

Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1

Электронный лекционный курс*

Судников А. В.

Лекция 5 Диагностика нейтральных атомов

© Новосибирский государственный университет 2013 г. Редакция 2017 г.
* Курс подготовлен в рамках реализации Программы развития НИУ НГУ на 2009–2018 годы

I. Пассивная корпускулярная диагностика плазмы

- Основы метода. Каналы возникновения нейтральных атомов.
- Обдирочные мишени
- Анализаторы энергий и импульсов частиц
- Фокусировка пучков заряженных частиц

Образование нейтральных атомов в плазме

Пассивная корпускулярная диагностика основана на изучении испускаемых плазмой *нейтральных атомов*

Интерес представляют атомы, возникшие в результате нейтрализации ионов плазмы.

Основной процесс, приводящий к возникновению быстрых нейтралов — резонансная перезарядка на фоновых холодных атомах.

Найдём функцию распределения быстрых нейтралов f_0 по энергиям.

Функция распределения быстрых нейтралов

Плотность потока нейтралов dj_x в дифференциально малом фазовом объёме d^3v :

$$dj_x = f_0 v_x d^3v = f_0 v_x v^2 dv d\Omega$$

Кинетическое уравнение для функции распределения быстрых нейтралов:

$$\frac{df_0}{dt} = \frac{\partial f_0}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial f_0}{\partial R} = St$$

Считаем параметры плазмы стационарными:

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = 0$$

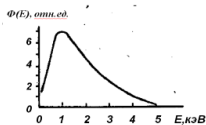
Интеграл столкновений холодных атомов с быстрыми ионами:

$$St(\bar{v}) \approx n_a(\bar{v}) \bar{v} f_i(\bar{v}) \sigma_{cx}(v)$$

Функция распределения быстрых нейтралов

Плотность потока атомов заданной энергии вдоль определённого луча зрения:

$$\begin{aligned} \frac{dj_x}{dv d\Omega} &= f_0 v_x v^2 = v^2 \int v_x \frac{df_0}{dx} dx = v^2 \int St(x) dx = \\ &= v^2 \int n_a(x) f_i(\bar{v}) \bar{v} \sigma_{cx}(v) dx \end{aligned}$$



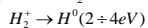
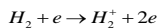
Функция распределения нейтралов по энергиям. Плазма максвелловская, $T_i = 1$ кэВ; плотности плазмы и нейтрального фона постоянны.

В. А. Курнаев и др. Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы.

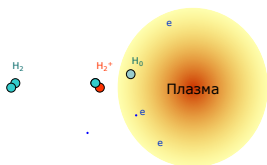
Пассивная корпускулярная диагностика плазмы

Откуда берётся нейтральный фон?

1. Проникновение с периферии:



франк-кондоновские атомы



Проникновение с периферии:

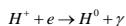
Оценим глубину проникновения (численные значения вычислены для $n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $T_e = T_i = 1 \text{ кэВ}$):
 $\lambda_i \sim 1 \text{ см}$ — длина пробега атома относительно ионизации
 $\lambda_{ex} \sim 0.25 \text{ см}$ — длина пробега атома относительно перезарядки
 Ионизации предшествует $N = \frac{\lambda_i}{\lambda_{ex}}$ актов перезарядки.

После каждой перезарядки атом меняет направление случайным образом, таким образом, проникновение атома внутрь плазмы имеет диффузионный характер

$$l \sim \sqrt{N} \cdot \lambda_{ex} \approx \sqrt{\lambda_i \lambda_{ex}}$$

В плотной горячей плазме проникновение атомов с периферии за счет описанного механизма затруднено

2. Фоторекомбинация



Практическое выражение константы фоторекомбинации:

$$k_{f.p.} \approx 2.7 \times 10^{-13} \frac{Z^2}{\sqrt{T_e}} \left[\frac{\text{см}^3}{\text{с}} \right]$$

Равновесная плотность атомов определяется равенством скоростей фоторекомбинации и ионизации электронным ударом:

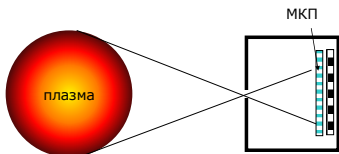
$$n_a \approx \frac{\gamma \cdot n_e}{\langle \sigma_i v_e \rangle}$$

При $n_e \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ $n_a \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$
 $T_e \approx 1 \text{ кэВ}$

Что делать с нейтрами?

1. Камера-обскура.

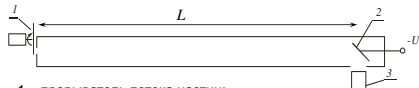
Изображение плазмы в «свете» атомов перезарядки



В качестве приемника используется люминесцентный экран или матрица из детекторов

Что делать с нейтрами?

