

04

Исследование трехмерной структуры облака углеродной макрочастицы, испаряющейся в плазме стелларатора Wendelstein 7-AS

© Б.В. Кутеев, В.Ю. Сергеев, В.А. Белопольский,
В.М. Тимохин, R. Burhenn

С.-Петербургский государственный политехнический университет,
E-mail: timokhin@phtf.stu.neva.ru
Max Planck Institut fur Plasmaphysik, EURATOM Ass., Boltzmannstrasse, 2,
D-85748 Garching, Germany

Поступило в Редакцию 26 сентября 2002 г.

В экспериментах на стеллараторе Wendelstein 7-AS обнаружена асимметрия облака испаряющейся углеродной макрочастицы. Облако вытянуто вдоль большого радиуса в сторону сильного поля, т.е. против направления тороидального дрейфа. С целью более глубокого изучения этого эффекта проводилось исследование трехмерной структуры облака методами компьютерной томографии. В результате подтверждено наличие асимметрии облака в пространстве, связанной с существованием в плазме дрейфового потока вдоль большого радиуса в сторону сильного поля. Численная оценка для скорости обнаруженного дрейфа составляет ~ 300 м/с.

Инжекция макрочастиц (пеллет), широко распространенная в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу, используется для управления разрядом и для диагностики высокотемпературной плазмы [1]. Одним из важных диагностических приложений пеллет-инъекции является исследование дрейфовых потоков примесей в плазменном шнура. Информацию о таких дрейфах можно получить, анализируя пространственную структуру облака испаряющейся макрочастицы [2].

В данной работе приводятся результаты первых экспериментов по одновременному скоростному фотографированию облаков углеродных макрочастиц в плазме стелларатора Wendelstein 7-AS (W7-AS) с двух направлений. Установка W7-AS и схема эксперимента по примесной пеллет-инъекции на ней подробно описаны в [3]. Наблюдение за

пространственной и временной динамикой процесса испарения макро-частицы и формой облака испаренного вещества на W7-AS осуществлялось с помощью нескольких быстрых ПЗС (CCD) камер, видеокамеры и широкообзорного диода, перед которыми устанавливались светофильтры с центром полосы пропускания на длине волны 720 nm соответствующей линии СП, и шириной 10 nm. Излучение светящегося облака регистрировалось со стороны нижнего патрубка под углом примерно 45° к траектории пеллеты (вид снизу) и сзади вдоль траектории макро-частицы (вид сзади). Время экспозиции составляло $5 \mu\text{s}$.

В результате экспериментов была получена база мгновенных фотографий примерно для 30 разрядов. Облако на снимках, как правило, имеет вид эллипсоида, вытянутого в направлении вдоль магнитного поля. В зависимости от локальных параметров плазмы размеры облаков, а также степень их вытянутости изменяются в широких пределах. Вдоль поля облака имеют размеры 0.8–3.0 см, поперек — 0.5–1.5 см.

Особенности структуры облаков рассмотрим на примере характерного импульса 49982 (рис. 1). Направление линии магнитного поля на фотографиях (а) и (б) вертикально. Направление скорости пеллеты показано стрелкой. Пеллета находится в центре данного облака. Обратим внимание, что облако сзади (а) выглядит симметрично, тогда как снизу (б) заметна асимметрия облака относительно своего центра. Более четко асимметрия облака видна на профиле интенсивности (д), для наглядности пунктирной линией нанесен профиль, зеркально отраженный относительно середины облака. На профиле интенсивности вида „сзади“ (с) можно заметить, что асимметрия присутствует и здесь, но эта асимметрия гораздо менее выражена, чем на профиле вида „снизу“. Данная структура облаков типична, проявляется в ряде импульсов и заметна наиболее отчетливо для крупных облаков. Асимметрия облака в радиальном направлении не может быть объяснена особенностями геометрии системы регистрации или изгибом облака вместе с магнитной поверхностью. Она указывает на наличие радиального дрейфа вторичной плазмы облака в направлении центра плазмы.

