

**NPP** Scientific-Coordination Workshop on  
**Non-Ideal Plasma Physics**  
December 16-17, 2020, Moscow, Russia

Welcome to the main page of the NPP-2020 Workshop

**NPP 2020**  
**NON-IDEAL PLASMA PHYSICS**  
Annual Moscow Workshop

December 16-17, 2020, Moscow, Russia

*Современная Аспирантская Школа*  

First Announcement  
Информационное сообщение

Main  
Workshop News  
Workshop Topics  
Deadlines  
Location  
Abstracts  
Registration and  
Abstract in English  
Registers  
Participants  
Тезисы на русском  
Contact Information  
LOC Page



# Моделирование разлета и формирования ионной сверхзвуковой волны в ультрахолодной плазме.

Е.В. Вихров, С.Я. Бронин, Клярфельд А.Б.,  
Б.Б. Зеленер, Б.В. Зеленер,

# План доклада

1. Информация о эксперименте
2. Физическая модель и метод расчета
3. Испарение электронов
4. Формирование ионной ловушки
5. Ионная сверхзвуковая волна
6. Выводы

## Эксперимент.

$$T_{e0}=1-100\text{К}, T_{i0}=(3-4)10^{-3}\text{К},$$

$$n_e = n_i = 10^8 - 10^{10} \text{см}^{-3} .$$

$$n(r) = n_0 \exp(-r^2/\sigma^2)$$

$$\sigma = 0,05 - 0,1 \text{см}.$$

Число зарядов  $10^6 - 10^8$  .

Время разлета  $\tau$  - до нескольких десятков микросекунд.

Основные методы диагностики: а) Регистрация зарядов при помощи детекторов зарядов на основе microchannel; б) Обработка данных по спектрам флуоресценции и абсорбции ионов.

Обзоры

T.C. Killian, T. Pattard, T. Pohl, J.M. Rost *Physics Reports* 449 (2007) 77

M. Lyon and S. L. Rolston, *Rep. Prog. Phys.* 80, (2017) 017001

# Физическая модель и метод расчета

1. Рассматривается система частиц, состоящая из однозарядных ионов и электронов. В начальный момент времени концентрации электронов и ионов равны:  $n_{e0} = n_{i0}$ . Взаимодействие частиц описывается законом Кулона.

2. В нулевой момент времени скорости частиц обоих типов распределены по Максвеллу при заданной температуре.

3. Начальные координаты задаются так, что плотность частиц подчиняется нормальному закону распределения, дисперсия которого зависит от концентрации.

4. Используется схема Верле в скоростной форме. Минимальный шаг по времени при расчете движения электронов  $10^{-12}$  сек. Шаг по времени выбран различным для ионов и электронов (пропорционально корню квадратному из отношения масс).

5. Рассматривается разлет сферического облака плазмы в вакуум. При моделировании отсутствуют граничные условия, а также учитываются взаимодействие всех частиц со всеми. В процессе расчетов обеспечивалось сохранение энергии с точностью до 1%.

