

УДК 537.525.1

М.М. Макар, Н.С. Афанасьева, Е.С. Дзлиева, В.Ю. Карасёв, С.И. Павлов

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Россия, plasmadust@yandex.ru

МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЫ В ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Уединенная пылевая гранула в низкотемпературной плазме обладает собственным вращением под действием потоков, поступающих на ее поверхность в процессе поддержания стационарного заряда. Для управления потоками в эксперименте используется наложенное магнитное поле. Регистрация собственного вращения, изменения величины и направления угловой скорости, служит методом контроля потоков.

В представляемой работе при применении пылевых частиц различных геометрических форм, обнаружен пороговый характер возникновения вращения, а также изменение его скорости. Результаты показывают, что пылевая плазма обладает парамагнитными свойствами.

ПЫЛЕВАЯ ГРАНУЛА, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД, МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ, ИОННЫЕ ПОТОКИ, СИЛА ИОННОГО УВЛЕЧЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Пылевая (комплексная) плазма представляет собой систему макрочастиц как правило, микронного размера, находящуюся в низкотемпературной плазме. Каждая пылевая гранула несет на своей поверхности заряд $10^3 - 10^6$ элементарных, благодаря чему потенциальная энергия взаимодействия частиц между собой превышает их тепловую. В такой системе происходит процесс самоорганизации пылевых частиц в так называемый плазменный кристалл, являющийся объектом пристального внимания в последние 15 лет [1]. Изучаются структурные, электрические, кинетические, механические свойства комплексной плазмы. Известны работы по применению частиц из материала обладающего постоянной намагниченностью с целью изучения их агломерации и условий левитации [2]. Проблема исследования магнитных свойств пылевой плазмы до сих пор не ставилась.

Задача изучения поведения отдельных частиц впервые была поставлена в [3]. Ее важность связана с изучением плазменных потоков, идущих на поверхность гранулы, рядом промышленных приложений, а также фундаментальной задачей – пониманием поведения пылевых структур во внешнем магнитном поле [4, 5, 6] и изучением магнитных свойств пылевой подсистемы. Реализация данной задачи представляет собой техническую проблему, поскольку необходимо не только на кинетическом уровне наблюдать отдельную частицу в плазме, но детектировать ее механическое состояние. Благодаря применению прямой оптической методики измерения вращения отдельных гранул вокруг собственной оси, предложенной авторами статьи [7, 8], появилась возможность ставить необходимые эксперименты и проводить детальные продолжительные измерения на кинетическом уровне с большим оптическим увеличением.

В настоящей работе представлены количественные измерения собственного вращения пылевых частиц, с которым связаны магнитные моменты, с учетом влияния внешнего магнитного поля. В частности, такое влияние впервые подтверждено экспериментально.

Помимо названной методики в экспериментах применялась также скоростная видеосъемка с высоким оптическим увеличением.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Суть проводимого эксперимента заключается в прямом оптическом наблюдении отдельных пылевых частиц размером 10-50 мкм, находящихся в плазме, и в определении их механического состояния – поступательного и вращательного движения. Методика координатной развертки и конструкция разрядной камеры детально описаны в [7, 8]. В настоящих экспериментах центральная часть камеры – вертикальная разрядная трубка – целиком помещалась в магнитное поле, созданное широкой катушкой и направленное вертикально, соосно трубке вверх или вниз. Его абсолютная величина изменялась в пределах от 0 до 250 Гс. В качестве пылевых частиц были использованы полидисперсные микросферы радиусом от 5 до 60 мкм, в которых присутствовали дефектные. Рабочим газом были неон и его смесь с водородом при давлениях в несколько десятых мм. рт. ст. и токах 2 – 4 мА. Эксперимент проводился следующим образом. При установленных условиях зажигался разряд, затем вбрасывались частицы. Наблюдения производились каждый раз за единственной частицей, находящейся в пылевой ловушке, имеющейся в головной части страты, первой от сужения токового канала со стороны анода [8].

Предварительно было установлено [9], что для частиц идеально сферической формы в данном диапазоне магнитного поля изменений угловой скорости собственного вращения в пределах погрешности эксперимента не обнаружено. Причина возникновения собственного вращения связана с наличием на поверхности частиц дефектов [8]. Поэтому в представляемых экспериментах было решено производить наблюдения за частицами, форма которых существенно отличается от сферической, такие дефектные частицы присутствовали в используемом порошке. Именно применение подобных сильно асимметричных частиц позволило зарегистрировать влияние магнитного поля на их механическое состояние. При наблюдении порядка нескольких тысяч уединенных частиц было отобрано около сотни наблюдений асимметричных, их которых информативными оказались несколько десятков. Проведение и анализ подобных экспериментов существенно затратны по времени, но к настоящему моменту можно выделить несколько определенных результатов.

