انتقال الموجات واطئة التردد في البلازما المغبرة الممغنطة

د. حامد حافظ مربط*

تاريخ قبول النشر 2008/3/24

الخلاصة:

تم القيام بنمذجة عددية لدراسة الأمواج واطئة التردد في البلازما المغبرة باخذ حالتين خاصتين لاتجاه انتشارها فيما يخص المجال للمجال المغناطيسي هما: عندما يكون الانتشار بموازاة المجال K//B ويدعى بالنمط الصوتي, والثانيه عندما يكون الانتشار عمودي على المجال K ⊥ B و يدعى بالنمط السايكلوتروني, فضلا عن ذلك فان كلاً من النمطين يقسم على نمطين اعتماداً على مدى الترددات. تمت دراسة معامل ترابط كولوم Γ مع كلٍ من درجة الحرارة T وكثافة حبيبات الغبار N_d وكذلك شحنة الحبيبات Q_d.

وقد درست الأمواج واطئة التردد في البلازما المغبرة بوجود حبيبات غبار سالبة الشحنة. ولوحظ إن وجود غبار مشحون يؤدي إلى تحوير أمواج الأيون الصوتية وأمواج سايلكوترون أيون الالكتروستاتيكية من خلال شرط التعادل. على الرغم من إن حبيبات الغبار لاتشارك في حركيات الموجة. وعند الأخذ بنظر الاعتبار حركيات حبيبات الغبار في التحليلات تظهر أنماط الغبار الموجية.

1- المقدمة:

تعد البلازما على نحو عام مجمعا من الأيونات والإلكترونات ، ولكن البلازما في الحقيقة وفي أحيان كثيرة تحوي على جسيمات دقيقة تدعى بالغبار، وتدعى مثل هذه البلازما بالبلازما المغبرة " dusty plasma". إن جسيمات الغبار في البلازما هي جسيمات غير مألوفة بالمقارنة مع بقية مكونات البلازما فحجمها يتراوح بين جزء من المايكرون إلى عدة مايكرونات وكتلتها وشحنتها تتدرج لمدى واسع، فكتلتها تبلغ (10^{-2}-10^{-15}gm) وشحنتها هي q_d ~(10^3 – 10^6 e) (Salimullah; 1999)

وقد ازداد الاهتمام في موضوع البلازما المغبرة ; Kou; 2000) Bliokh;1995, Spitzer 1978,Shukla;1992, Mendis and Goertg; 1989 ,Rosenberg;1994;(Northrop,1992 بسبب تطبيقاتها الواسعة في مجال الفضاء والفلك مثل السدم والغيوم الجزيئين والأوساط ما بين النجوم وفي المذنبات. فضلا عن تطبيقاتها الصناعية والمختبرية كالقشط بالبلازما والإلكترونيات الدقيقة , وربما يعد احدث تطور في مجال البلازما المغبرة هو إمكانية تبلورها [Morfill et at 1998] مكونة ما يسمى ببلورات البلازما. وفيها تزرع حبيبات من الغبار وهي إما إن تبذر من خارج البلازما او تنتمى في داخلها. وحبيبات الغبار هذه لها القابلية على كسب مقدار كبير من الشحنة السالبة مكونة ما يسمى بشبيكة كولوم كما توقعها نظرياً الباحث (Ikezi; 1986) وقد عزاها الى قدرة حبيبات الغبار على كسب عدد ضخم من الإلكترونات، وهذا يؤدي الى ان يصبح معدل الطاقة الكامنة لحبيبات الغبار اكبر بكثير من معدل طاقتها الحركية. وهذا ينتج عنه تغير كبير في خصائص البلازما اذ تتكون بلازما ذات ترابط شديد حتى في درجات الحرارة والكثافة الاعتيادية مع إن هذا النوع من البلازما لا يواجد إلا في ظروف غير اعتيادية من درجات حرارة منخفضة جداً وكثافات عالية جداً.

وتبدو البلازما بهذه المواصفات وكأنها بحالة سائلة او صلبة. وهنا تظهر مواد جديدة تماماً اذ يلاحظ انتقال طور الحالة والتركيب البلوري. وهذا يفتح مجالا جديدا في دراسة فيزياء الحالة الصلبة مثل الانصهار والإحماء والعيوب البلورية.