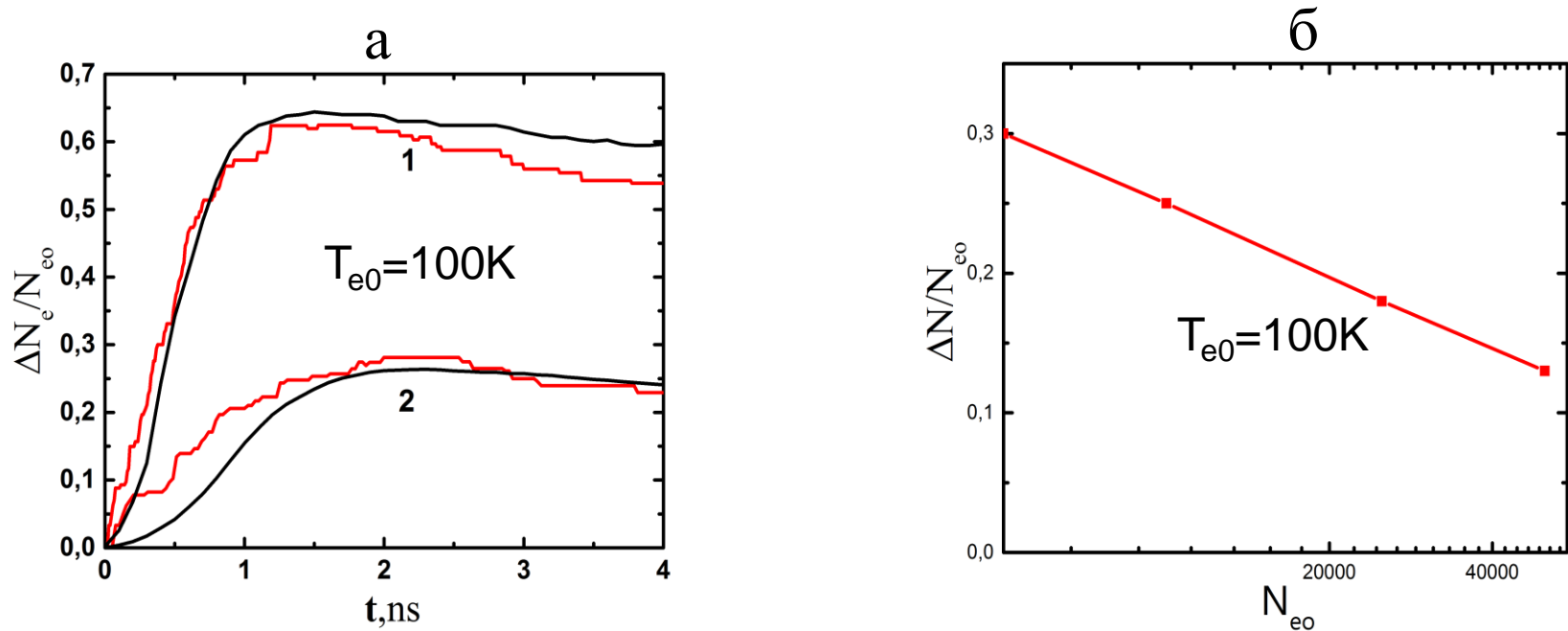
6. Одна из задач, которая была поставлена нами, состояла в том, чтобы на основании расчетов, сделанных для разного числа частиц, построить общие закономерности для процесса разлета облака плазмы в зависимости от числа частиц и выйти на значения основных характеристик разлета для максимальных чисел  $N \sim 10^8$ , соответствующих экспериментальным данным. Оказалось, что для этого достаточен диапазон  $N$  от  $10^3$  до  $10^5$ .

7. При постановке задачи предполагалось сравниться с экспериментальными результатами для  $\text{Sr}^{88}$ . В связи с этим для основной группы расчетов были выбраны следующие параметры плазмы: масса ионов равна массе иона  $\text{Sr}^{88}$ ; начальная температура ионов  $T_{i0} = 3,5 \text{ мК}$ ;  $T_{e0} = 100 \text{ К}$ ; начальная плотность плазмы  $n_{e0} = n_{i0} = 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . Тем не менее часть расчетов была проведена для других значений масс ( $\text{Ca}^{40}$ ,  $\text{Xe}$ ) и других  $T_{e0}$ .

# Результаты расчетов

## 1.Испарение электронов

Вначале за время порядка нескольких наносекунд из плазмы улетает часть электронов. В результате в плазме возникает объемный заряд, который формирует электрическое поле, образующее потенциальную яму для оставшихся электронов.



(а) - зависимость  $\Delta N/N_{e0}$  от времени: 1-  $N_{e0}=500$ ; 2-  $N_{e0}=10000$  (черная линия – расчет ММД, красная – расчет по (1)); (б) - зависимость  $\Delta N/N_{e0}$  от  $N_{e0}$ .

