

УДК 533.9

О РЕАКТИВНОЙ СИЛЕ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ПЫЛИНКУ В ИОННОМ ПОТОКЕ

С. А. Майоров

Показан механизм возникновения реактивной силы, ускоряющей пылинку против ионного потока. Он основан на передаче импульса от потока дополнительно ускоренных в поле пылинки ионов атомам буферного газа (при перезарядке ионов на атомах буферного газа). В результате атомами (которые до перезарядки были ионами) из системы "ионы + пылинка" выносятся больший импульс, чем вносился ими, что и создает реактивную силу, направленную против потока (отрицательная сила трения). Получена оценка ее величины.

Введение. Силы, действующие на отрицательно заряженную пылинку в ионном потоке приэлектродного слоя, обусловлены кулоновским взаимодействием частиц плазмы с зарядом пылинки. Но даже редкие столкновения ионов с атомами газа могут значительно менять как характеристики экранирования заряда пылинки, так и силу увлечения, действующую со стороны ионного потока на пылинку.

В работе [1] впервые было обнаружено, что число связанных ионов, находящихся на орбитах вокруг пылинки (и соответственно их влияние на экранирование), практически не зависит от частоты столкновений ионов с атомами, в результате которых они образуются. Поэтому даже из-за сколь угодно редких столкновений возможно накопление большого числа связанных ионов. В обычных для эксперимента по пылевой плазме условиях столкновительная релаксация с атомами приводит к тому, что вокруг отрицательно заряженной пылинки образуется облако из связанных ионов, которое оказывает существенное влияние на экранирование заряда пылинки. Кроме того, связанные ионы повышают поток ионов на пылинку, и соответственно ее заряд меняется в сторону уменьшения [2, 3].

Вопрос о влиянии слабой столкновительной релаксации ионной компоненты в газоразрядной плазме на экранирование заряда пылинки в неподвижной и движущейся

плазме рассмотрен в работах [4, 5]. Полученные результаты численного моделирования продемонстрировали, что наличие даже слабой столкновительной релаксации приводит к радикальному отклонению от широко используемой модели ограниченных орбит. Распределение потенциала электрического поля и плотность ионов при учете перезарядки становятся очень близки к результатам модели Дебая. Распределение электронов хорошо описывается моделью Больцмана с дебаевским потенциалом. Но потоки частиц на пылинку сильно зависят от частоты столкновений ионов с атомами (давления газа), поэтому заряд пылинки не может быть корректно определен по модели Мотта-Смита.

Здесь рассмотрен новый эффект – появление реактивной силы, ускоряющей пылинку против ионного потока. Механизм этой силы обусловлен столкновениями ионов потока с атомами буферного газа и передачей импульса от потока дополнительно ускоренных в поле пылинки ионов атомам буферного газа (при перезарядке ионов на атомах буферного газа). В результате атомами (которые до перезарядки были ионами) из системы "ионы + пылинка" выносятся большой импульс, чем вносился ими, что и создаёт реактивную силу, направленную против потока (отрицательная сила трения).

Отметим, что имеется существенное различие между отрицательной силой трения, которая действует в направлении, увеличивающем относительную скорость движения, и отрицательной дифференциальной силой трения, которая соответствует уменьшению силы трения с увеличением скорости движения, но действует в направлении, обычном для силы трения. Специфическая зависимость кулоновской силы трения от скорости может при определенных условиях приводить к увеличению средней энергии пылинки [6]. Возможность появления отрицательной силы трения для кулоновских столкновений обсуждается в работах [7, 8], сила ионного увлечения (ion drag force) в экранированном потенциале рассмотрена в работе [9]. В настоящей работе впервые анализируется сила трения, обусловленная столкновениями ионов и атомов с перезарядкой.

Реактивная сила трения. Пусть имеется поток ионов с зарядом $e > 0$, массой m , налетающих из бесконечности вдоль оси x на неподвижную, отрицательно заряженную сферу радиуса a , имеющую заряд $Q = -eZ < 0$. Оценим силу трения, обусловленную перезарядкой ионов на атомах газа.

Будем считать, что радиус пылинки, длина экранирования и средняя длина свободного пробега иона до перезарядки удовлетворяют условиям

$$a \ll \lambda_D \ll \lambda_{st}, \quad (1)$$

а температуры электронов, ионов и атомов – условиям

$$T_e \gg T_i \approx T_a. \quad (2)$$

В экспериментах по левитирующим в приэлектродном слое пылинкам кинетическая энергия налетающих ионов примерно равна по порядку величины электронной температуре, соответственно $K_\infty = \frac{1}{2}mv_\infty^2 \gg T_a$. При перезарядке образующийся из атома ион имеет среднюю кинетическую энергию $\frac{3}{2}T_a \ll K_\infty$ и распределение по скоростям, определяемое температурой атомов. Следовательно, при перезарядке происходит уменьшение полной энергии иона в среднем на величину $K_\infty - \frac{3}{2}T_a$.

