

04

Притяжение макротел в плазме

© А.Е. Дубинов, В.С. Жданов, А.М. Игнатов,
С.Ю. Корнилов, С.А. Садовой, В.Д. Селемир

Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Саров
Институт общей физики РАН, Москва

Поступило в Редакцию 22 января 1999 г.

Представлены результаты экспериментального наблюдения притяжения металлических и диэлектрических макротел в воздушной плазме стационарного тлеющего разряда постоянного тока и измерена величина притяжения в зависимости от концентрации плазмы. Измерена зависимость разности потенциалов между телами от концентрации плазмы.

Известно, что в запыленной плазме при определенных условиях микрочастицы пыли могут выстраиваться в упорядоченные структуры — так называемые плазменно-пылевые кристаллы [1–3]. Так как в плазме пылинки могут заряжаться до некоторого равновесного значения электрического заряда одинакового знака, как правило отрицательного, то на расстояниях, меньших дебаевского радиуса, они должны отталкиваться вследствие их кулоновского взаимодействия. Однако помимо отталкивания, на больших расстояниях должны существовать механизмы притяжения между микрочастицами пыли, удерживающие плазменно-пылевой кристалл от распада. Здесь отметим, что для формирования однородной кристаллической структуры из одноименно заряженных частиц в замкнутом контейнере или в безграничном пространстве, вообще говоря, нет необходимости в дальнедействующих силах притяжения, однако для ограниченных кристаллических структур, которые наблюдаются в экспериментах [3], поиск механизмов притяжения пылинок является оправданным.

К настоящему времени в научной литературе опубликован ряд теоретических работ, в которых предложено и рассмотрено несколько различных по своему проявлению сил притяжения, среди которых здесь отметим следующие:

притяжение, механизм которого основан на асимметрии бомбардировки пылинки частицами плазмы, причиной которой является затенение этой пылинки соседними [4,5];

притяжение, связанное с кулоновским рассеянием заряженных частиц плазмы заряженными пылинками [6];

притяжение в результате ионно-звуковой волновой связи пылинок, являющееся, как утверждается в [7], классическим аналогом известного из теории сверхпроводимости металлов куперовского спаривания электронов.

Обзор современных представлений о механизмах притяжения пылинок в плазме дан в [6]. Однако, несмотря на наличие большого количества работ по теоретическим аспектам данной проблемы, экспериментально притяжение частиц пыли в плазме, насколько нам известно, специально не исследовалось. В связи с этим целью данной работы являлось осуществление прямого экспериментального наблюдения притяжения макроскопических частиц в плазме.

Очевидно, что проводить исследования притяжения пылинок ("нульмерных" макроскопических объектов) непосредственным наблюдением вследствие их малости затруднительно. Поэтому для измерений целесообразно выбрать их 1-мерные (тонкие нити) или 2-мерные (тонкие пленки) аналоги. В нашей предыдущей работе [8] действительно наблюдалось притяжение двух лавсановых пленок, свободно висящих в гравитационном поле Земли и помещенных в плазму, причем с увеличением степени ионизации плазмы при постоянном давлении было замечено увеличение сил притяжения.

Однако эти измерения были выполнены с большой погрешностью и с недостаточной повторяемостью. Причиной этому является тепловое воздействие плазмы на пленки так, что после уже непродолжительного нахождения в плазме они сминались, закручивались и становились неплоскими. Это требовало частой замены пленок. При этом несовершенство подвески пленок вследствие неконтролируемого отклонения от вертикальности в верхней точке приводила к существенному разбросу измеренных значений притяжения после установки новых пленок. Кроме того, в работе [8] невыясненным остался вопрос и о притяжении металлических объектов. Эти обстоятельства стимулировали дальнейшие исследования и поиск наиболее приемлемых конструкций притягивающихся в плазме объектов.