Установившиеся значения  $\Delta N/N_{e0}$  для  $N_{e0} > 5000$  хорошо аппроксимируются функцией

$$\Delta N/N_{e0} \approx 6,7 N_{e0}^{-1/3}$$

# Кинетическое уравнение для испарения электронов

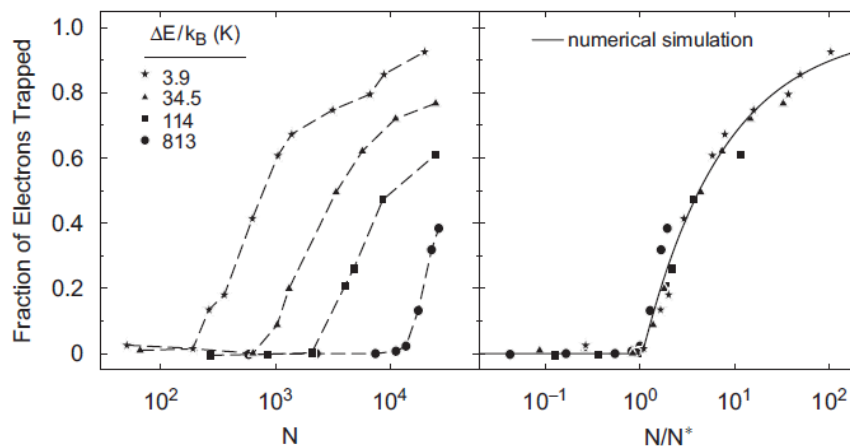
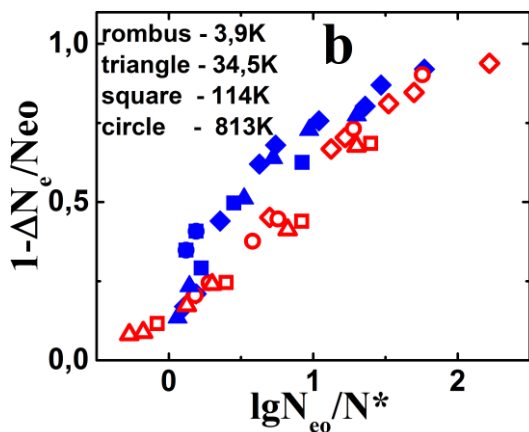
$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + v_r \frac{\partial f_e}{\partial r} - \frac{v_r v_{\perp}}{r} \frac{\partial f_e}{\partial v_{\perp}} + \left( \frac{v_{\perp}^2}{r} - \frac{e}{m} E(r, t) \right) \frac{\partial f_e}{\partial v_r} = I_{col}$$

$I_{col} = \nu (f_e + v_r \partial f_e / \partial v_r)$  ( $\nu = n_i v_{Te} \sigma_{ei}$ ,  $\sigma_{ei}$ -электрон-ионное сечение упругого рассеяния)

Уравнение характеристик соответствующее кинетическому уравнению:

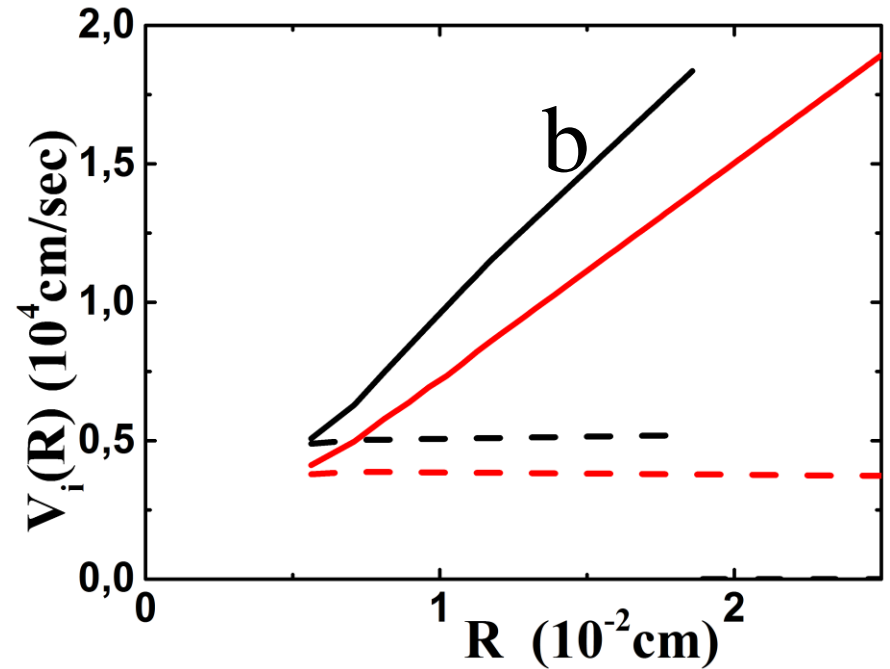
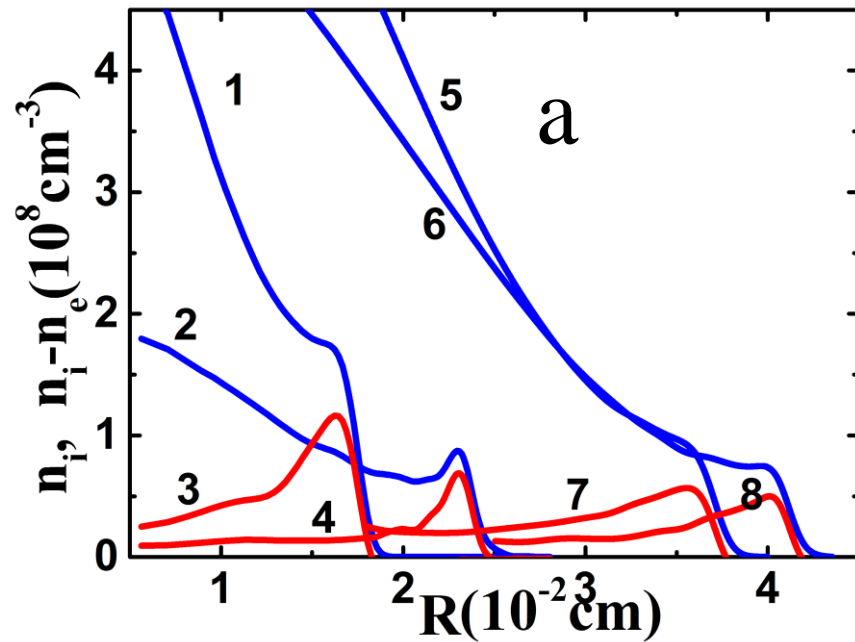
$$\frac{dr}{dt} = v_r \quad \frac{dv_r}{dt} = -\frac{e}{m} E(r, t) - \nu v_r + \frac{v_{\perp}^2}{r} \quad \frac{dv_{\perp}}{dt} = -\frac{v_r v_{\perp}}{r}$$

$$r(0) = r_0 \quad v_r(0) = v_{r0} \quad v_{\perp}(0) = v_{\perp 0}$$



На рисунке представлена зависимость  $1 - \Delta N_e / N_{e0}$  от  $N_{e0} / N^* = N_{e0} / (1,88 \sigma k_b T_e / e^2)$  для плазмы Xe с  $\sigma = 0,02$  см. Закрашенные символы-эксперимент для Te0 от 4К до 800К, не закрашенные - результаты МД и результаты решения уравнения

