

Об ионном увлечении как механизме вращения плазменно-пылевой структуры в страте в магнитном поле

© Е.С. Дзлиева, В.Ю. Карасев, И.Ч. Машек, С.И. Павлов

Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: plasmadust@yandex.ru, v.karasev@spbu.ru

(Поступило в Редакцию 13 мая 2015 г. В окончательной редакции 13 июля 2015 г.)

Методом зондирования калиброванными пылевыми частицами различающихся размеров прозондирована область стоячей страты, в которой существует левитация пылевых структур, в наложенном магнитном поле в условиях повышенного давления для экспериментов по изучению комплексной плазмы. Измеренная азимутальная скорость зондирующих частиц соответствует действию силы ионного увлечения для частиц размером $4\ \mu\text{m}$ и увлечению вращающимся газом из-за действия электронного вихревого тока в теле страты для частиц размером $1\ \mu\text{m}$. Проведенная экстраполяция к давлениям и диапазону магнитного поля для экспериментов, в которых наблюдается инверсия вращения пылевых структур, показывает, что доминирующей силой, вызывающей вращение с отрицательной проекцией угловой скорости на индукцию магнитного поля, является ионное увлечение.

Введение

Продуктивным методом исследования комплексной плазмы [1,2] является наложение на плазменно-пылевое образование внешнего управляемого воздействия и наблюдение и интерпретация отклика системы. Одним из возможных воздействий оказалось помещение комплексной плазмы в магнитное поле [3–7]. Последнее действует на пылевую компоненту опосредованно, через потоки плазменных частиц, что дает широкую возможность при исследованиях варьировать данное воздействие. Вместе с тем магнитное поле изменяет условия в фоновой плазме, особенно в областях ее резких неоднородностей. Обнаруженная сложная динамика пылевых структур, созданных в тлеющем разряде в магнитном поле [5,6], получила в последние три года широкое обсуждение [8–11]. В настоящее время возник вопрос о выборе среди альтернативных моделей для описания инверсии угловой скорости вращения пылевых структур в тлеющем разряде в магнитном поле.

В недавней работе [12] была предложена вариация одной из возможных доминирующих сил, действующих на пылевую структуру в магнитном поле — силы ионного увлечения. Увеличение силы ионного увлечения приводило к подавлению конкурирующего механизма и в общем случае к невозможности изучать инверсию вращения [5,6]. После анализа результатов [12] стало ясно, что для исследования инверсии нужно варьировать ионное увлечение, но при этом не подавлять действия силы Ампера. Новым возможным способом вариации силы ионного увлечения может служить применение калиброванных монодисперсных частиц различающихся размеров, чему и посвящено настоящее сообщение.

В эксперименте с комплексной плазмой невозможно создать плазменные кристаллы из частиц различающихся размеров в идентичных разрядных условиях, зависимость левитации частиц от их размеров детально исследована в [13].

Поэтому для исследования было решено применить метод зондирования плазменно-пылевой ловушки частицами сильно отличающихся размеров в условиях, когда зондирующие частицы, падая в вертикальном разряде в магнитном поле, поддаются наблюдению, при котором можно измерить их азимутальную скорость в зависимости от вертикальной координаты на длине страты.

Эксперимент и результаты

Метод измерения и используемая установка (рис. 1, *a*) были теми же, что применялись для зондирования разряда полидисперсными частицами [5,14,15]. Разрядная трубка ориентирована вертикально катодом вниз. Условия разряда были выбраны следующие: газ неон, давление $2\ \text{mm Hg}$, ток разряда $1.6\ \text{mA}$, магнитное поле $120\ \text{G}$. При этих условиях в разрядной трубке радиусом $1.5\ \text{cm}$ формировались резкие стоячие страты, и время пролета зондирующих частиц было достаточным для регистрации. Регистрировалась азимутальная проекция движения сверху на стандартную видеокамеру при боковой подсветке всего сечения трубки лазерным пучком толщиной $3\ \text{mm}$ (рис. 1, *b*).

Типичные результаты зондирования калиброванными частицами диаметром 1.10 ± 0.04 и $4.10 \pm 0.14\ \mu\text{m}$ сферической формы плотностью $1.5\ \text{g/cm}^3$ представлены на рис. 2. Графики показывают зависимость проекции угловой скорости частиц на вектор магнитного поля от продольной координаты. На рисунке вертикальной чертой обозначена граница светящейся части страты (голова страты), непосредственно над которой в экспериментах формируются пылевые структуры. Эта область $h = 0 - 5\ \text{mm}$ и представляет интерес для исследования. В области под стратой, $h = -(15 - 0)\ \text{mm}$, работает другой механизм вращения [8–11,15], не исследуемый в настоящей работе.