2. Вре́мяпролётный анализатор.
Обычно применяется для атомов низких энергий (<1 кэВ)



- 1 – прерыватель потока частиц;
- 2 – вторично-эмиссионный коллектор;
- 3 – ВЗУ

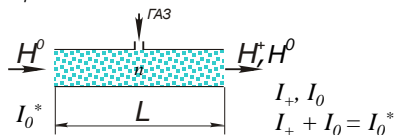
$$E_{H_0}(\tau) = \frac{ML^2}{2\tau^2}$$

Энергетическое разрешение:

$$\frac{\delta E}{E} \approx 2 \cdot \frac{\delta \tau}{\tau}$$

Что делать с нейтрами?

3. Перезарядная мишень.
Преобразовать атомы в ионы



σ_{01} - полное сечение обдирки
 σ_{10} - полное сечение нейтрализации

$$\begin{aligned} dl_+ &= I_0 \sigma_{01} n dl - I_+ \sigma_{10} n dl \\ dl_0 &= -I_0 \sigma_{01} n dl + I_+ \sigma_{10} n dl = -dl_+ \end{aligned}$$

$$\frac{I_+}{I_0^*} = \frac{\sigma_{01}}{\sigma_{01} + \sigma_{10}} \left[1 - e^{-(\sigma_{01} + \sigma_{10})nL} \right]$$

$\sigma n L \ll 1$ - «тонкая» мишень
 $\sigma n L \gg 1$ - «толстая» мишень

Газовая обдирочная камера

Для анализа по энергиям выгодно использовать «тонкие» обдирочные мишени с $nL \sim (0,01 \div 0,5)/\sigma$, так как при больших значениях nL сказывается влияние рассеяния.

Сечение обдирки $\sigma_{01} \sim 10^{-16} \text{ см}^2 \rightarrow$ при $L \sim 30 \text{ см}$
оптимальная плотность газа $n \sim 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$

При такой плотности истечение газа из трубки является бесстолкновительным.

$$\tau_{\text{газ}} \approx \frac{L^2}{a v_a}$$

где a – диаметр трубки,
 v_a – тепловая скорость частиц газа.

Типы обдирочных мишеней:

- Импульсные газовые мишени (электромагнитные и пьезоэлектрические клапаны. Длительность существования мишени ~1–5 мс)
- Стационарные газовые мишени (дифференциальная откачка)
- Плазменные мишени ($nl \geq 10^{14} \text{ см}^{-2}$)
- Сверхтонкие пленки ($d \sim 1 \cdot 10 \text{ нм}$, малое Z , C , Be , углеводородные соединения и т.д. Флуктуации толщины приводят к уширению спектра энергий)
- Электронный удар (вторично-ионная масс-спектрометрия. Малая эффективность конверсии)

Анализ частиц по энергиям и импульсам (Neutral particle analyzers)

1. Электростатическое поле \rightarrow энергия:

$$m \frac{dv}{dt} = m \mathbf{v}(\nabla \mathbf{v}) = e \mathbf{E} \quad \begin{matrix} \mathbf{E} = -\nabla \phi \\ \rightarrow \end{matrix} \quad \nabla \left(\frac{mv^2}{2} + e\phi \right) = 0$$

Траектория частицы определяется только ее энергией

2. Статическое магнитное поле \rightarrow импульс:

$$m \frac{dv}{dt} = m \mathbf{v}(\nabla \mathbf{v}) = \frac{e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}] \quad \rightarrow \quad \mathbf{p}(\nabla \mathbf{p}) = \frac{e}{c} [\mathbf{p} \times \mathbf{H}]$$

Статическое магнитное поле может быть использовано для анализа по импульсам (массам)

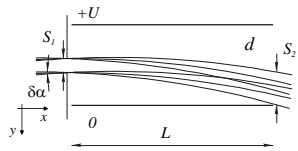
Электростатический анализатор

Основные характеристики:

- Основная траектория
- Энергия настройки (W_0)
- Дисперсия (D)
- Разрешение анализатора (ρ)
- Разрешающая способность ($R = 1/\rho$)
- Светосила (G)

$$\rho = -\frac{\Delta W_{1/2}}{W_0} \quad D = \left| \frac{dx}{d\Delta W} \right| \quad G = \frac{\Omega}{4\pi}$$

Плоский конденсатор



Основная траектория:

$$y(x) = \frac{eUx^2}{4E_0d}$$

Энергия настройки:

$$W_0 = E_0 = \frac{eUL^2}{4y_0d}$$

Дисперсия:

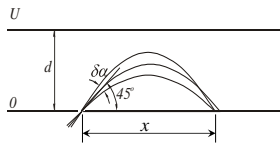
$$D = \left| \frac{dy_0}{d\Delta W} \right| = \frac{y_0}{W}$$

Ширина на выходе: $S_2 = S_1 + \delta\alpha L$,
где $\delta\alpha$ - угловой разброс

$$\rho = \frac{\Delta W_0}{W_0} = \frac{S_2}{D} = \frac{S_1 + \delta\alpha L}{y_0}$$

Если $\delta\alpha$ большой?

