

Физика плазмы

Часть 2. Элементарные процессы в плазме

Поступаев Владимир Валерьевич

Кафедра физики плазмы НГУ

ИЯФ СО РАН, 339-42-74, V.V.Postupaev@inp.nsk.su

<http://www.inp.nsk.su/chairs/plasma/sk/fpl.ru.shtml>



Один простой вопрос

Как получить плазму?



Нагреть газ

Здравый смысл подсказывает, что греть надо до температуры $T \sim I$

Водород: $I = 13.6$ эВ, для большинства веществ $I \sim 10$ эВ

1 эВ = 11600 К



$T = 160\ 000$ К ???



Неужели в люминесцентной лампе такая температура?

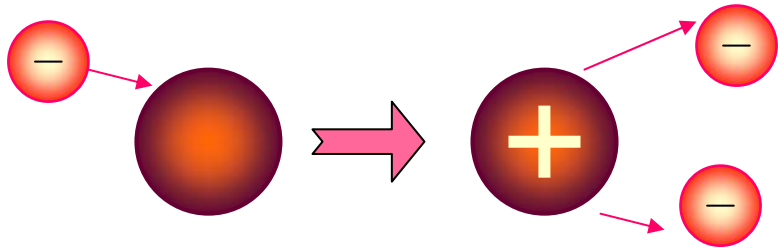
Элементарные процессы в плазме

Элементарные процессы в плазме:

= процессы, происходящие при столкновениях и с участием атомов, ионов, электронов, фотонов и молекул.

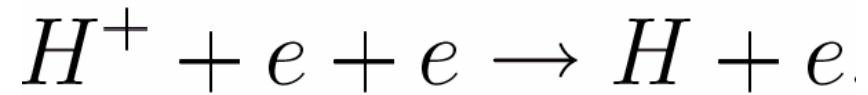
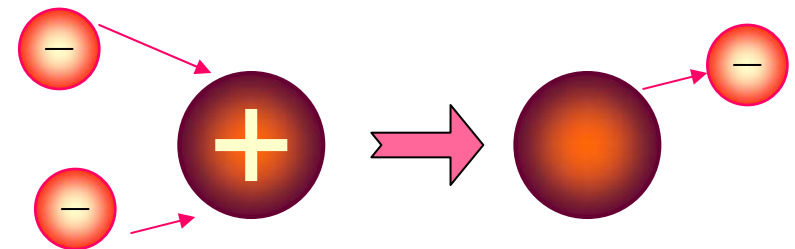
ионизация электронным ударом

