۵۲	مقاطع عرضی میدان الکتریکی $E_x(x)$ بدون بعد در زمان‌های مختلف [۱۲].	۱۰.۲

۶۶	حفره غباری [۱].	۱.۴
۶۷	حفره غبار همراه با یونیزاسیون برخورد الکترون‌ها [۴۱].	۲.۴

فصل ۱

مقدمه‌ای بر پلاسمای غباری

۱.۱ مقدمه

واژه پلاسما برای اولین بار توسط تونگ و لانگمیر^۱ در سال ۱۹۲۹ ابداع شد و به محیطی از گاز یونیزه متشکل از یون و الکترون گفته می‌شود [۱]. این محیط ۹۹٪ جهان را تشکیل می‌دهد و حالت چهارم ماده نامیده می‌شود. در حوالی سال ۱۹۹۰ آنجلیز^۲ با ارائه مقاله‌ای وجود نوع دیگری از پلاسما را گزارش داد که پلاسمای غباری نام گرفت. پلاسمای غباری به عنوان پلاسمای دمای پایین^۳ تعریف می‌شود و از گازهای خنثی، ذرات غبار، یون و الکترون تشکیل شده است. ذرات غبار دارای جرمی بزرگ در حدود 10^9 برابر جرم پروتون و اندازه‌ای در حدود نانومتر تا میکرومتر می‌باشند. جنس ذرات غبار در نواحی مختلف متفاوت است و در اندازه‌های متفاوتی یافت می‌شوند مگر اینکه ساخته دست بشر باشند [۱]. به عنوان نمونه در مزوسفر زمین اغلب از جنس یخ و در آگروزو رآکتورهای فضائی به صورت گرده‌های اکسید آلومینیوم می‌باشند. به دلیل وجود ذرات غبار اضافی به پلاسمای غباری پلاسمای مختلط^۴ نیز گفته می‌شود [۱].

ذرات غبار در پلاسما به دلیل شار بزرگ الکترون‌ها نسبت به یون‌ها، بار منفی بزرگی به دست می‌آورند، به علت وجود همین بار بزرگ می‌توانند بر یکدیگر تأثیر بگذارند. این ذرات در پلاسما تحت تأثیر نیروهای مختلفی قرار می‌گیرند. وجود این گونه ذرات دانشمندان را به ردیف جدیدی از اثرات کیفی تحقیق نشده رهنمون می‌سازد.

۲.۱ مشخصه‌های پلاسمای غباری

یک پلاسما با ذرات یا دانه‌های غبار را با توجه به چندین مشخصه طولی، می‌توان پلاسمای غباری نامید. این مشخصه‌های طولی عبارتند از: شعاع دانه غبار (r_d)، فاصله متوسط بین دانه‌ها (a)، شعاع دمای پلاسما (λ_D) و ابعاد پلاسمای غباری.

هنگامی که شرط $r_d \ll \lambda_D < a$ برقرار باشد، دانه‌های غبار به صورت مجموعه دانه‌های حفاظ-

^۱ Tonks and Langmuir

^۲ Angelis

^۳ Low-Temperature plasmas

^۴ plasma complex

دار منزوی بوده و غبار در پلازما ایجاد می‌شود. اگر شرط $a < \lambda_D \ll r_d$ برقرار باشد، در این حالت به پلازما، پلاسمای غباری گفته می‌شود و ذرات غبار در رفتارهای دسته جمعی شرکت می‌کنند. وقتی پلازما با دانه‌های غبار ایزوله ($a \gg \lambda_D$) در نظر گرفته شود، پلاسمائی غیر همگن خواهیم داشت. در مقابل، هنگامی که شرایط ($a \ll \lambda_D$) در نظر گرفته شود، دانه‌های غبار مانند ذرات باردار شده سنگین، شبیه چند یونی‌های مثبت و منفی رفتار خواهند کرد [۱].

برای درک درستی از پلاسمای غباری برخی از مشخصات اساسی همچون خنثی بودن ماکروسکوپی، حفاظ دبابی، مشخصه فرکانسی و پارامتر جفت‌شدگی کولنی و ... را به تفصیل بررسی می‌کنیم.