ان الغرض من دراستنا هذه هي دراسة بعض الأمواج واطئة التردد في البلازما المغبرة ,ومدى تأثير حبيبات الغبار على بعض الأنماط المعروفة في البلازما والأنماط الجديدة المتولدة

2- الترابط في البلازما المغبرة (Coupling in Dusty Plasma)

إن النسبة بين الطاقة الكامنة إلى الطاقة الحركية للجسيمات تعطى بالعلاقة (Oliver; 2004) :

$$\Gamma = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 K_b T_p b} \quad (1)$$

اذ: Γ = معامل ترابط كولوم ، Q= شحنة الجسيمة ، ε_0= سماحية الفراغ، K_b ثابت بولتزمان ، T_p= درجة حرارة الجسيمة، b= المسافة ما بين الجسيمات وتعطى بالعلاقة:

$$b=\left(\frac{3}{4\pi n}\right)^{1/3}$$ اذ n كثافة الجسيمات.ولقد وجد بأنه

عندما تزيد Γ عن قيمة حرجةΓ_c (Γ_c=178) يكون هنالك انتقال في طور الحالة وتتحول حالة المادة الى الحالة الصلبة مكونة شبيكة كولوم [Anderson, et al 1995].وفي الظروف الاعتيادية وعندما تحوي البلازما على الكترونات وايونات فقط فان $\Gamma_c >> \Gamma$. فالبلازما ضعيفة الترابط هي التي يتحقق فيها الشرط $\Gamma_c >> \Gamma$.اذ إن ذرات الغبار بإمكانها ان تكتسب كمية كبيرة من الشحنة كما مر سابقاً، فانه من الممكن لـ Γ ان تزيد عن Γ_c حتى في درجة حرارة الغرفة والكثافة الاعتيادية. وعندما تصبح $\Gamma_c < \Gamma$ فان البلازما تدخل منطقة الترابط الشديد وتصبح

*قسم الفيزياء/ كلية العلوم للبنات / جامعة بغداد

خصائص البلازما مشابهة لخصائص الحالة الصلبة وتكون ما يسمى ببلورات كولوم. وعندما تكون قيم Γ معتدلة تبدو خصائص البلازما المغبرة وكأنها بحالة سائلة.

3 - شروط التعادل في البلازما المغبرة:

ان وجود حبات غبار مشحونة في البلازما كصنف ثالث فضلا عن الإلكترونات والأيونات بإمكانها ان تغير من مواصفات البلازما بسبب القيمة غير الاعتيادية لنسبة شحنتها الى كتلتها، ان حبيبات الغبار بإمكانها تجميع الإلكترونات والأيونات معاً. ولكن لان الإلكترونات بإمكانها التحرك بانسيابية اكبر من الايونات، فان الحبيبات تميل لان تكتسب شحنة سالبة. وبالنتيجة فان توازن الشحنة سوف يتغير، بحيث ان شرط التعادل في البلازما بوجود حبيبات مشحونة سالبة يصبح:

$$n_i = n_e + Zn_d \quad (2)$$

اذ n_d , n_e , n_i هي كثافة الأيونات ، الإلكترونات ، حبيبات الغبار على التوالي. و $Z = q_d/e$ هي النسبة بين شحنة الحبيبة (q_d) إلى شحنة الإلكترون e

ان وجود غبار مشحون يمكن ان يكون له تأثير كبير على خصائص الأمواج الاعتيادية للبلازما، وحتى في الترددات التي لاتشترك فيها حبيبات الغبار في حركة الموجة. وعند الأخذ بنظر الاعتبار الترددات التي تقل بكثير عن الترددات المميزة لإلكترونات وأيونات البلازما فان أنماطا جديدة من الترددات ستظهر في علاقة التشتت المشتقة من المعادلات الحاكمة في البلازما الحاوية على ثلاثة أصناف وهي الإلكترونات والأيونات وحبيبات الغبار، وبعض من هذه الأنماط مشابهة الى حد ما للأنماط المعروفة في البلازما ذات الأيونات السالبة، مع فوارق مهمة تميز البلازما المغبرة.

