

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

11-84-505

Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков, Б.Г.Шинов

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ  
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ ПУЧКОВ

Направлено на Международную конференцию  
по численным методам и приложениям, ИРБ,  
сентябрь 1984 г.

1984

В связи с бурным развитием в последние годы коллективных методов ускорения, сильноточных электронных ускорителей, источников многозарядных ионов появилась необходимость в моделировании процесса накопления ионов и динамики электронно-ионных пучков и тонких колец. Большими возможностями для решения этих задач обладает метод крупных частиц<sup>/1,2/</sup>, который представляет собой численное решение кинетического уравнения по характеристикам. Этот метод уже использовался ранее для изучения процессов в электронных пучках и кольцах<sup>/3-6/</sup>. Однако в этих работах действие собственных полей на движение частиц определялось путем вычисления взаимодействия между каждой парой крупных частиц. Такой перебор всех частиц требовал большого счетного времени на ЭВМ и, как следствие, ограничивал несколькими сотнями общее число используемых в моделировании крупных частиц. В этих расчетах нельзя было детально исследовать многие эффекты, изучать функции распределения частиц, рассматривать одновременно несколько различных типов заряженных частиц.

Для моделирования процессов в аксиально-симметричных многокомпонентных пучках заряженных частиц с учетом собственных квазистационарных электромагнитных полей была создана программа, в которой в каждый момент времени на сетке определяются плотности частиц  $\rho$ . Потенциалы собственных полей  $U$  вычисляются решением уравнения Пуассона в цилиндрических координатах

$$\Delta U = -4\pi\rho \quad /1/$$

с граничными условиями, например,

$$U|_{r=R} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial r}|_{r=0} = 0,$$

где  $R$  - граница рассматриваемой в задаче области. Уравнение Пуассона решается при помощи модификации программы DELSQZR<sup>/7/</sup>, использующей быстрое преобразование Фурье. Между узлами сетки  $U$  находится линейной интерполяцией. Движение частиц в поперечном сечении пучка описывается уравнениями движения

$$\frac{dr}{dt} = v_r, \quad \frac{dv_r}{dt} = \frac{M_\theta^2}{m^2 r^3} + \frac{ze}{m} (F + F_{ext}), \quad /2/$$

где  $M_\theta = mv_\theta r$  - момент количества движения, являющийся интегралом движения,  $v_r$  и  $v_\theta$  - радиальная и угловая скорости движения частицы,  $ze$  и  $m$  - заряд и масса частиц соответственно,  $F$  и  $F_{ext}$  - силы, действующие со стороны собственных  $U$  и внешних полей  $U_{ext}$ .

Для определения траектории движения частиц в программе используется интеграл системы /2/ - закон сохранения энергии  $E$

$$\frac{dr}{dt} = \pm \sqrt{\frac{2}{m} \left( E - \frac{M^2 \theta}{2m\Gamma^2} - ze(U + U_{ext}) \right)} \quad /3/$$

Это уравнение лучше интегрируется численными методами в окрестностях нулевого радиуса, чем второе уравнение системы /2/. Кроме того, использование закона сохранения энергии вместо уравнений движения позволяет вдвое сократить число решаемых уравнений. Уравнение /3/ интегрируется методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

Для начальной расстановки крупных частиц в фазовом пространстве координат и скоростей в соответствии с заданной функцией распределения  $f$  используется следующий алгоритм. Для факторизованной начальной функции распределения

$$f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k) = f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_i(x_i) \dots f_k(x_k).$$

Тогда начальные значения, например, координаты  $x_{in}$  крупной частицы с номером  $n$  /  $n = 1, 2, \dots, N$  / ,  $x_{in} = F_i^{-1}(R(n))$ ,  $x_i \in [a_i, b_i]$ , где  $R(n)$  - генератор случайных чисел в интервале  $[0, 1]$  - стандартная функция, имеющаяся, как правило, в математическом обеспечении всех крупных ЭВМ.

$F_i^{-1}$  есть обратная функция от  $F_i(x_{in}) = \frac{1}{N} \int_{a_i}^{b_i} f_i(y) g_i(y) dy$ . Здесь  $g_i$  - весовая функция, определяемая метрикой пространства. Например, для распределения по радиусам в полярных координатах  $g(r) = r$ . В программе предусмотрена возможность записи всей промежуточной информации на магнитный диск для продолжения расчетов в следующем сеансе. Кроме численного отображения результатов расчета могут быть изображены фазовые плотности частиц каждого сорта на стандартной странице выдачи. Характерное время сдвига на шаг по времени 1000 частиц на ЭВМ типа СДС-6500 - около 1 с; вычисление полей на сетке  $16 \times 64$  требует 0,7 с.