۱.۲.۱ خنثی بودن ماکروسکوپی (شرط شبه خنثی بودن)

هنگامی که هیچ توزیع بار خارجی وجود نداشته باشد، پلاسمای غباری مانند پلاسمای یون-الکترون از لحاظ ماکروسکوپی خنثی^۵ خواهد بود. به عبارتی دیگر، در حالت تعادل بدون حضور نیروهای خارجی بار الکتریکی خالص در پلاسمای غباری صفر خواهد بود [۱].

بنابراین در حالت تعادل شرط شبه خنثائی به صورت زیر می‌باشد:

$$q_i n_i = e n_e - q_d n_d. \quad (1.1)$$

n_s چگالی غیر اختلالی مربوط به ذره s است که برای الکترون‌ها e ، برای یون‌ها i و برای دانه‌های غبار d می‌باشد. $q_i = z_i e$ بار یون و $q_d = z_d e (-z_d e)$ بار دانه‌های غبار در حالتی که دانه‌های غبار به صورت مثبت (منفی) باردار شده‌اند که در آن e اندازه بار الکترون و z_d تعداد بارهای موجود روی سطح دانه غبار می‌باشند. دانه غبار باری در حدود هزار تا چندین هزار برابر بار الکترون به دست می‌آورد. بنابراین هنگامی که $n_i \gg n_d$ است، $z_d n_d$ قابل مقایسه با n_i خواهد بود. در اکثر پلاسمای آزمایشگاهی و فضائی اغلب الکترون‌های زمینه روی سطح دانه‌های غبار می‌چسبند. در نتیجه در محیط پلازما با کمبود الکترون مواجه خواهیم شد. بنابراین برای دانه‌های غبار با بار منفی

^۵Macroscopic neutrality

معادله (۱.۱) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$n_i \approx z_d n_d. \quad (2.1)$$

۲.۲.۱ حفاظ دبابی

یکی از مشخصات اساسی پلازما توانائی آن برای نگه داشتن میدان الکتریکی یک ذره باردار یا به عبارتی سطحی با پتانسیل غیر صفر است. این مشخصه فاصله‌ای در اطراف ذره باردار می‌باشد که در این ناحیه میدان الکتریکی توسط هر ذره باردار دیگری احساس می‌شود. نحوه محاسبه حفاظ دبابی^۶ در زیر آورده شده است [۱].

برای تصور میدان الکتریکی در اطراف دانه غبار، گلوله بارداری در درون پلاسمای غباری در نظر گرفته می‌شود. گلوله ذرات با بار مخالف را جمع می‌کند. یعنی اگر بار گلوله مثبت باشد ابری از الکترون‌ها و ذرات غبار با بار منفی در اطراف آن جمع می‌شود و بالعکس. همچنین فرض می‌شود، ترکیب مجددی از ذرات پلازما روی سطح گلوله اتفاق نمی‌افتد. اگر پلازما سرد باشد و هیچگونه حرکت حرارتی وجود نداشته باشد، تعداد بار ابر برابر با تعداد بار گلوله می‌گردد. در این صورت عمل حفاظ کامل می‌شود و هیچ میدان الکتریکی در حجم پلازما در خارج از ناحیه ابرها وجود نخواهد داشت. از طرف دیگر، اگر دما معین و محدود باشد ذراتی که در لبه ابر جایی که میدان الکتریکی ضعیف است قرار گرفته باشند، انرژی حرارتی کافی برای فرار از ابر یا به عبارتی چاه پتانسیل الکتروستاتیکی پیدا می‌کنند. در این صورت لبه ابر در شعاعی واقع می‌شود که در آنجا انرژی پتانسیل تقریباً برابر با انرژی حرارتی $k_B T_s$ ، ذرات است (k_B ثابت بولتزمن و T_s دمای ذره نوع s پلازما است) و حفاظ کامل نیست و یک پتانسیل الکتریکی محدود وجود خواهد داشت.

برای محاسبه ضخامت تقریبی ابر غبار فرض می‌شود، پتانسیل $\phi_s(r)$ در مرکز ابر ($r = 0$) برابر ϕ_s است. بعلاوه نسبت جرم غبار به جرم یون m_d/m_i به قدری بزرگ است که اینرسی ذرات غبار از حرکت عمده آنها جلوگیری می‌کند. دانه‌های غبار خیلی سنگین و باردار پس‌زمینه یکنواختی با بار

