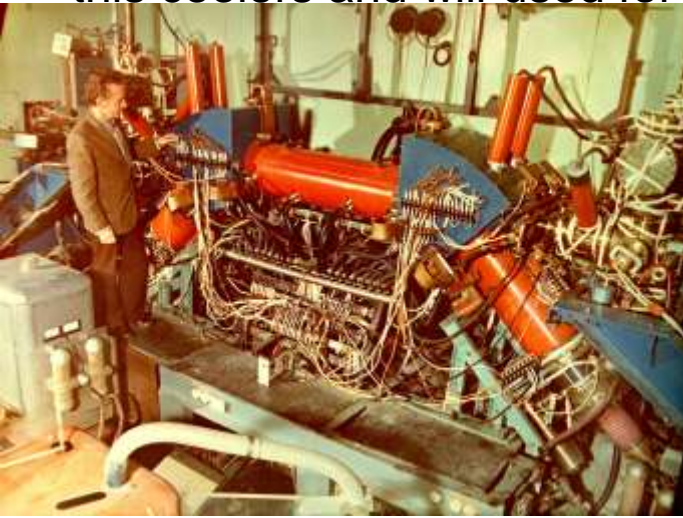


Плазменные колебания ионов пучка в электронном потоке системы электронного охлаждения.

Пархомчук В.В.
ИЯФ СОРАН, Новосибирск

25.12.2015

Coolers photo: The electron cooling experiments was made at this coolers and will used for discussion at this report