прямой процесс



тройная рекомбинация

обратный процесс

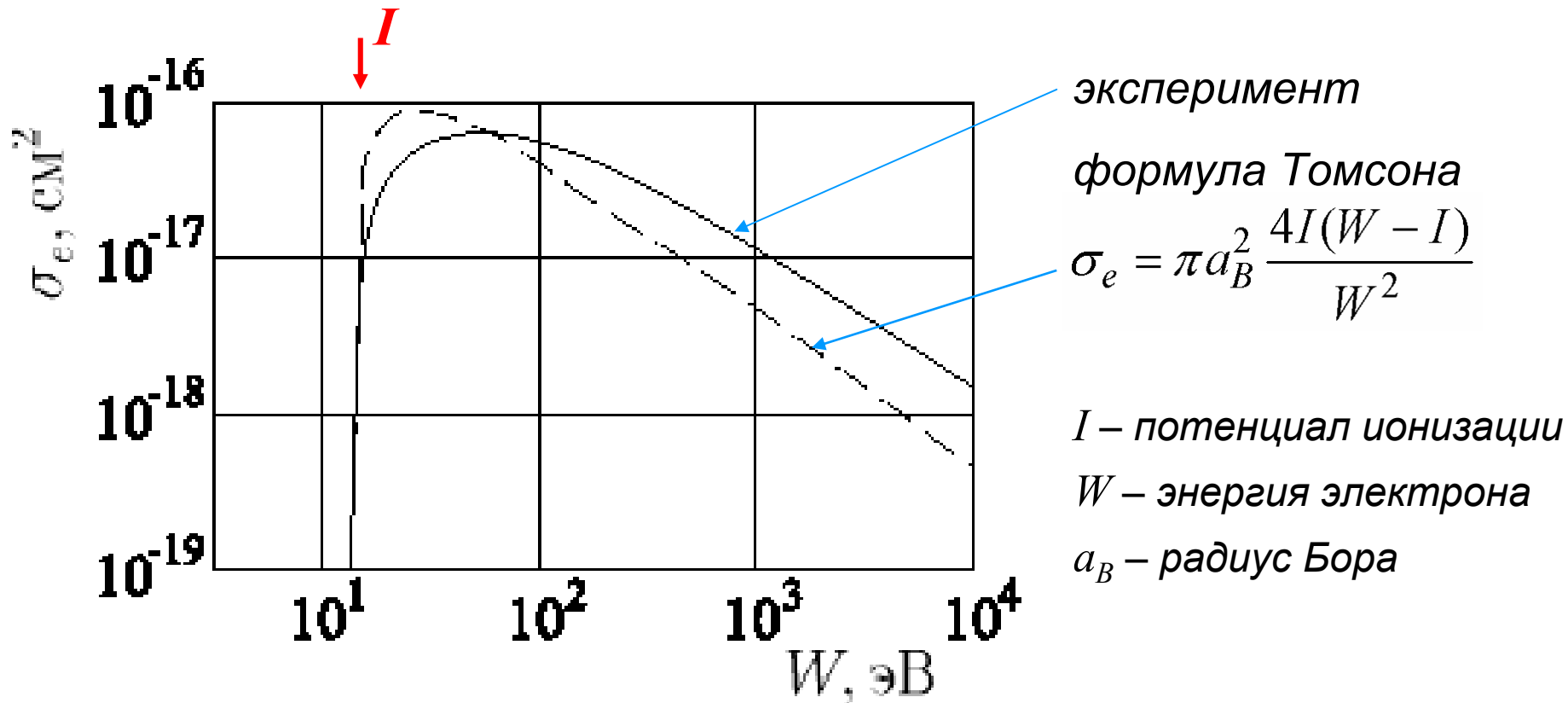


Динамика числа электронов:

$$\left(\frac{dn_e}{dt} \right)_{\text{эл}} = n_e n_a \langle \sigma_e v \rangle - \beta n_e^2 n_i.$$

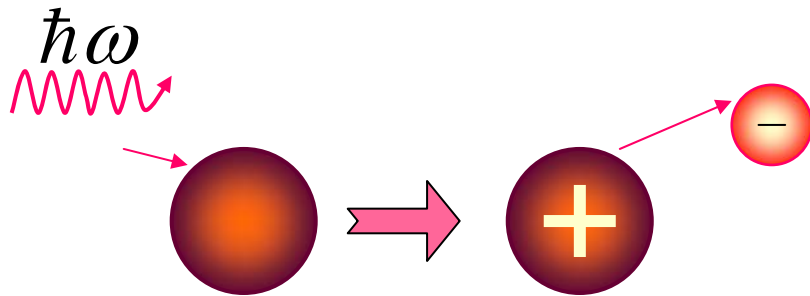
Ионизация электронным ударом

Зависимость сечения ударной ионизации водорода
от энергии налетающего электрона

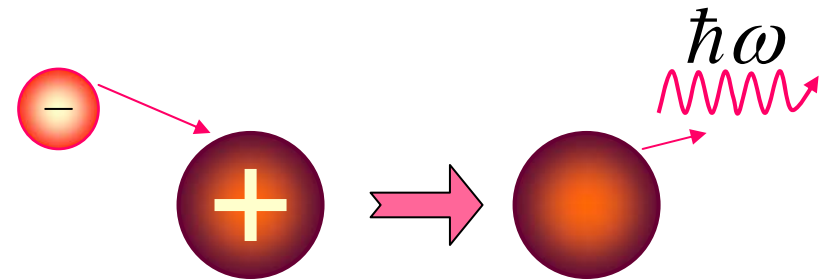


Фотоионизация и фоторекомбинация

фотоионизация
прямой процесс



фоторекомбинация
обратный процесс



Динамика числа электронов:

$$\left(\frac{dn_e}{dt}\right)_{\text{фото}} = \mu n_a - \gamma n_i n_e.$$

$$\updownarrow$$

$$\mu = \sigma_{ph} \Phi_{ph}$$

Модели равновесия в плазме

Ионизационное равновесие

Стационарное состояние по плотности электронов, ионов и атомов.

$$\frac{dn_e}{dt} = n_e n_a \langle \sigma v \rangle - \beta n_e^2 n_i + \mu n_a - \gamma n_e n_i \equiv 0$$

Полное (детальное) термодинамическое равновесие

Такое равновесие, при котором скорости прямого и обратного процессов одинаковы для каждого из элементарных процессов. Система является полностью термодинамически равновесной.

Локальное термодинамическое равновесие (ЛТР)

Приближение для тех случаев, когда нет равновесия в строгом смысле этого слова, но распределение частиц по скоростям в каждой точке близко к максвелловскому и можно ввести параметры, зависящие от координаты и времени (*напр.*, $T(x, y, z, t)$). Некоторые элементарные процессы могут быть несущественны ($\beta n_e^2 n_i \gg \mu n_a, \gamma n_e n_i$).

Корональное равновесие

Тип равновесия, реализуемый в редкой, прозрачной плазме.

... и много других типов равновесия, которые могут реализовываться в определённых условиях.

Но система может быть и неравновесной, когда распределение частиц по скоростям не является максвелловским.

