

НАГРІВАННЯ ПОРОШИНОК У ВИПАДКОВОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

В.І. Засенко, А.Г. Загородній

Інститут теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова, Київ, Україна

Розглянуто поведінку заряджених порошинок у плазмі під дією зовнішнього випадкового електричного поля. Зміна заряду порошинок через зіткнення з електронами та іонами плазми вважається випадковим процесом. Моделювання показало, що зміна заряду порошинок приводить до їх додаткового нагрівання. Посилення нагрівання спричинено як зростанням середнього заряду порошинки, так і його флуктуаціями.

1. ВСТУП

Останнім часом було привернуто увагу до мікрохвильового випромінювання зі стохастично стрибаючою фазою. В порівнянні з регулярним випромінюванням воно здатне проникати у плазму з надкритичною густиною. Крім того, воно може ефективніше розігрівати заряджені частинки плазми, в тому числі і порошок її компоненту, якщо така міститься у плазмі. Нагрівання стохастичним полем має також ту перевагу, що просторова дифузія частинок очікується меншою, ніж при нагріванні їх через парні зіткнення, і це сприяє підтриманню газового розряду. Такі особливості випромінювання можуть бути використані при створенні нового типу газового розряду низького тиску та нового джерела оптичного випромінювання [1,2].

Нагрівання заряджених частинок електричним полем відповідає їхній дифузії у просторі швидкостей. Мірою ефективної температури при цьому є дисперсія швидкостей частинок. Величина дисперсії швидкості частинок залежить від спектру хвиль в просторі фазових швидкостей [3,4]. Для хвиль із раптовими стрибками фази відбувається розширення частотного спектру, відповідно розширюється спектр у просторі фазових швидкостей. Нагрівання відбувається ефективніше зі збільшенням частоти стрибків фази [5].

Якщо зосередитись на заряджених порошинках, необхідно зауважити, що їхній заряд і маса не залишаються постійними через зіткнення з електронами і іонами. Зарядження при цьому може розглядатися як випадковий процес. Таким чином, крім стохастичних стрибків фази хвиль будуть відбуватися стохастичні стрибки амплітуди сили, пов'язаної з електричним полем, внаслідок зміни заряду порошинок. Природно очікувати, що раптова зміна амплітуди поля також буде впливати на нагрівання частинок. Тобто стрибки амплітуди сили виступають як додатковий ефект до стрибків фази поля. Варто зауважити, що в експериментах спостерігався більший розігрів порохової компоненти, ніж оточуючої плазми [6, 7]. Пошук механізмів розігріву порошинок є цікавим також для пояснення цього явища.

Стрибки амплітуди в теоретичному дослідженні нагрівання порохової компоненти доцільніше розглядати окремо від стрибків фази. Тому в цій роботі будемо вважати, що стрибки фаз хвиль відсутні.

2. МОДЕЛЮВАННЯ ДИФУЗІЇ ПОРОШИНОК

Модель для числового аналізу дифузії частинок у зовнішньому полі детально описана в роботах [3,4], тут окреслимо її основні елементи.

Розглянемо частинки, що рухаються у випадковому електричному полі. Вважаємо, що парною взаємодією можна нехтувати. Таке припущення є обґрунтованим для нерівноважної плазми, в якій збуджено турбулентні поля помірної інтенсивності. При цьому дифузійні процеси більше обумовлені зіткненнями частинок з колективними модами, ніж парними зіткненнями. Крім того, нехтуємо зворотнім впливом частинок на електричне поле, тобто вважаємо його зовнішнім. Зовнішнє поле розглядаємо як суперпозицію хвиль з різними хвильовими векторами. Частоту вважаємо однаковою для всіх хвиль (таке припущення не є принциповим, залежність частоти від хвильового вектора не ускладнює моделювання). Розподіл інтенсивності парціальних хвиль за хвильовими числами вважаємо гаусовим; при цьому хвильове число, що відповідає максимуму розподілу, не дорівнює нулю. Крім хвильового числа, частоти і амплітуди кожна хвиля характеризується початковою фазою. В моделюванні набір фаз генерувався випадковим чином. Для вибраного набору було розраховано координату і швидкість частинки, що рухається в електричному полі, в залежності від часу. Процедура повторена для інших наборів випадкових фаз і потім знайдено залежності дисперсії координат і швидкостей частинок від часу. Дисперсія швидкості є характеристикою ефективної температури, і швидкість її зростання у часі визначає ефективність нагрівання частинок.