NAP-M storage ring pioneer of the storage rings with electron cooling



LEIR cooler



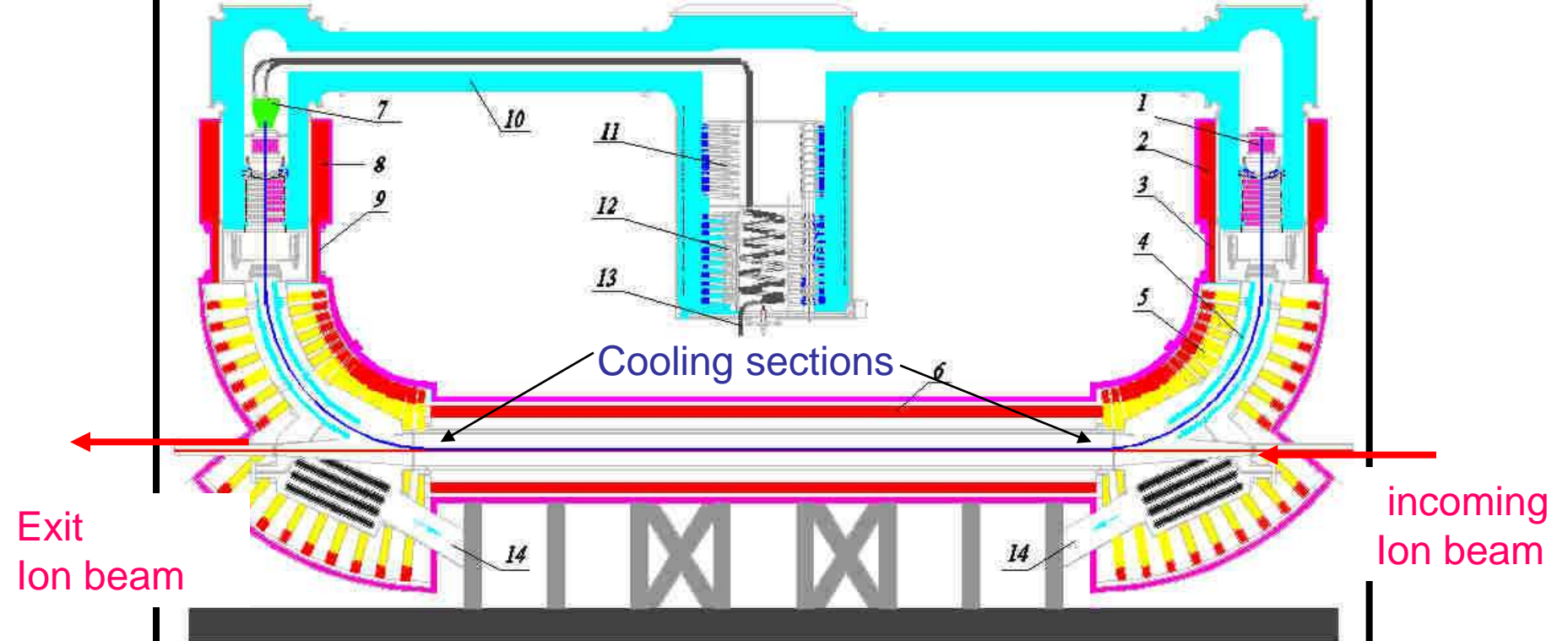


Fig. 1. Layout of the 350 keV cooler.

1-electron gun; 2-main gun solenoid; 3-additional gun solenoid; 4-electrostatic bend; 5-toroid; 6-main solenoid; 7-collector; 8-main collector solenoid; 9-additional collector solenoid; 10-SF₆ feeder; 11-recovery rectifier; 12-350 kV rectifier; 13- cooling system input; 14-vacuum pumps.



Новая система электронного охлаждения в зале ИЯФ
В середине 2016 отправим в Дубну для бустера НИКА

Вычисления силы трения иона о электронный газ

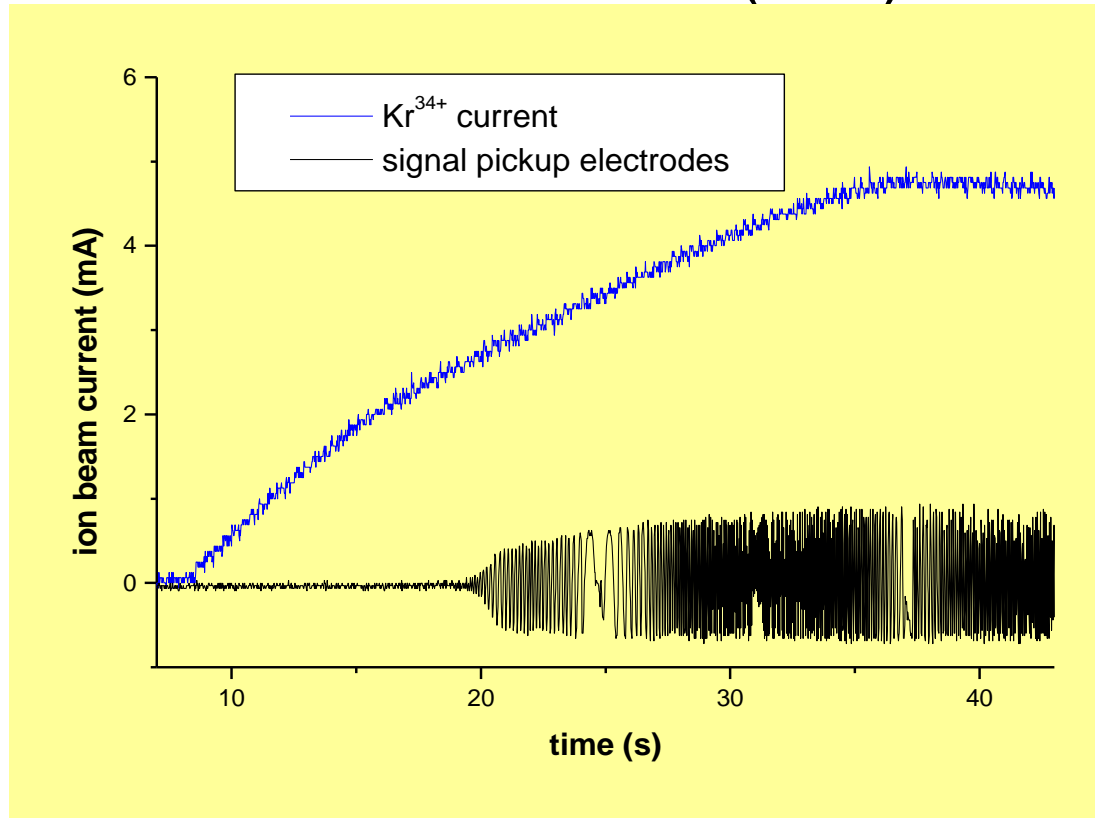
$$\Delta p(\rho) = \frac{2e^2 Z_i}{V_i \rho} \quad \begin{array}{l} \text{Переданный импульс электрону при} \\ \text{Пролёте ионы на прицельном расстоянии } \rho \end{array}$$