Плазма в термодинамическом равновесии

Найдём плотность электронов n_e , ионов n_i и нейтральных атомов n_a для водородной плазмы в термодинамическом равновесии

электрон находится в состоянии с энергией ε_k с вероятностью

$$w_k = A \exp\left(-\frac{\varepsilon_k}{T}\right) \quad \text{причём} \quad \sum_k w_k = 1, \quad \frac{\sum_{\varepsilon_k > 0} w_k}{\sum_{\varepsilon_k < 0} w_k} = \frac{n_i}{n_a}$$

здесь за ноль принята энергия, соответствующая потенциалу ионизации, поэтому $\varepsilon_k < 0$ – связанные состояния, $\varepsilon_k > 0$ – свободные состояния

В атоме водорода:

$$\varepsilon_k = -\frac{me^4}{2\hbar^2 k^2} = -\frac{I}{k^2}$$

$I = 13.6$ эВ – потенциал ионизации
 $k \geq 1$ – номер уровня

Поэтому для связанных электронов:

$$\sum_{\varepsilon_k < 0} w_k = 2A \left(e^{I/T} + \dots \right)$$

коэффициент 2 из-за спина
 пренебрегаем уровнями с $k \geq 2$

Формула Саха

Для свободных электронов:

$$\sum_{\varepsilon_k > 0} w_k = 2A \sum_{\varepsilon_k > 0} \exp\left(-\frac{\varepsilon_k}{T}\right) = 2A \int \frac{d\vec{p} d\vec{r}}{(2\pi\hbar)^3} \exp\left(-\frac{p^2}{2mT}\right) =$$

объём на один электрон, $V = 1/n_e$

$$= \frac{2AV}{(2\pi\hbar)^3} \underbrace{\int_0^\infty 4\pi p^2 \exp\left(-\frac{p^2}{2mT}\right) dp}_{(2\pi mT)^{3/2}} = \frac{2A}{n_e} \left(\frac{mT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$

Формула Саха

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = e^{-I/T} \underbrace{\left(\frac{mT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}}_{\sim \lambda_{d-B}^{-3}} \stackrel{\text{def}}{=} K(T)$$

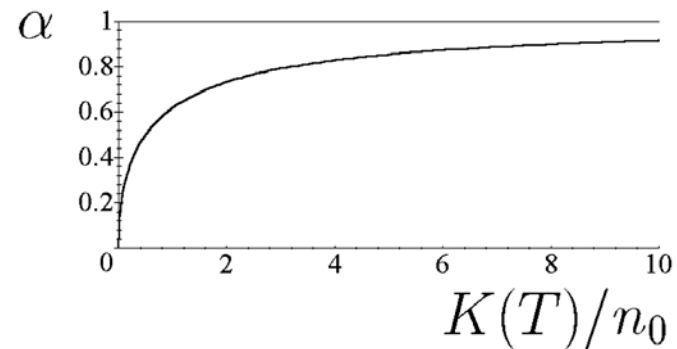
$K(T)$ – константа равновесия

Степень ионизации

$$\alpha \stackrel{\text{def}}{=} \frac{n_i}{n_0}, \quad n_0 = n_i + n_a$$

$$K(T) = \frac{\alpha n_0 \cdot \alpha n_0}{n_0 - \alpha n_0}$$

$$\frac{K(T)}{n_0} = \frac{\alpha^2}{1 - \alpha}$$

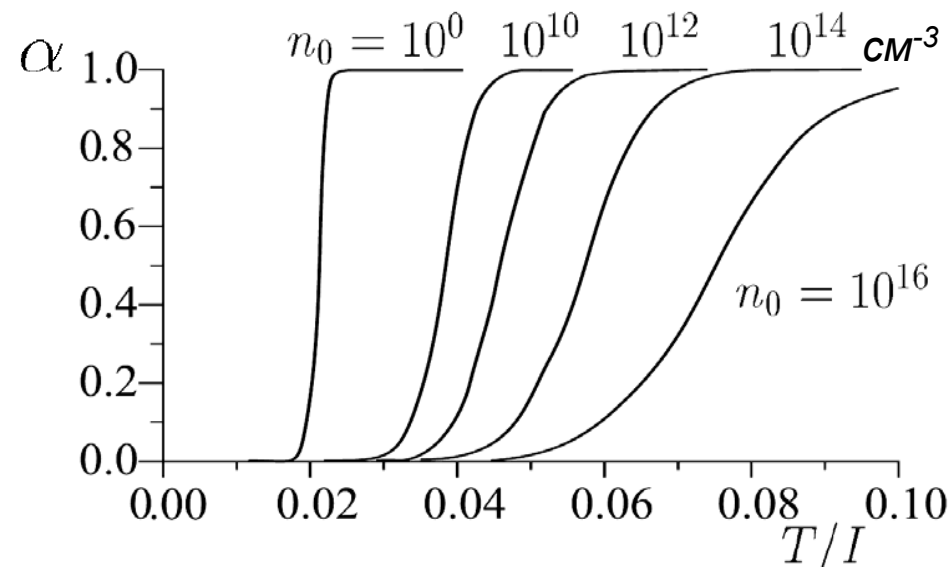


в классической идеальной плазме

$$\alpha = 0.5 \quad \text{при} \quad T = T^* \ll I \quad !!!$$

переход к сильно ионизированной
плазме происходит очень быстро,

$$\text{на } \Delta T \ll T \quad !!!$$



Комментарии к выводу

- При $\alpha = 0.5$ имеем $e^{-I/T_*} \sim n_0 \lambda_{d-B}^3$, откуда

$$\frac{T_*}{I} \sim -\frac{1}{\ln(n_0 \lambda_{d-B}^3)} \sim \frac{1}{\ln(\text{параметр классичности})}.$$

- При $T \sim T_*$:

$$\frac{w_2}{w_1} = \exp\left(\frac{|\varepsilon_2| - I}{T}\right) \sim e^{-3I/4T_*} \sim (n_0 \lambda_{d-B}^3)^{3/4} \ll 1,$$

число электронов на возбужденных уровнях мало по параметру классичности \Rightarrow пренебрежение ими оправдано.