## 2. Движение ионов в пространственно-неоднородном электрическом поле

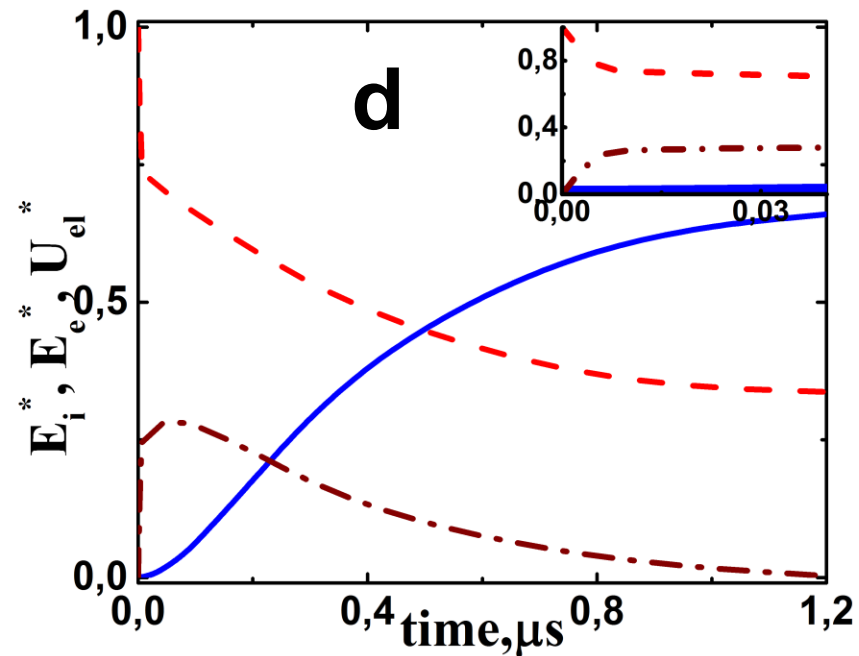
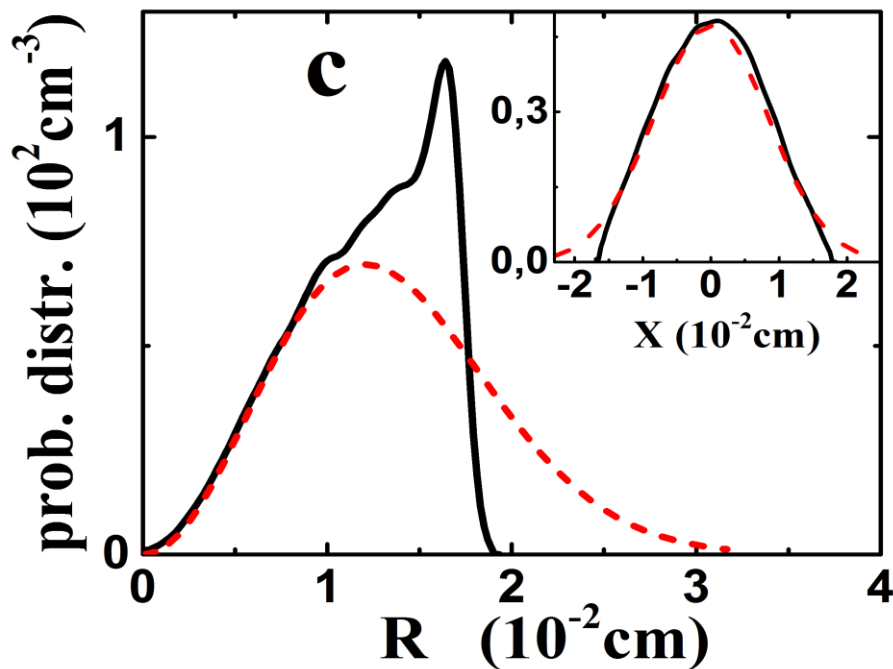


(a) Зависимость ионной концентрации (синие линии)  $n_i$  и разности ионной и электронной концентрации (красные линии)  $n_i - n_e$ : 1, 3 -  $t = 0,8 \mu\text{s}$ ; 2, 4 -  $t = 1,2 \mu\text{s}$ ; ( $T_{e0} = 100 \text{ K}$ ,  $n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_i = 5000$ ); 5, 7 -  $t = 0,8 \mu\text{s}$ ; 6, 8 -  $t = 1,2 \mu\text{s}$ ; ( $T_{e0} = 100 \text{ K}$ ,  $n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_i = 50000$ )

