

ویژگی های غبار در غلاف پلاسمایی در حضور میدان مغناطیسی مسطح و مایل

سعید بابایی آبکنار^۱، ساعد جعفری^۱ و علی دژپور^۱

*گروه فیزیک اتمی مولکولی دانشگاه گیلان، رشت saeedbabaiev@yahoo.com

کلید واژه: غلاف پلاسمایی، غبار پلاسمایی، ویگنر پیچشی

چکیده

در این مقاله، به بررسی تاثیر میدان های مغناطیسی مسطح بر رفتار ذره غبار در یک پلاسمای غباری می پردازیم. پلاسمای غباری، گازی حاوی الکترون ها، یون ها و ذرات غبار است که ذرات بارهای الکتریکی بزرگی را از بدنه ی پلاسما جمع آوری می کنند و به واسطه ی کسب چنین بارهای عظیمی، می توانند انرژی الکتروستاتیکی قوی در پلاسما برقرار کنند و رفتار پلاسما را تحت کنترل خود درآورند. در این مقاله اثرات میدان ویگنر مسطح بر تکامل مشخصات تراکم و سرعت غبار بحث شده است و مشخص شد که با افزایش قدرت ویگنر، نوسانات سرعت و تراکم غبار در نزدیکی دیواره دیواره افزایش می یابد.

Effects of planar and oblique magnetic fields on the dust characteristics in a plasma sheath

Saeed Babaei Abkenar¹, Saed Jafari¹ and Ali Dezhpour¹

Department of Physics, University of Guilan, Rasht, ۱۳۳۵-۱۹۱۴, Iran saeedbabaiev@yahoo.com

Abstract

In this paper, we investigated the dust characteristics in a collisional plasma sheath in the presence of a planar and oblique magnetic fields. Dust plasma is a gas containing electrons, ions, and dust particles that attract large electrical charge particles from the plasma and, by obtaining such huge charges, can establish strong electrostatic energy in the plasma and modify the behavior of the plasma. In this paper discusses the effects of the planar wiggler on the evolution of dust density and velocity characteristics. It was found that by increasing the wiggler strength, dust grain velocity fluctuations and dust density near the wall increases.

Keywords: plasma sheath, dusty plasma, helical wiggler

مقدمه

ای. همچنین به طور آزمایشگاهی هم می توان آن ها را در تخلیه ی الکتریکی و کندوپاشی الکترودها و تزریق غبارهایی مانند اکسید آلومینیوم در دستگاه های تولیدکننده ی پلاسما به وجود آورد. ذرات غبار همچنین می توانند در آزمایشگاه تولید شوند. در سالهای اخیر چندین روش برای تولید پلاسما ی غباری در آزمایشگاه پیشنهاد شده است. تخلیه DC و تخلیه RF از تکنیک های تولید پلاسما ی غباری هستند [۳-۵]. پلاسما ی غباری یکی از زمینه های توسعه یافته پلاسما ی آزمایشگاهی مانند رسوب بخار (PECVD) تشکیل ساختارهای نانو بر پایه کربن در دستگاه های رسوب پلاسما است که در دهه های گذشته مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. این که چگونه ذرات غبار می توانند بر ویژگی های پلاسما (چگالی، توزیع فضایی، سرعت رانش، توابع توزیع انرژی الکترون و دما) تأثیر بگذارند مورد بررسی قرار گرفته است. ذرات غبار بر شکل عملکرد توزیع انرژی الکترون نیز تأثیر می گذارد. در پلاسما ی آزمایشگاه وجود ابرهای مترکم ذرات غبار در نزدیکی دیواره رفتار غلاف پلاسما را تغییر می دهد. ذرات غبار می توانند در غلاف پلاسما وارد شده و یا به عنوان آلاینده های ناخالصی ظاهر شوند، که توسط ابزارها و فرآیندهای تولید اضافه می شوند.