^۶Debye shielding

منفی را تشکیل می‌دهند. فرض می‌شود یون‌ها و الکترون‌ها در تعادل حرارتی موضعی قرار دارند و چگالی آنها، n_e و n_i از توزیع بولتزمن پیروی می‌کند. یعنی:

$$n_e = n_{e0} \exp\left(\frac{e\phi_s}{k_B T_e}\right) \quad (۳.۱)$$

$$n_i = n_{i0} \exp\left(\frac{-e\phi_s}{k_B T_i}\right) \quad (۴.۱)$$

n_e و n_i به ترتیب چگالی الکترون و یون دور از ابر است. برای شرایط غباری حاضر، معادله پواسن به صورت زیر می‌باشد:

$$\nabla^2 \phi_s = 4\pi(e n_e - e n_i - q_d n_d) \quad (۵.۱)$$

n_d چگالی ذره غبار است که بر طبق فرضیات در داخل و خارج ابر یکسان می‌باشد. یعنی:

$$q_d n_d = q_d n_{d0} = e n_e - e n_i.$$

معادلات (۳.۱) و (۴.۱) را در معادله (۵.۱) جایگزین کرده و فرض می‌شود $e\phi_s/k_B T_e \ll 1$ و $e\phi_s/k_B T_i \ll 1$ باشد. در این صورت داریم:

$$\nabla^2 \phi_s = \left(\frac{1}{\lambda_{De}^2} + \frac{1}{\lambda_{Di}^2}\right) \phi_s \quad (۶.۱)$$

می‌باشند. قابل به ذکر است، تقریب $e\phi_s/k_B T_e \ll 1$ و $e\phi_s/k_B T_i \ll 1$ ممکن است در نواحی نزدیک $r = 0$ ، معتبر نباشند. به هر حال در این ناحیه که پوسته نامیده می‌شود، پتانسیل ϕ_s که به صورت $\phi_s = \phi_{s0} \exp(-r/\lambda_D)$ می‌باشد، سریعاً نزول می‌کند و سهم زیادی در ضخامت ابر ندارد.

از معادله (۶.۱) شعاع دبای پلاسمای غباری به صورت زیر به دست می‌آید [۱]:

$$\lambda_D = \frac{\lambda_{De}\lambda_{Di}}{\sqrt{\lambda_{De}^2 + \lambda_{Di}^2}} \quad (۷.۱)$$

کمیت λ_D اندازه‌ای از فاصله حفاظ یا ضخامت پوسته است. برای یک پلاسمای غباری با دانه‌های غبار منفی، $\lambda_{De} \gg \lambda_{Di}$ است، در نتیجه $\lambda_D \simeq \lambda_{Di}$ می‌شود. می‌توان اینگونه تعبیر کرد که در یک پلاسمای غباری با دانه‌های غبار منفی فاصله حفاظتی یا ضخامت پوسته اساساً توسط دما و چگالی یون‌ها مشخص می‌شود. در مقابل اگر دانه‌های غبار به طور مثبت باردار شوند و بیشتر یون‌ها بر سطح دانه‌های غبار چسبیده باشند به طوریکه $T_e n_i \ll T_i n_e$ باشد، $\lambda_{De} \ll \lambda_{Di}$ است، در نتیجه $\lambda_D \simeq \lambda_{De}$ می‌شود. بنابراین در یک پلاسمای غباری با دانه‌های غبار مثبت فاصله حفاظ یا ضخامت پوسته به وسیله دما و چگالی الکترون‌ها مشخص می‌گردد [۱].

۳.۲.۱ فرکانس‌های مشخصه

یک خاصیت مهم پلاسمای غباری همانند پلاسمای یون - الکترون پایداری خنثایی ماکروسکوپیکی بار - فضا است. زمانی که پلاسمای از حالت تعادل منحرف می‌شود، میدان بار - فضا داخلی به وجود آمده، باعث می‌شود ذرات در جهتی حرکت کنند که به حالت خنثایی اولیه بازگردند. این مجموعه حرکات توسط فرکانس طبیعی نوسانات که فرکانس پلاسمایی ω_p نامیده می‌شود، مشخص می‌گردند. برای به دست آوردن فرکانس پلاسمایی ω_p در یک پلاسمای غباری غیرمغناطیده، سرد و یکنواخت به صورت زیر عمل می‌کنیم [۱].