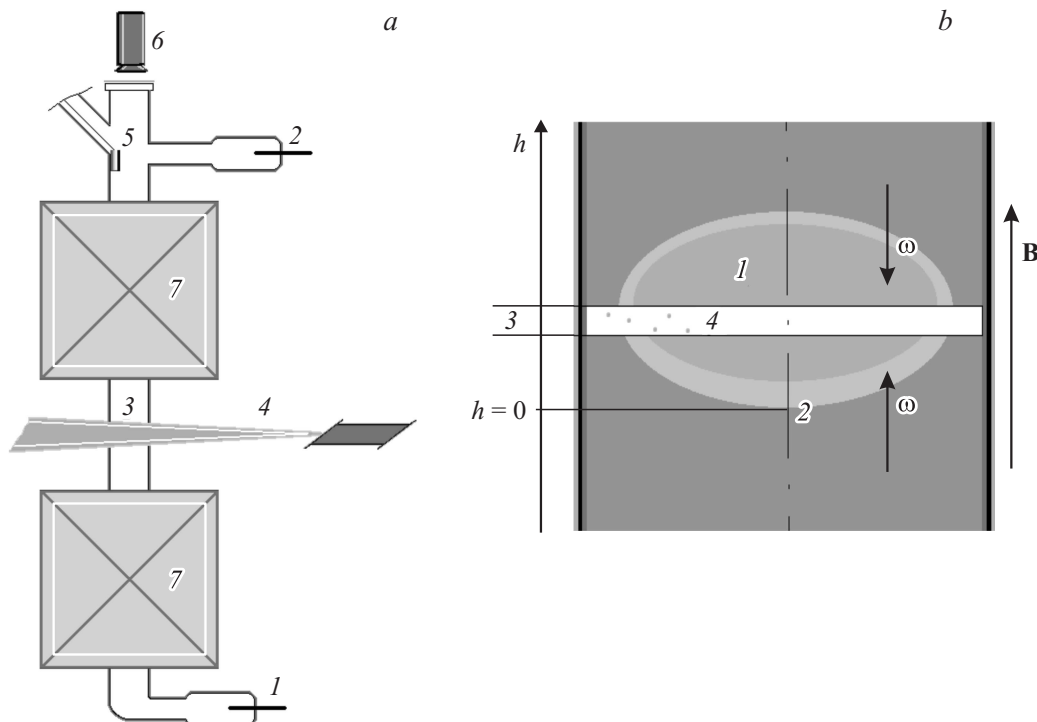


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной установки: 1 — катод, 2 — анод, 3 — область наблюдения зондирующих частиц, 4 — лазерная подсветка, 5 — контейнер с частицами, 6 — видеокамера, 7 — магнитные катушки; *b* — схема, поясняющая зондирование страты: 1 — страта, 2 — нижняя светящаяся граница страты, 3 — подсветка лазерным пучком толщиной 3 мм, 4 — зондирующие частицы, падающие сквозь подсвечиваемую область. Измерялась проекция угловой скорости азимутального движения частиц на направление вектора магнитного поля. На схеме указаны направления угловой скорости на разных h .

Результаты показывают, что в области левитации пылевой структуры вращение больших по размеру зондирующих частиц происходит быстрее. Например, при координате 0–5 мм, частицы диаметром 4 мкм вращаются со скоростью почти в 2 раза большей чем частицы диаметром 1 мкм.

Интерпретация

Интерпретация результатов показывает, что на частицы в страте в данных условиях и магнитном поле 120 Г действует сила ионного увлечения как доминирующая, а увлечение вращающимся газом разряда, существующее из-за вихревого тока в страте, имеет меньшую величину. Приведем количественные оценки.