45° – анализатор.



$$x = \frac{2E_0d \sin 2\alpha}{eU}$$

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{4E_0d \cos(2\alpha)}{eU}$$

$$\text{При } \alpha = 45^\circ \quad \frac{dx}{d\alpha} = 0$$

Разрешение:

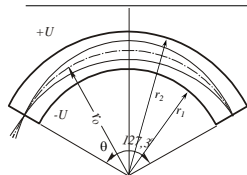
$$\rho = \frac{S_1 + S_2}{d} + 2\delta\alpha^2 + \frac{1}{2} \cdot \delta\beta^2$$

где S_1, S_2 – ширина входной и выходной щелей, $\delta\alpha$ и $\delta\beta$ - угловой разброс частиц в плоскости рисунка, и перпендикулярно ей.

45° – анализатор.



Цилиндрический дефлектор (анализатор Юза - Рожанского)



Орбита:

$$r_0 = \sqrt{r_1 r_2}$$

Энергия настройки:

$$W_0 = \frac{eU}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

Полупериод радиальных колебаний : $\theta = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 127^\circ 17' \approx 127.3^\circ$

Дисперсия по скоростям: $\frac{dr}{dv} = \frac{2r_0}{v_0}$

где v_0 - скорость на основной траектории

Анализатор типа цилиндрическое зеркало (2D фокусировка)



Входное отверстие находится на оси двух *цилиндрических* электродов радиусами r_1 и r_2 , между которыми прикладывается анализирующее напряжение.

Угловая фокусировка второго порядка при $\theta_0 = 42^\circ 20'$

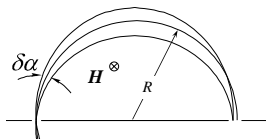
$$R = \frac{1}{r_1/r_2 + 2.8\delta\alpha^2}$$

В. А. Курнаев и др. Корпускулярная диагностика лабораторной и космической плазмы.

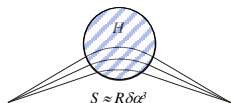
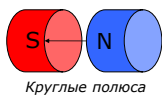
Магнитные анализаторы

180° анализатор с однородным полем:

Размер изображения точечного источника:
 $S \approx R\delta\alpha^2$

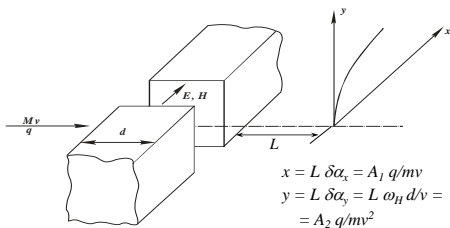


Анализатор с угловой фокусировкой второго порядка:



Анализатор Томсона

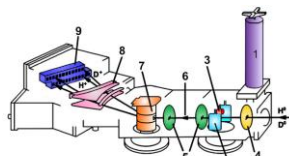
$E||B$ - одновременное определение энергии и массы ионов:



NB: Нет фокусировки.

$y^2 \propto (q/m)x$

Пример одновременного анализа по массам и энергиям: АКОРД-24



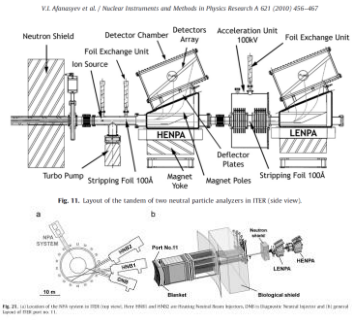
- 1 - вакуумный латвор, 2 - конденсор очистки,
- 3 - ионный источник, 4 - входной коллиматор,
- 5 - коллиматор камеры обзора, 6 - камера обзора,
- 7 - анализирующий электростатит,
- 8 - анализирующий конденсор, 9 - детекторы.

Бахарев Н. Н. Поведение быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М // По материалам диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Пример одновременного анализа по массам и энергиям: АКОРД-24

NPA version	ACORD-12		ACORD-24	
Detection row	H row	D row	H row	D row
Overall dimensions	705 x 510 x 360 mm			
Weight	50 kg			
Number of energy channels	6	6	12	12
Minimal particle energy	250 eV	300 eV	250 eV	400 eV
Maximal particle energy	100 keV	50 keV	100 keV	70 keV

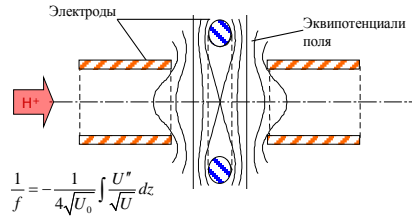
Пример анализатора: ИТЭР



Электронно-оптические элементы

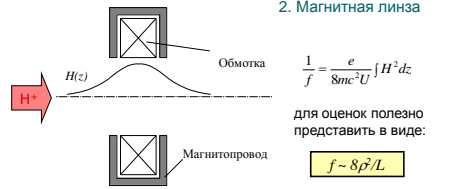
Использование фокусировки параллельного пучка ионов после обдирочной камеры электростатическими или магнитными линзами позволяет увеличить поток ионов в анализатор.

1. Электростатическая линза



Электронно-оптические элементы

2. Магнитная линза



Где ρ – ларморовский радиус ионов в центре линзы,
 L – характерная длина магнитного поля в линзе.

Независимо от направления магнитного поля короткая магнитная линза **всегда фокусирует**.
