



Інститут ядерних досліджень НАНУ

ФІЗИКА НЕІДЕАЛЬНОЇ ПЛАЗМИ

Семінарське (практичне) заняття #4

Модуль #1

Класична неідеальна плазма

4. Уширення спектральних ліній

4.1. Профіль лінії

Коефіцієнт поглинання в лінії

$$\kappa(\Delta\omega) = \frac{\pi e^2}{mc} f N_m \frac{P(\Delta\omega)}{2\pi},$$

Профіль лінії

$$\int_{-\infty}^{+\infty} P(\Delta\omega) d(\Delta\omega) = 1$$

Чинники уширення

1. Взаємодія атома з полем випромінювання;
2. Тепловий рух (доплерівське уширення);
3. Взаємодія атома з оточуючими частинками

4. Уширення спектральних ліній

4.2. Радіаційне загасання. Лоренцевий профіль

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{2e^2}{3c^3} (\ddot{x})^2.$$

$$f_{\text{ТР}} = \frac{2e^2}{3c^3} \ddot{x} = -\frac{2e^2}{3c^3} \omega_0^2 \dot{x},$$

$$\ddot{x} - \frac{f_{\text{ТР}}}{m} + \omega_0^2 x = \ddot{x} + \gamma \dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

$$\gamma = \frac{2e^2 \omega_0^2}{3mc^3}$$

$$\gamma \ll \omega_0, \quad x = x_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \gamma t + i\omega_0 t\right)$$

$$a(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{1/2\gamma + i(\omega - \omega_0)}$$

$$P(\Delta\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{1/2\gamma}{(\Delta\omega)^2 + (1/2\gamma)^2}$$

$$\Delta\lambda_n = \frac{2\pi c\gamma}{\omega_0^2} = \frac{4\pi e^2}{3mc^2} = 1,18 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}.$$

4. Уширення спектральних ліній

4.3. Допплерівське уширення

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{v}{c}$$

$$P(\Delta\omega) = W \left(c \frac{\Delta\omega}{\omega} \right) \frac{\omega}{c}$$

$$P(\Delta\omega) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta\omega_0} \exp\left(-\frac{\Delta\omega^2}{\Delta\omega_0^2}\right)$$

$$\Delta\omega_0 = \frac{\omega}{c} v_0 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

4. Уширення спектральних ліній

4.4. Уширення тиском. Статистична теорія

Автокореляційна функція

$$\phi(s) = \langle \exp \{i\eta(t+s, t)\} \rangle = \left\langle \exp \left(i \frac{\sigma}{c} \sum_j v_j s_j \right) \right\rangle$$

Сукупність збурень

$$\phi(s) = \left\langle \exp \left\{ i \sum_{nV} \eta_j(t+s, t) \right\} \right\rangle = \left\langle \prod_{nV} \exp \{i\eta_j(t+s, t)\} \right\rangle.$$

Об'єм збурень

$$\phi(s) = e^{-nV_p(s)},$$

$$V_p(s) = -V \ln \langle \exp \{i\eta_j(t+s, t)\} \rangle$$

$$V_p(s) = V \langle 1 - \exp \{i\eta_j(t+s, t)\} \rangle$$

$$V_p(s) = sv \int_0^{\infty} (1 - e^{i\eta(\rho)}) 2\pi\rho d\rho = sv (\sigma_r - i\sigma_i).$$

4. Уширення спектральних ліній

4.5. Уширення тиском.

Профіль

$$P(\Delta\omega) = \frac{n\nu\sigma_r}{\pi [(\Delta\omega - n\nu\sigma_i)^2 + (n\nu\sigma_r)^2]}$$

Повна напіширина (стала загасання)

$$\gamma = 2n\nu\sigma_r$$

Зсув

$$\Delta\omega_s = n\nu\sigma_i$$

$$\Delta\omega(r) = \frac{C_p}{r^p}$$

$$\eta(\rho) = \frac{\alpha_p C_p}{\nu \rho^{p-1}}$$

$$\alpha_p = \sqrt{\pi} \frac{\Gamma[1/2(p-1)]}{\Gamma(1/2p)}$$

4. Уширення спектральних ліній

4.6. Уширення тиском. Типи взаємодій

1) Лінійний Штарк-ефект

$$p = 2, \quad \alpha_2 = \pi;$$

2) Резонансна взаємодія

$$p = 3, \quad \alpha_3 = 2;$$

3) Кв. Штарк-ефект

$$p = 4, \quad \alpha_4 = \frac{1}{2} \pi;$$

4) Взаємодія ВдВ

$$p = 6, \quad \alpha_6 = \frac{3}{8} \pi.$$

4. Уширення спектральних ліній

4.7. Уширення тиском. Розподілення Гольцмарка

1) Фазовий зсув є результатом суперпозиції електричних полів частинок

$$p = 2$$

$$\gamma = 2,6031$$

$$V_p(s) = (\gamma s)^{3/p}$$

$$\gamma = \left(\frac{2\pi^2 p}{3(p+3) \Gamma(3/p) \sin(3/2\pi/p)} \right)^{p/3}$$

$$\phi(s) = \exp[-n(\gamma s)^{3/2}]$$

$$W(F) = 4\pi F^2 W(\mathbf{F})$$

$$\begin{aligned} W(F) &= 4\pi F^2 \frac{1}{(2\pi)^3} \int_s \int_{\Omega} \phi(s) \exp(isF \cos \vartheta) ds d\Omega = \\ &= \frac{F^2}{\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} \exp[-n(\gamma s)^{3/2} + isF \cos \vartheta] \sin \vartheta d\vartheta s^2 ds. \end{aligned}$$

$$F = \beta F_0 = \beta \gamma n^{2/3}$$

$$F_0 = e\gamma n^{2/3}$$

4. Уширення спектральних ліній

4.8. Уширення тиском. Розподілення Гольцмарка

$$W(\beta) = \frac{2}{\pi\beta} \int_0^{\infty} v \sin v \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{3/2}\right] dv.$$

$$W(\beta) = \frac{4}{3\pi} \beta^2 (1 - 0,4628\beta^2 + 0,1227\beta^4 \dots)$$

$$\beta \ll 1$$

$$W(\beta) = \frac{1,496}{\beta^{5/2}} \left(1 + \frac{5,107}{\beta^{3/2}} + \frac{14,43}{\beta^3} \dots\right)$$

$$\beta \gg 1.$$

4. Уширення спектральних ліній

Функція Гольцмарка

$$H(\beta) = \frac{2}{\pi} \beta \int_0^{\infty} \exp(-x^{3/2}) \sin(\beta x) x dx$$

$$\beta = Ea^2 / (ze) \quad x = r/a$$

$$a = \left[\frac{3}{4\pi n_e} \right]^{1/3}$$

$$H(\beta) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{4}{3} \pi \beta^2, \quad \beta \rightarrow 0 \\ \frac{3}{2} \beta^{-5/2}, \quad \beta \rightarrow \infty \end{array} \right\}$$