Отдельные пылевые частицы могут иметь орбитальное движение в горизонтальной плоскости с достаточно малой частотой – единицы и десятые Гц. Наблюдаются частицы, движущиеся в отсутствие магнитного поля в обоих круговых направлениях. Пример зависимости угловой скорости от индукции магнитного поля показан на рис.1. Положительное значение вектора магнитной индукции на представляемых графиках соответствует направлению вверх, за положительное направление угловой скорости принято направление совпадающее с вектором магнитной индукции.

Обнаружение и изучение собственного вращения частиц при отсутствии орбитального движения является главной задачей работы. Частицы, обладающие только таким вращением, можно разделить на две группы: не изменяющие направления вращения и изменяющие его скачкообразно при достижении магнитным полем некоторой величины. На рис.2. представлен фрагмент зависимости угловой скорости без переворота частицы при изменении величины и полярности индукции магнитного поля. Рис.3 демонстрирует самую общую наблюдаемую закономерность – как гладкое (линейное) изменение величины угловой скорости, так и ее скачкообразное изменение, связанное с переворотом ее направления. Соединяющая экспериментальные точки линия показывает динамику направления угловой скорости.

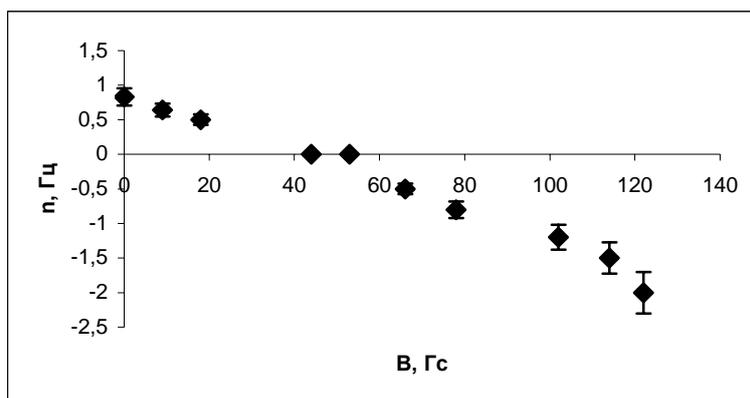


Рис. 1. Пример зависимости частоты орбитального движения уединенной частицы от индукции магнитного поля. Условия: ток 2,1 мА, газ – смесь неона с водородом 2:1 при давлении 0,3 мм рт. ст., частота съемки 30 Гц

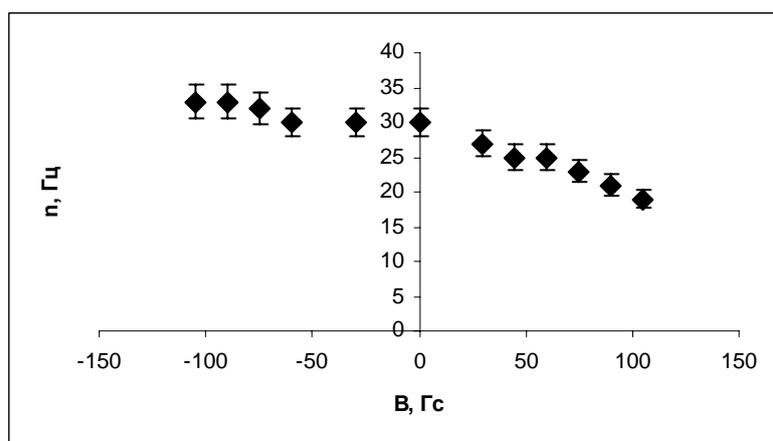


Рис. 2. Пример гладкой спадающей зависимости вертикальной составляющей угловой скорости собственного вращения асимметричной пылевой частицы. Условия: ток 3 мА, газ – смесь неона с водородом 2:1 при давлении 0,3 мм рт. ст., частота съемки 150 Гц

Обсуждая обнаруженные закономерности, выделим следующее. На рассмотренной выборке частиц в отсутствие магнитного поля угловая скорость собственного вращения имеет положительный знак – при наблюдении сверху частиц в форме палочек, расположенных в разряде горизонтально, их вращение вокруг вертикальной оси происходит против часовой стрелки. Поскольку у частиц существует и более быстрое вращение вокруг осей их фигур [8] (не обсуждаемое в настоящей работе), то такие частицы подобны симметричным волчкам и могут обладать прецессией, например, вынужденной прецессией под действием силы тяжести, центр приложения которой не совпадает с геометрическим центром частицы. Вектор угловой скорости такой прецессии направлен вертикально вверх. Частота прецессии при наложении магнитного поля может измениться при изменении скорости собственного вращения частицы вокруг оси фигуры. Кроме того, монотонное изменение частоты вращения вокруг вертикальной оси может быть вызвано другой причиной - действием ионного потока на торцевые части частицы [10].