(Электрон с большей вероятностью переходит на один из многих уровней непрерывного спектра, нежели на возбужденный уровень).

- Для сложных атомов равновесная степень ионизации находится аналогично (но с учетом многих, в том числе и вырожденных, уровней).

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = \frac{g_e g_i}{g_a} e^{-I/T} \left(\frac{mT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2}$$

Корональное равновесие

Редкая, оптически прозрачная плазма

пример: солнечная корона



Основные процессы:

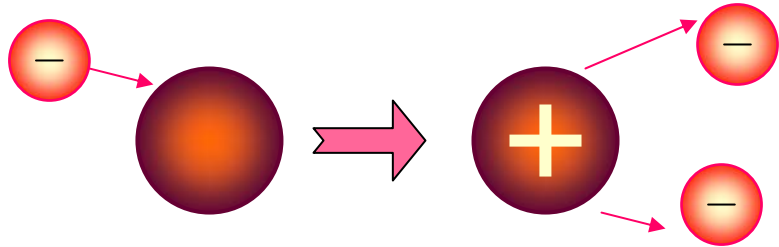
ионизация электронным ударом \leftrightarrow фоторекомбинация
тройная рекомбинация и фотоионизация незначительны

Корональное равновесие (2)

Редкая, оптически прозрачная плазма

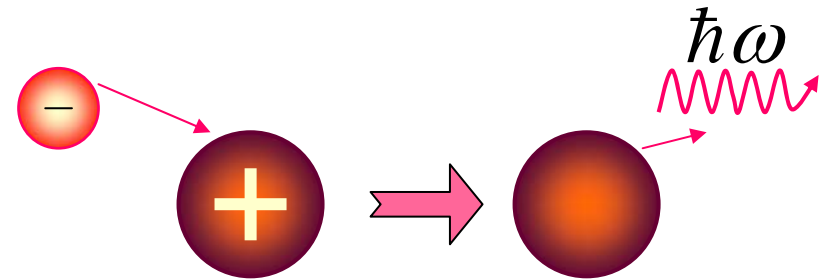
ионизация электронным ударом

прямой процесс



фоторекомбинация

обратный процесс



Динамика числа электронов:

$$\frac{dn_e}{dt} = n_e n_a \langle \sigma v \rangle - \gamma n_e n_i$$

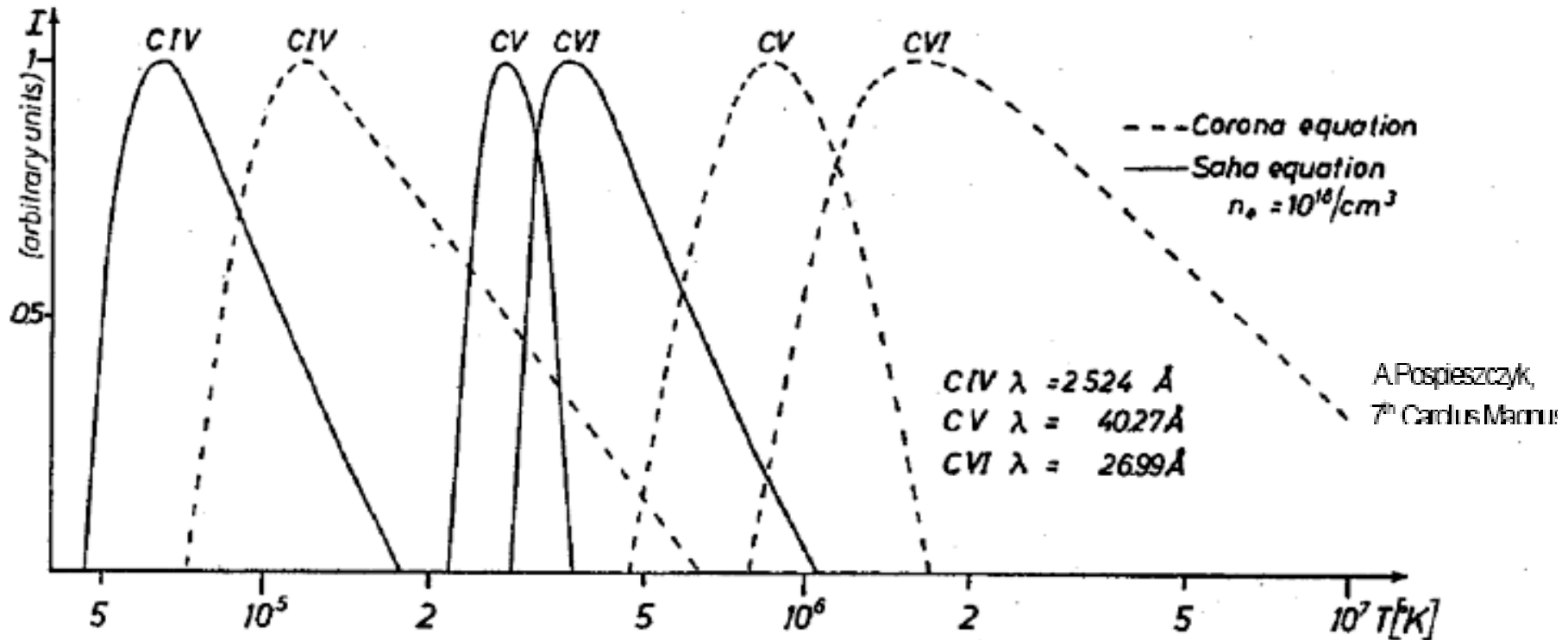
Степень ионизации (формула Эльверта):