(b) Сплошные линии: ионная радиальная скорость для  $t = 0,8 \mu\text{s}$  и  $t = 1,2 \mu\text{s}$  ( $T_{e0} = 100 \text{ K}$ ,  $n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_i = 5000$ ); пунктирные линии для тех же параметров – скорость звука:

$$V_s = (k_b T_e / M_i)^{1/2}$$





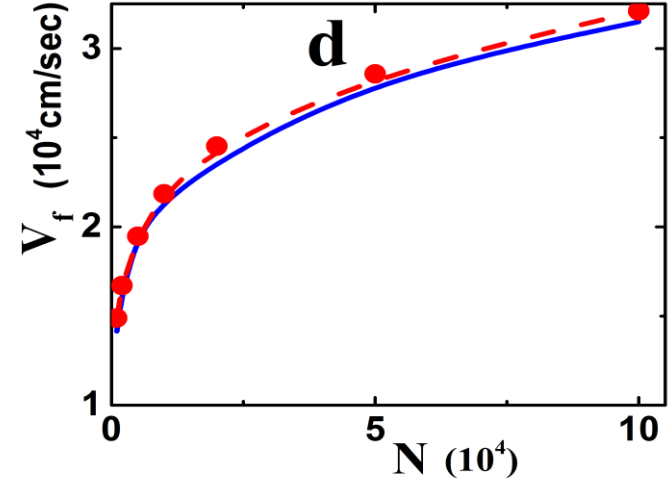
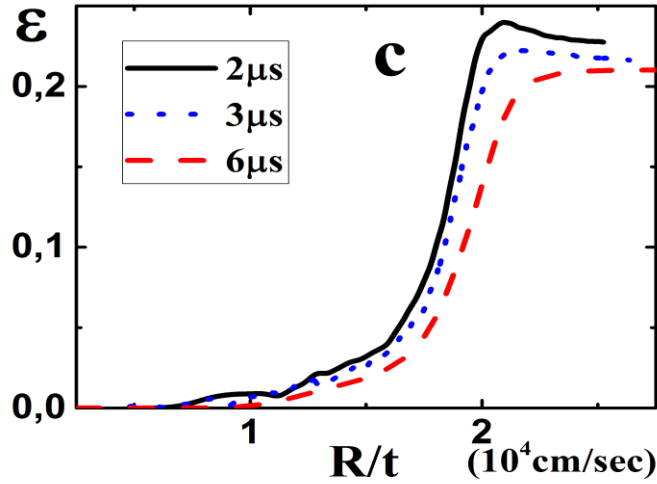
(c) Радиальное и одномерное(вставка) распределение концентраций для  $t = 0.8 \mu\text{s}$ ; черные кривые - МД, красный пунктир – распределение Гаусса.

(d) Кинетические энергии ионов  $E_i$  (синяя кривая) и электронов  $E_e$  (красная кривая) и энергия поля  $U_{el}$  (коричневая кривая), нормированные на начальную энергию плазмы ( $T_{e0} = 100 \text{ K}$ ,  $n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_i = 5000$ ). На вставке - начальный этап.

Время образования фронта зависит от  $N$ . Аппроксимация результатов МД дает зависимость  $t_f = 0,16 N^{1/6}$ . При этом для  $N = 10^8$  -  $t_f = 3,5 \mu\text{s}$ .

Электрическое поле ускоряющее ионы замедляет электроны. Энергия электронов преобразуется в энергию электрического поля.

