

## ПОВЕДЕНИЕ ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ В ПУЧКОВОЙ ПЛАЗМЕ

**В.И. Владимиров, Л.В. Депутатова, Д.В. Крутов,**

*Институт теплофизики экстремальных состояний РАН, dlv@ihed.ras.ru*

**В.А. Рыков, К.В. Рыков, А.В. Худяков**

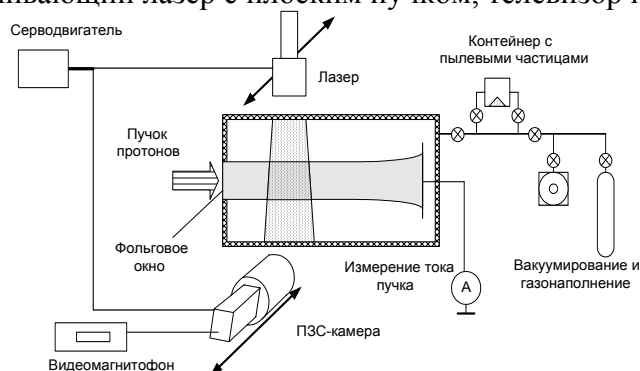
*ГНЦ РФ Физико-энергетический институт (г. Обнинск), rykov@ippe.obninsk.ru*

Проводимые ранее экспериментальные и расчетно-теоретические исследования ядерно-возбуждаемой плазмы содержащей твердые микрочастицы показали возможность получения упорядоченных пылевых структур жидкостного типа [1]. Более связанные структуры, подобное плазменно-пылевому кристаллу в плазме газового разряда [2], в ядерно-возбуждаемой плазме не наблюдались. Одной из причин этого является сильная неоднородность плазмы, образованной жестким ионизатором, что приводит к флуктуациям заряда пылевых частиц во времени [3] и, следовательно, к практически случайному изменению взаимодействия между соседними частицами. Вторым серьезным препятствием являются установившиеся газовые течения, которые сопровождали все ранее проводившиеся эксперименты с источником спонтанного деления. Природа течений связана с наличием внешнего электрического поля, необходимого как для компенсации силы тяжести электрически заряженных пылевых частиц, так и для увеличения температуры электронов. При этом положительные и отрицательные ионы приобретают на длине свободного пробега дополнительный импульс в направлении поля и передают его нейтральным атомам [4].

Обе трудности можно преодолеть при использовании пучка ускоренных частиц проходящих через газ. При величине потока более  $10^{13} \text{ c}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  трековая структура плазмы исчезает, а заряд пылевых частиц, основываясь на расчетах [3], должен непрерывно расти. При этом пылевые частицы постоянно будут находиться в трековых областях ионизирующих частиц, где средняя температура электронов намного превышает температуру ионов и за несколько микросекунд смогут приобретать значительный заряд.

### Экспериментальная установка и результаты экспериментов

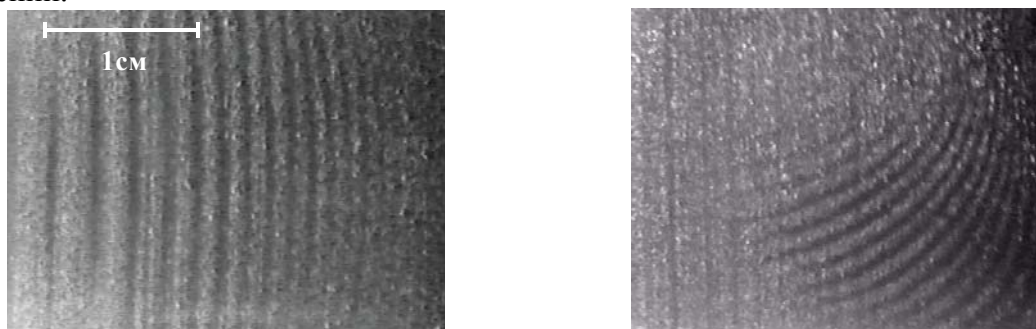
Эксперименты проводятся на ускорителе КГ-2.5 (ГНЦ РФ ФЭИ), дающем пучок протонов с энергией до 2 МэВ и током до 3 мА. Был изготовлен узел, отделенный от ионопровода ускорителя фольговым окном и представляющий собой герметичный полый плексигласовый цилиндр диаметром 50 мм (рис.1). Узел соединен с системами вакуумирования, газонаполнения и инъекции пылевой компоненты. Пылевые частицы вносятся вместе с газовой средой в заранее вакуумированный объем мишенного узла и равномерно его заполняют. Для визуализации поведения пылевых частиц, используется ПЗС-камера, подсвечивающий лазер с плоским пучком, телевизор и видеоманитофон.



