



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



# Влияние эффектов ионной динамики на спектры многозарядных ионов в плотной плазме

А.Ю. Летунов<sup>1,2</sup>, В.С. Лисица<sup>2,3</sup>, П.А. Лобода<sup>1,2</sup>, А.А. Новиков<sup>1,2</sup>

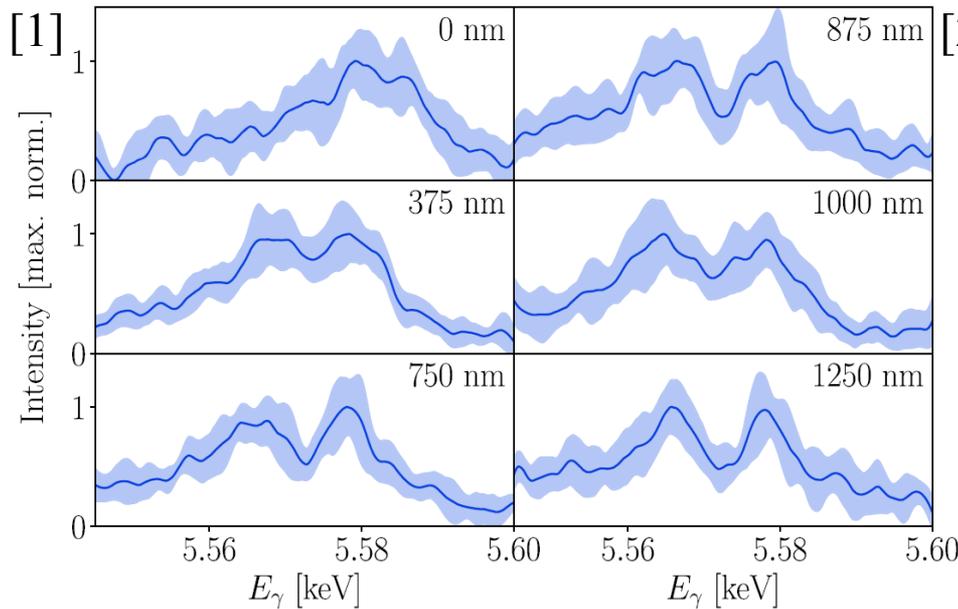
<sup>1</sup> *Российский федеральный ядерный центр ВНИИ технической физики им. академ. Е.И. Забабахина*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

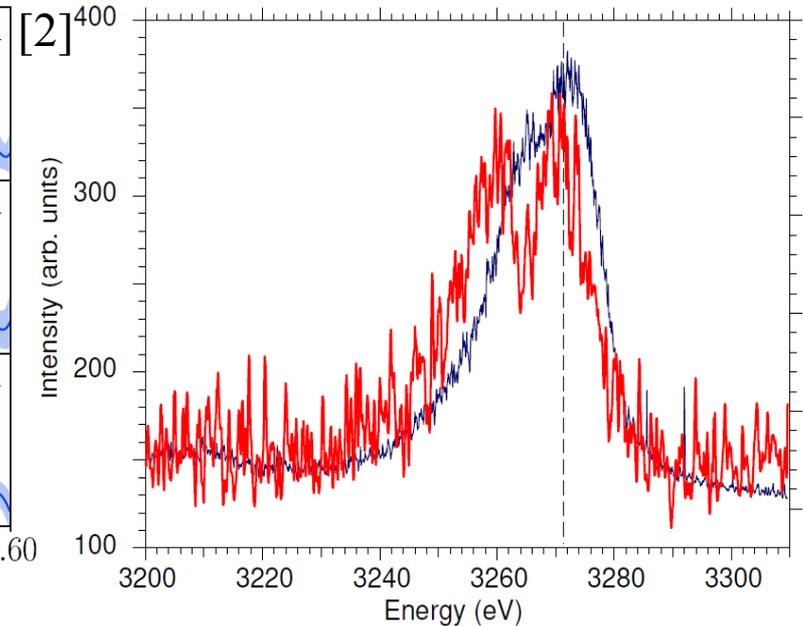
<sup>3</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*