В цій роботі взято до уваги процес зарядження порошинок. Вважалося, що протягом певного інтервалу часу порошок із заданою ймовірністю змінює свій заряд внаслідок зіткнень з іонами і електронами. Величина зміни заряду є випадковою величиною, розподіленою в певному інтервалі. Цей інтервал є фіксованою часткою повного початкового заряду порошинки. Можна розглядати стрибки заряду порошинки на величину елементарного заряду (частинний випадок в рамках запропонованої моделі). Але припускаємо, що відбулося усереднення по деякій кількості елементарних зіткнень (по фізично малому інтервалу часу) і зміна заряду є не дискретною величиною, а визначається рівнорозподілом у фіксованому інтервалі. У наступному розділі розглянемо характерні випадки зміни заряду і часової поведінки дисперсії швидкості порошинок, що характеризує їхнє нагрівання.

2.1. НАГРІВАННЯ ПОРОШИНОК

Порошинки занурені в плазму обмінюються з нею електронами і іонами. Найбільш типовою є ситуація, коли порошинки заряджаються негативно поки потоки іонів і електронів на їхню поверхню не зрівняються. На обмеженому відтинку часу перехідного процесу можна припустити, що поглинуті порошинкою електрони майже не впливають на подальше заряджання, і ймовірність поглинання не змінюється з часом.

Після перехідної стадії обмін зарядами порошинки з плазмою вийде на стаціонарний режим, при цьому заряд порошинки в середньому не буде змінюватись, а відбуватимуться тільки його флуктуації. Тоді знову ймовірність зміни заряду можна вважати незалежною від часу, хоч вона буде відрізнятися від тієї, що розглядалася раніше.

В цій роботі ми не намагась точно врахувати зміни ймовірності поглинання у часі по мірі накопичення частинкою заряду. Метою є показати на якісному рівні існування двох механізмів нагрівання, що реалізуються в перехідному і стаціонарному режимах заряджання порошинок. У зв'язку з цим наведені на рисунках залежності подано в умовних одиницях.

2.2. НАГРІВАННЯ ПРИ НАКОПИЧЕННІ ЗАРЯДУ

Розглянемо перехідний процес заряджання порошинок, коли вони із заданою ймовірністю, віднесеною до одиниці часу, накопичують заряд. На Рис.1 показано, як зростає дисперсія швидкості в часі.

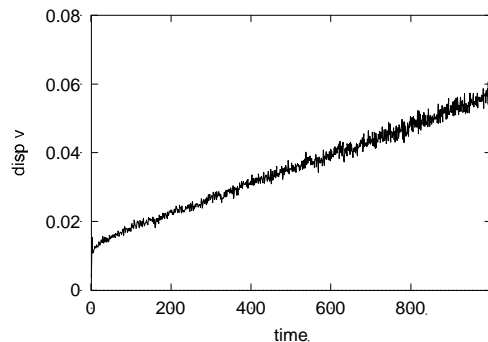


Рис.1. Дисперсія швидкості порошинки при накопиченні нею заряду

На Рис.2 наведена часова залежність дисперсії для частинки з незмінним зарядом, його величина співпадає із зарядом порошинки в початковий момент. З порівняння Рис.1 та 2 видно, що темп нагрівання частинок зростає, якщо частинка накопичує заряд. Щоб прояснити причину швидшого нагрівання розрахуємо зростання заряду порошинки в часі (усередненого по ансамблю порошинок) для випадку, показаному на Рис.1. Через постійну ймовірність акумуляції заряду порошинкою її заряд збільшується лінійно з невеликими флуктуаціями (Рис.3).

Щоб остаточно з'ясувати причину більш інтенсивного нагрівання порошинок було розраховано дисперсію швидкості частинок в полі, амплітуда якого зростає в часі регулярно, без флуктуацій, за тим же лінійним законом, що і заряд на Рис.3.