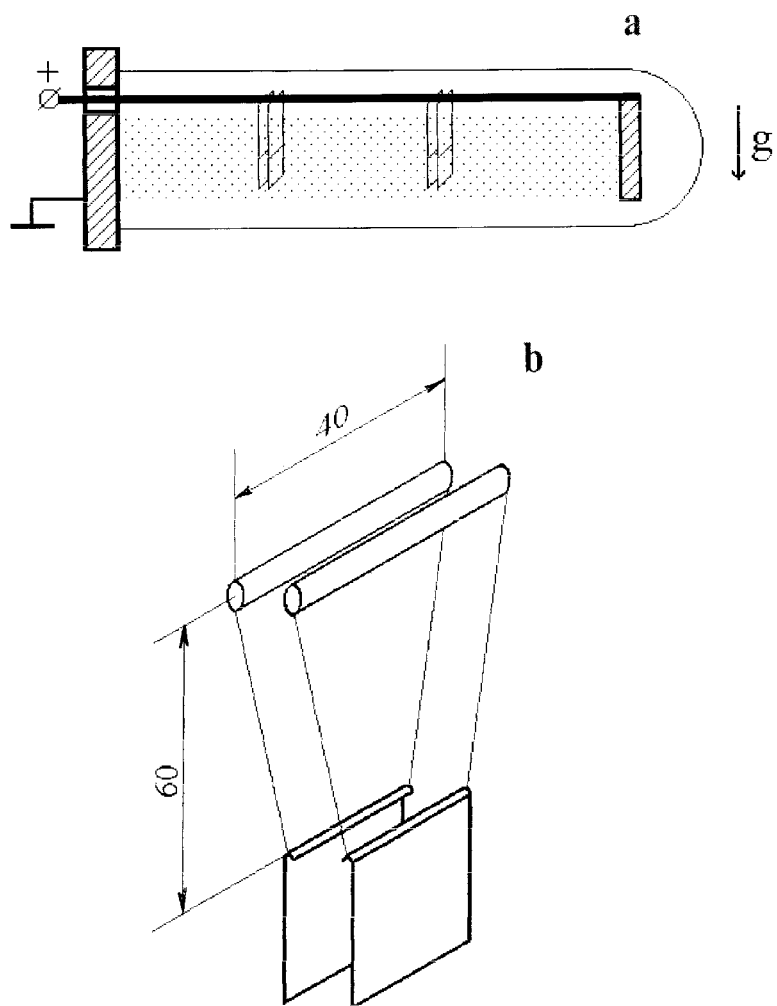


Рис. 1. Схема эксперимента: *a* — разрядная камера; *b* — система подвеса пластинок (все размеры в мм).

Эксперименты проводились, как и в [8], в тонкостенной стеклянной разрядной камере диаметром 180 mm и длиной межэлектродного промежутка 700 mm (рис. 1, *a*). Камера располагалась горизонтально, с тем чтобы свободно висящие объекты располагались в камере поперек разрядного тока.

Давление воздуха в камере поддерживалось от 0.01 до 0.1 Torr. Между электродами камеры зажигался стационарный тлеющий разряд постоянного тока. Параметры плазмы разряда определялись с помощью зондовой методики.

В экспериментах использовались диэлектрические (бумага для ксеркса с поверхностной плотностью 80 g/m²) и металлические (алюминиевая фольга с плотностью 67.5 g/m²) пластинки размером 25 × 25 mm, подвешенные на медных проволочках диаметром 80 μm. Способ и геометрия подвески, показанные на рис. 1, *b*, во-первых, обеспечивали достаточную чувствительность для измерений, а во-вторых, исключали вращательные движения пластинок вокруг вертикальной оси.

Фотография свободновисящих пластинок в слабом разряде показана рис. 2, *a*. При медленном увеличении разрядного тока, а следовательно, и концентрации плазмы пластинки постепенно сближались практически до слипания вдоль своих краев (полного контакта между сблизившимися пластинками, как оказалось, не наблюдалось, о чем см. ниже). Окончательная ситуация показана на фотографии рис. 2, *b*. Была измерена величина сближения пластинок в зависимости от тока разряда, а величинам разрядного тока были поставлены в соответствие значения электронной концентрации по данным зондовых измерений. На рис. 3, *a* показаны полученные таким образом зависимости величины сближения и соответствующие им силы притяжения для бумажных и алюминиевых пластинок.

Необходимо отметить, что сближение пластинок происходило и при неоднородной форме горения разряда в режиме стоячих страт, реализующегося при определенном давлении и разрядном токе, однако в этом режиме результаты измерений имеют меньшую повторяемость, чем при режиме однородного разряда.