# Штарковское уширение и диагностика плотной плазмы

## Спектры Ti



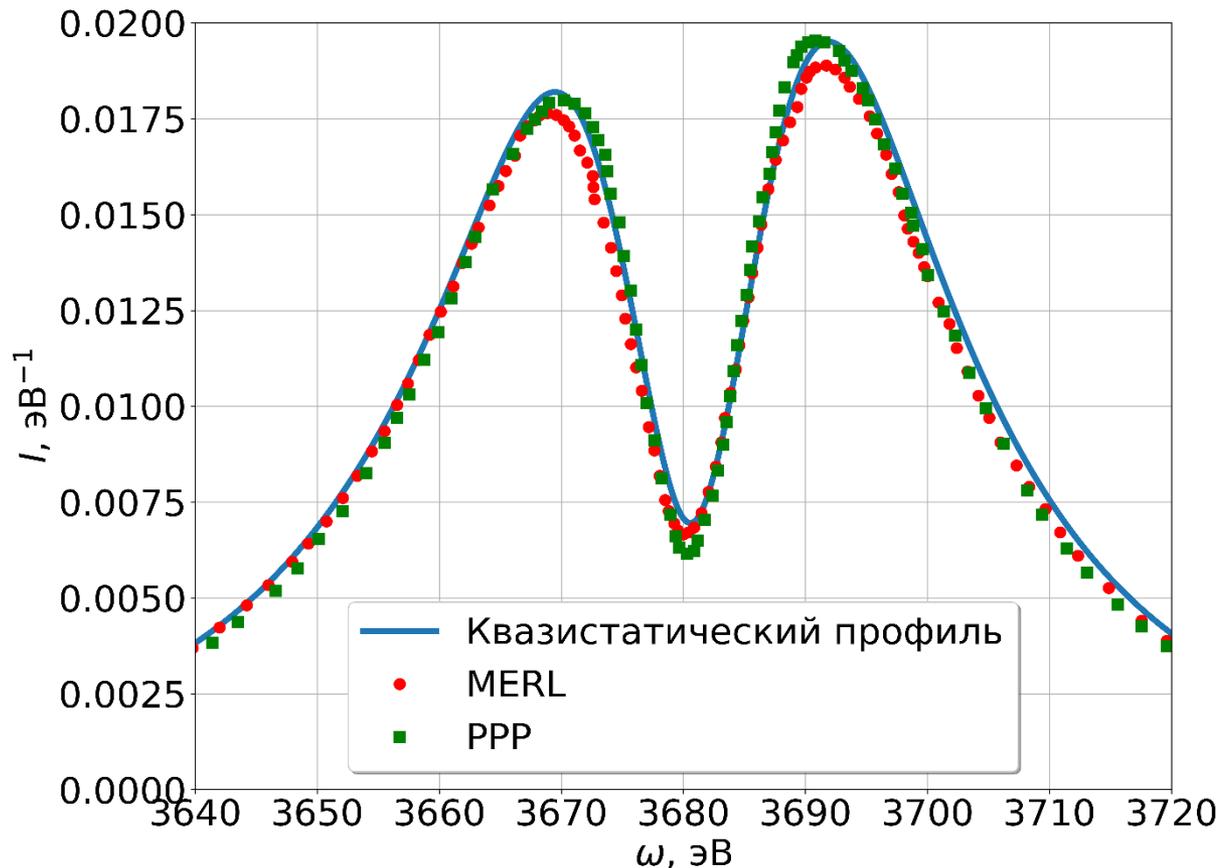
## Спектры Si



[1] *B. F. Kraus. et al. // Phys. Rev. Lett., 127, 205001 (2021).*

[2] *P. Beiersdorfer et al. // Phys. Rev. A 100, 012511 (2019).*

# LINE DM



Параметры плазмы:

Дейтериевая плазма с  
0,1% примесью Ar

Линия  $\text{He}_\beta$   
 $N_e = 2 \cdot 10^{24} \text{ см}^{-3}$   
 $T = 1 \text{ кэВ}$

Вклад ионов учитывается  
в квазистатическом  
приближении

[3] Loboda P.A. et al. // *Laser and Particle Beams*, 2000, Vol. 18, pp. 275-289.

[4] Ferri S. et al. // *Atoms*, 2014, Vol. 2, pp. 299-318.



Численная процедура Frequency Fluctuation Method [5] позволяет учитывать эффекты ионной динамики. В работе [6] показано, что она может быть сведена к простым аналитическим формулам:

$$I_i(\omega) = \frac{\nu J_0(\omega)J_2(\omega) - J_1^2(\omega)}{\pi J_2^2(\omega) + \nu^2 J_1^2(\omega)},$$

$$J_k(\omega) = \int \frac{d\omega' I_{i0}(\omega')(\omega - \omega')^k}{\nu^2 + (\omega - \omega')^2},$$

где  $I_{i0}(\omega)$  – квазистатический ионный профиль.

[5] Talin B., Calisti A., Godbert L. et al. // *Phys. Rev. A.*, 1995, Vol. 51, Pp. 1918–1928.

[6] Bureeva L.A. et al // *JETP Lett.*, 2010, 90, 647–650.

# Вычисление эффективного ионного профиля

- Квазистатический профиль составляется из электронного и ионного профилей:

$$I_0(\omega) = \int V(\omega') I_{i0}(\omega - \omega') d\omega',$$

где  $V(\omega')$  – эффективный профиль Фойгта.

- Данное интегральное уравнение решается методом преобразования Фурье:

$$\Phi_0(\tau) = \int \exp(i\omega\tau) I_0(\omega) d\omega = \Phi_V(\tau) \Phi_{i0}(\tau),$$

$$I_{i0}(\omega) = \int \exp(-i\omega\tau) \frac{\Phi_0(\tau)}{\Phi_V(\tau)} d\omega,$$

$$I = \int V(\omega') I_i(\omega - \omega') d\omega'.$$

# Расчёт частоты скачков ионного микрополя

$$\nu = \int_0^\infty d\beta d^3\vec{v} H(\beta) W(\vec{v}) \nu(\beta, \vec{v}),$$

$$\nu(\beta, \vec{v}) = \nu(\beta, 0) \left[ 1 + \frac{\langle Z^{1/2} \rangle |\vec{v}|^2}{\langle Z^{1/2} |\vec{u}|^2 \rangle} + \frac{5}{12\pi} \frac{\langle Z^2 \rangle |\vec{v}|^2}{\langle Z^{3/2} \rangle \langle Z^{1/2} |\vec{u}|^2 \rangle} \frac{H(\beta)}{\beta^{1/2} G(\beta)} \right]^{1/2},$$