نوسانات الکتروستاتیک الکترون‌ها، یون‌ها یا ذرات غبار که مربوط به میدان بار - فضای داخلی می‌شوند، توسط معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و پواسن توصیف می‌گردند:

$$\frac{\partial n_s}{\partial t} + \nabla \cdot (n_s v_s) = 0 \quad (۸.۱)$$

^yplasma frequency

$$\frac{\partial v_s}{\partial t} + (v_s \cdot \nabla) v_s = -\frac{q_s}{m_s} \nabla \phi \quad (9.1)$$

$$\nabla^2 \phi = -4\pi \sum_s q_s n_s \quad (10.1)$$

برای ساده‌سازی از نیروهای گرادیان فشار صرف‌نظر شده است. همچنین فرض می‌شود دامنه نوسانات خیلی کوچک است به طوری که می‌توان از جملات دامنه بالا صرف‌نظر کرد، یعنی نظریه خطی معتبر است. در حالت تعادل همه‌ی ذرات پلاسما (الکترون‌ها، یون‌ها و دانه‌های غبار) در حالت سکون هستند. حال اگر میدان بار - فضا در حالت تعادل نباشد فرض می‌شود، چگالی به صورت $n_s = n_{s0} + n_{s1}$ به طوری که $n_{s1} \ll n_{s0}$ است تغییر یابد. با خطی کردن معادلات (۸.۱) تا (۱۰.۱) و ترکیب آن‌ها معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \nabla^2 \phi + 4\pi \sum_s \frac{n_{s0} q_s^2}{m_s} \nabla^2 \phi = 0 \quad (11.1)$$

معادله (۱۱.۱) را در فضای $r(x, y, z)$ تحت شرایط مرزی مناسب (یعنی در $r = 0$ ، $\phi = 0$ باشد) محاسبه کرده و با جایگزین کردن $\partial/\partial t$ به جای d/dt ، معادله (۱۱.۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} + \omega_p^2 \phi = 0 \quad (12.1)$$

$$\omega_p^2 = \sum_s \frac{4\pi n_{s0} q_s^2}{m_s} = \sum_s \omega_{ps}^2 \quad (13.1)$$

$\omega_{ps} = (4\pi n_{s0} q_s^2 / m_s)^{1/2}$ فرکانس پلاسمایی ذره نوع s را نشان می‌دهد. معادله (۱۳.۱) نشان می‌دهد، پتانسیل بار - فضا داخلی با فرکانس ω_p نوسان می‌کند. این فرآیند را می‌توان اینگونه تعبیر کرد

که وقتی ذرات پلاسما از موضع‌های تعادلی خود جابجا می‌شوند، میدان بار - فضا در جهتی ایجاد خواهد شد که با هل دادن ذرات به عقب به موضع اولیه‌شان، پلاسما را به حالت خنثی اولیه برخواهد گرداند. اما بخاطر اینرسی‌شان بالاتر خواهند رفت و میدان ناشی از بار با پلاریته مخالف آن‌ها را دوباره به عقب، به موضع اولیه‌شان باز خواهد گرداند. دوباره بخاطر اینرسی‌شان بالا خواهند رفت، بنابراین حول نقطه تعادلی خود به طور پیوسته نوسان خواهند کرد. البته فرکانس چنین نوساناتی برای الکترون-ها، یون‌ها و دانه‌های غبار یکسان نخواهد بود اما به جرم و بار ذرات پلاسما بستگی خواهد داشت [۱]. به عنوان مثال الکترون‌ها حول یون‌ها با فرکانس پلاسمای الکترونی $\omega_{pe} = (4\pi n_e e^2 / m_e)^{1/2}$ یون-ها حول دانه‌های غبار باردار با فرکانس پلاسمای یونی $\omega_{pi} = (4\pi n_i e^2 / m_i)^{1/2}$ و ذرات غبار حول نقطه تعادلی خود با فرکانس پلاسمایی غبار $\omega_{pd} = (4\pi n_d Z_d^2 e^2 / m_d)^{1/2}$ نوسان می‌کنند. مشخصه مهم دیگر فرکانس‌ها مربوط به برخورد ذرات پلاسما با ذرات خنثی ساکن است. ν_{en} فرکانس برخورد الکترون با ذرات خنثی، ν_{in} فرکانس برخورد یون با ذرات خنثی و ν_{dn} فرکانس برخورد دانه‌های غبار با ذرات خنثی است. فرکانس برخورد ν_{sn} برای پراکندگی ذرات نوع s پلاسما توسط ذرات خنثی به صورت زیر تعیین می‌گردد [۱]:

$$\nu_{sn} = n_n \sigma_s^n v_{Ts} \quad (14.1)$$

در معادله‌ی بالا n_n چگالی ذرات خنثی، σ_s^n سطح مقطع پراکندگی است و بستگی ضعیفی به دما T_s دارد. $v_{Ts} = (k_B T_s / m_s)^{1/2}$ سرعت حرارتی ذرات نوع s است. در اثر برخورد ذرات پلاسما با ذرات خنثی مجموعه نوسانات کاهش یافته و دامنه نوسانات به تدریج کاهش می‌یابند. هنگامی که فرکانس برخورد ν_{sn} از فرکانس پلاسمایی ω_p کوچکتر باشد ($\nu_{en}, \nu_{in}, \nu_{dn} < \omega_p$) نوسانات اندکی میرا خواهند شد [۱].

۴.۲.۱ پارامتر جفت شده کولنی

مهمترین مشخصه سیستم برهمکنشی چند ذره‌ای، ثابت جفت شدگی کولنی^۱ است که احتمال تشکیل کریستال‌های پلاسمای غباری را تعیین می‌کند. برای توضیح این مشخصه، دو دانه غبار با بار یکسان q_d که در فاصله a از هم قرار دارند، در نظر گرفته می‌شود. انرژی پتانسیل کولنی غبار عبارت است:

$$\varepsilon_c = \frac{q_d^2}{a} \exp\left(-\frac{a}{\lambda_D}\right) \quad (15.1)$$

اگر $k_B T_d$ انرژی حرارتی غبار باشد. پارامتر جفت شدگی کولنی Γ_c ، نسبت انرژی پتانسیل به انرژی حرارتی غبار است که به صورت زیر می‌باشد [۱]:

$$\Gamma_c = \frac{Z_d^2 e^2}{a k_B T_d} \exp\left(-\frac{a}{\lambda_D}\right) \quad (16.1)$$

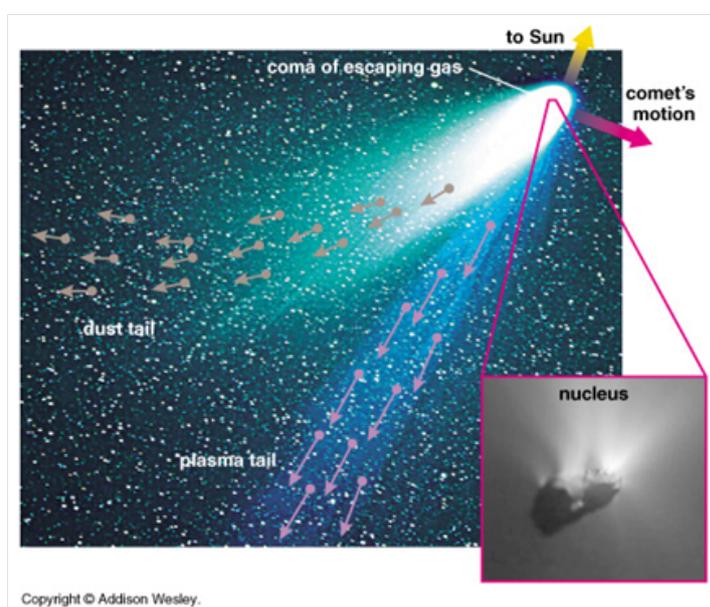
هنگامی که $\Gamma_c \ll 1$ است، پلاسمای غباری یک سیستم جفت شده ضعیف و هنگامی که $\Gamma_c \gg 1$ است، جفت شده قوی می‌باشد. بنابراین تعداد بارهای مستقر روی سطح دانه غبار (Z_d)، نسبت فاصله بین دانه‌های غبار به شعاع حفاظ دبابی (a/λ_D) و انرژی حرارتی غبار ($k_B T_d$)، نقش تعیین کننده-ای در تشخیص این که پلاسمای غباری جفت شده ضعیف یا جفت شده قوی خواهد بود، دارند. به آسانی در سیستم‌های پلاسمای غباری آزمایشگاهی می‌توان نشان داد که دانه‌های غبار سنگین به علت بار الکتریکی بزرگ ($10^3 e - 10^4 e$)، دمای پائین و فاصله کم بین دانه‌ها، جفت شده قوی هستند [۱].