### 3. Ионная сверхзвуковая волна



(c) Зависимость  $\varepsilon$  от  $R/t$ ; ( $T_{e0} = 100 \text{ K}$ ,  $n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ );

(d) Зависимость скорости фронта от числа частиц;

MD результаты (точки и красный пунктир),  $v = 2,5v_0$  (синяя сплошная).

$$E = \frac{eN^{2/3}}{r^2} \varepsilon \quad M \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_i \frac{\partial v_i}{\partial r} \right) = M \frac{dv_i}{dt} = eE = \frac{e^2 N^{2/3}}{r^2} \varepsilon$$

$$r_0 = (N/n_0)^{1/3}, \quad \rho = r/r_0, \quad \tau = t/t_0, \quad u = v_i/v_0, \quad v_0 = r_0/t_0$$

$$\frac{du}{d\tau} = \lambda \frac{\varepsilon}{\rho^2} \quad \lambda = \frac{e^2 n_0 t_0^2}{MN^{1/3}}$$

$$\text{Полагая } \lambda = 1, \text{ мы получим: } t_0 = \left( \frac{M}{e^2 n_0} \right)^{1/2} N^{1/6} \quad v_0 = \frac{e}{M^{1/2}} (Nn_0)^{1/6}$$

Для  $n_0 = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  и  $M = 87.6 \text{ AMU}$  (стронций),  $v_0 = 1.85 * 10^3 N^{1/6} \text{ cm/s}$ .

# Выводы

Наша работа опубликована в

*Phys. Plasmas* **27**, 120702 (2020) doi: 10.1063/5.0028476

1. ММД выполнено моделирование разлета ультрахолодной двухкомпонентной плазмы, в которой взаимодействие зарядов описывается законом Кулона.

2. Расчеты для числа частиц от  $10^3$  до  $10^5$  позволили обнаружить общие закономерности для разных этапов разлета и построить уравнения для полного описания процесса разлета плазмы.

3. Показано, что причиной разлета плазменного облака является уход части быстрых электронов из объема облака плазмы и образования в результате объемного заряда. В начальный момент энергия плазмы представлена кинетической энергией электронов. Передача их энергии ионам происходит не за счет малоэффективных парных соударений, а в результате дальнедействующих коллективных взаимодействий, энергия которых равна энергии электрического поля. Электроны, находящиеся в ловушке, теряют свою энергию. Эта энергия переходит в энергию поля, а затем в кинетическую энергию ионов.

4. В результате расчетов был обнаружен и описан всплеск концентрации ионов на границе плазменного облака и его распространение в виде ионной сверхзвуковой волны в пространстве.

5. Получено хорошее согласие с экспериментом.

Спасибо  
за внимание

## Электрическое поле

При наличии сферической симметрии напряженность электрического поля  $E(r, t)$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial r^2 E(r, t)}{\partial r} = 4\pi e(n_i - n_e) \quad E(0, t) = 0$$

$$E(r, t) = \frac{e}{r^2} \int_0^r (n_i - n_e) 4\pi r'^2 dr' = \frac{e}{r^2} \int_0^r (n_i - n_e) dV(r') \quad V(r) = \frac{4\pi}{3} r^3$$

Заданы величины  $N_{i,k}$  и  $N_{e,k}$  равные числу ионов и электронов в сферическом слое между радиусами  $r_{k-1}$  и  $r_k$  ( $r_0 = 0$ ,  $k = 1, 2, \dots, M$ ).

$$E_k(t) = \frac{e}{r_k^2} \sum_{k'=1}^k \int_{r_{k'-1}}^{r_{k'}} (n_i - n_e) dV(r') = \frac{e}{r_k^2} \sum_{k'=1}^k (N_{i,k} - N_{e,k})$$

В CGSE ( $e = 4,8 * 10^{10}$   $r_k$  в  $cm$ ). Если  $r_k$  выражены в см, то  $E_k(t)$  в вольт/см равна:

$$E_k(t) = \frac{1,44 * 10^{-7}}{r_k^2} \sum_{k'=1}^k (N_{i,k} - N_{e,k})$$

Напряженность внутри и вне однородно заряженного шара радиуса  $R$ :

$$E = \frac{q}{R^3} r \quad r < R$$

$$E = \frac{q}{r^2} \quad r > R$$