Обычно пылинка заряжается так, чтобы ее заряд создавал значительный кулоновский барьер для электронов. При выполнении условий (1), (2) поверхностный потенциал пылинки имеет значение

$$e|\varphi(a)| \sim (2 - 4)T_e. \quad (3)$$

Следовательно, при $T_e \gg T_a$ вблизи пылинки существует некий объем V_0 , такой, что образовавшийся из атома ион оказывается захваченным в потенциальной яме пылинки. В этом случае наиболее вероятно, что в ходе дальнейших столкновений ион достигнет поверхности пылинки и рекомбинирует на ней.

В малом объеме ΔV (вблизи точки с расстоянием до центра пылинки r) за промежуток времени Δt произойдет $\Delta N_{st}(r) = n_i v \Delta V \Delta t / \lambda_{st}$ столкновений, здесь n_i – плотность ионов, v – их скорость, λ_{st} – средняя длина свободного пробега иона до перезарядки. Средний импульс образующихся из атомов при перезарядке ионов равен нулю, так как атомы газа имеют изотропную функцию распределения по скоростям (зависимостью сечения перезарядки от скорости можно пренебречь в силу малой скорости атомов). Поэтому ионы после их рекомбинации на пылинке не меняют ее импульс.

Из закона сохранения импульса следует, что результирующее изменение импульса пылинки определяется разницей между импульсом ионов на бесконечности и импульсом образующихся при перезарядке атомов: $\Delta p_x(r, \Delta V) = \Delta p_{1x}(r) \Delta N_{st}$, где $\Delta p_{1x}(r) = mv_\infty - mv_x$ – передача импульса пылинке вследствие одного акта перезарядки. Из закона сохранения полной энергии иона, движущегося в потенциальном поле пылинки, следует, что его кинетическая энергия $K(r) = K_\infty - e\varphi(r)$. При использовании приближения прямолинейных траекторий в кулоновском потенциале $\varphi(r) = Q/r$ получаем следующую оценку для средней величины передачи импульса пылинке из-за одного столкновения в любой точке объема V_0

$$\Delta p_{1x} = mv_{\infty} - \sqrt{2mK(r)} \approx - \left| \frac{e\varphi(r)}{v_{\infty}} \right|. \quad (4)$$

Сила трения определяется, как изменение импульса в единицу времени и получается в результате интегрирования по объему V_0 :

$$F_x = \int_{V_0} \frac{n_i v}{\lambda_{st}} \Delta p_{1x} dV. \quad (5)$$

Полагая, что объем V_0 ограничен сферой радиуса $r_0 \gg a$, потенциал внутри которой меняется по закону Кулона $\varphi(r) = \frac{Q}{r}$, а значения плотности и скорости $n_i(r) \approx n_{i0}$, $v(r) \approx v_{\infty}$, из (5) получаем:

$$F_x = \int_a^{r_0} \frac{n_{i0} v_{\infty}}{\lambda_{st}} \frac{eQ}{rv_{\infty}} 4\pi r^2 dr \approx -2\pi r_0^2 n_{i0} \frac{e^2 Z}{\lambda_{st}}. \quad (6)$$

Полагая в (3) численный множитель равным тройке, получаем

$$F_x \approx -\pi r_0^2 n_{i0} T_e \frac{6a}{\lambda_{st}}. \quad (7)$$

Свойства реактивной силы трения. Основным следствием из полученной оценки для величины реактивной силы трения (7) является ее знак. Сила трения направлена против налетающего на пылинку ионного потока, т.е. пылинка под воздействием такой силы трения увеличивает свою скорость относительно потока. Поскольку в этом имеется некий элемент парадоксальности, то проясним картину возникновения отрицательной силы трения.

Физическая картина эквивалентна принципу движения сверхзвукового реактивного самолета: из набегающего потока забирается масса (воздух), путем нагревания и ускорения в соплах сообщается направленная скорость, большая, чем скорость потока, и масса воздуха выбрасывается по потоку. Роль горючего сводится к нагреву воздуха, в отличие от космического корабля, где горючее играет также и роль рабочего тела

массы, переносчика импульса. Источником энергии – горючим – для пылинки являются электроны, которые, преодолевая кулоновский потенциальный барьер, заряжают пылинку, позволяя ей в дальнейшем собирать и нейтрализовать на своей поверхности образовавшиеся после перезарядки медленные ионы.