بررسی خصوصیات ناحیه باردار در مقابل غلاف یکی از جذابترین موارد پلاسما در پلاسما ی آزمایشگاه است. غلاف فضای باردار در مقابل الکترودهای فلزی است (مانند الکترودهای آند / کاتد در راکتورهای PECVD) و از حجم پلاسما در برابر آن محافظت می کند. تحقیق در مورد خصوصیات فضای باردار در مقابل غلاف به دلیل پویایی پلاسما جذاب است. داس و همکاران خصوصیات رفتار ذرات غبار را در غلاف پلاسما ی مغناطیسی یکنواخت مطالعه کرد. گذشته از این، مهدی پور و همکاران. ساختار غلاف مغناطیسی شده در پلاسما ی غباری را در حضور یک میدان مغناطیسی یکنواخت بررسی کرد [۶]

محاسبات و معادلات حاکم

ویگلر مگنتواستاتیک به طور کلی به شکل پیچشی و مسطح با استفاده از آهن ربا های دائمی یا سیم پیچ های حامل جریان تولید

در دهه ی اخیر کارهای زیادی در موضوع موج های غیرخطی در دینامیک پلاسما انجام شده است. و در این میان توجه زیادی به تشکیل غلاف اطراف یک جسم جامد در یک پلاسما شده است. به زبان ساده، غلاف فضای باردار است که در مقابل الکترودهای فلزی قرار دارد و از حجم پلاسما در مقابل آن محافظت می کند. تا همین چند سال پیش به مطالعه ی غلاف پلاسما یی در حضور ذرات غبار بدلیل اینکه هم در آزمایشگاه و هم در محیط پلاسما اتفاق می افتاد، توجه بیشتری می شد. ذرات غبار در فرآیند واکنش در سطح پلاسما باردار در مقیاس ماکروسکوپی باردار می شوند.

جرم ذرات غبار خیلی بالاست و تقریباً $10^8 - 10^6$ برابر جرم پروتون است. در هر صورت اندازه، بار و جرم غبار مانند متغیرهای دینامیکی رفتار می کنند. این رفتار مبهم ذرات غبار دینامیک پلاسما را هم تغییر می دهد. بخاطر وجود چنین شرایطی مد جدید به وجود می آید که به آن «موج اکوستیکی غبار» گفته می شود. که از طریق مطالعه ی تجربی بدست می آید.

پلاسما ی غباری، یک گاز یونیزه حاوی الکترون ها، یون ها و ذرات غبار است که در آن ذرات غبار موجود در پلاسما، ابعادی بسیار بزرگتر از ذرات الکترونی و یونی از مرتبه ی میکرومتر دارند [۱، ۲]. این ذرات غبار قادرند که بارهای الکتریکی بسیار بزرگی را از بدنه پلاسما جمع آوری کنند و به واسطه ی کسب چنین بارهای عظیمی، می توانند انرژی الکترواستاتیکی قوی در بین خودشان ایجاد نمایند و منجر به جفت شدگی های پر قدرتی در زمینه پلاسما گردند. جنس ذرات غبار می تواند هم دی الکتریک (مانند سیلیکات) و هم رسانا (مانند گرافیت) باشد. [۲]. این ذرات باردار، که اندازه ی آن ها از ده ها نانومتر تا قطر صدها میکرون می باشد، با محیط پلاسما واکنش انجام می دهند و به گونه های باردار در پلاسما تبدیل می شوند [۳]. چنین ذراتی به طور طبیعی در فضا یافت می شوند، مانند پلاسما ی غباری موجود در بارهای خورشیدی، حلقه های سیاره هایی مانند زحل، و ابرهای بین ستاره

$$u_{dx} \frac{\partial u_{dy}}{\partial \xi} = Z_d \gamma_{dx} u_{dz} \cos \frac{\gamma \pi \xi}{\lambda_w} - \alpha u_{dy} \quad (10)$$

$$u_{dx} \frac{\partial u_{dz}}{\partial \xi} = -Z_d \gamma_{dx} u_{dy} \cos \frac{\gamma \pi \xi}{\lambda_w} - \alpha u_{dz} \quad (11)$$