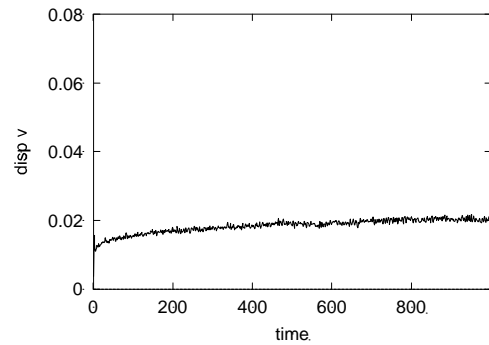


Рис.2. Зростання дисперсії швидкості частинки з постійним зарядом є меншим, ніж порошинки, що накопичує заряд

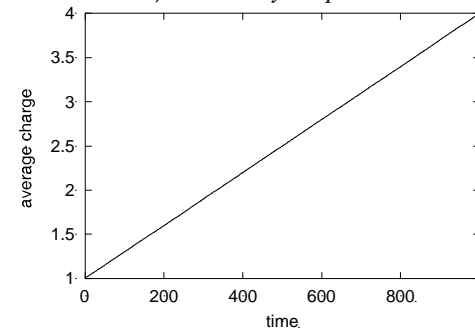


Рис.3. Накопичення середнього (за ансамблем) заряду порошинки з часом (заряд нормований на початкове значення)

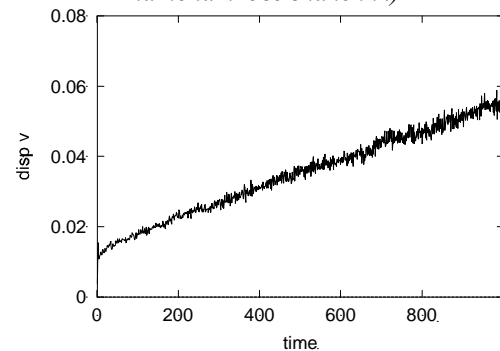


Рис.4. Дисперсія частинок в електричному полі, амплітуда якого зростає так само, як середній (за ансамблем) заряд порошинки

З порівняння дисперсій порошинок при накопиченні заряду та частинок в полі з лінійно зростаючою амплітудою (див. Рис.1 та 4) можна зробити висновок, що незначні флуктуації заряду порошинки не відіграють помітної ролі у збільшенні темпу нагрівання, коли порошинка накопичує заряд. Ефект нагрівання на перехідній стадії, пов'язаний саме із зростанням його середнього значення. До розгляду нагрівання, спричиненого флуктуаціями заряду порошинки, повернемося в розд. 2.3.

2.3. ДИСПЕРСІЯ КООРДИНАТ ПРИ ЗМІНІ ЗНАКУ ЗАРЯДУ

А тепер зупинимось на випадку, коли в плазму занурюють позитивно заряджені порошинки, які потім при зіткненні з частинками плазми, як і в попередньому випадку, накопичують негативний заряд. В певний момент часу заряд порошинки змінює знак. Це відбувається на поведінці дисперсії порошинок. На Рис.5, 6 показано часову залежність дисперсії швидкості порошинок і відповідну поведінку заряду.