После гашения разряда пластинки отталкивались, что свидетельствует о накоплении пластинками существенного электрического заряда, одинакового по знаку. Однако внешнее закорачивание алюминиевых пластинок не приводило к изменению характера и величины притяжения, что свидетельствует о неэлектрической природе притяжения.

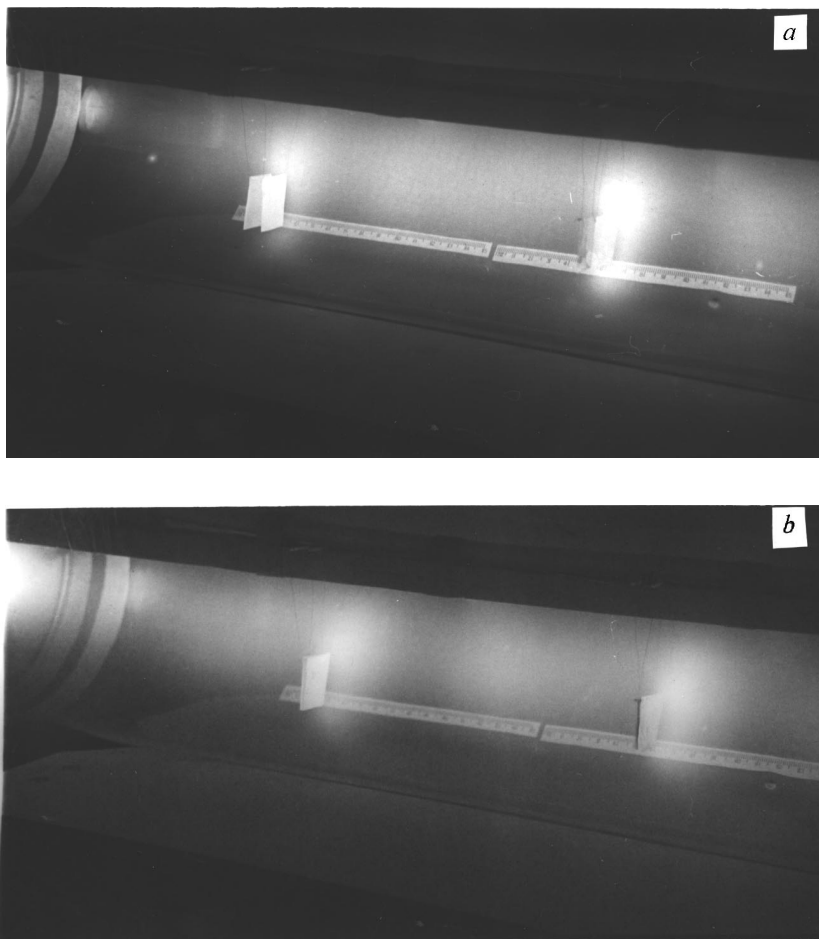


Рис. 2. Фотографии положения пластинок в плазме: *a* — минимальный разрядный ток, пластинки свободно подвешены; *b* — разрядный ток ~ 0.5 А, пластинки полностью сблизилась.