پارامترهای نرمال شده در معادلات بالا عبارتند از:

$$\xi = x / \lambda_e \quad \text{فاصله نرمال شده}$$

$$c_{ds} = (T_e / m_d)^{1/2} \quad \text{سرعت صوتی غبار}$$

$$Z_d = q_d / e \quad \text{عدد بار ذره غبار}$$

$$u_d = v_d / c_{ds} \quad \text{سرعت نرمال شده غبار}$$

$$\alpha = v \lambda_e / c_{ds} \quad \text{اندازه نیروی برخورد}$$

$$\mu = g \lambda_e m_d / T_e \quad \text{اندازه نیروی گرانش}$$

$$\lambda_e = (\epsilon \cdot T_e / n_e \cdot e^2)^{1/2} \quad \text{طول دمای الکترون}$$

$$\gamma_w \quad \text{قدرت میدان ویگلر}$$

$$= \left(\lambda_e e^2 B_w^2 / T_e m_d \right)^{1/2}$$

$$\gamma = \left(\lambda_e e^2 B^2 / T_e m_d \right)^{1/2} \quad \text{قدرت میدان مایل}$$

$$\eta = -e \phi / T_e \quad \text{پتانسیل الکتروستاتیک نرمال شده}$$

$$M_d = v_{dx} / c_{ds} \quad \text{عدد ماخ غبار}$$

$$N_d = n_d / n_a \quad \text{چگالی نرمال شده غبار}$$

$$N_i = n_i / n_i \quad \text{چگالی نرمال شده یون}$$

$$N_e = n_e / n_e \quad \text{چگالی نرمال شده الکترون}$$

$$\delta_d = n_d / n_e$$

$$\delta_i = n_i / n_e$$

بحث

تجزیه و تحلیل عددی مشخصات ذرات غبار در حضور ویگلر پیچشی در این بخش انجام شده است. مکانیسم فیزیکی به شرح زیر است: یک میدان ویگلر به پیکربندی در غلاف پلاسما اضافه شده است، باعث می شود ذرات غبار در غلاف نوسان عرضی داشته باشند. نمودار سرعت غبار نرمال شده در برابر عدد بار دانه غبار (Z_d) برای ویگلر مارپیچی در شکل ۱ نشان داده شده است. مقادیر Z_d به ترتیب برابر با ۱۰۰۰، -۵۰۰، -۳۰۰ و -۲۰۰-

می شود. معادله میدان مغناطیسی ویگلر مسطح به صورت زیر است،

$$\vec{B}_w = B_w (\hat{e}_y \cos k_w x + \hat{e}_z \sin k_w x) \quad (1)$$

که در آن B_w دامنه میدان ویگلر است و $k_w = 2\pi / \lambda_w$ تعداد موج ویگلر است و همچنین میدان مایل بصورت $\theta = 50^\circ$ انتخاب شده است.

از معادله انتقال حرکت برای یک ذره غبار در پلاسمای غباری مغناطیسی شده شروع می کنیم ،

$$m_d v_{dx} \frac{\partial v_{dx}}{\partial x} = -q_d \frac{\partial \phi}{\partial x} + q_d v_{dy} B_{wz} + m_d g - m_d v v_{dx} \quad (2)$$

که در آن v_d سرعت غبار است ، Φ پتانسیل الکتروستاتیک ، m_d جرم غبار و q_d بار غبار است. با استفاده از

$$B_w = B_w e_z \cos k_w x$$

معادله حرکت را دوباره بنویسیم ،

$$m_d v_{dx} \frac{\partial v_{dx}}{\partial x} = -q_d \frac{\partial \phi}{\partial x} + m_d g - m_d v v_{dx} \quad (3)$$

$$m_d v_{dx} \frac{\partial v_{dy}}{\partial x} = +q_d (v_{dz} B_{wx}) - m_d v v_{dy} \quad (4)$$

$$m_d v_{dx} \frac{\partial v_{dz}}{\partial x} = -q_d (v_{dy} B_{wx}) - m_d v v_{dz} \quad (5)$$