Для более глубокого исследования данного явления полезно иметь картину трехмерного распределения свечения испаренного вещества. Широко распространенные в настоящее время томографические методы позволяют судить о трехмерном распределении свечения по отдельным проекциям [4]. До настоящего времени при анализе пеллетных томографические методы не применялись.

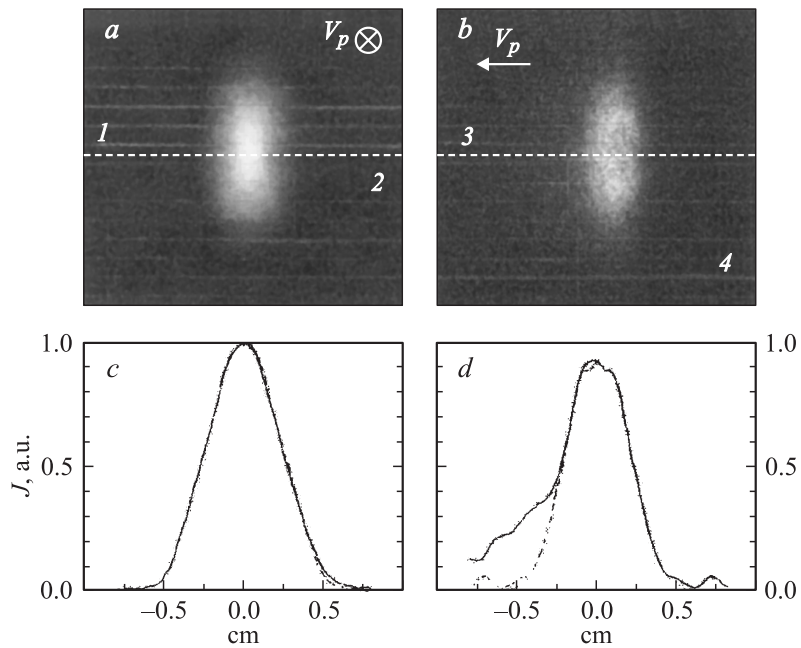


Рис. 1. Пример мгновенных фотографий облака снизу (*a*) и сзади (*b*): 1 — верх, 2 — низ, 3 — центр, 4 — периферия. На нижних графиках (*c*, *d*) изображены соответствующие проекционные профили интенсивности для центральной части облака. Импульс 49982.

Мгновенные фотографии, получаемые с CCD-камер, являются проекциями излучения плазмы в соответствующее направление. Существенное упрощение, которое допускает задача — это редукция трехмерной задачи к N -двумерным за счет выделения сечений в направлении магнитного поля B . Двумерные массивы интенсивностей с двух ракурсов должны быть разбиты на N пар векторов, определяющих распределение интенсивности излучения в соответствующей плоскости по оси B . Учитывая слабую асимметрию, для нашей задачи применима модель восстанавливаемого распределения в виде системы деформированных окружностей [5]. В этом случае локальное значение интенсивности излучения ищется в виде