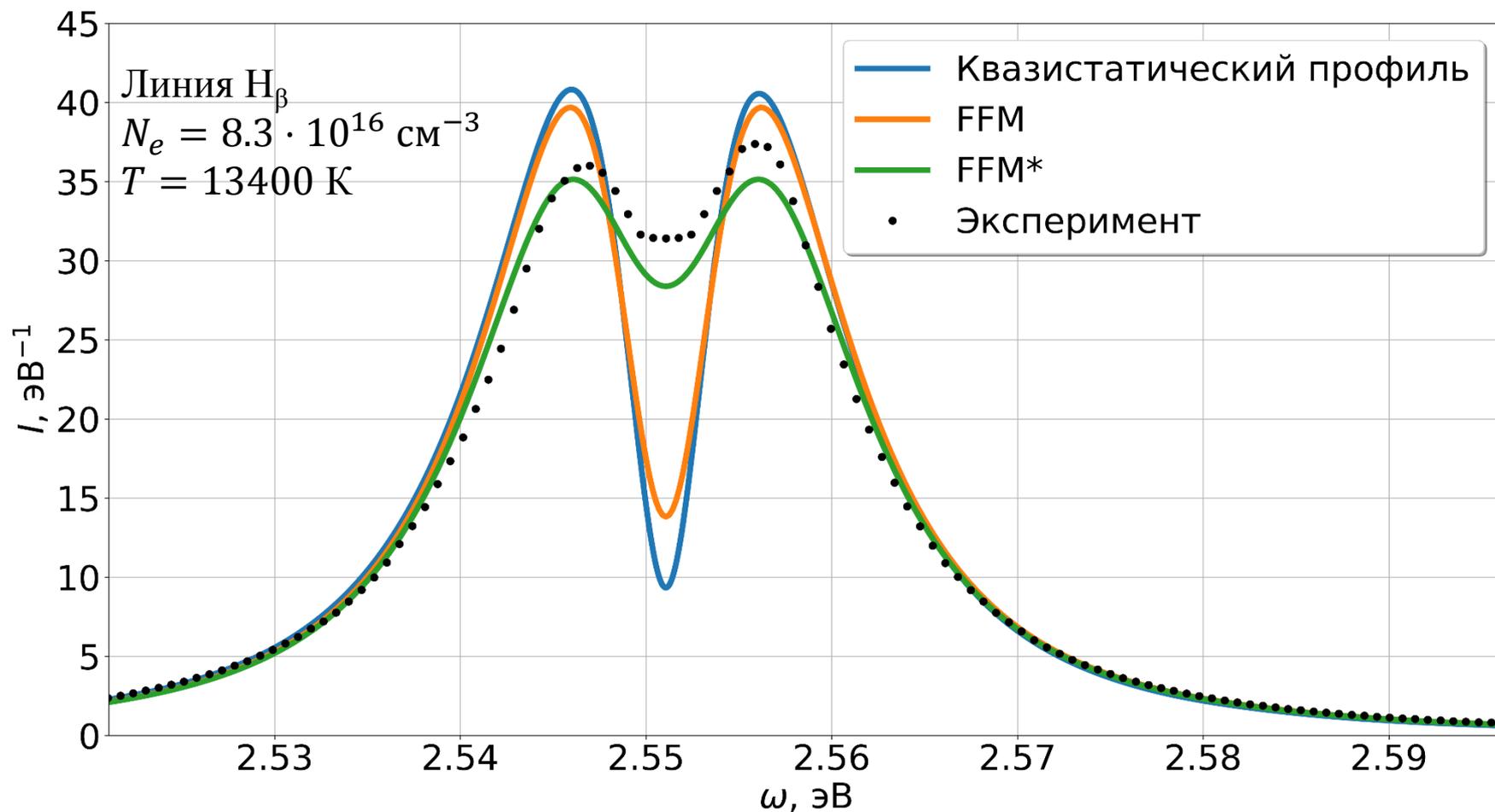
$$\nu(\beta, 0) = a \left( \frac{\nu_0}{\omega_{st}} \right) \nu_0 \left[ 2\pi \left( \frac{15}{4} \right)^{1/3} \frac{\langle Z^{1/2} |\vec{u}|^2 \rangle}{\langle Z^{3/2} \rangle^{1/3} \nu_T^2} \frac{G(\beta)}{\beta^{3/2} H(\beta)} \right]^{1/2}, \beta = \frac{F}{F_0},$$

$$G(\beta) = \frac{3}{2} \int_0^\beta dx x^{-3/2} H(x), \nu_0 = N_i^{1/3} \nu_T, \nu_T^2 = \frac{2T_i}{m_i},$$

$$F_0 = 2\pi \left( \frac{4}{15} \right)^{\frac{2}{3}} (\langle Z^{3/2} \rangle)^{2/3} N_i^{2/3}.$$

где  $H(\beta)$  – квазистатическое распределение ионного поля,  $W(\vec{v})$  – распределение Максвелла,  $a \left( \frac{\nu_0}{\omega_{st}} \right)$  учитывает вклад вращения микрополя.

