



Інститут ядерних досліджень НАНУ

# ФІЗИКА НЕІДЕАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ

**Семінарське (практичне) заняття #3**

Модуль #1

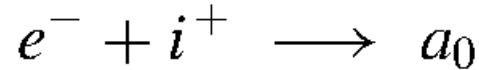
Класична неідеальна плазма

### 3. Слабонеідеальна плазmv

#### 3.1. Рівняння Сага-Еггерта для ідеальної плазми

$$n_+ = n_-$$

$$n_0 = n_+ + n_a = n_- + n_a.$$



$$\mu_e + \mu_i = \mu_a$$

$$\mu_a = I + k_B T \ln n_a + k_B T \ln \Lambda_a^3$$

$$\mu_e = k_B T \ln n + k_B T \ln \lambda_e^3$$

$$\mu_i = k_B T \ln n + k_B T \ln \Lambda_i^3$$

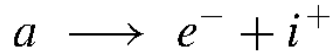
$$\Lambda_k = h / \sqrt{2\pi m_k k_B T}.$$

$$\Lambda = \frac{\Lambda_e \Lambda_i}{\Lambda_a}$$

$$\frac{n_a}{n_e n_i} = \Lambda^3 \exp\left(\frac{I}{k_B T}\right)$$

### 3. Слабонеідеальна плазmv

#### 3.2. Рівняння Сага



$$N_e = N_e^* + N_a^*$$

$$N_i = N_i^* + N_a^*$$

$$N_e^* = N_i^*$$

$$N_e = N_i = N_0$$

$$n_+ = n_-$$

$$n = n_+ + n_0 = n_- + n_0.$$

$$\frac{n_a}{n_e n_i} = \Lambda^3 \sigma(T) \exp\left(\frac{\mu_{ex}}{k_B T}\right)$$

$$\Lambda = \frac{\Lambda_e \Lambda_i}{\Lambda_a}$$

$$\sigma(T) = \sum_{sl} w_{sl} (2l + 1) \exp(-\beta E_{sl})$$

$$\mu_{ex} = -\frac{e^2 \kappa}{\epsilon_r} G(\kappa \lambda)$$

$$\kappa^2 = 4\pi(n_e + n_i)e^2$$

### 3. Слабонеідеальна плазmv

#### 3.3. Рівняння Сага

Рівняння стану

$$\beta p = n_e + n_i + n_a - \frac{\kappa^3}{24\pi} \Phi(\kappa\lambda) + O(n^{5/2}).$$

QDHA

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha^2} = n_0 \Lambda_e^3 \sigma(T) \exp\left(-\beta e^2 \frac{\kappa_0 \sqrt{\alpha}}{1 + \kappa_0 \sqrt{\pi \alpha} \lambda / 4}\right)$$

