# Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1

Электронный лекционный курс\* Судников А. В.

#### Лекция 7

# Активная корпускулярная диагностика

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



## Активная корпускулярная диагностика плазмы (часть 2)

- о Основы метода
  - Взаимодействие диагностического пучка с плазмой
  - Источники диагностических атомарных пучков (обзорно)
- о Многохордовое ослабление пучка
- Резерфордовское рассеяние быстрых атомов
- о Регистрации вторичных ионов
- о Зондирование пучками тяжелых ионов или атомов
- о Пучково-спектроскопические диагностики
  - Собственное свечение пучка
  - Динамический эффект Штарка (MSE)
  - Перезарядно-рекомбинационная спектроскопия (CHERS)

#### Активная корпускулярная диагностика плазмы

Параметры плазмы определяются в результате взаимодействия диагностического пучка частиц с плазмой.

#### Общая схема измерений:





## Измерения профиля плазмы методом регистрации вторичных ионов

Диагностика локальной плотности ионов. Перезарядка и ионизация атомов диагностического пучка приводит к возникновению быстрых ионов с ларморовским радиусом, сравнимы с размером камеры.







## Измерения профиля плазмы методом регистрации вторичных ионов





### Зондирование пучками тяжелых ионов (heavy ion beam probe)

Измеряет потенциал внутри плазмы за счёт анализа двукратно ионизированных ионов. Не вносит возмущений в плазму. Точка измерения определяется наклоном и энергией пучка. Измеряется малое изменение большой величины → требуется стабильность пучка и качество измерения



*E<sub>i</sub>* – кинетическая энергия иона
 *eU* – энергия ионов пучка
 *φ* – потенциал плазмы в

 потенциал плазмы в данной точке пространства
 До ионизации (*Cs*<sup>+</sup>):

 $E_i = e(U - p)$ После ионизации ( $Cs^{++}$ ):  $E_i = e(U - p)$ 

На выходе из плазмы:

 $E_i = e(U - \boldsymbol{\varphi}) + 2e \boldsymbol{\varphi} = \frac{e(U + \boldsymbol{\varphi})}{e(U + \boldsymbol{\varphi})}$ 



#### Зондирование пучками тяжёлых ионов













Барнет К., Харрисон М. Прикладная физика атомных столкновений. Плазма. М: Энергоатомиздат, 1987
 Бондаренко И.С., Губарев С.П., Крупник Л.Н. и др. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 208



### Зондирование продольными пучками ионов

Специфический метод измерения продольного профиля электрического потенциала в амбиполярной ловушке



M. Yoshikawa, T. Imai et al. Simultaneous evaluation of potential fluctuation from the core plasma to the end region in GAMMA 10 // Nuclear Fusion, Vol. 53, N. 7, 14 June 2013



### Зондирование продольными пучками ионов

Специфический метод измерения продольного профиля электрического потенциала в амбиполярной ловушке



Ионы Не<sup>+</sup> не проходят, если их энергия  $E_i < e \mathbf{q}_{\kappa}$ Ионы Не<sup>++</sup> в основном образуются в промежуточной области и не выходят из потенциальной ямы при условии  $E_i < e (2\mathbf{q}_{\kappa} - \mathbf{q}_{0})$ .

📖 Давыденко В.И. и др. // Диагностика плазмы, М.: Энерго-атомиздат, 1986. Вып. 5.





### Метод искусственной мишени.



Анализатор атомов перезарядки совмещен с камерой-обскурой.



### Метод искусственной мишени



Сигнал с каналов анализатора

Результат: локальная F<sub>i</sub>(E)



## Активная корпускулярная диагностика плазмы (часть 2)

- о Основы метода
  - Взаимодействие диагностического пучка с плазмой
  - Источники диагностических атомарных пучков (обзорно)
- Многохордовое ослабление пучка
- Резерфордовское рассеяние быстрых атомов
- Регистрации вторичных ионов
- о Зондирование пучками тяжелых ионов или атомов
- о Пучково-спектроскопические диагностики
  - Собственное свечение пучка
  - Динамический эффект Штарка (MSE)
  - Перезарядно-рекомбинационная спектроскопия (CHERS)



### Диагностика профиля интенсивности свечения пучка в плазме



Излучение возбуждённых атомов пучка смещено за счёт эффекта Доплера — излучение фонового нейтрального газа может быть отфильтровано. Доплеровский сдвиг линии  $H_a$ :

 $\Delta \lambda = \frac{v_b}{c} \cos(\theta) \lambda \approx 5 \cdot 10^{-3} \lambda \approx (2 - 3) \, hm$ 

При  $E_{n_p 
m wea}$  з 30:50 каВ основной вклад в сечение возбуждения атомов пучка дают столкновения с протонами плазмы.  $J(x) \propto n_p$ 

 $J(X) \ll n$ 



#### Динамический эффект Штарка (Motional Stark Effect, MSE)

Диагностика локального магнитного поля. Эффект Штарка — исчезновение вырождения уровней энергии атома во внешнем электрическом поле H<sub>a</sub> — линия излучения водорода с переходом (n=3)→(n=2) π-компонента — поляризация ⊥ E, Δm = 0 о-компонента — поляризация ⊥ E, Δm = 1



Упрощенный спектр мультиплета  $H_a$  (не показаны компоненты  $\pm 5\pi,\pm 6\pi,\pm 7\pi).$ 