**Рис.1.** Схема эксперимента

Были проведены предварительные эксперименты с использованием непрерывного пучка круглого сечения с апертурой 15 мм, током до 1 мкА и энергией протонов 1.95

МэВ. Использовались пылевые частицы из оксида церия с диаметром  $1\pm 0.1$  мкм. В качестве газовой среды использовались неон или воздух при давлениях от 0.1 до 1 атм. По истечении около десяти секунд после инъекции газопылевой смеси в определенных участках объема наблюдалось «расслоение» пылевой компоненты, т.е. образовывались области незаполненные пылевыми частицами (рис. 2а). Расслоение наблюдается в неоне, но не имеет места в воздухе. По истечении нескольких минут очертания слоистой структуры нарушаются, так как происходит постоянная потеря частиц на стенках. Как в неоне, так и в воздухе пылевая компонента находится в движении, охватывающем весь объем и приобретающем устойчивую форму по истечении нескольких секунд после инъекции смеси. Кроме электростатических сил причиной движения может служить движение газа, вызванное нагревом фольги и самого газа, а также передачей направленного импульса протонов атомам газа. Причиной движения газовой среды также может быть передача импульса ионов газа [4], приобретающих энергию в электрическом поле объемного заряда, который должен образовываться вследствие существенного отличия температуры и коэффициентов диффузии электронов и ионов. При перекрытии пучка движение нарушается, пылевые частицы осаждаются вниз, а слоистая структура медленно искажается при падении (рис. 2а), что говорит о неоптической природе расслоений.



**Рис.2.** Видеоизображения расслоения пылевой компоненты при вертикальном сканировании лазерным «ножом» в плоскости проходящей на расстоянии 7 мм от оси пучка. а) – под воздействием пучка, б) - пучок перекрыт

Трехмерная картина слоистой структуры оказалась достаточно сложной (рис. 3-6) и для ее изучения экспериментальная установка была оснащена устройством, позволяющим получать последовательность растровых изображений в вертикальной плоскости параллельной оси пучка. Данное устройство состоит из ПЗС-камеры и лазерного «ножа» с осями, расположенными под прямым углом относительно друг друга, которые синхронно перемещаются по направляющим, при помощи серводвигателя.