$$\Delta E(\rho) = \frac{\Delta p(\rho)^2}{2m_e} = \frac{2r_e^2 Z_i^2}{\beta^2 \rho^2} m_e c^2 \quad \text{Энергия полученная электроном}$$

$$W = n_e V_i 2\pi \rho d\rho \quad \text{Частота столкновений}$$

$$F = \frac{dE}{ds} = -m_e c^2 \frac{4\pi r_e^2 Z_i^2 n_e}{V_i^3} \ln\left(\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}}\right) * \vec{V}_i \quad \begin{array}{l} \text{Сила трения при непрерывном} \\ \text{движении в электронном газе} \end{array}$$

Instability for intensive electron and ion beam (SIS)

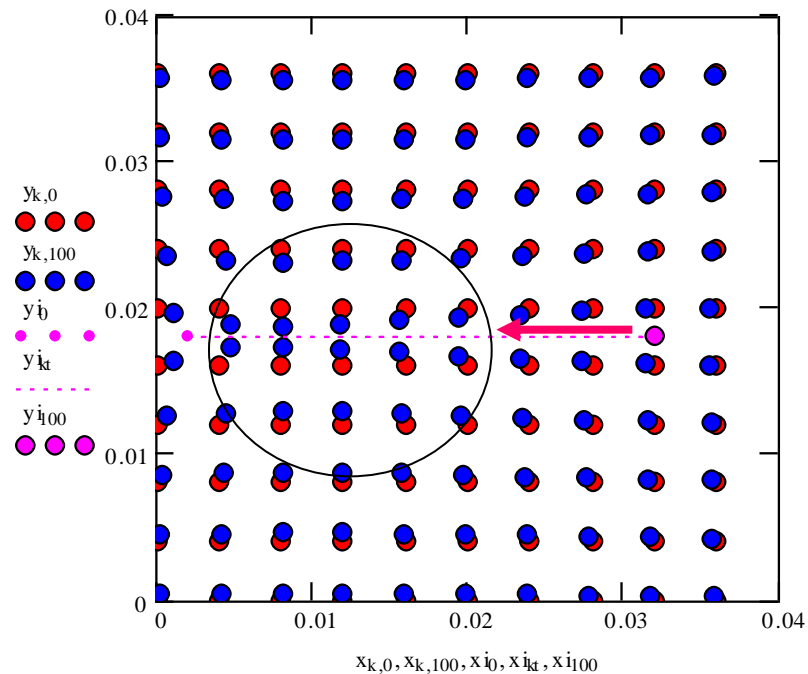
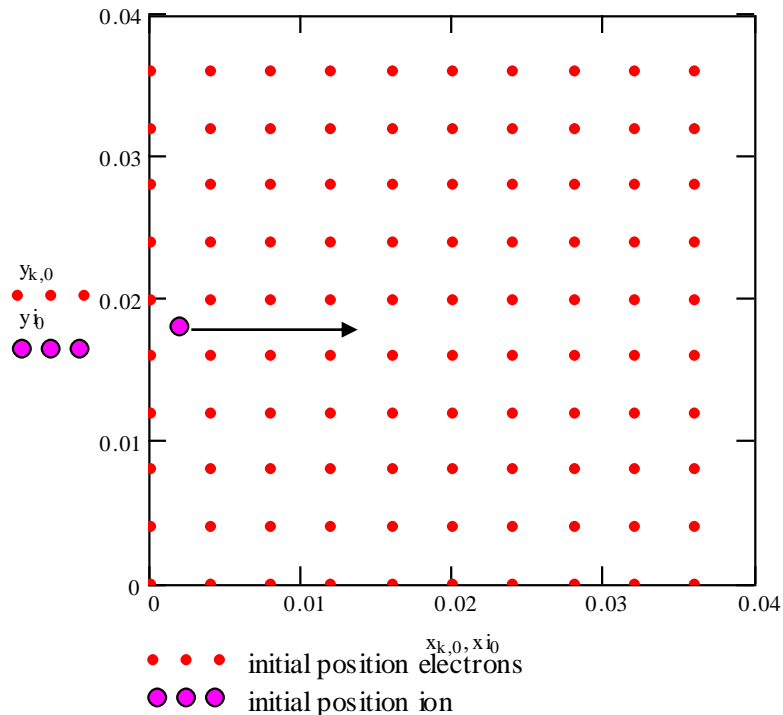