Созданная программа была использована для моделирования различных процессов в электронно-ионных пучках /8-9/. Некоторые результаты приведены на рис.1-4. В расчетах использовалось по 1000 крупных частиц для каждой зарядности. На рис.1, 2 и 3 изображена динамика функции распределения электронов и ионов и потенциала электрического поля в зависимости от фактора зарядовой нейтрализации  $f$  электронного заряда ионами. В начальный момент времени электроны имели распределение Максвелла в поперечном сечении пучка со среднеквадратичным радиусом  $a_0$ . Точность вычисления полей для известных случаев была выше 1%. Первые моменты функции распределения частиц, расставленных по описанному выше алгоритму, отличались от известных значений при-

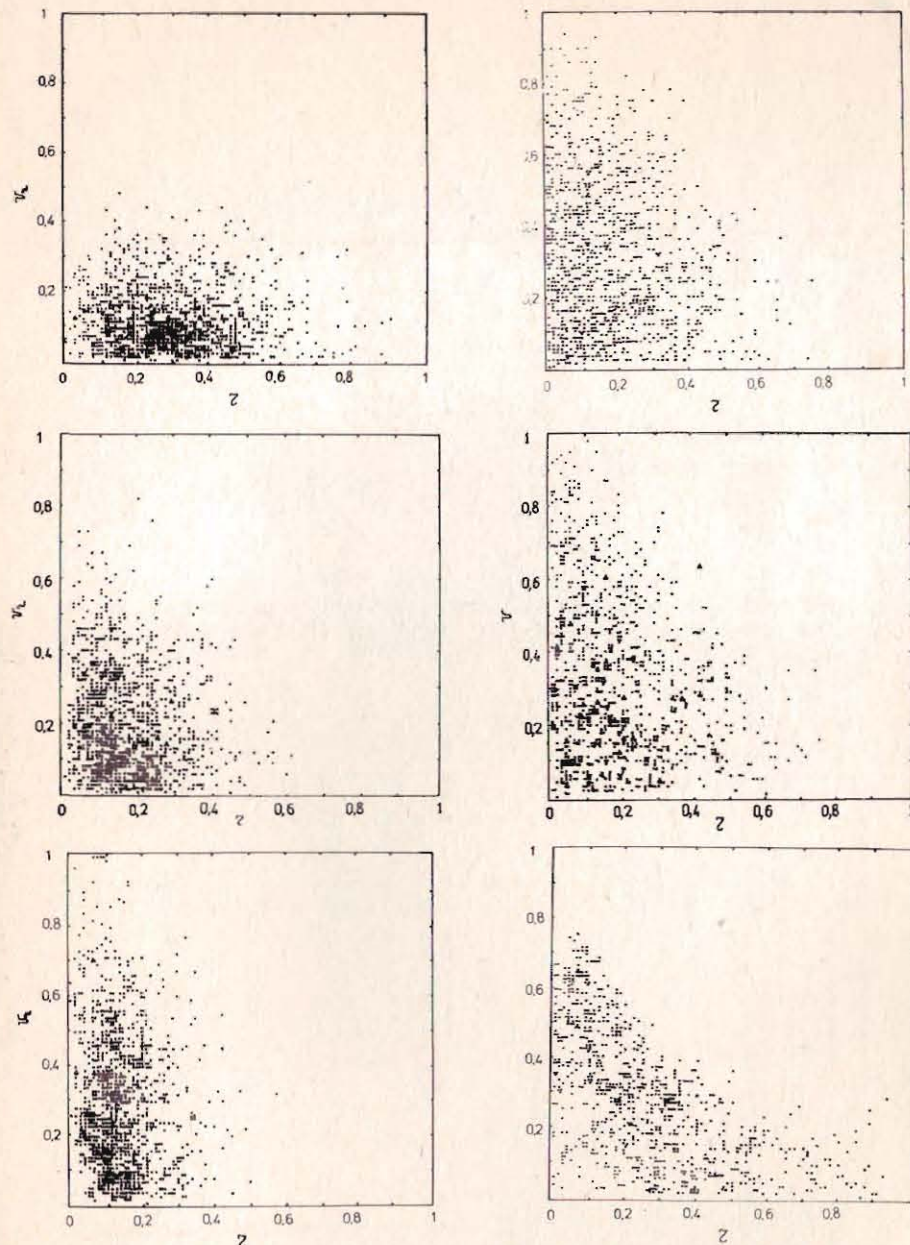


Рис.1. Функция распределения электронов в фазовом пространстве координат и скоростей при увеличении фактора нейтрализации: а/  $f = 0$ ; б/  $f = 0,3$ ; в/  $f = 0,9$ .