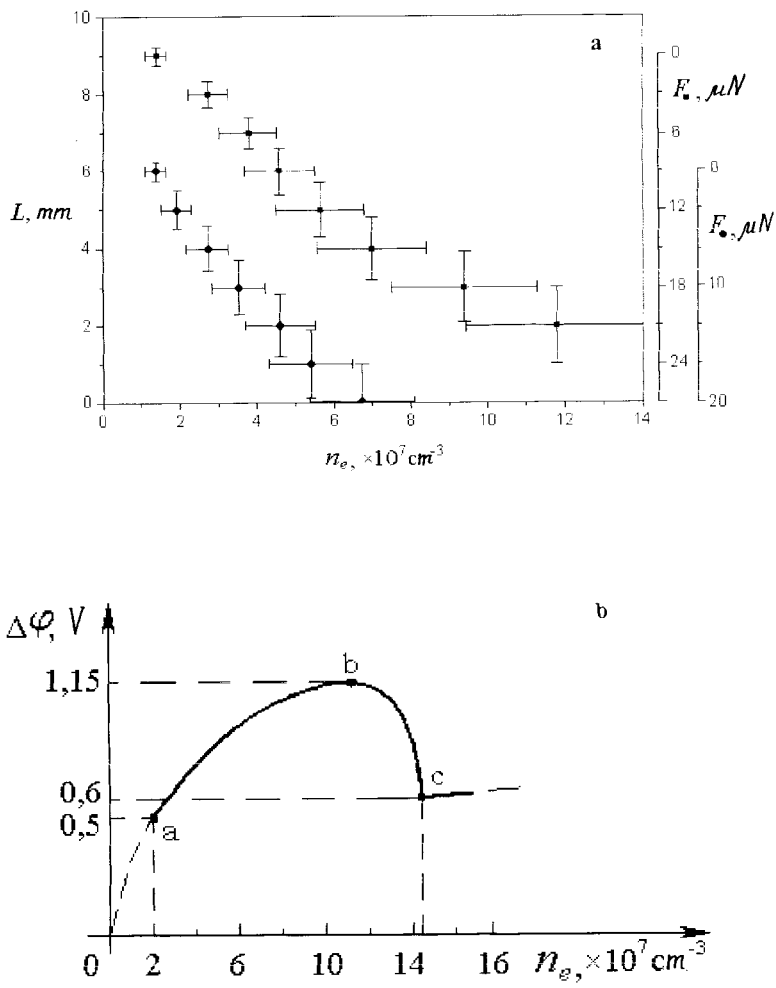


Рис. 3. Графики зависимостей, полученных в эксперименте: *a* — сил притяжения пластинок и расстояния между ними от концентрации электронов плазмы (● — зависимость для пластинок из бумаги, ■ — зависимость для пластинок из алюминия); *b* — разности потенциалов алюминиевых пластинок от концентрации плазмы.

Электрический потенциал алюминиевых пластинок примерно соответствовал потенциалу положительного столба разряда, а разность потенциала между пластинками при увеличении концентрации плазмы сначала росла до 1.15 V, а затем при близком сближении пластинок падала лишь до 0.6 V, что свидетельствует о наличии некоторого минимального зазора между пластинками, по порядку величины равного, по нашим оценкам, дебаевскому радиусу (примерно несколько сотых долей миллиметра). Это можно объяснить тем, что на меньших расстояниях силы электростатического отталкивания уже превосходят обнаруженные нами силы притяжения. Зависимость разности потенциалов для алюминиевых пластинок от концентрации плазмы показана на рис. 3, *b*.

Таким образом, по результатам данных экспериментов можно заключить, что в плазме между близкорасположенными макроскопическими телами действительно возникают силы притяжения неэлектрической природы, которые определяют динамику этих тел. Эти силы могут определять также гидродинамику разлета сгустка запыленной плазмы, замедляя его разлет по сравнению с разлетом чистой плазмы, а в ряде случаев, как показано в [9], приводить к самосжатию сгустка, что интересно в контексте проблемы удержания плазмы. Еще одно следствие сил притяжения — возникновение изотропного поверхностного натяжения границы запыленной плазмы в отличие от анизотропного натяжения границы раздела "плазма–магнитное поле".

В заключение авторы благодарят А.А. Рухадзе за полезные обсуждения работы.

Список литературы

- [1] *Thomas H., Morfill G.E., Demmel V., Goree J.* // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. P. 652.
- [2] *Chu J.H., Du J.-B., Lin I.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1994. V. 27. P. 296.
- [3] *Фортон В.Е., Нефедов А.П., Торчинский В.М.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 64. С. 86.
- [4] *Игнатов А.М.* // Физика плазмы. 1996. Т. 22. С. 648.
- [5] *Игнатов А.М.* // Кр. сообщ. физ. ФИАН. 1995. № 1–2. С. 58.
- [6] *Цытович В.Н.* // УФН. 1997. Т. 167. С. 57.

- [7] *Nambu M., Vladimirov S.V., Shukla P.K.* // Phys. Lett. A. 1995. V. 203. P. 40.
- [8] *Дубинов А.Е., Жданов В.С., Игнатов А.М.* и др. // Кр. сообщ. физ. ФИАН. 1997. № 7–8. С. 40.
- [9] *Цытович В.Н., Резендас Д.* // Физика плазмы. 1998. Т. 24. С. 71.