$$\alpha = \frac{n_i}{n_a} = \frac{\langle \sigma_e v \rangle}{\gamma}$$

Корональное равновесие: степень ионизации не зависит от плотности!

Сравнение моделей

Сравнение равновесий по Саха и коронального – ионы углерода



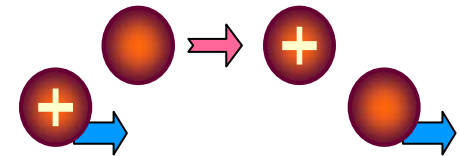
Если в плазме на самом деле реализуется **не ЛТР**, а **корональное равновесие**, то результат обработки измерений даст **сильную ошибку**.

Некоторые другие элементарные процессы

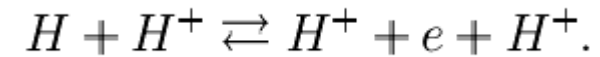
- Перезарядка

- резонансная перезарядка, если частицы одного сорта

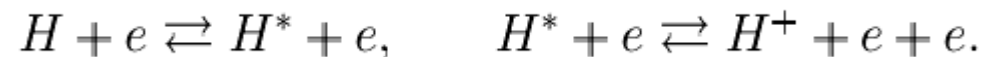
- нерезонансная перезарядка, если частицы разного сорта



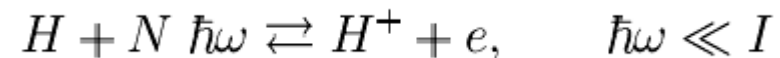
- Ионизация ионами и тройная рекомбинация



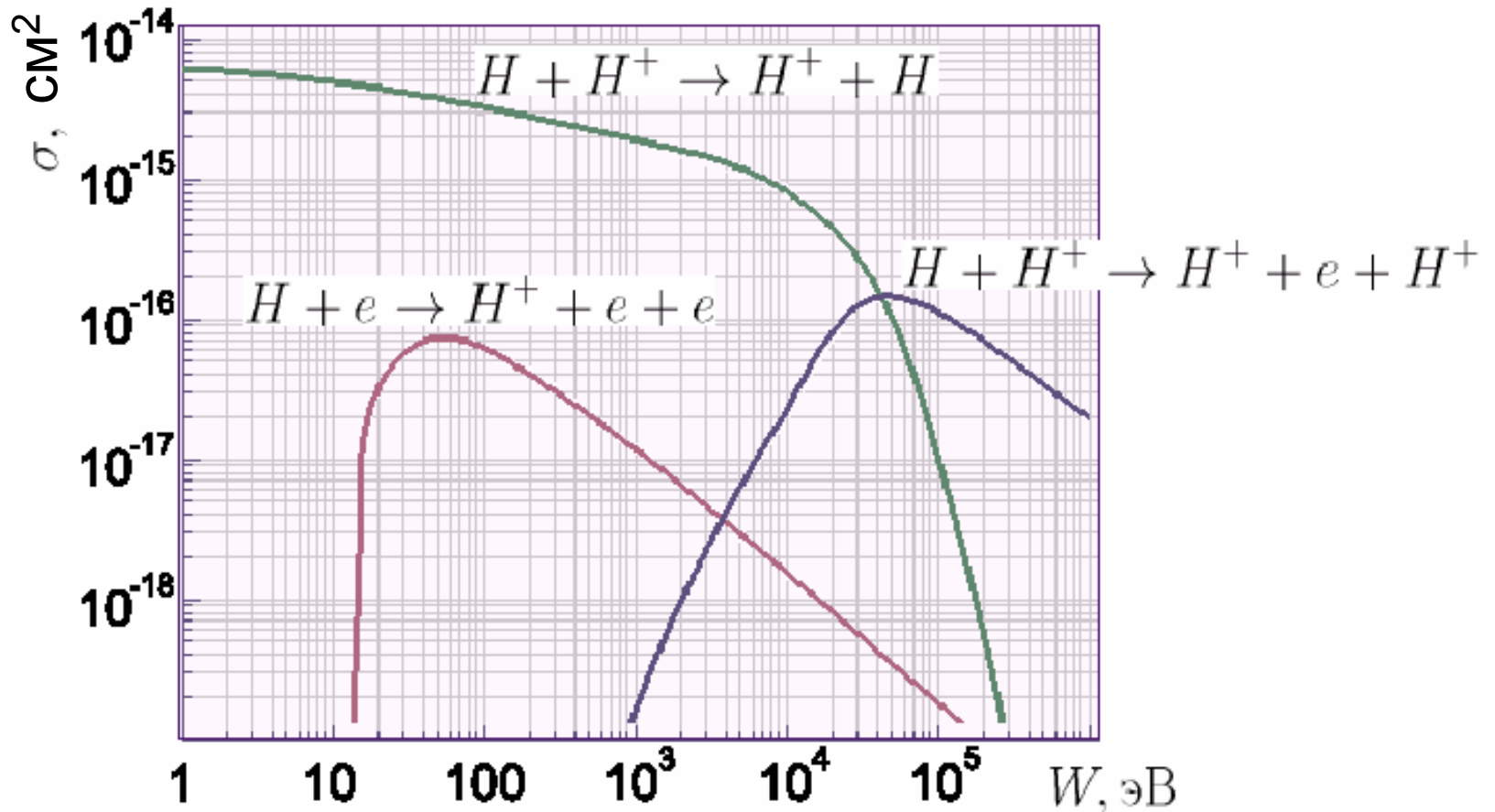
- Многоступенчатая (каскадная) ионизация