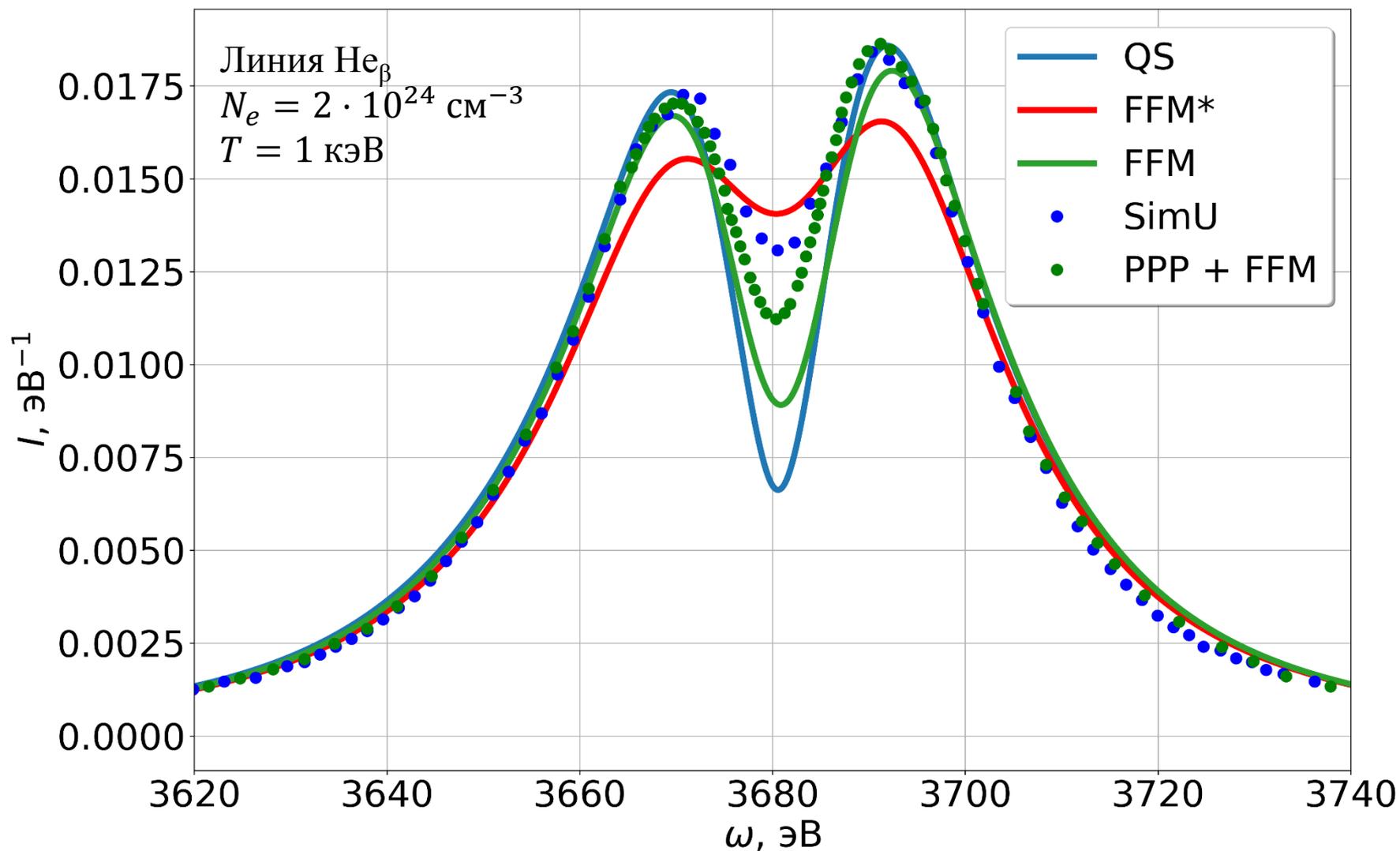
# Водородная линия $H_\beta$



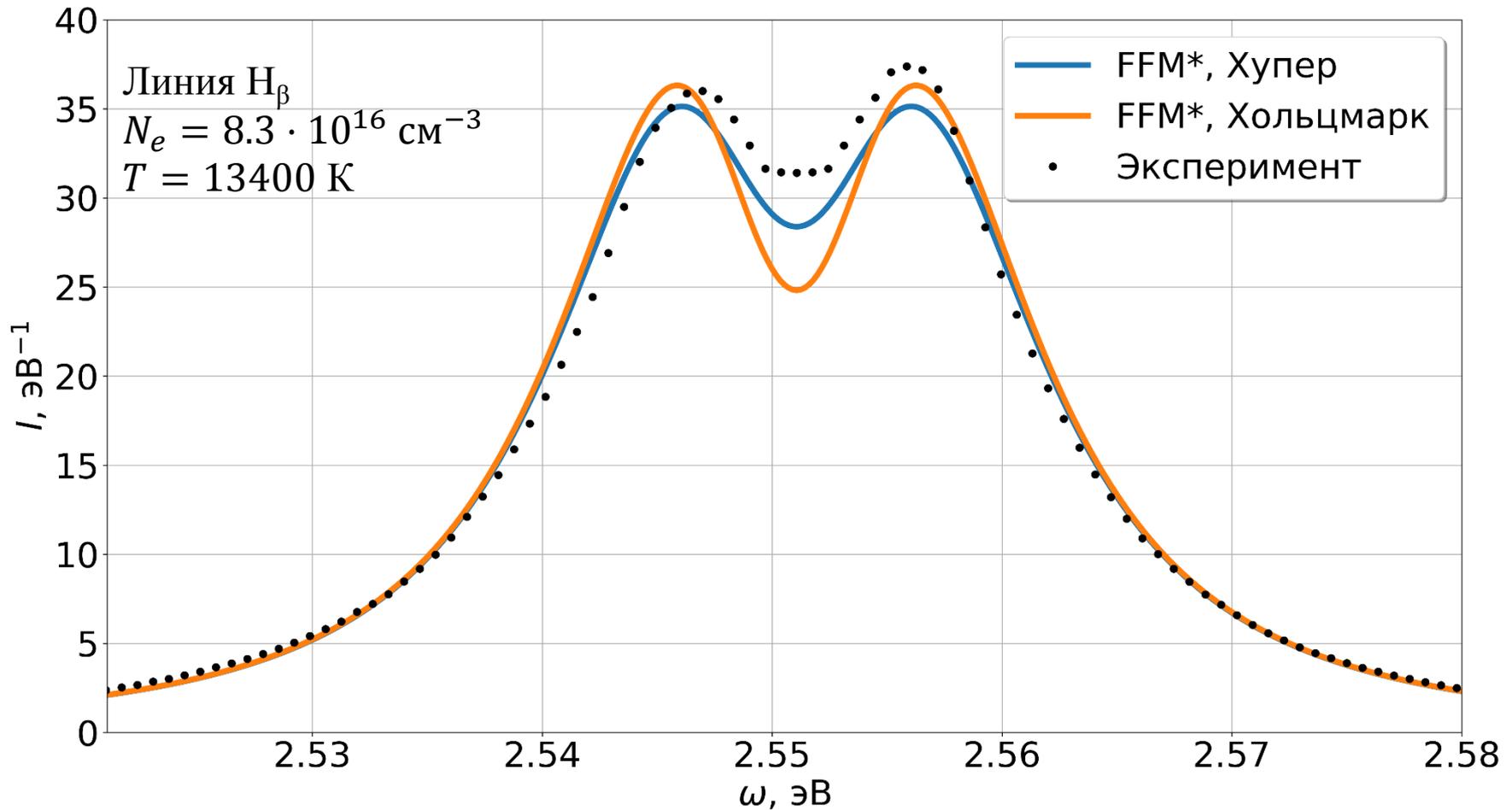
# Сравнение с другими методиками



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