اکنون ، با ضرب در هر دو طرف معادله (۳) ، (۴) و (۵) ،

$$\frac{m_d \lambda_e}{T_e} v_{dx} \frac{\partial v_{dx}}{\partial x} = -\frac{q_d \lambda_e}{T_e} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{m_d \lambda_e}{T_e} g - \frac{m_d \lambda_e}{T_e} v v_{dx} \quad (6)$$

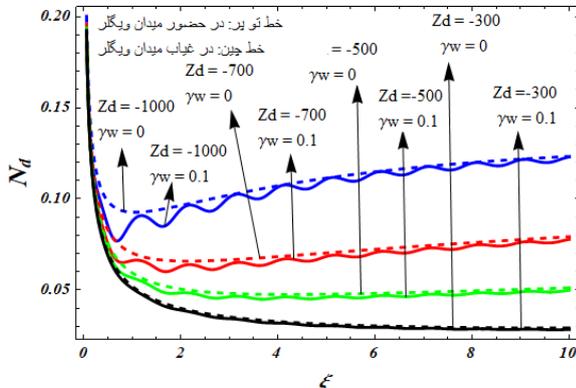
$$\frac{m_d \lambda_e}{T_e} v_{dx} \frac{\partial v_{dy}}{\partial x} = \frac{q_d \lambda_e}{T_e} (v_{dz} B_{wx}) - \frac{m_d \lambda_e}{T_e} v v_{dy} \quad (7)$$

$$\frac{m_d \lambda_e}{T_e} v_{dx} \frac{\partial v_{dz}}{\partial x} = -\frac{q_d \lambda_e}{T_e} (v_{dy} B_{wx}) - \frac{m_d \lambda_e}{T_e} v v_{dz} \quad (8)$$

پس از بی بعد کردن معادلات

$$u_{dx} \frac{\partial u_{dx}}{\partial \xi} = Z_d \frac{\partial \eta}{\partial \xi} + \mu - \alpha u_{dx} \quad (9)$$

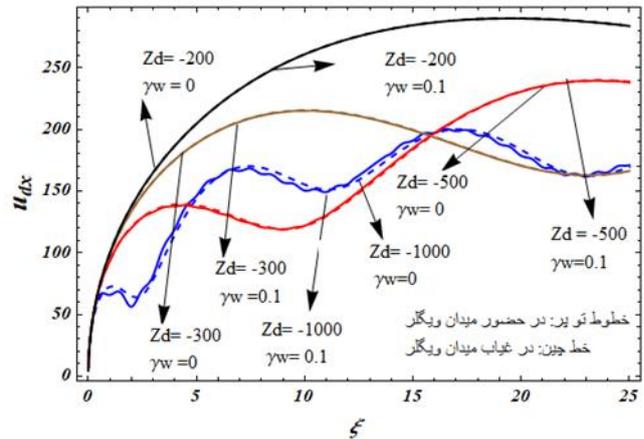
است. همانطور که نشان داده شده است، با افزایش میزان بار غبار $|Z_d|$ ، نوسانات غبار افزایش می یابد و در عین حال سرعت بیشینه ی ذرات کاهش پیدا می کند.