4- الأمواج الالكتروستاتيكية واطئة الترددفي البلازما المغبرة

4-1- علاقة التشتت:

إن علاقة التشتت الخطية للأمواج الالكتروستاتيكية واطئة الترددفي البلازما المغبرة الممغنطة و يمكن اشتقاقها من مفهوم المائع المتعدد [D'Angelo,1990]ونعني بالترددات الواطئة هي الترددات المقاربة او الاقل من تردد الايون السايكلوتروني (Ω_{ci}) وتردد ايون البلازما (ω_{pi}) ، لنفرض ان بلازما مكونة من ثلاثة عناصر موزعة بانتظام داخل مجال مغناطيسي منتظم ممتد باتجاه محور Z بالإحداثيات الكارتيزية. ولنفرض إن كتلة كل عنصر هي m_α ، وشحنته هي q_α , ونسبتها الى شحنة الإلكترون هي $Z_\alpha = q_\alpha / e$ ، وكثافته تبلغ n_α، ودرجة حرارته T_α وسرعته الحرارية $(k_bT/m_\alpha)^{1/2}$. ولنفرض ان جميع حبيبات الغبار لها الكتلة نفسها m_d و الشحنة السالبة نفسها. ان عناصر البلازما الثلاثة يمكن وصفها بمعادلتي الاستمرارية والزخم الآتيتين (Chen; 1988) :

$$\frac{\partial n_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (n_\alpha V_\alpha) = 0 \quad (3)$$

$$n_\alpha m_\alpha \left[\frac{\partial v_\alpha}{\partial t} + (v_\alpha \cdot \nabla) v_\alpha \right] = q_\alpha n_\alpha (E - v_\alpha \times B) \quad (4)$$

ولأمواج واطئة التردد كالتي أفترضناها فانه يمكن إهمال قصور الالكترون، وكذلك يمكن اخذ حركة الإلكترون وهي فقط باتجاه B وهذا يعني ان الإلكترونات في توازن بولتزمان، أي إن :

($K_bT_e = en_e \nabla \Phi$) فضلا عن معادلتي الاستمرارية والزخم السابقتين ,و يستخدم شرط التعادل (المعادلة 2) في حالتي الاتزان والاضطراب كذلك. ولنفرض ان الاضطراب في الكميات حول موضع الاتزان هو بشكل: $\exp[i(K_xx+K_zz-\omega t)]$ وبعد اجراء التعويضات والعمليات الرياضية اللازمة نحصل على علاقة التشتت الاتية:

$$\frac{G}{\xi_i^2 - G} + \varepsilon Z_d^2 \mu_{i/d} \frac{H}{\xi_i^2 - \tau_{d/i}\mu_{i/d} H} - \tau_{i/e}(1 - \varepsilon Z_d) = 0 \quad (5)$$

اذ

$$G = \left[\frac{\xi_i^2}{\xi_i^2 - 1} \right] K_x^2 \rho_i^2 + K_z^2 \rho_i^2 \quad (5a)$$

و نصف قطر التدويم $\rho_i = V_{t\alpha} / \Omega_{ci}$

$$H = \left[\frac{\xi_i^2}{\xi_i^2 - (\xi_i/\xi_d)^2} \right] K_x^2 \rho_i^2 + K_z^2 \rho_i^2 \quad (5b)$$

علما ان

$\mu_{i/d} = m_i/m_d$, $\xi_d = \omega/\Omega_{cd}$, $\xi_i = \omega/\Omega_{ci}$

, $\varepsilon = n_{do}/n_{io}$, $\tau_{i/e} = T_i/T_e$, $\tau_{d/i} = T_d/T_i$

بحيث أنه وبعد استخدام المعادلة (2) نحصل على:

$$n_{eo} = (1 - \varepsilon Z_d) n_{io}$$

والعلامة"0" الموجودة في اسفل كل كمية تعني ان هذه الكمية في حالة الاتزان (المرتبة صفر) والكمية (εZ_d) تمثل جزء الشحنة السالبة لكل وحدة حجم موجودة على الغبار.وهنالك حالتان خاصتان لانتشار الموجة وهي بموازاة المجال B//K وهو ما يسمى بالنمط الصوتي والعمودي على المجال $\vec{B} \perp \vec{K}$ الذي يسمى بالنمط السايكلوتروني.