Experiments show that: down electron beam density results increasing ion beam threshold current but by slowing accumulation rate

Basic idea of new cooler to have high electron current but low density at accumulation zone (center).

Электронный нагрев вместо охлаждения из-за развития плазменных колебаний.

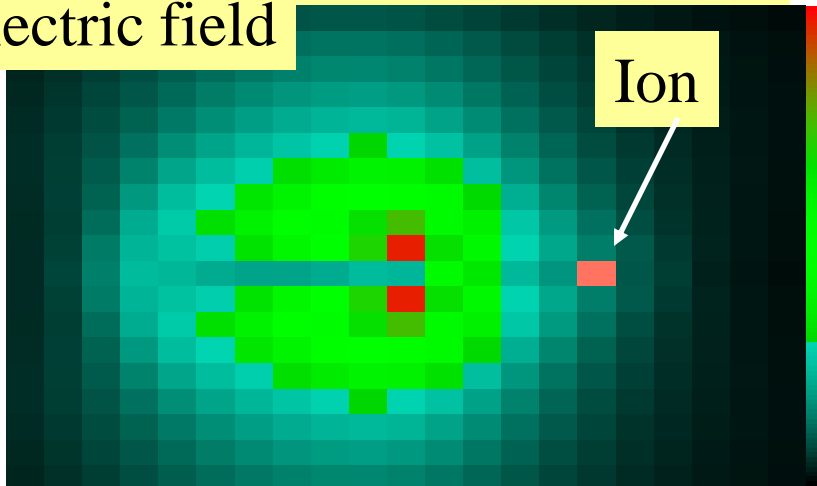
После пролёта иона позади появляется дополнительная плотность электронов «хвост» иона тормозящий ион



«Сбежавшие» к месту где раньше был ион электроны создают зону отрицательного заряда тормозящего ион

Wave at electron beam by moving Bi ion

Electric field

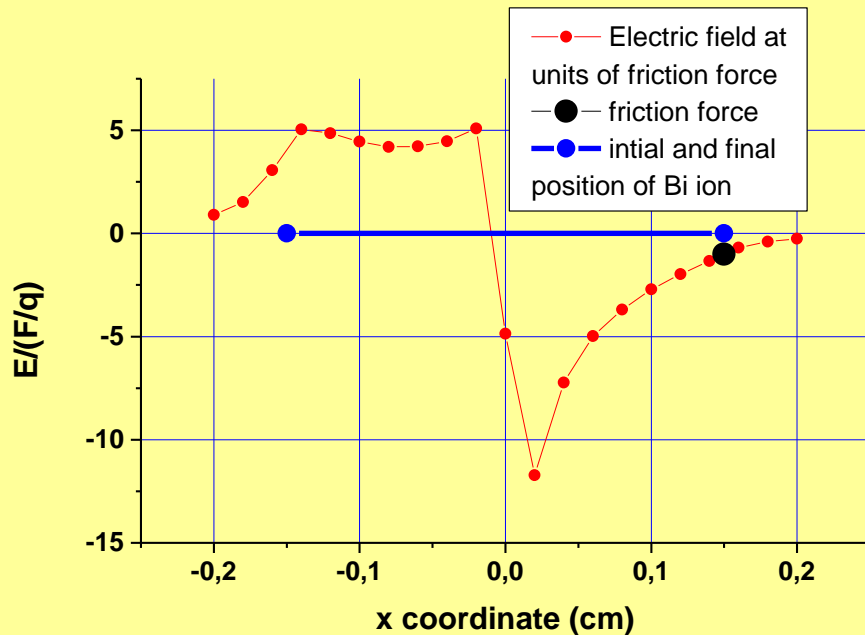


12

0



Red boat (as Bi ion) exit visual wave



Electric field around moving ion Bi at plane (color map) and along axis (down figure)