$$g(r, \theta) = g_0(r) + rg_1(r) \sin \theta + rg_2(r) \cos \theta, \quad (1)$$

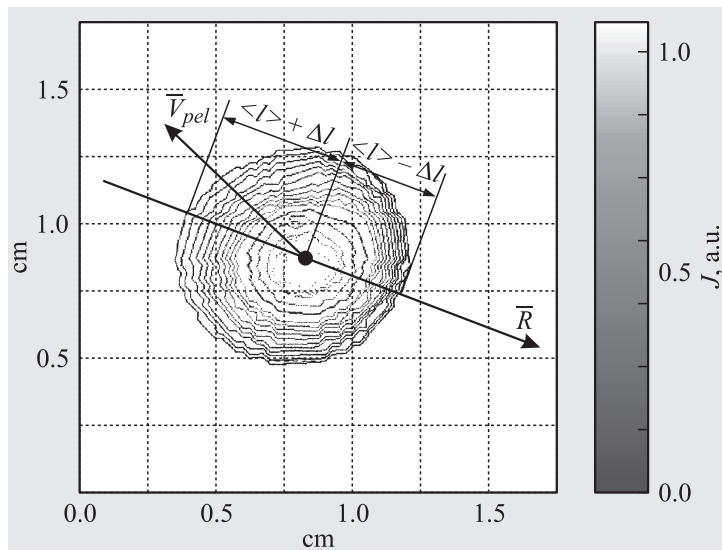


Рис. 2. Пример восстановленного распределения интенсивностей в центральном сечении облака. Импульс 49982.

здесь $g_0(r)$ описывает систему изолиний в виде концентрических окружностей, а $g_1(r)$ и $g_2(r)$ — проекции возмущений на оси x и y соответственно (см. подробнее [5,6]).

На рис. 2 приведен пример восстановленного распределения интенсивности в сечении облака поперек магнитного поля. Изображенное сечение соответствует приблизительно середине облака в направлении магнитного поля. Параметры плазмы в данном импульсе: центральные электронные температура и плотность $T_e(0) = 2.6$ keV, $n_e(0) = 2 \cdot 10^{13}$ cm $^{-3}$ соответственно, мощность ЭЦР нагрева $P_{ECRH} = 900$ kW. Пеллета имела сферическую форму диаметром $d_p = 0.4$ mm и инжектировалась со скоростью $V_p = 250$ m/s. Линии магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости рисунка. Направления скорости пеллеты и большого радиуса установки обозначены стрелками.

Из приведенного восстановленного распределения свечения видно, что присутствует асимметрия облака в пространстве, особенно ярко

выраженная для изолиний низкой интенсивности (менее 10% от максимума). Облако асимметрично вдоль большого радиуса и вытянуто в сторону сильного поля. Характерная структура облака не изменяется от сечения к сечению при движении вдоль магнитного поля в положительном и отрицательном тороидальном направлениях.

Исходя из анализа полученного распределения интенсивности свечения, получена оценка скорости дрейфа по следующей формуле:

$$V_{dr} \sim \frac{\Delta l \langle l \rangle}{\langle l \rangle \tau_{ion}}, \quad (2)$$

здесь $\Delta l \cong 0.06 \text{ cm}$ — разность размеров облака в направлениях против и по большому радиусу, $\langle l \rangle \cong 0.14 \text{ cm}$ — средний размер облака поперек магнитного поля, $\langle l \rangle / \tau_{ion}$ определяет скорость разлета частиц поперек магнитного поля, где $\tau_{ion} \cong 2 \mu\text{s}$ — время ионизации углерода до иона C^{2+} , взятое из работы [7]. Полученная численная оценка скорости дрейфа равна $\sim 300 \text{ m/s}$. Направление этого дрейфа отличается от обнаруженного в экспериментах на токамаке ASDEX Upgrade [8], где плазма облака водородной макрочастицы дрейфует в направлении слабого поля. Физические механизмы обнаруженного явления в настоящий момент остаются непонятными.

Авторы выражают благодарность сотрудникам стелларатора, обеспечивавшим выполнение работы.

Список литературы

- [1] Kuteev B.V., Lang P.T., Sudo S. et al. // Fusion technology. 1994. V. 26. P. 938–944.
- [2] Егоров С.М., Кутеев Б.В., Рожанский В.А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 9. С. 569–573.
- [3] Ledl L., Burhenn R., Sergeev V. et al. // EPS. 1999. Vol. 23J. P. 1477–1480.
- [4] Пикалов В.В., Мельникова Т.С. Томография плазмы. Новосибирск: Наука, 1995.
- [5] Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. Новосибирск, Наука, 1987.
- [6] Kuteev B.V., Ovsishcher M.V. // EPS. 1991. V. 4. P. 241–244.
- [7] Bell K.L. et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1983. N 12. P. 891.
- [8] Muller H.W., Buhl K., Kaufmann M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. N 11. P. 2199.