2-الانماط الصوتية Accoustic (k_x=0) modes وهي على نوعين:

أ- نمط أيون غبار الصوتي(ω) >>k_zV_{td}

dust ion acoustic mode (DIA)

وهو نمط الأيون الصوتي الاعتياد والمحور بوجود غبار ذي شحنة سالبة (D'Angelo, 1990 , Shukla, 1992) ويشكل الغبار في هذه الحالة كقاعدة ثابتة ($m_d \to 0$) ، ونحصل على علاقة التشتت الاتية :

$$\frac{\omega}{K_z} = \left[\frac{K_bT_i}{m_i} + \frac{K_bT_e}{m_i(1 - \varepsilon Z_d)} \right]^{1/2} = C_{s,d} \quad (6)$$

اذ $C_{s,d}$ هي سرعة صوت الأيون المحور-الغبار dust-modified ion acoustic speed

ب- نمط الغبار الصوتي ($\omega \ll k_z V_{ti}$) DA-Dust Acoustic mode (DA)

وتردد هذا النمط قليل جداً، وتشترك فيه حبيبات الغبار في حركيات الموجة مباشرةً (Roa et al, 1990) وعلاقة التشتت لهذا النمط هي :

$$\frac{\omega}{K_z} = \left[\frac{K_b T_d}{m_d} + \varepsilon Z_d^2 \frac{K_b T_i}{m_d} \frac{1}{1+(T_i/T_e)(1-\varepsilon Z_d)}\right]^{1/2} = C_{DA} \quad (7)$$

اذ C_{DA} هي سرعة الغبار الصوتية dust acoustic velocity

4 –3- الأنماط السايكلوترونية ($k_z \ll k_x$) Cyclotron modes

تنتشر هذه الأمواج بصورة عمودية على اتجاه المجال المغناطيسي B تقريباً، وهي على نوعين:

أ- نمط سايكلوترون ايون غبار الالكتروستاتيكي ($\omega \sim \Omega_{ci}$) Electrostatic dust ion cyclotron mode (EDIC)

فعندما يكون تردد الموجة مقاربا لتردد الأيون السايكلوتروني ($\omega \sim \Omega_{ci}$) يمكن إهمال حركة حبيبات الغبار وعدها ساكنة، وتصبح علاقة التشتت كما يأتي:

$$\omega^2 = \Omega_{ci}^2 + K_x^2 \left[\frac{K_b T_i}{m_i} + \frac{K_b T_e}{m_i(1-\varepsilon Z_d)}\right] \quad (8)$$

ب- نمط سايكلوترون الغبار الالكتروستاتيكي (EDC) Electrostatic dust - cyclotron mode

في هذا النمط يؤخذ بنظر الاعتبار حركيات حبيبات الغبار الممغنطة، وعلاقة التشتت هي:

$$\varpi^2 = \Omega_{cd}^2 + K_x^2 \left[\frac{K_b T_d}{m_d} + \varepsilon Z_d^2 \frac{K_b T_i}{m_i} \frac{1}{1+(T_i/T_e)(1-\varepsilon Z_d)}\right] \quad (9)$$

5 - أ نموذج المحاكاة Simulation Model

تم إجراء المحاكاة على البلازما المكونة من أيونات البوتاسيوم (K^+) والإلكترونات، وفرضت درجة حرارة الإلكترونات (Te= 2.5 eV) ، المحصورة في مجال مغناطيسي شدته (B=0.35 T)، وقد استخدمت مادة سليكات الألمنيوم كغبار داخلها. ويتراوح حجم حبيبات الغبار من جزء من المايكرون الى عدة مايكرونات وعدت درجة حرارة حبيبات الغبار مساوية لدرجة حرارة الأيونات الموجبة ($T_i=T_d$) , وكتلة حبيبات الغبار $m_d = 3.6\ Kgm \times 10^{-16}$ وقد اعتمدت هذه القيم اعتمادا على ما جاء في المصدر (Ganguli et al, 2001)

6 - المناقشة:

1- دراسة معامل ترابط كولوم Γ

الشكل (1) يبين تغيير معامل ترابط كولوم Γ مع درجة الحرارة ويلاحظ إن العلاقة تتناقص اسياً مع درجة الحرارة فتصل إلى قيمتها الحرجة (~ 178) في درجة حرارة الغرفة تقريبا (300 K). الشكل (2) يمثل تغير Γ كدالة لكثافة حبيبات الغبار N_d عندما تكون شحنة الحبيبة Q_d ثابتة عند درجة حرارة الغرفة T_d= 300k ، ويمكن ملاحظة ان Γ تصل الى القيمة الحرجة عندما تكون $9.1 \times 10^5\ m^{-3}$ > N_d الشكل (3) يمثل تغير Γ كدالة لشحنة الحبيبة Q_d بثبات كثافة الحبيبات N_d وفي درجة حرارة الغرفة T_d=300K ,ويلاحظ ان Γ تصل الى قيمتها الحرجة عندما تكون قيمة الشحنة