$$\left(\frac{d^2 x_i}{dt^2} = \frac{Z_i e}{M_i} E_p\right), \times 4\pi e Z_i n_i$$

$$\left(\frac{d^2 x_e}{dt^2} = -\frac{e}{m_e} E_p\right), \times 4\pi e n_e$$

$$E_p = 4\pi e (n_e x_e - Z_i n_i x_i)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} E_p = -\left(\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e} + \frac{4\pi e^2 Z_i^2 n_i}{M_i}\right) E_p = \omega_p^2 E_p$$

Стационарная двух компонентная плазма, плазменные колебания с частотой ω_p

$$M_i = A_i m_p = A_i * 1836 * m_e$$

$$Z_i := 79 \quad A_i := 197 \quad n_e := 10^7 \quad n_i := 10^6 \quad r_e := 2.8 \cdot 10^{-13} \quad r_i := \frac{r_e}{1836} \cdot \frac{Z_i^2}{A_i} \quad c := 3 \cdot 10^{10} \quad q := 4.8 \cdot 10^{-10}$$

$$\omega_e := c \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot r_e \cdot n_e}, \quad \omega_i := c \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot r_i \cdot n_i}, \quad \omega_p := \sqrt{\omega_e^2 + \omega_i^2}, \quad M_i := A_i \cdot 1.67 \cdot 10^{-24}, \quad m_e := 9.1 \cdot 10^{-28}$$