شکل ۳. تغییرات چگالی در حالت بدون برخورد

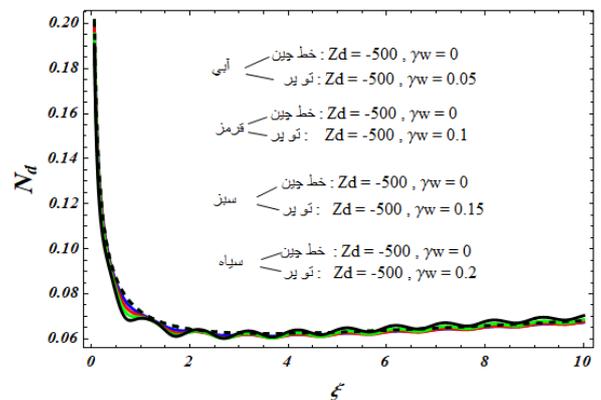
نتیجه گیری

در این مقاله ویژگی های ذرات غبار را در یک غلاف پلاسمایی در حضور یک میدان ویگلر پیچشی بررسی کردیم. اخیراً، مطالعه غلاف های پلاسما در حضور میدان مغناطیسی خارجی اهمیت پیدا کرده است. میدان مغناطیسی ویگلر می تواند با میدان الکترواستاتیکی محیط پلاسمای غباری در نزدیکی دیواره جفت شود و سرعت ذرات غبار و چگالی آنها را در غلاف پلاسما تغییر دهد. مشخص شد که با افزایش میزان بار غبار $|Z_d|$ ، نوسانات غبار افزایش می یابد و در عین حال سرعت بیشینه ی ذرات کاهش پیدا می کند و نوسانات غبار با فاصله گرفتن از غلاف با افزایش قدرت میدان ویگلر افزایش پیدا می کند. همچنین افزایش بار ذرات غبار باعث افزایش نوسانات چگالی غبار می شود که این نوسانات با فاصله گرفتن از غلاف کاهش پیدا می کند.



شکل ۴. تغییر سرعت و تعداد ذرات غبار در میدان ویگلر چرخش

نمودار چگالی ذرات غبار بر قدرت ویگلر (γ_w) در شکل ۲ نشان داده شده است. اندازه بار ذرات غبار ۵۰۰- در نظر گرفته شده و مقادیر مختلف قدرت ویگلر به ترتیب ۰.۰۵، ۰.۱، ۰.۱۵ و ۰.۲ است. مشخص شده است که نوسانات غبار با فاصله گرفتن از غلاف با افزایش قدرت میدان ویگلر افزایش پیدا می کند. با توجه به قدرت ویگلر در برابر پلاسمای غباری بدون برخورد ($\alpha = 0$)، نمودار چگالی غبار در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل نشان می دهد که افزایش بار ذرات غبار باعث افزایش نوسانات چگالی غبار می شود که این نوسانات با فاصله گرفتن از غلاف کاهش پیدا می کند.



شکل ۵. چگالی غبار بر اساس قدرت میدان ویگلر پیچشی

مرجع ها

- [۱] Wei, C., Yang, L., Huang, Z., & Guo, L. (۲۰۱۹). Research on the propagation characteristics of THz waves in spatial inhomogeneous, time varying, and weakly ionized dusty plasma. *IEEE Transactions on Plasma Science*, ۴۷(۱۰), ۴۷۴۵-۴۷۵۲.
- [۲] Popel, S. I., Zelenyi, L. M., & Atamaniuk, B. (۲۰۱۵). Dusty plasma sheath-like structure in the region of the lunar terminator. *Physics of Plasmas*, ۲۲(۱۲), ۱۲۳۷۰۱.
- [۳] Maoyan, W., Meng, Z., Guiping, L., Baojun, J., Xiaochuan, Z., & Jun, X. (۲۰۱۶). FDTD simulation on terahertz waves propagation through a dusty plasma. *Plasma Science and Technology*, ۱۸(۸), ۷۹۸.
- [۴] Li, L., Wei, B., Yang, Q., Yang, X., & Ge, D. (۲۰۱۷). High-order SO-DGTD simulation of radio wave propagation through inhomogeneous weakly ionized dusty plasma sheath. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, ۱۶, ۲۰۷۸-۲۰۸۱.
- [۵] Xu, G., & Song, Z. (۲۰۱۹). Interaction of terahertz waves propagation in a homogeneous, magnetized, and collisional plasma slab. *Waves in Random and Complex Media*, ۲۹(۴), ۶۶۵-۶۷۷.
- [۶] Das, G. C., & Kalita, P. (۲۰۰۴). Characteristic behaviour of dust grains in a magnetized plasma sheath. *Journal of Physics D: Applied Physics*, ۳۷(۵), ۷۰۲.
- [۷] Mehdipour, H., & Foroutan, G. (۲۰۱۰). The magnetized sheath of a dusty plasma with nanosize dust grains. *Physics of Plasmas*, ۱۷(۸), ۰۸۳۷۰۴.