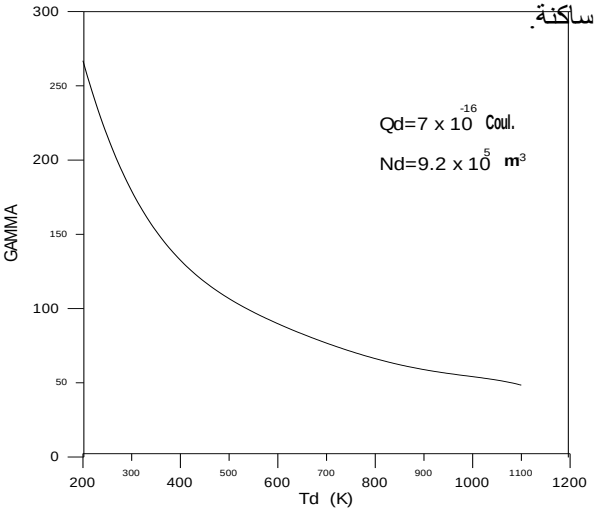
$7 \times 10^{-17}\ Q_d \geq$ Coul

2- دراسة الترددات الواطنة في البلازما المغبرة

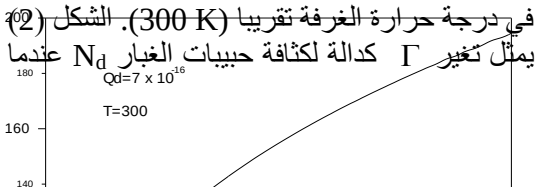
الشكل(4) يمثل تغير سرعة الطور لنمط الغبار الصوتيDA كدالة لكمية الشحنة السالبة التي تحملها حبيبات الغبار لوحدة الحجم ($\varepsilon Z_d = 1 - n_e / n_i$) , ويلاحظ ان سرعة الطور تزداد بعلاقة غير خطية مع (εZ_d) ، وقيمتها قليلة جداً (10^{-3} m./sec 3.2 ×10^{-3} - 4.4 ×) وهذا يعني انه عندما يكون الطول الموجي قصير (~ 3 mm) تكون ترددات هذا النمط قليلة جداً (9-13 Hz) ولذلك تشترك حبيبات الغبار في حركيات الموجة. وهذا النمط هو نمط جديد لا يوجد في البلازما الاعتيادية ويظهر نتيجة وجود حبيبات الغبار السالبة في البلازما.

الشكل (5) يوضح تغير سرعة الطور لنمط DIA كدالة للكمية $Z_d \varepsilon$ ويلاحظ زيادة سرعة الطور مع زيادة الشحنة السالبة على الحبيبات ولا تشترك حبيبات الغبار في حركيات الموجة لهذا النمط.

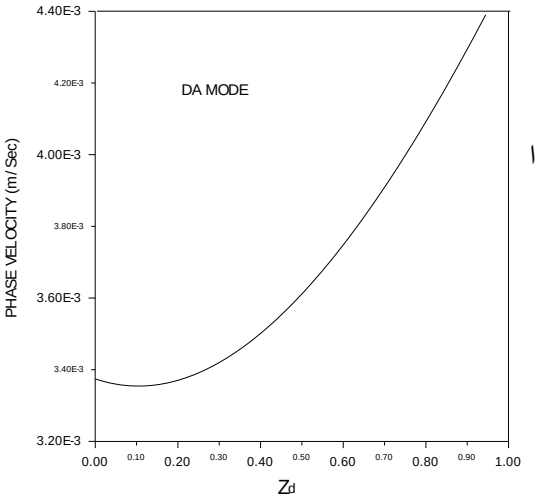
الشكل (6) يمثل علاقة التشتت الخطية لنمط EDC ويلاحظ انه للأطوال الموجية القصيرة ($\lambda \sim 1$ mm) يكون التردد قليلا جداً (22 Hz) ففي هذا النمط تشارك حبيبات الغبار في حركيات الموجة وهذا نمط جديد في البلازما ناتج عن تأثير وجود حبات الغبار السالبة في البلازما كذلك.الشكل (7) يوضح علاقة التشتت لنمط EDIC ويلاحظ انه في الأطوال الموجية القصيرة (λ ~1mm)فان التردد يكون (ω ~ 2.5 ×10^7 Hz) وهي مقاربة للتردد السايكلوتروني للايون (Ω_{ci}) ولهذا لاتشترك حبيبات الغبار في حركيات الموجة ويمكن عدها ساكنة.