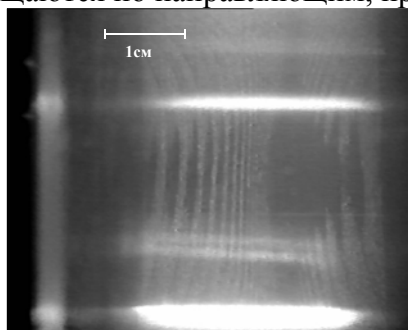


Рис.3. Вертикальное сечение на расстоянии 10 мм от оси пучка

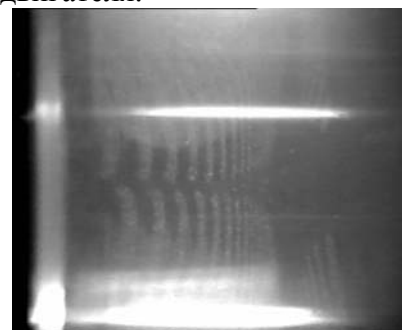


Рис. 4. Вертикальное сечение на расстоянии 15 мм от оси пучка

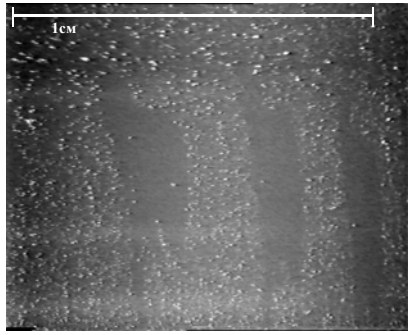


Рис.5. Вертикальное сечение на расстоянии 17мм от оси пучка

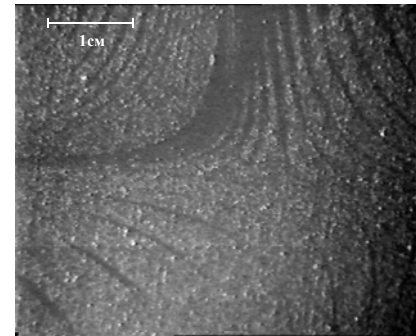


Рис.6. Горизонтальное сечение на оси пучка

Так в вертикальной плоскости проходящей через ось пучка пылевые частицы поднимаются вверх с разной скоростью в зависимости от продольной координаты. Если плоскость отодвинуть на периферию пучка, то можно наблюдать появление темных полос, форма и размер которых меняется при поперечном движении плоскости наблюдения к стенке трубки. При этом скорость частиц уменьшается до нуля приблизительно по центру между осью и стенкой, а затем меняет направление. Качественная картина наблюдаемого явления показана на рис. 7. Направление движения частиц указано стрелками.

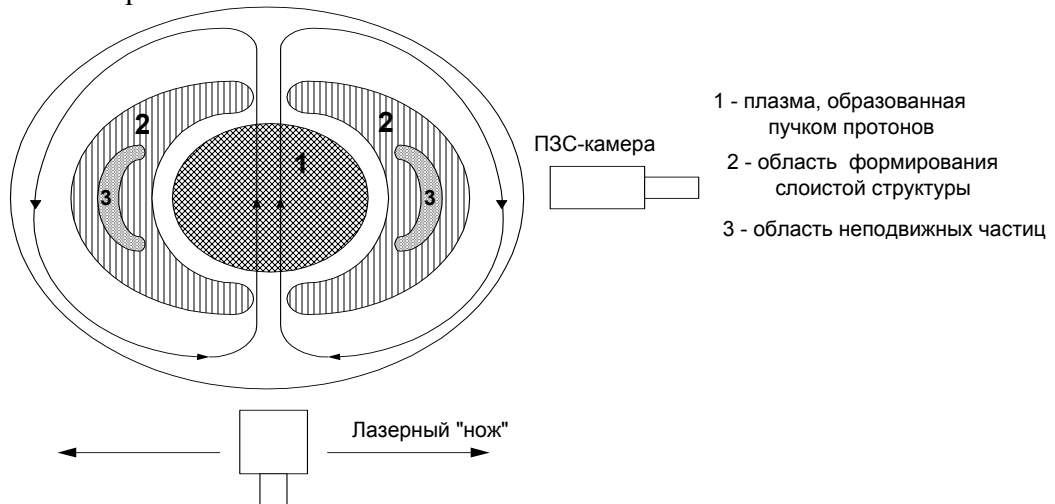


Рис.7. Поперечное сечение экспериментальной кюветы качественная картина движения пылевых частиц

### Анализ необходимого режима пучка для накопления заряда на частицах

В работе [3] расчет зависимости заряда пылевой частицы в треке ядерной частицы в газе показал, что заряд в течение нескольких наносекунд линейно возрастает до нескольких единиц заряда электрона, взаимодействуя с электронами трека, после чего начинает уменьшаться. За времена порядка нескольких десятков наносекунд практически исчезает, что объясняется деградацией трека и разрядкой пылевой частицы остовом из положительных ионов. Таким образом, для достижения больших величин заряда ( $10^3$ - $10^4$  e) необходимо, чтобы пылевая частица в течение нескольких микросекунд находилась в неравновесной трековой плазме. При этом должно выполняться следующее условие для тока пучка:

$$I > \frac{R^2 |Z| e}{r_T^2 \tau} ,$$

где  $R$ -радиус пучка (7 мм),  $Z$  - заряд ионов пучка,  $r_T$  – радиус трека,  $\tau$ - характерное время, за которое заряд частицы не успевает упасть существенно. Если радиус трека взять равным 10 мкм [5], а время  $\tau$  равным 10 нс [3], то значение тока должно превышать 8 мкА. В реальной ситуации ток пучка ограничивается неразрушающим температурным режимом фольги. При значении тока пучка 8 мкА, максимальная температура фольги составит величину близкую к температуре плавления титана. С другой стороны, если использовать импульсный режим ускорителя, можно подобрать соотношение между длительностью импульсов и интервалом между импульсами так, что температура фольги не будет превышать, например, 150 С°, и в тоже время пылевые частицы в интервале между импульсами не будут значительно смещаться. При этом в момент импульса частицы будут обладать зарядом, что приведет к их упорядочиванию, а в момент между импульсами заряд частиц будет близок к нулю. Так, если длительность  $\Delta t$  импульса равна 2 мкс, то предполагаемая величина заряда частиц, определяемая отношением  $\Delta q \Delta t / \tau$ , должна достигать  $10^3 e$ , где  $\Delta t$ -длительность импульса,  $\Delta q$  - изменение заряда частицы в треке ( $\Delta q \approx 5e$  следуя [3]). За время между импульсами  $T=20$  мкс микронная пылевая частица с массой  $4 \cdot 10^{-13}$  г (при плотности  $7.3$  г/см<sup>3</sup>) успеет сместиться под действием силы тяжести на расстояние

$$\delta_G = g \left( \frac{\Delta t}{\lambda} + \frac{e^{-\lambda \Delta t}}{\lambda^2} \right) \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ см}, \quad \lambda = \frac{6\pi\eta r_d}{m_d},$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости газа ( $0.5 \cdot 10^{-5}$  Па·с) и продиффундировать на расстояние:

$$\delta_D = \sqrt{4D\Delta t} \approx 10^{-8} \text{ см},$$

где  $l$  - средний свободный пробег пылевой частицы до столкновения с нейтральным атомом,  $D$  – коэффициент диффузии пылевых частиц. Обе величины  $\delta_G$  и  $\delta_D$  много меньше среднего межчастичного расстояния  $a=N_d^{-1/3}=10^{-2}$  см, при характерной концентрации пылевых частиц  $N_d=10^6$  см<sup>-3</sup>.

Таким образом, во время импульса пылевые частицы обладая зарядом должны стремиться образовать упорядоченную структуру, а за время между импульсами частицы не успеют существенно изменить свое пространственное положение.

Как показал эксперимент, изучение поведения пылевой компоненты и свойств пылевой плазмы, образованной пучком ускоренных ионов, достаточно интересно с фундаментальной точки зрения. Использование ускорителя для таких исследований является более безопасным способом по сравнению с использованием спонтанно делящихся изотопов. Кроме того, это дает возможность без труда варьировать энергозатраты в газ и достигать значений потока ионов до  $10^{13}$ - $10^{14}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Результаты исследований могут послужить базой для разработки в будущем, ядерно-оптических и ядерно-электрических преобразователей [6], основанных на использовании в качестве топлива радиоактивных микрочастиц находящихся в виде взвеси в газовой среде.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Владимиров В.И. и др. // Изв. Академии Наук, серия физ. 2000. Т.64. В. 8.
2. Thomas H, Morfill G et al // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. P. 652
3. V.E.Fortov, A.P.Nefedov, V.I.Vladimirov, L.V.Deputatova., A.P.Budnik, A.V.Khudyakov, V.A.Rykov. Physics Letters A. 2001. 284. P. 118-123.
4. В.Е.Фортов, В.И. Владимиров, Л.В. Депутатова, А.П. Нефедов, В.А. Рыков, А.В. Худяков. ДАН. 2001. Т. 384. № 2. С.610-613.
5. Budnik A.P., Sokolov Yu.V., Vakulovskiy A.S.//Hyperfine Interaction.V.88.P.185. 1994.
6. Баранов В.Ю. и др. // Препринт ИАЭ-6105/6, 1998г.