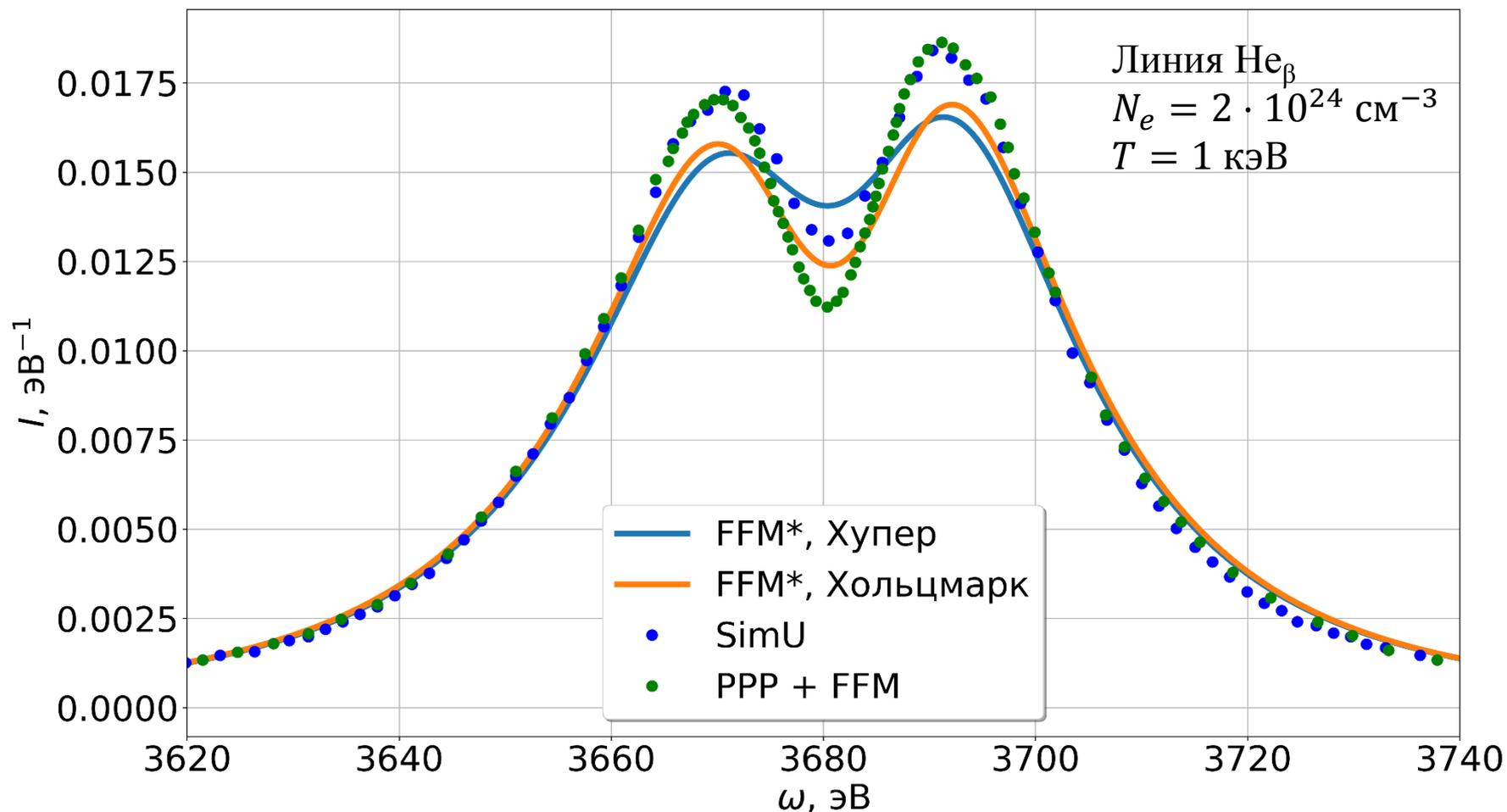


# Влияние неидеальности плазмы на эффекты ионной динамики

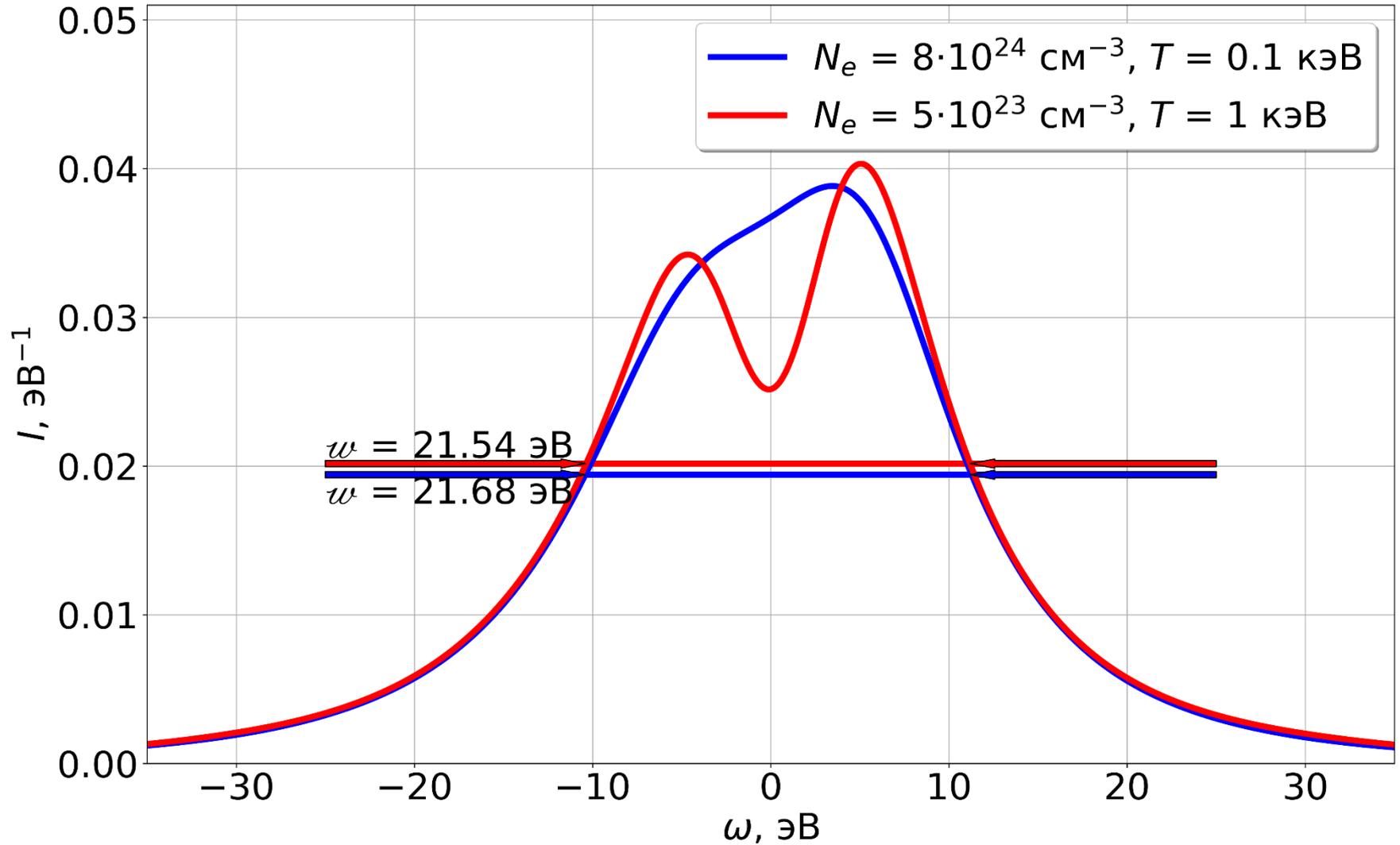