$a(T)$

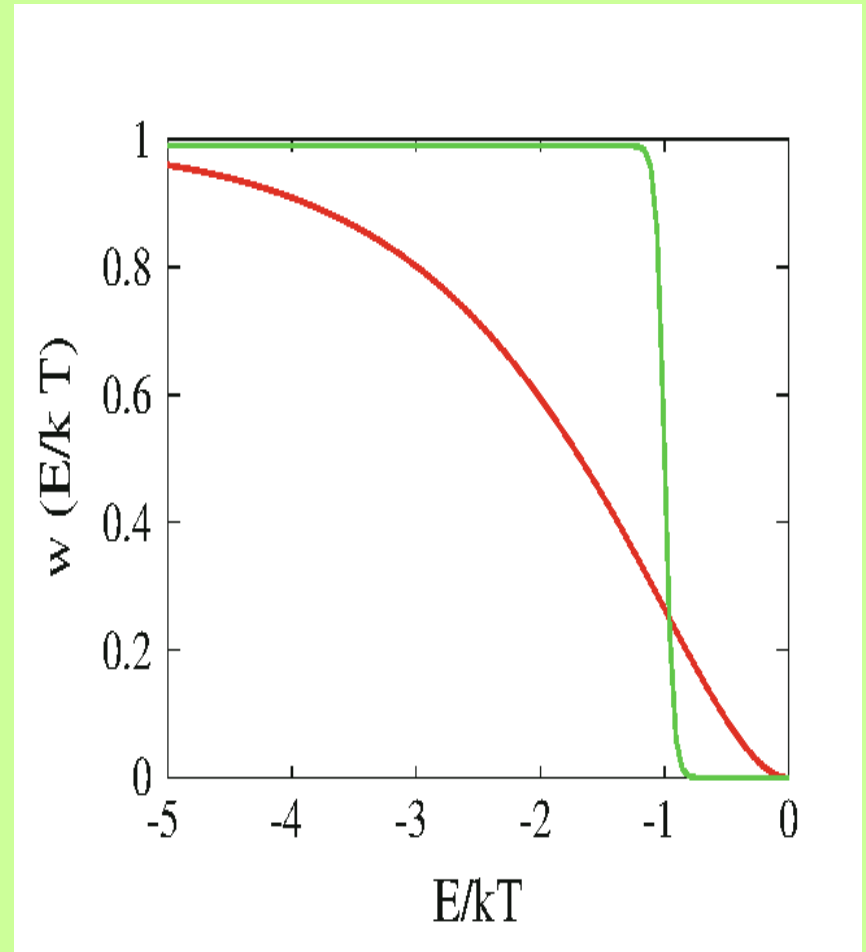
КЕРА.

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha^2} = n_0 \Lambda_e^3 \sigma(T) \exp\left(-\beta e^2 \frac{\kappa_0 \sqrt{\alpha}}{\sqrt{1 + \sqrt{\pi} \kappa_0 \lambda_{ie} \sqrt{\alpha} / 2}}\right)$$

## 3. Слабонеідеальна плазmv

### 3.4. Статсума

- **BPL**  
(статсума Бріллюена-Планка-Ларкіна)
- **RRS** (Рів-Ромпе-Штеєнбек)



### 3. Слабонеідеальна плазmv

#### 3.5. Регуляризація статсуми

BPL

$$w_{sl} = 1 - \exp(\beta E_{sl}) + \beta E_{sl} \exp(\beta E_{sl})$$

$$\sigma(T) = \sum_l w_{sl} (2l + 1) \exp(-\beta E_{sl})$$

RRS

$$\sigma(T) \approx \sum_{E_{sl} < -\epsilon^*} (2l + 1) \exp(-\beta E_{sl})$$

$$a_s = s^2 a_B, \quad a_B = \frac{\hbar^2}{\mu e^2}, \quad E_s = -\frac{\mu e^4}{2\hbar^2 s^2},$$

### 3. Слабонеідеальна плазма

#### 3.6. Рівноважна плазма

Рівняння стану

$$p = \sum_i n_i kT + \Delta p_R$$

Електронейтральність

$$n_i = n_e$$

Рівняння Саха

$$\frac{n_e n^+}{n_0} = 2 \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \frac{Z_1^+}{Z_a} \exp \left( \frac{\chi_1 - \Delta\chi_1}{kT} \right)$$

### 3. Слабонеідеальна плазма

#### 3.7. Рівноважна плазма

Середня кулонівська енергія

$$\frac{\partial F_k}{\partial N_i} = \frac{e^2 Z_i^2}{2D} = \bar{\epsilon}_i$$

Дебаївський радіус

$$D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi e^2 \sum_i N_i Z_i^2}}$$

Зниження потенціала іонізації

$$\Delta\chi_{m+1} = \bar{\epsilon}_e + \bar{\epsilon}_{m+1} - \bar{\epsilon}_m = (m+1)e^2/D$$

Статсума

$$Z = \sum_{n=1}^{n^*} W_n g_n \exp(-E_n/kT)$$