#### Динамический эффект Штарка

При движении атома в поперечном магнитном поле в сопутствующей CO возникает эл. поле  $E=(v{\times}B).$ 



Если атом водорода в пучке имеет энертию 30 къВ, что соответствует скорости у $_{hram} \approx 3.100$  см/с, то в магнитном поле B = 5 Т величина электрического поля в системе отсчета атома составит  $E = 1.5 \cdot 10^5$  В/см. Величина расцепления для  $H_a = 656.3$  ви и E = 30 къВ пучка Н°:

 $\Delta \lambda = \frac{3a_0 e \lambda_0^2 v_{beam}}{2hc} B$  $\Delta \lambda [nm] = 6.6 \times 10^{-2} B[T]$ 



### Динамический эффект Штарка







#### Динамический эффект Штарка. Пример диагностической системы







# Модель распределения интенсивности переходов в мультиплете H<sub>α</sub> для общих условий MSE-эксперимента

Требование к временному разрешению диагностики:  $200{-}300~{\rm {\rm Mkc}}$  (т  $\approx 750~{\rm {\rm Mkc}}$ 

Требование к точности измерения |B|: ≈5% (для вычисления β) Интервалы тонкой структуры составляют ~10% от штарковского расщепления для 40 юВ пучка атомов Н при движении в поле 0.2 Т Для интерпретации результатов в слабых полях и для повышения точности вычисления |B| актуальна точная модель спектра.



Расчет спектра для энергии пучка 40 кэВ, поля 0.2 T и  $O = 22.5^{\circ}$ 

#### Численная модель включает • MSE

- Эффект Зеемана
   Спин-орбитальное
- спин-ороитальное взаимодействие
- 15 . Лэмбовский сдвиг уровней







### Пример результатов MSEдиагностики на ГДЛ



Радиальный профиль |B| в области точки остановки быстрых ионов. Горизонтальные "усы" показывают пространственное разрешение диагностики. Радиальный профиль β⊥ в точке остановки быстрых дейтонов. Максимальное значение на оси 0.4, радиус ≈8 см



### Пример результатов MSEдиагностики на MST





#### Перезарядно-рекомбинационная спектроскопия (*Charge-exchange recombination spectroscopy, CHERS*)

Локальные измерения плотности, скорости и температуры полностью ободранных ионов примеси. Атом пучка отдаёт *(нерезонансно)* электрон иону примеси с зарядом Z. Образуется возбуждённый ион с зарядом (Z-1):  $\mathrm{H}^0 + \mathrm{A}^{Z^*} \to \mathrm{H} + \mathrm{A}^{(Z_4)^*}(n,l)$ 

•

Возбуждённый ион излучает фотон:  $\mathbf{A}^{(\mathbb{Z}\cdot 1)+}(n,l)\to \mathbf{A}^{(\mathbb{Z}\cdot 1)+}(n',l')+hv$ 

 $\bigcirc$ hv \_\_\_\_\_ We observe this!

По материалам: D. A. Ennis, B. E. Chapman, D. Craig, D. J. Den Hartog, G. Fiksel, D. J. Holly. CHERS measurements in MST. University of Wisconsin-Madison



## Перезарядно-рекомбинационная спектроскопия

Эффект Доплера приводит к смещению центра линии (направленная скорость) и уширению её контура (телловая скорость). Интенсивность свечения пропорциональна концентрации примеси:



 CHERS gives impurity (Carbon) density, velocity, and temperature



## Перезарядно-рекомбинационная спектроскопия

#### All of These Are Localized Measurements

Observation volume is intersection of beam path and viewing sightline.









## Перезарядно-рекомбинационная спектроскопия

• The total detected signal is given by:  $\begin{array}{c} \text{Teom. partop} & \text{Усреднённое сечение} \\ \text{Усиление оптики} & \text{перезарядки} \\ V \approx G \cdot T \cdot E \cdot \frac{1}{4\pi} \langle \sigma v \rangle_{CX}^{\lambda} n_C \cdot n_{beam} \cdot W \cdot \Delta t \end{array} \\ \begin{array}{c} \text{Время накопления} \\ \text{Кооффициент} & \text{Концентрация} & \text{Плотность Ширина пучка} \\ прокуссания оптики примеса \\ пучка \end{array}$ 

• Plugging in all the numbers, with  $\sim 0.1~V$  signal gives  $n_C\approx 1\%~n_e$  in rough agreement with other measurements



Boron impurities provide a consistency check of measurement and analysis at a different wavelength (298.1 nm)



### Пример комбинированного использования активных корпускулярных диагностик: MST

On MST, two-pronged approach to advancing beam-based diagnostics:

- compact, high-brightness diagnostic neutral beams

- custom high-throughput spectrometers

New physics (some unexpected) already obtained

- impurity, majority ion heating differ

Diagnostic	Plasma parameters measured	Spatial and temporal resolution
CHERS	Impurity (C) $T_i$ and $v_i$	2 cm, 100 kHz
Rutherford scattering	Majority (D) <i>T<sub>i</sub></i> and <i>v<sub>i</sub></i>	~14 cm, 100 kHz
Spectral MSE	IBI ≥ 0.2 T, ~2% precision	~8 cm, 10 kHz

# CHERS and Rutherford scattering measurements show that ions are strongly heated during a reconnection event.

Majority T<sub>i</sub> increase is less than impurity

 implies Z or mass dependence to heating mechanism