[8] Wiese W. L., Kelleher D. E., Paquette D. R. // *Phys. Rev. A.*, 1972, Vol. 6, Pp. 1132–1153.

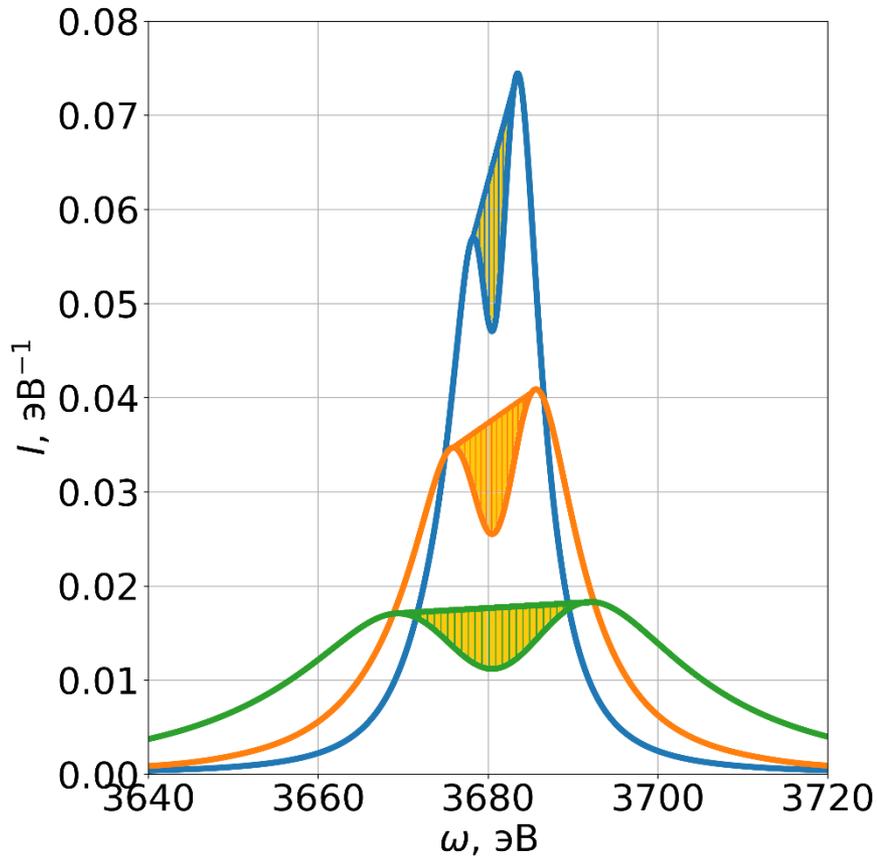
# Сравнение распределений микротополя для линии $\text{He}_\beta$