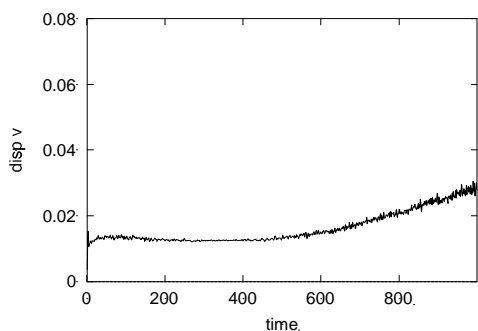


Рис.5. Дисперсія швидкості порошинок, коли їхній заряд змінює знак

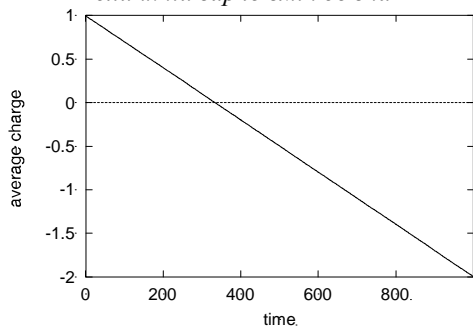


Рис.6. Зміна знаку середнього (за ансамблем) заряду порошинки

Коли заряд порошинок досягає нульового значення, електричне поле перестає діяти на них. В цей момент рух частинок перестає бути дифузійним, і вони розлітаються з набраними раніше швидкостями. При цьому зростання дисперсії швидкості в часі загальмовується, проте дисперсія координати, навпаки швидко зростає. На Рис.7 наведено порівняння поведінки просторової дисперсії порошинок без зміни знаку середнього заряду і з його зміною.

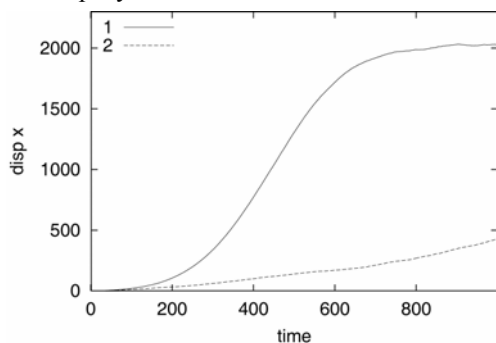


Рис.7. Просторова дисперсія порошинок зі зміною середнього заряду (суцільна крива 1) в порівнянні з дисперсією, коли такої зміни не відбувається (штрихова крива 2). Відповідні дисперсії швидкостей подано на Рис.1 та 5

Стрімке зростання просторової дисперсії порошинок з малим зарядом свідчить про те, що набравши певних швидкостей, вони можуть полишати обмежений об'єм, в якому утримується плазма.

2.4. НАГРІВАННЯ ПРИ НЕЗМІННОМУ СЕРЕДНЬОМУ ЗАРЯДІ

Розглянемо тепер стаціонарний режим, коли ймовірності накопичення позитивного і негативного зарядів в одиницю часу є рівними. При цьому нагрівання, пов'язане зі зміною середнього (за ансамблем порошинок) заряду, відсутнє. На Рис.8,9 подано

часову еволюцію дисперсії швидкості порошинок і відповідну поведінку заряду.