Выражение для угловой скорости вращения уединенной частицы под действием силы ионного увлечения и силы торможения в режиме свободного пролета — силы Эпштейна [1,2] — имеет следующий вид [13]:

$$\omega = \frac{U_{ir}}{r_d} \frac{\omega_{iB}}{v_{ia}} \frac{n_i}{n_a} \sqrt{\frac{T_i}{T_a}} \sqrt{\frac{m_i}{m_a}} \left\{ 1 + \frac{z\tau}{2} + \frac{z^2\tau^2}{4} \Pi \right\}. \quad (1)$$

Здесь U_{ir} — радиальная скорость потока ионов, r_d — радиальная координата зондирующей частицы, ω_{iB} — циклотронная частота иона, v_{ia} — транспортная частота столкновения ионов с атомами, $\tau = T_e/T_i$,

$z = Z_d e^2 / a T_e$ — безразмерный заряд пылинки, Z_d — ее зарядовое число, Π — модифицированный кулоновский логарифм, проинтегрированный с функцией распределения ионов по скоростям. При условиях $U_{ir} \approx 600$ м/с, $r_d \approx 5 \cdot 10^{-3}$ м, $\omega_{iB} \approx 0.56 \cdot 10^5$ рад/с, $v_{ia} \approx 7.5 \cdot 10^6$ с $^{-1}$, $n_a \approx 3.5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, $n_i \approx 1 \cdot 10^9$ см $^{-3}$, $Z_d \approx 10^3$ (для частиц 1 мкм), $Z_{d2} \approx 3 \cdot 10^4$ (для частиц 4 мкм), $\Pi = 1$, абсолютное значение угловой скорости, вычисленное по формуле (1), на участке, где левитирует пылевая структура, для частиц размером 4 мкм оказывается порядка 0.3 рад/с, а для частиц размером 1 мкм около 0.05 рад/с. Экстраполяция к условиям работы [5] дает значения 2.7 и 0.45 рад/с соответственно.

Абсолютное значение скорости вращения газа разряда из-за петлевого тока в стратах определяется выражением [8–11]

$$\Omega_a \approx \frac{1}{3} n_e \tau \sigma_a \frac{\omega_{eB}}{v_{ea}} \sqrt{\frac{T_a}{m_a}}. \quad (2)$$

Здесь n_e — концентрация электронов (которая сильно зависит от высоты h [8,9]), σ_a — газокинетическое сечение рассеяния атома, ω_{eB} — циклотронная частота электрона, v_{ea} — транспортная частота столкновения электронов с атомами. Зондирующая частица успевает приобрести скорость вращения газа за характерное

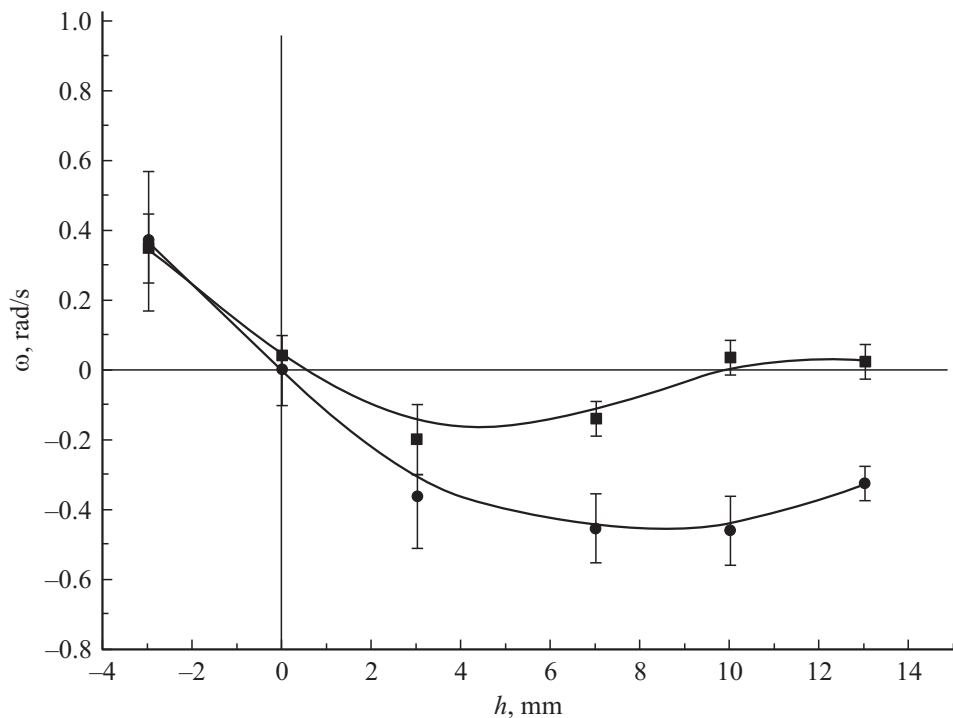


Рис. 2. Проекция азимутальной скорости зондирующих частиц на направление индукции магнитного поля при различных вертикальных координатах в страте. Граница светящейся части стоячей страты отмечена вертикальной линией. Положительное направление вертикальной координаты h направлено вверх в сторону анода. Условия: газ неон, давление $p = 1 \text{ mm Hg}$, ток разряда $i = 1.6 \text{ mA}$, магнитное поле $B = 120 \text{ G}$, размер частиц (■) — $1.1 \mu\text{m}$, (●) — $4.1 \mu\text{m}$.