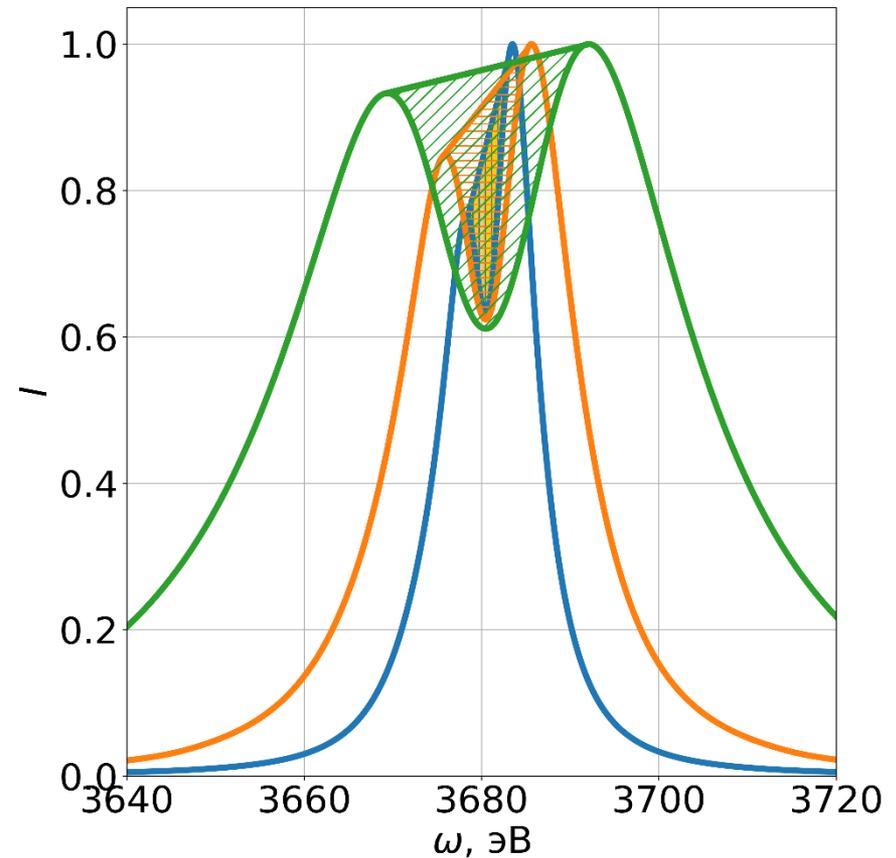
# Линия $He_{\beta}$ (ArXVII)