Другим интересным следствием из (7) является независимость силы трения от скорости потока. Следует иметь в виду, что слабая зависимость из-за искривления траекторий вблизи пылинки все-таки имеется, причем более точный расчет даст, по-видимому, большее значение силы трения.

Из (7) также следует, что наибольший вклад в реактивную силу дают далекие пролеты. Аналогичная ситуация имеется и для силы трения из-за кулоновских столкновений.

Сравнение с другими силами, действующими на пылинку в плазме. Для проведения сравнительного анализа необходимо определить величину объема V_0 . Простейшей оценкой является определение через радиус, на котором потенциальная энергия в поле пылинки имеет порядок температуры атомов. Полагая $e|\varphi(a)| \sim 3T_e$, получим

$$r_0 = a \frac{e|\varphi(a)|}{T_a} \sim 3a \frac{T_e}{T_a}. \quad (8)$$

Однако следует учитывать, что эффекты экранирования, недебаевский характер поведения потенциала на больших расстояниях, наличие внешнего поля [2], ионная фокусировка – все эти факторы могут значительно усложнить задачу определения объема V_0 . Например, сильная экранировка может привести к тому, что $r_0 \sim \lambda_D$.

При подстановке (8) в (7) получаем

$$F_x \approx -\pi a^2 n_{i0} T_e \frac{60a}{\lambda_{st}} \left(\frac{T_e}{T_a} \right)^2 \propto a^3. \quad (9)$$

Приведем также силу давления, которую оказывает на пылинку поток нейтральных неупругих частиц (атомов)

$$F_{flow} = 2\pi a^2 n K_\infty \propto a^2. \quad (10)$$

Сила одностороннего газокINETического давления

$$F_{GD} = \pi a^2 n T \propto a^2. \quad (11)$$

Сила трения движущейся со скоростью v поглощающей сферы, малой по сравнению с длиной свободного пробега атомов, имеющих распределение Максвелла

$$F_{Maxw} = \frac{4\pi a^2 n v}{3} \sqrt{\frac{8T}{\pi m}} \propto a^2. \quad (12)$$

Сила трения при рассеянии в поле Кулона

$$F_{Col} = n_{i0} \frac{2\pi e^4 Z^2}{K_\infty} \Lambda \sim 18\pi a^2 n_{i0} \frac{T_e^2}{K_\infty} \Lambda \propto a^2. \quad (13)$$

Сила гравитации

$$F_g = \frac{4\pi a^3}{3} \rho g \propto a^3. \quad (14)$$

Интересной особенностью является то, что помимо реактивной силы трения (9), только сила гравитации (14) пропорциональна объему пылинки, все другие силы пропорциональны ее площади. Поэтому при наличии гравитации реактивная сила будет поправкой, меняющей вес пылинки. В невесомости реактивная сила может оказаться самой большой силой, действующей на пылинку.

Заключение. Показан механизм возникновения реактивной силы, действующей на пылинку в плазменном потоке. Эта сила связана с перезарядкой ионов на атомах буферного газа вблизи пылинки. Она имеет смысл отрицательной силы трения, которая действует против потока, пытаясь ускорить пылинку, ее величина не зависит от скорости потока, пропорциональна объему пылинки и частоте перезарядки ионов.

Автор благодарит Российский фонд фундаментальных исследований (проект 02-02-16439) и Нидерландское научное общество (NWO) за финансовую поддержку работы, а также А.М. Игнатова и С.А. Триггера за стимулирующие дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gogee J. Phys. Rev. Lett., **69**, 277 (1992).
- [2] Швейгерт В. А., Швейгерт И. В., Беданов В. М. и др. ЖЭТФ, **115**, 877 (1999).
- [3] Зобнин А. В., Нефедов А. П., Синельщиков В. А., Фортон В. Е. ЖЭТФ, **118**, вып. 3(9), 554 (2000).
- [4] Майоров С. А. Физика плазмы, в печати, 2004.
- [5] Майоров С. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 6, 32 (2004).
- [6] Майоров С. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11, 3 (2002).
- [7] Trigger S. A., Zagorodny A. G. Contr. Plas. Phys., N 5-6, 381 (2003).
- [8] Trigger S. A. Phys. Rev. E, **67**, 046403 (2003).

- [9] Khrapak S. A., Ivlev A. V., Morfil G. E., and Zhdanov S. K.
Phys. Rev. Lett., **90**, 225002 (2003).

Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 20 мая 2004 г.