$$x_{i0} := 1, \quad v_{xi0} := 1 \cdot \omega_i$$

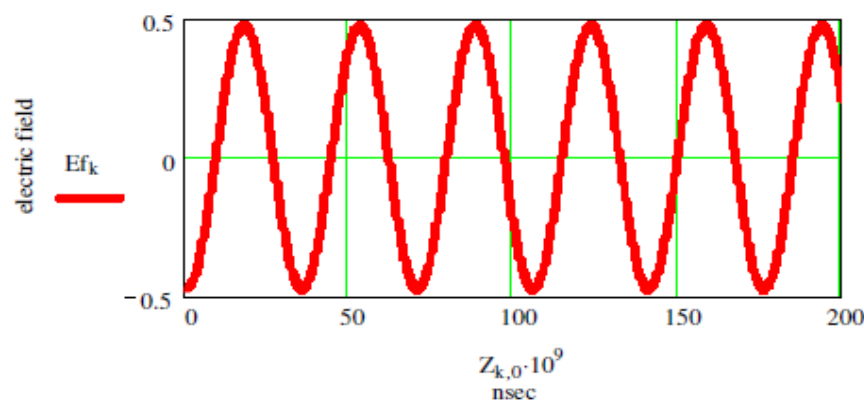
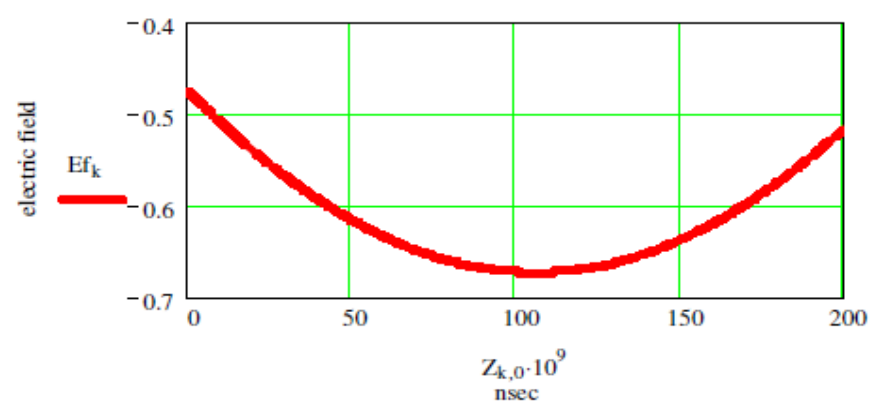
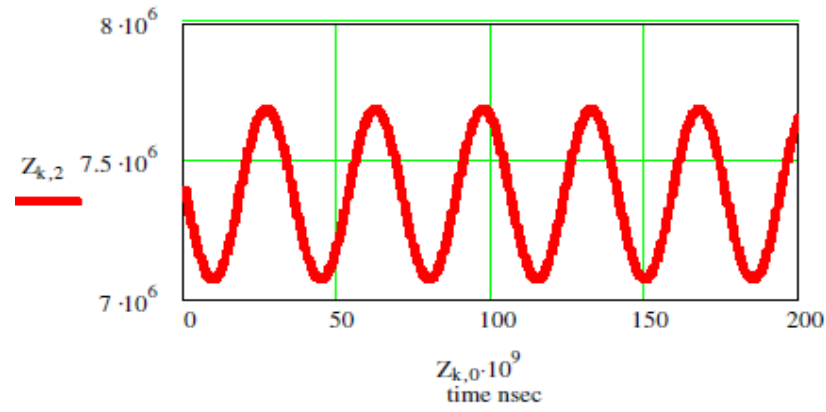
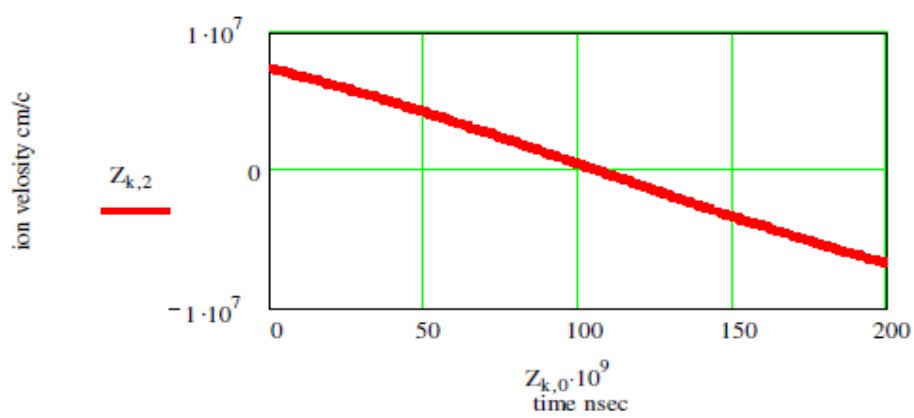
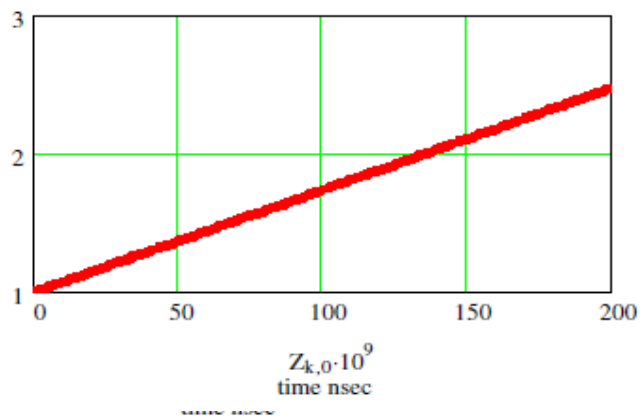
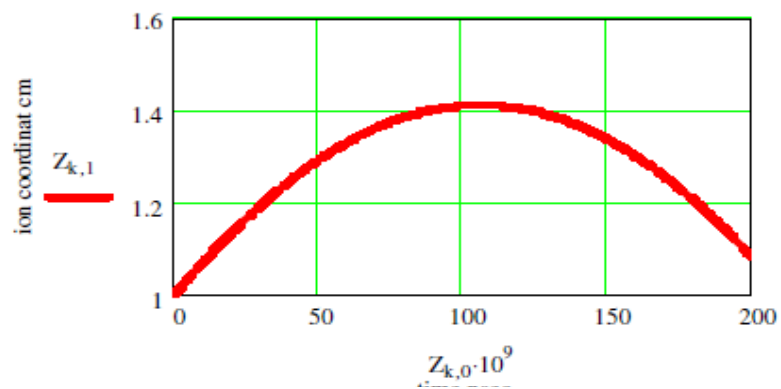
$$\omega_e = 1.78 \times 10^8$$