# Вычисление площади провала

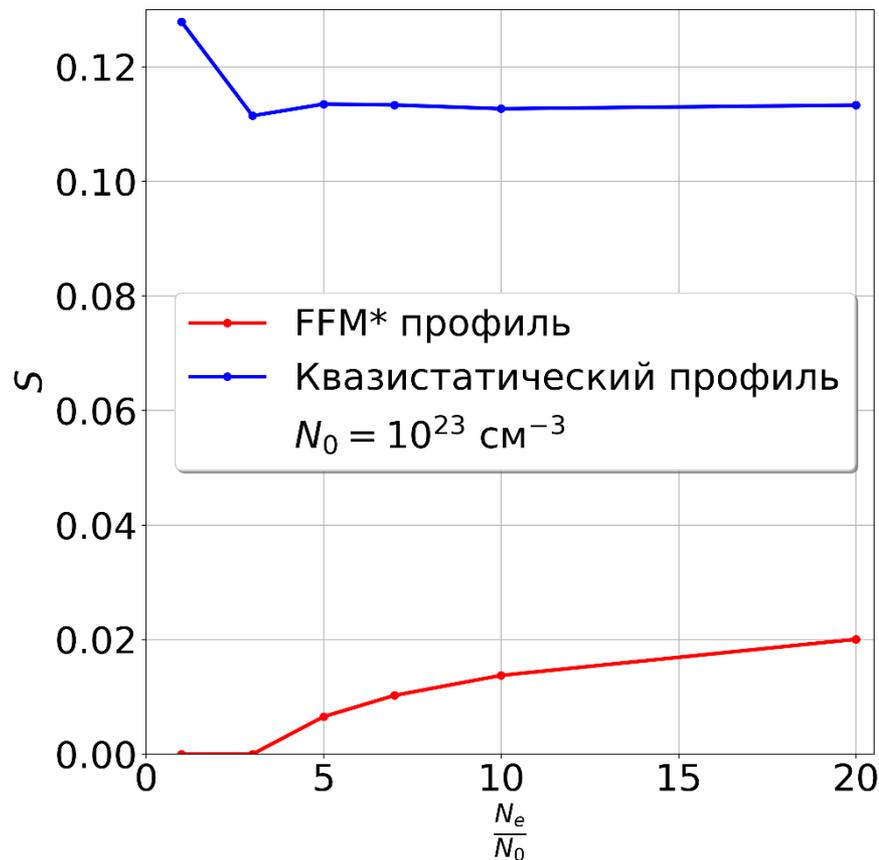


Площадь провала для линии с  
нормировкой  $\int I(\omega)d\omega = 1$

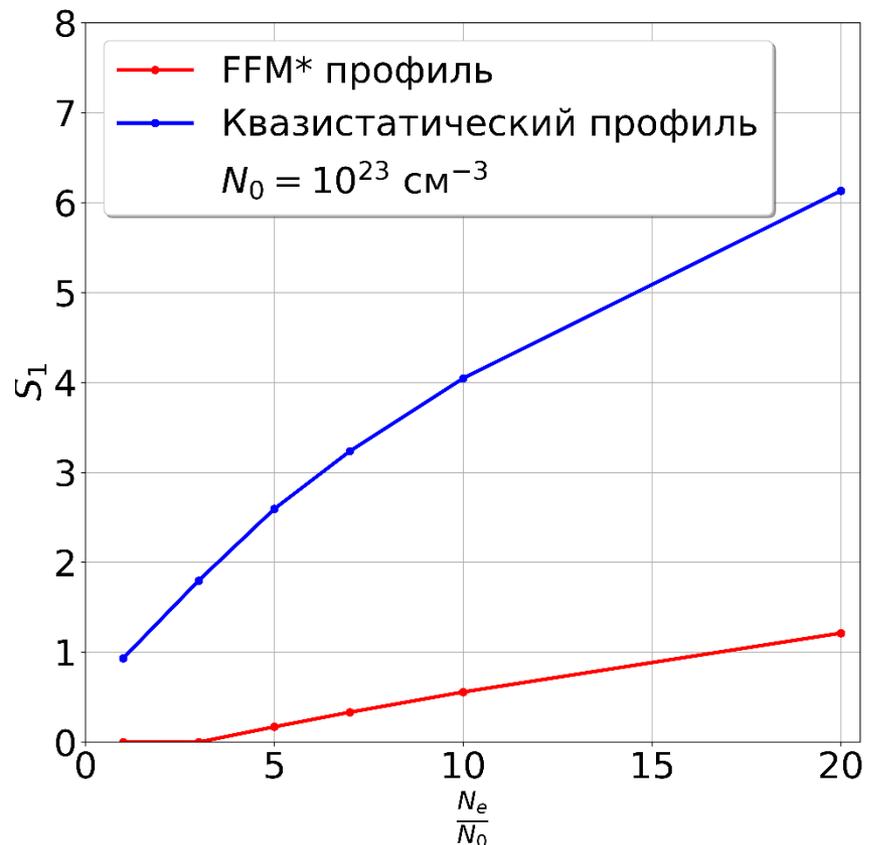


Площадь провала для линии с  
нормировкой  $I_{max} = 1$

# Зависимость площади провала от плотности

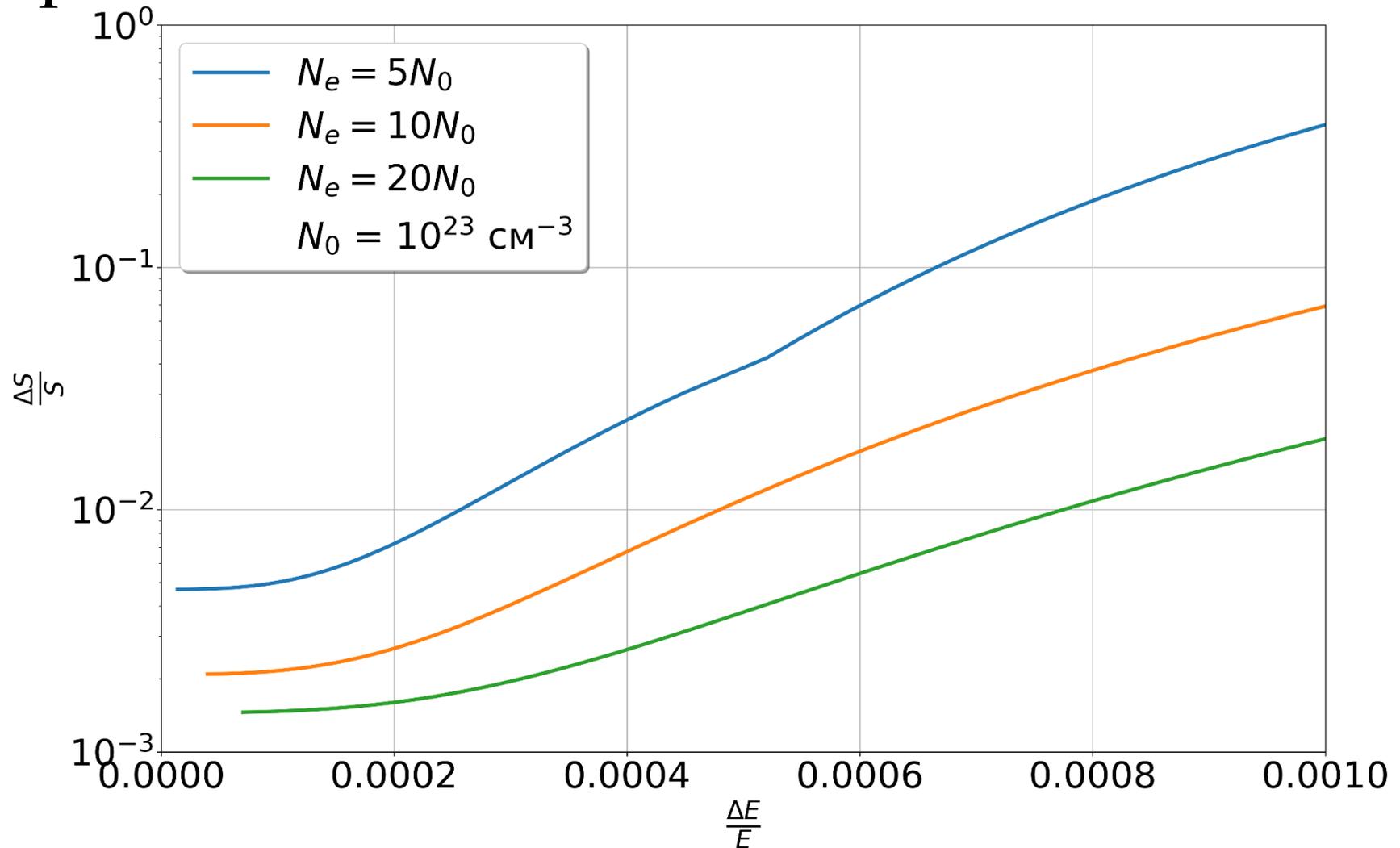


Площадь провала для линии с нормировкой  $\int I(\omega)d\omega = 1$



Площадь провала для линии с нормировкой  $I_{max} = 1$

# Оценка погрешности площади провала



# Выводы

- 1) Получена аналитическая формула для частоты скачков ионного микрополя, учитывающая зависимость ее от величины электрического поля.
- 2) С учетом полученных результатов рассчитаны спектры водорода для условий дугового разряда. Получено согласие с экспериментальными данными.
- 3) Разработана методика расчета спектров МЗИ, учитывающая одновременно эффекты ионной динамики и интерференцию штарковских компонент линий.
- 4) Показано, что неидеальность плазмы может существенно влиять на частоту скачков ионного микрополя.