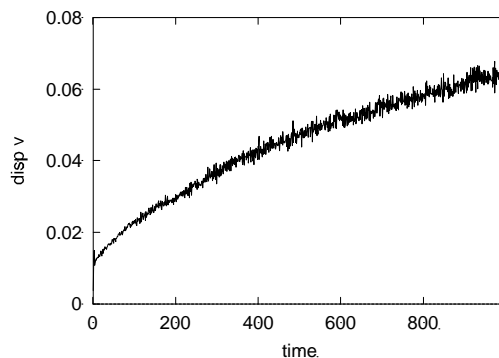


Рис.8. Дисперсія швидкості порошинок, є більш інтенсивною за рахунок флуктуацій

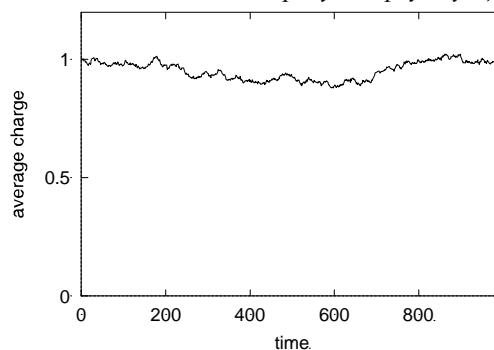


Рис.9. Середній (за ансамблем) заряд порошинки слабо змінюється в часі

Середній (за ансамблем порошинок) заряд майже не змінюється в часі. Тим не менше дисперсія частинок є інтенсивнішою, ніж за відсутності флуктуацій заряду порошинок (див. Рис.2). Ефект нагрівання внаслідок флуктуацій є слабшим, ніж той, що пов'язаний із зростанням заряду. Його можна не помітити на тлі більш сильного ефекту (так дисперсія внаслідок обох ефектів, показана на Рис.1 є ледь більшою, ніж за відсутності флуктуацій – Рис.4). В моделюванні, результати якого подані в цьому розділі, для виявлення ефекту нагрівання було взято більшу величину флуктуацій і більше значення ймовірності поглинання елементарних зарядів, ніж у попередніх розділах. Тут необхідно зауважити, що підсилення нагрівання порошинок внаслідок флуктуацій продовжує діяти і в стаціонарному режимі, коли накопичення заряду порошинками вийшло на насичення. Тоді як підсилення нагрівання за рахунок зростання заряду обмежено перехідною стадією накопичення заряду порошинкою, тобто коротким проміжком часу. Таким чином, не зважаючи на відносну слабкість ефекту нагрівання порошинок за рахунок флуктуацій їхнього заряду, він може бути помітним на реальних часах спостережень запорошеної плазми.

ВИСНОВКИ

В роботі виконано моделювання дифузії порошинок під дією випадкового поля з урахуванням зміни заряду, що спричинена їхньою взаємодією з плазмовим оточенням. Показано, що в перехідному режимі, коли частинка накопичує заряд, нагрівання зовнішнім полем посилюється через збільшення прискорення, спричиненого зростанням заряду по-

рошинки. В стаціонарному режимі, коли в середньому заряд порошинки не змінюється, нагрівання підсилюється внаслідок флуктуацій заряду. Другий ефект є слабшим, але діє він протягом довшого часу; тому обидва ефекти можуть бути помітними в експериментальних спостереженнях нагрівання порошинок у плазмі.

Робота виконана в рамках проекту ДФФД Ф28.2/055 та цільової програми ВФА.

ЛІТЕРАТУРА

1. V.I. Karas', V.D. Levchenko. Penetration of a Microwave with a Stochastic Jumping Phase (MSJP) into Overdense Plasmas and Electron Collisionless Heating by It // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods»*. 2003, №4, p.133-136.
2. В.И. Карась, Я.Б. Файнберг, А.Ф. Алисов и др. Взаимодействие с плазмой или газами микроволнового излучения со стохастически прыгающей фазой // *Физика плазмы*. 2005, т.30, №9, с.810-822.
3. V. Zasenko, A. Zagorodny, J. Weiland. Stochastic Acceleration in Peaked Spectrum // *Phys. Plasmas*. 2005, v.12, p. 062311.
4. A. Zagorodny, V. Zasenko, J. Weiland, I. Holod. Particle diffusion in random fields: time-nonlocal description and numerical simulation // *Phys. Plasmas*. 2003, v.10, p.58-63.
5. V.I. Karas, I.V. Karas, A.G. Zagorodny, V.I. Zasenko, I.F. Potapenko, A.N. Starostin. Dependence of threshold capacity of breakdown on pressure of gas in various operating modes of the generator of microwave radiation with jumps of a phase // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2010, т.15, №3, с.47-68.
6. A. Melzer, A. Homann, A. Piel. Experimental investigation of the melting transition of the plasma crystal // *Phys. Rev. E*. 1996, v.53, p.2757-2766.
7. G.E. Morfill, H.M. Thomas, U. Konopka, M. Zuzic. The plasma condensation: Liquid and crystalline plasmas // *Phys. Plasmas*. 1999, v.6, p.1769-1790.

Статья поступила в редакцию 09.06.2010 г.

DUST PARTICLE HEATING IN RANDOM ELECTRIC FIELD

V.I. Zasenko, A.G. Zagorodny

We consider the behavior of charged dust particles in plasma undergoing to an external random electric field. Variation of dust charge due to collisions with plasma electrons and ions is assumed to be a random process. Simulation shows that dust charge variation leads to their additional heating. Increase of heating is caused by both growth of the average charge of dust particles, and its fluctuations.

НАГРЕВ ПЫЛИНОК В СЛУЧАЙНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В.И. Засенко, А.Г. Загородний

Рассмотрено поведение заряженных пылинок в плазме под воздействием внешнего случайного электрического поля. Изменение заряда пылинок вследствие столкновений с электронами и ионами плазмы трактуется как случайный процесс. Моделирование показало, что изменение заряда пылинок приводит к их дополнительному нагреву. Усиление нагрева вызвано как увеличением среднего значения заряда пылинок, так и его флуктуациями.