۳.۱ پلاسمای غباری در فضا

پلاسمای غباری نسبتاً در همه جای فضا یافت می‌شود. وجود دانه‌های غبار در سیستم‌هایی چون ابرهای بین ستاره‌ای، سیستم خورشیدی و ... به خوبی شناخته شده است. فاصله میان ستارگان به

^۱Coulomb coupling parameter

مقدار زیادی از گاز و غبار پر شده است. انعقاد دانه‌های غبار در سحابی خورشیدی باعث تشکیل سیارک‌ها می‌شود. فضای بین سیاره‌ای پر از غبار است که با عنوان غبار بین سیاره‌ای^۹ شناخته شده است. دنباله‌دارها^{۱۰} از ترکیب دانه‌های غیر فرار و گازهای یخ‌زده به وجود می‌آیند و مدارهای بیضوی کاملاً کشیده‌ای دارند که در مدار خود به دور خورشید طی مسیر می‌کنند تا به خورشید نزدیک شوند. گرمای خورشید باعث گرم شدن دنباله‌دار شده، در این حالت از خود نور ساطع می‌کند و قسمتی از آن به غبار و گاز تبدیل می‌شود که دنباله‌دار را ترک کرده و دنباله را پدید می‌آورند [۱]. فشار



شکل ۱.۱: دنباله‌دار هالی - بوپ.

پرتو خورشید و بادهای خورشیدی به ذرات شتابی می‌دهد که با سرعت‌های متفاوت بر اساس اندازه و جرم ذرات از سر دنباله‌دار دور می‌شوند. بنابراین دنباله‌های غبار نسبتاً سنگین به آرامی شتابدار شده و تمایل دارند خمیده شوند. دنباله یونی جرمش خیلی کمتر است و شتابش آنقدر زیاد است که به صورت یک خط تقریباً راست دور از دنباله در جهت دور شدن از خورشید نمایان می‌شود [۱]. شکل (۱.۱) دنباله‌دار هالی - بوپ^{۱۱} با دو دنباله مجزا را نمایش می‌دهد. دنباله پلاسمای آبی رنگ و نازک از گازها و دنباله سفید رنگ پهن از ذرات غبار تشکیل شده است.

^۹Interplanetary dust

^{۱۰}Comets

^{۱۱}Hale-Bopp

بیشتر حلقه‌های بیرونی سیاره‌های بزرگ همچون مشتری^{۱۲}، زحل^{۱۳}، اورانوس^{۱۴} و نپتون^{۱۵} از ذرات غبار با اندازه میکرون تا ریزمیکرون ساخته شده‌اند. به عنوان نمونه ذرات غبار در حلقه‌های سیاره زحل از یخ تشکیل شده‌اند. این ذرات توسط نیروی الکتریکی بالا برده می‌شوند و باعث ایجاد پره‌ها در بالای حلقه‌ها می‌گردند [۱].

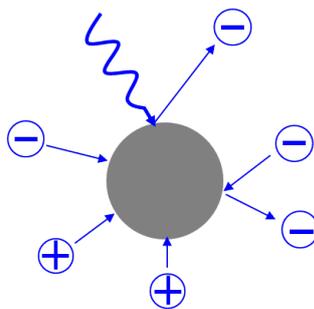
۴.۱ فرآیندهای باردار شدن دانه‌های غبار

نکته اصلی در فیزیک پلاسمای درک باردار شدن دانه‌های غبار است. فرآیندهای اولیه که منجر به باردار شدن دانه‌های غبار می‌شود کاملاً پیچیده است و به محیط اطراف دانه‌ها بستگی دارد. عناصر اصلی و مهم فرآیندهای باردار شدن دانه‌های غبار عبارتند از:

۱. برهمکنش دانه‌های غبار با ذرات گازی پلاسمای

۲. برهمکنش دانه‌های غبار با ذرات پرنرژی الکترون‌ها و یون‌ها

۳. برهمکنش دانه‌های غبار با فوتون‌ها



شکل ۲.۱: باردار شدن دانه غبار

دانه غبار کروی ایزوله شده ($r_d \ll \lambda_D \ll a$)، در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که دانه‌های غبار در پلاسمای گازی قرار می‌گیرند، ذرات پلاسمای (الکترون‌ها و یون‌ها) توسط دانه‌های غبار جمع‌آوری

^{۱۲}Jupiter
^{۱۳}Saturn
^{۱۴}Uranus
^{۱۵}Neptune