Обсуждая немонотонное изменение – скачок угловой скорости, нужно сказать, что оно может происходить в обе стороны: от совпадающих по направлению векторов магнитного момента частицы и магнитного поля к противоположному, и обратно, к устойчивому положению равновесия в магнитном поле. Это возможно при толчке вращающейся заряженной частицы, например, при изменении параметров разряда (положения страты), связанном с изменением индукции наложенного магнитного поля.

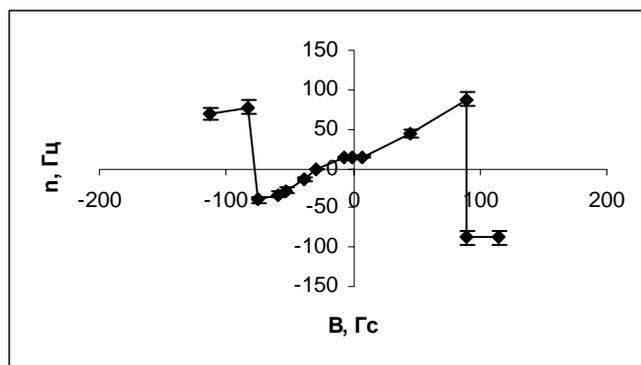


Рис. 3. Зависимость вертикальной составляющей угловой скорости собственного вращения асимметричной частицы в магнитном поле. Зависимость имеет гладкий участок и скачкообразное изменение, связанное с перевертотом. Условия: ток 2,1 мА, газ – смесь неона с водородом 2:1 при давлении 0,3 мм рт. ст., частота съемки 1000 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе обнаружен эффект воздействия внешнего магнитного поля на собственное вращение пылевых гранул. Зарегистрировано плавные изменения частоты вращения вытянутых пылевых гранул, а также скачкообразные изменения, связанные с перевертотом самих пылевых волчков. Предложена качественная интерпретация обнаруженных эффектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Цытович В.Н., Морфилл Г.Е., Томас Х. // Физ. плазм. 2002. Т.28. N.8. С. 675 – 707.
2. Samsonov D., Zhdanov S., Morfill G. // New Journ. Phys. 2003. V. 5. P. 24.1–24.10.
3. Sato N., Uchida G., Kaneko T. // Phys. Plasmas, 2001, V.8, N.5.P.1786-1790.
4. Karasev V. Yu. // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. P. 066403
5. Конорка У., Samsonov D., Ivlev A.V. // Phys. Rev. E 2000. V.61. P.1890-1898.
6. D'yachkov L.G., Petrov O.F., Fortov V.E. // Contr. Plasma Phys. 2009. V. 49. P.134.
7. Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И., Дзлиева. Е.С. // Вест. СПбГУ, Сер:Физика, 2008. В.4. С.113.
8. Karasev V. Yu. // Phys. Rev. E. 2009. V. 79. P. 026406.
9. Karasev V. Yu., Dzljeva E. S., Eikhval'd A.I. // PNP-13. Moscow: IPCP RAS, 2009. P.70.
10. Семенов Р. И., Карасев В.Ю., Иванов А.Ю. // Вестник СПбГУ, Серия 4:Физика, химия, 2009. В.4. С.140-142.

Macar M.M., Pavlov S.I., Dzljeva E.S., Karasev V.Yu., Afanaseva N. S.

Saint-Petersburg State University, Russia, plasmadust@yandex.ru

INVESTIGATION OF GLOW DISCHARGE PROPERTIES WITH SINGLE DUST PARTICLES

The magnetic field influence to angular velocity of a dusty particle self rotation are detected in the magnetic field range up to 250 G. The observation was conducted with single particles having asymmetry shape oriented in horizontal plane. High speed detector of motion was applied. The mine obtained results are: lineal character of angular velocity changing on the magnetic field, and a uneven changing of velocity direction. A quality interpretation is presented.

DUST GRAIN, MAGNETIC FIELD, GLOW DISCHARGE, VISUALISATION METHOD, ION GLOWS, ION DRAG FORCE DUSTY PLASMA