- Туннельная (многофотонная) ионизация



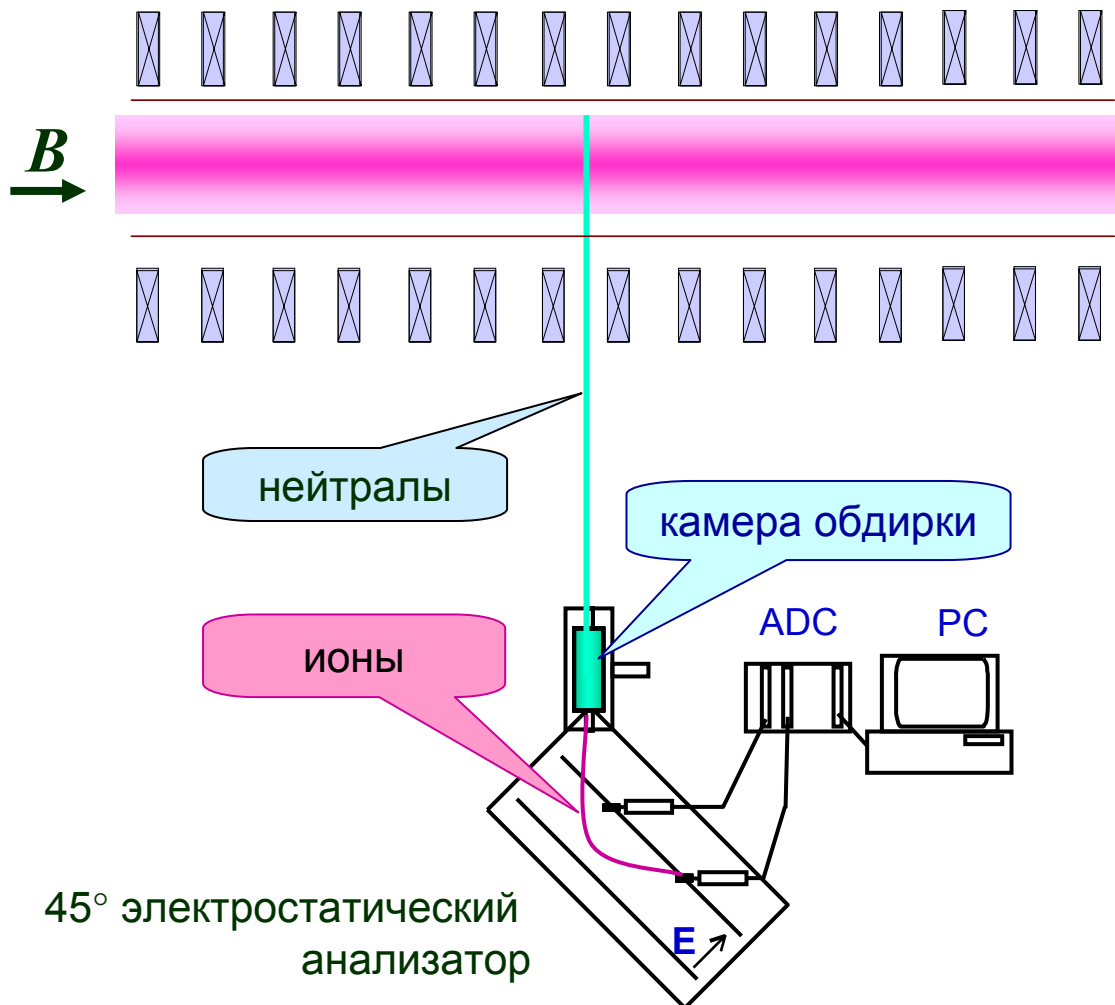
Резонансная перезарядка



Сечение резонансной перезарядки очень большое, поэтому этот процесс важен!