$$y := \begin{pmatrix} x_{i0} \\ v_{xi0} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \text{ion}(\text{coordinat}) \\ \text{ion}(\text{velocity}) \\ \text{electron}(\text{coordinat}) \\ \text{electron}(\text{velosite}) \end{pmatrix} \blacksquare$$

$$D(t, y) := \begin{bmatrix} y_1 \\ \frac{q^2 \cdot Z_i \cdot 4 \cdot \pi \cdot (n_e \cdot y_2 - n_i \cdot Z_i \cdot y_0)}{M_i} \\ y_3 \\ -\frac{q^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot (n_e \cdot y_2 - n_i \cdot Z_i \cdot y_0)}{m_e} \end{bmatrix}, \begin{pmatrix} \frac{dx_i}{dt} \\ \frac{dv_{xi}}{dt} \\ \frac{dx_e}{dt} \\ \frac{dv_{xe}}{dt} \end{pmatrix} \blacksquare$$

$$N := 1000, \quad \tau := 2 \cdot 10^{-7} \quad k := 0..N \quad Z := \text{rkfixed}(y, 0, \tau, N, D)$$

Решение методом Рунге-Куты плазменного уравнения



Ne=0

Ne= 10^8 1/cm³

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = \frac{Z_i e}{M_i} E_p,$$

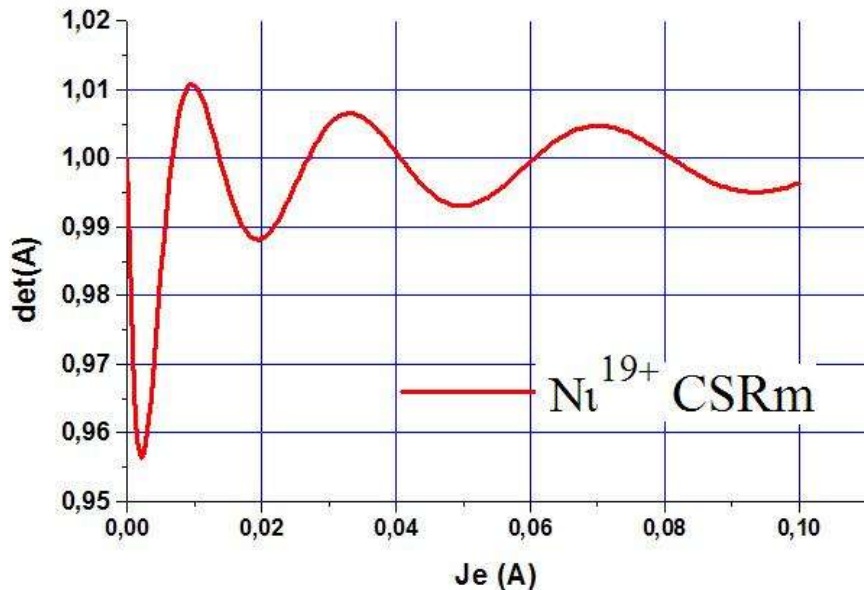
$$\omega_p^2 = -\left(\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e} + \frac{4\pi e^2 Z_i^2 n_i}{M_i}\right) E_p$$

$$\frac{d^2 x_e}{dt^2} = -\frac{e}{m_e} E_p,$$

$$\omega_e^2 = \frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}, \omega_i^2 = \frac{4\pi (eZ_i)^2 n_i}{M_i}$$

$$E_p = 4\pi e (n_e x_e - n_i x_i)$$

$$|A| = 1 - 2 \frac{\omega_e^2 \omega_i^2}{\omega_p^4} (1 - \cos(\omega_p \tau)) + \frac{\omega_e^2 \omega_i^2 \tau}{\omega_p^3} \sin(\omega_p \tau)$$



Заключение

То что при высокой плотности ионов и высокой плотности электронов возникают неустойчивости это неоспоримый эффект. Предложенная модель плазменных колебаний это простейшая модель плоских плазменных колебаний (одномерных). Реальная ситуация довольно сложная (3D) с переходом в псевдо кристаллическое состояние, когда энергия взаимодействия частиц больше температуры.

Американские теоретики развивают исследования упорядоченных структур получаемых в такой плазме, а у нас эти явления постепенно забываются!