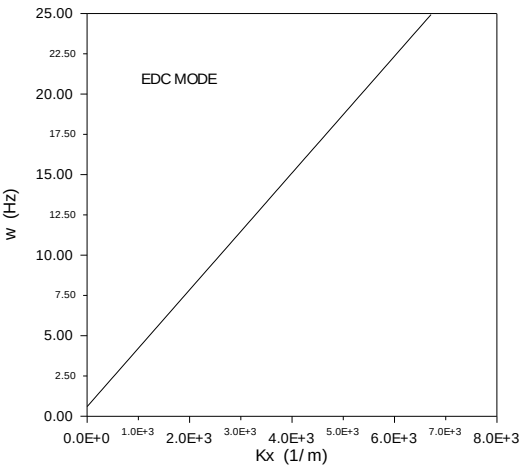
الشكل (1) معامل ترابط كولوم كدالة لدرجة الحرارة



الشكل (2) معامل ترابط كولوم كدالة كثافة الجسيمات

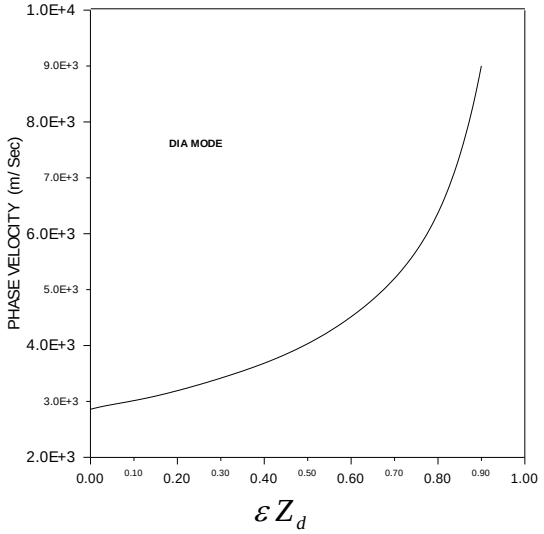


الشكل (4) سرعة الطور لنمط الغبار الصوتي DA كدالة لكمية الشحنة السالبة التي تحملها حبيبات الغبار لوحدة الحجم εZ_d

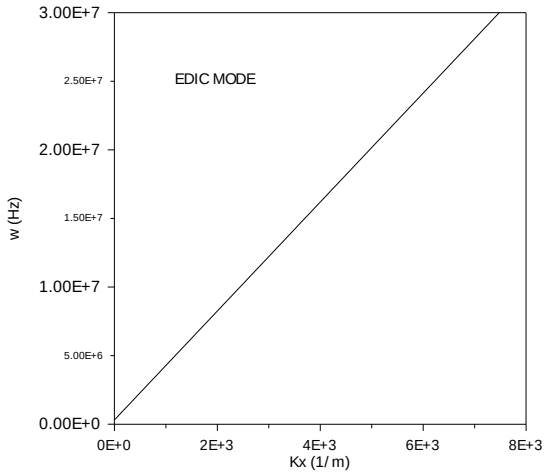


الشكل (6) علاقة التشتت الخطية لنمط

الشكل (3) معامل ترابط كولوم كدالة لشحنة الجسيمة



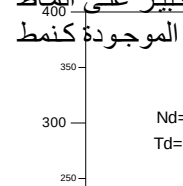
الشكل (5) سرعة الطور لنمط الغبار الصوتي DIA كدالة لكمية الشحنة السالبة التي تحملها حبيبات الغبار لوحدة الحجم εZ_d



الشكل (7) علاقة التشتت الخطية لنمط EDIC

7 - أ لاستنتاجات:

رأينا من خلال بحثنا المختصر هذا كيف ان البلازما المغبرة تعد الحالة الأكثر عمومية للبلازما، فيمكن عن طريقها دراسة بلازما الفضاء والفلك والبلازما الصناعية والمختبرية.ان وجود حبيبات غبار سالبة الشحنة في البلازما يكون له تأثير كبير على أنماط البلازما فهي إما إن تحور الأنماط الموجودة كنمط



آيون الغبار الصوتي (DIA) ونمط سايكلوترون آيون غبار الالكتروستاتيكي EDIC واما ان تظهر انماط جديدة مثل نمط الغبار الصوتي DA ، ونمط سايكلوترون الغبار الالكتروستاتيكي EDC. أ ن الانماط الجديدة هي أنماط ذات اطوال موجية قصيرة (عدة مليمترات) وترددات قليلة جداً (عدة ذبذبات) ولاشراك حبيبات الغبار في حركيات أمواج هذه الأنماط.

المصادر

1- Anderson H.M.,Badovanov S.B., 1995 "Low Frequency Waves in Dusty Plasmas",J.National Inst.Standard Tech. ,100(4):46-49.

2- D'Angelo N.,1990,"Dusty Plasma Studies in the Gaseous Electronic Conference Reference cell",Planet Space Sci. ,38(19):126-131.

3- Chen F.F.,1988,"Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion "2nd eddition,Plenum press,New York, p.273.

4- Ganguli G.,Merlino R.,Sen A.,2001 ,"Oscillation in a Dusty Plasma Medium",Washigton .

5- Bliokh P,Sinitsn V,Yaroshenko V ,1995,"Dusty and Self Gravitational Plasmas in space",Kluwer,Dordrecht ,p.37.

6- Goertz G. K.,1989,"dusty plasma in the solar system",Rev.Geophys., 27 (271):57-59.

7- Ikezi H.,1986,"Coulomb solid of small particles in plasmas",Phys. Fluids, 29(7): 1764-1768.

8- Kuo,F.S.Chinese 2000,"Numerical simulation of wave propagation in crystallized dusty plasmas: in one dimensional model" J. phys., August, 38(4):315-325.

9- MendisD.A.,Rosenberg M.,1994 ," Ionization Equilibria in Dusty Environements",Annu.Rev.Astron.Astroph. , 32(5):419-424.

10- Morfill G.E.,Thomas H.M.,1998," Physics of Dusty Plasmas",p.184, AIP Conference Proceedings 446, Woodbrug, New York,p.431-435.

11- Northrop T.G.,1992," Conditions of Phase Transition in Dusty Plasma", Phys. Scripta, 45, 475

12- Oliver,B.Dietmar P.Alexandar, 2004 ,"Study of Coulomb Parameter in Dusty Plasma",Phsycal Review Letters, 93(16):92-98.

13- Rao N.N.,Shukla P.K.,Yu M.,1990 ,"Low Frequency Waves in Dusty Plasma",Planet Space Sci.38(10) :543-546.

14- Salimullah M.,Salahuddin M,Mamun A.A.,1999,"Low Frequency Drift Wave Instabilities in a Magnetized Dusty Plasma",Astroph. Space Sci. ,262(3):215-222

15- Shukla P.K.,SilinV.P,1992," Dustion Acoustic Wave",Phys.Scripta,45 (8):508-513.

16- Spitzer L.,1978,"Physical Processes in the Interstellar Medium", Wily, New York, pp.157-162.

Proparyation of Low frequency microwave in dusty Plasma

H.H.Murbat

Abstract

The numerical simulation for the low frequency waves in dusty plasma has been studied. The studying was done by taking two special cases depending on the direction of the propagation of the wave:First, when the propagation is parallel to the magnetic field K//B,this mode is called acoustic mode.Second,when $K \perp B$ this mode is called cyclotron mode.In addition, every one of the two modes divided into two modes depending on the range of the frequency.The Coulomb coupling parameter Γ was studied, with temperature T,density of the dust particles N_d ,and the charge of the particle Q_d.The low frequency electrostatic waves in dusty grains were studied. Also, the properties of ion-acoustic waves and ion-cyclotron waves are shown to modify even through the dust grains do not participate in the wave dynamics. If the dust dynamics induced in the analysis, new " dust modes " appear.