Диагностика по нейтралам перезарядки

Пассивная диагностика: измеряем
ПОТОК ЧАСТИЦ, ВЫЛЕТАЮЩИХ ИЗ ПЛАЗМЫ

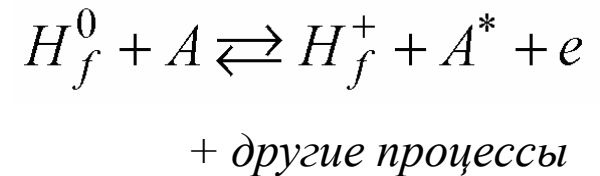


в плазме:

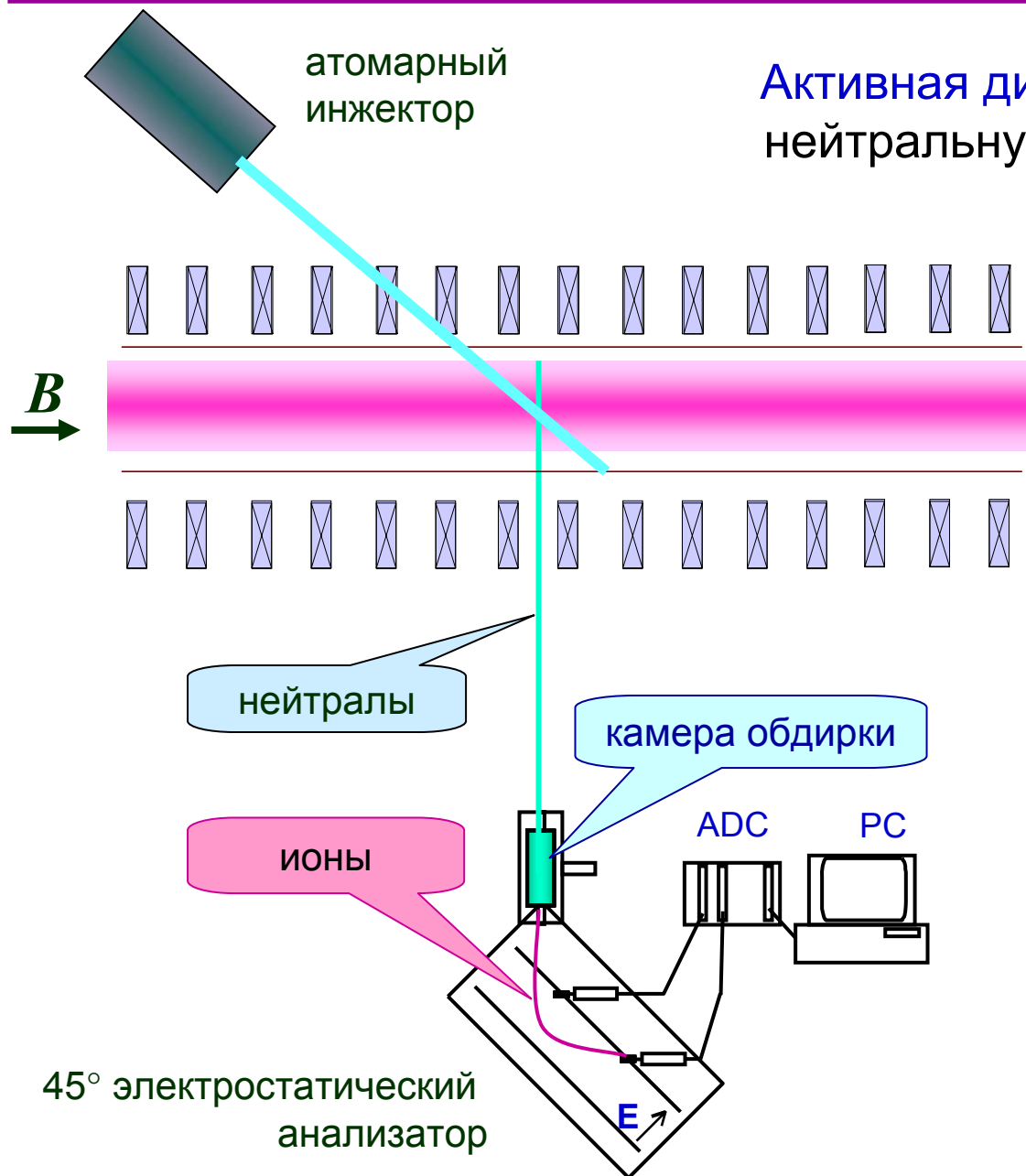


f - быстрый (горячий),
 s - медленный (холодный)

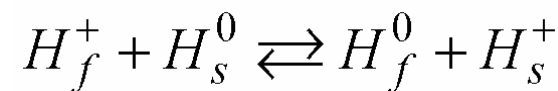
в камере обдирки:



Диагностика по нейтралам перезарядки

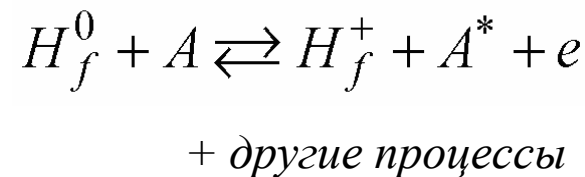


в плазме:



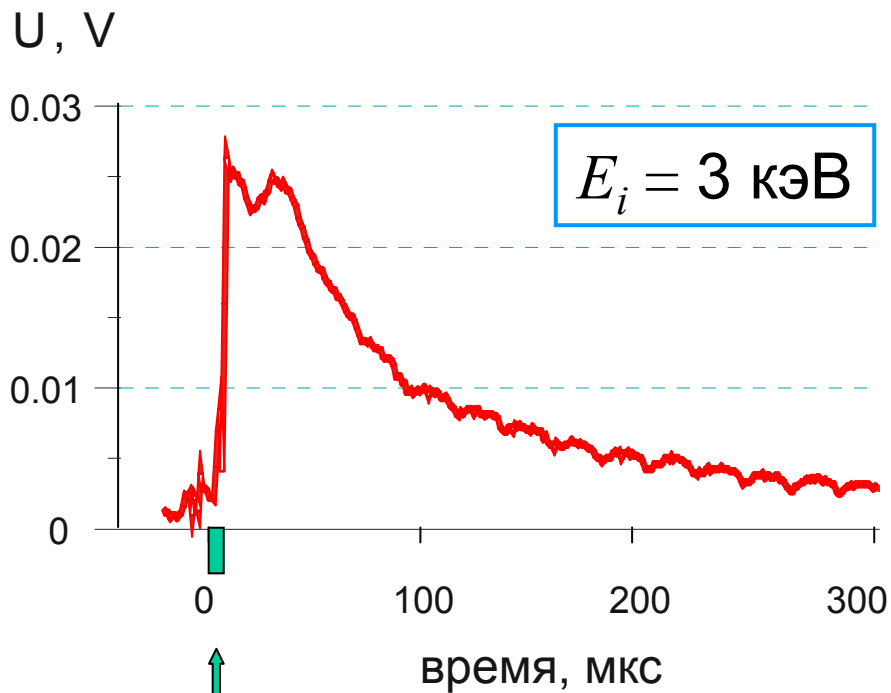
f - быстрый (горячий),
s - медленный (холодный)

в камере обдирки:



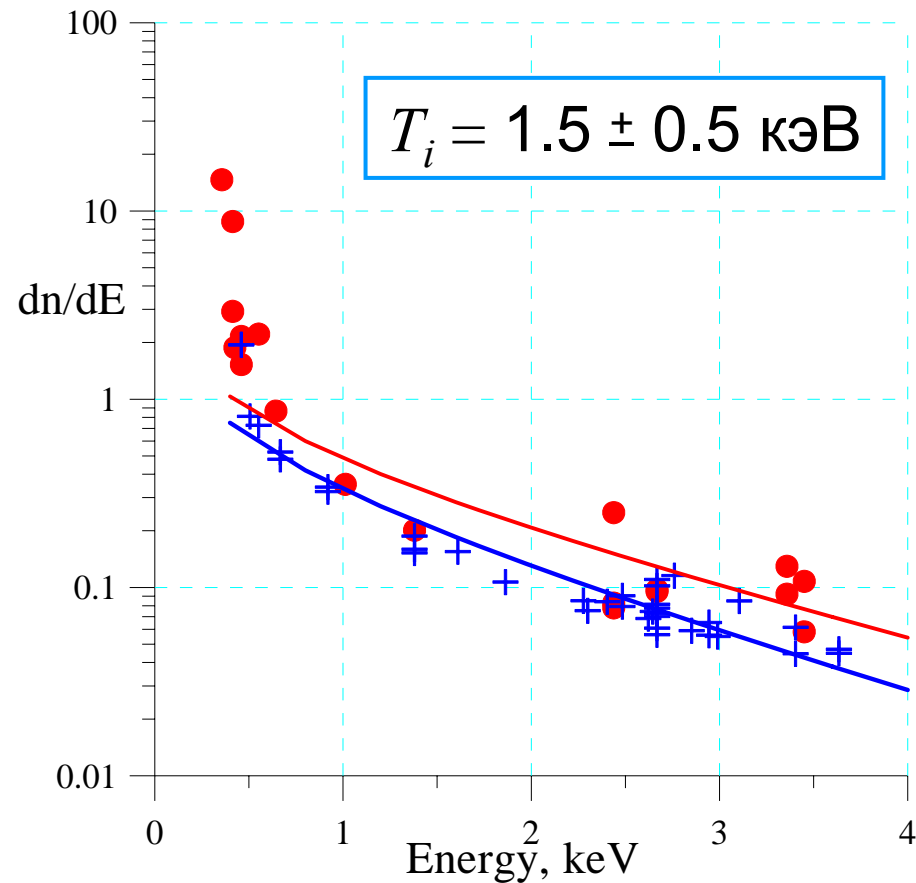
Эксперимент – установка ГОЛ-3 (ИЯФ)

Осциллограмма



↑
период
нагрева
плазмы

Спектр нейтралов



Конец темы

Элементарные процессы в плазме. Ионизация и рекомбинация, основные процессы. Корональное равновесие. Перезарядка, применение для диагностики и нагрева плазмы. Степень ионизации. Формула Саха. Термодинамическое равновесие, ЛТР. Зависимость степени ионизации от параметров плазмы, от потенциала ионизации.