время Δt , определяемое силой трения частицы о газ:

$$\Delta t = \frac{3m\nu\tau}{8\sqrt{2}\pi a^2 P}. \quad (3)$$

По оценкам, оно составляет порядка 1 ms , т.е. существенно меньше времени регистрации частицы в кадре 40 ms . Можно считать, что приведенное выражение отражает скорость вращения частиц под действием увлечения газом. Численная оценка по формуле (2) при параметрах $n_e \approx 1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$, $\tau \approx 100$, $\sigma_a \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$, $\omega_{eB} \approx 1.4 \cdot 10^9 \text{ rad/s}$, $v_{ea} \approx 7 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ дает 0.2 rad/s , что меньше, чем вследствие действия ионного увлечения для частиц размером $4 \mu\text{m}$, но больше, чем для частиц размером $1 \mu\text{m}$ для наших условий. Экстраполяция к условиям [5] дает значение 0.6 rad/s .

Таким образом, в диапазоне магнитного поля от 0 вплоть до его значения B_0 , при котором наступает инверсия вращения [5–12], на вертикальной координате h , соответствующей левитирующей пылевой структуре, угловая скорость зондирующих частиц соответствует выражению для вращения под действием силы ионного увлечения для частиц размером $4 \mu\text{m}$. Для частиц размером $1 \mu\text{m}$ оба механизма сравнимы по действию. В работах [5,6] применялись частицы с размером 5 и $2 \mu\text{m}$, на основании выполненного зондирования можно утверждать, что доминирующей силой для них в используемом диапазоне магнитного поля являлось ионное увлечение.

Заключение

В настоящей работе применен способ варьирования силы ионного увлечения, действующей на пылевую частицу, альтернативный к способу, примененному в [12]. С помощью зондирования пылевой ловушки в стратах в тлеющем разряде в магнитном поле калиброванными частицами различающихся размеров показано, что динамика вращения пылевых структур в магнитном поле до значения, при котором наступает инверсия угловой скорости вращения [5,6], определяется силой ионного увлечения.

Эксперимент выполнен при поддержке РФФ грант № 14-12-00094. Оценка силы ионного увлечения и моделирование при различных давлениях проведено при поддержке РФФИ грант № 14-02-00313.

Список литературы

- [1] Fortov V.E., Morfill G.E. Complex and dusty plasmas: from laboratory to space (N.Y.: Taylor & Francis Group) 2010. 440 p.
- [2] Tsytoich V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H.M. Elementary Physics of complex plasmas. N.Y.: Springer, 2008. 370 p.
- [3] Konopka U., Samsonov D., Ivlev A.V., Goree J., Steinberg V., Morfill G. E. // Phys. Rev. E. 2000. Vol. 61. P. 1890.

- [4] *Sato N., Uchida G., Kaneko T., Shimizu S.* // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8. P. 1786.
- [5] *Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Ivanov A.Yu., Eikhval'd A.I.* // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74. P. 066 403.
- [6] *Vasiliev M.M., D'yachkov L.G., Antipov S.N., Petrov O.F., Fortov V.E.* // JETP Lett. 2007. Vol. 86. P. 358.
- [7] *Schwabe M., Konopka U., Bandyopadhyay P., Morfill G.E.* // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. 106. P. 215 004.
- [8] *Nedospasov A.V.* // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 036 401.
- [9] *Nedospasov A.V.* // EPL. 2013. Vol. 103. P. 25 001.
- [10] *Nedospasov A.V., Nenova N.V.* // EPL. 2014. Vol. 108. P. 45 001.
- [11] *Vasiliev M.M., D'yachkov L.G., Antipov S.N., Huijink R., Petrov O.F., Fortov V.E.* // EPL. 2001. Vol. 93. P. 15 001.
- [12] *Dзлиева E.S., Ermolenko M.A., Karasev V.Yu., Pavlov S.I., Novikov L.A., Mayorov S.A.* // JETP Lett. 2014. Vol. 100. P. 703.
- [13] *Дзлиева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. С. 147.
- [14] *Pavlov S.I., Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Ermolenko M.A., Novikov L.A.* // Ukr. J. Phys. 2014. Vol. 59. P. 415.
- [15] *Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Pavlov S.I.* // EPL. 2015. Vol. 110. P. 55 002.