Рис.2. Функция распределения ионов в фазовом пространстве координат и скоростей при увеличении фактора нейтрализации: а/  $f = 0$ ; б/  $f = 0,3$ ; в/  $f = 0,9$ .

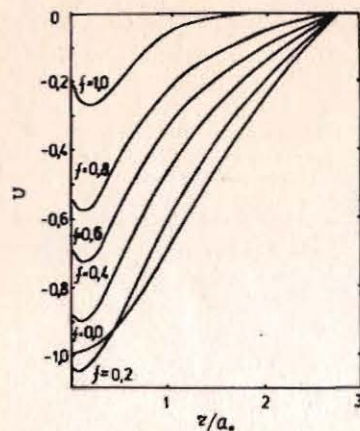


Рис.3. Зависимость потенциала электрического поля от радиуса в электронно-ионном пучке для различных факторов нейтрализации электронного заряда.

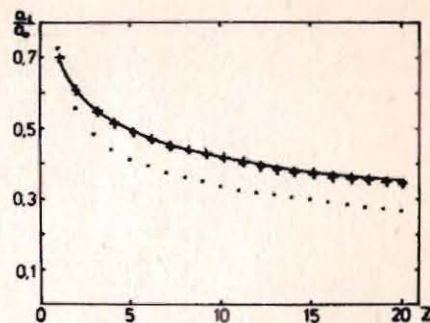


Рис.4. Среднеквадратичные размеры ионных компонент в зависимости от зарядности ионов.

мерно на 0,5%. На рис.4 изображено изменение среднеквадратичного размера ионов в зависимости от их заряда  $z$  для различных распределений плотности электронов в сечении пучка. Кресты относятся к электронному пучку с постоянной плотностью. Сплошная кривая соответствует точному решению задачи [8,10]. Этот вариант расчета являлся одним из тестов, проверяющих работу программы. Точками показано изменение среднеквадратичных размеров ионов в электронном пучке с гауссовской плотностью в сечении. В расчетах, приведенных на рис.4, собственные поля ионов не учитывались.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вычислительные методы в физике плазмы /под ред. Олдера Б., Фернбаха С., Ротенберга М./, "Мир", М., 1974.
2. Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. Атомиздат, М., 1979.
3. Перельштейн Э.А., Шевцов В.Ф., Щинов Б.Г. ОИЯИ, Р9-10060, Дубна, 1976.
4. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-11949, Дубна, 1978.
5. Казаринов Н.Ю. и др. ОИЯИ, Р9-12720, Дубна, 1979.
6. Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-80-368, Дубна, 1980.
7. Christiansen J.P., Hockney R.W. Comp. Phys. Comm., 1971, 2, p. 139.
8. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, Р9-82-526, Дубна, 1982.
9. Перельштейн Э.А. и др. ОИЯИ, Р9-82-532, Дубна, 1982. Журнал технической физики, 1984, т. 54, №2, с. 270.
10. Laslett L.J. ERAN-218, LBL, Berkeley, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел  
12 июля 1984 года.

Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д., Щинов Б.Г. 11-84-505  
Численное моделирование динамики электронно-ионных пучков

Описана программа для моделирования методом крупных частиц на ЭВМ процессов в аксиально-симметричных многокомпонентных пучках заряженных частиц. Собственные поля определяются на сетке интегрированием уравнения Пуассона с помощью быстрого преобразования Фурье. Приведены примеры использования программы для расчета процессов накопления ионов в электронных пучках.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

#### Перевод авторов

Perelstein E.A., Shirkov G.D., Shchinov B.G. 11-84-505  
Numerical Simulation of Electron-Ion Beams Dynamic

The program is described for finite-size particles computer simulation of the processes in axial-symmetric many-component beams of charged particles. Using the fast Fourier transform the charged particles own fields are defined with the mesh integration Poisson's equations. Calculation of the ion accumulation processes in the electron beams are cited as the examples of the program using.

The investigation has been performed at the Department of New Acceleration Methods, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984