

P9-2002-57

В. В. Калиниченко, Г. А. Карамышева

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА
В ЦИКЛОТРОНЕ-ИНЖЕКТОРЕ
В ФАЗОТРОН **ОИЯИ**

Введение

В работе представлены результаты расчётов динамики частиц сильноточного циклотрона на конечную энергию 5 МэВ, предназначенного для инъекции в фазотрон ОИЯИ. В циклотроне предполагается ускорять пучки с током 10–15 мА, поэтому расчёты эффектов пространственного заряда представляют собой задачу первостепенной важности для этого ускорителя. Для учёта влияния пространственного заряда на динамику частиц в работе используется метод прямого учёта кулоновского взаимодействия, основным преимуществом которого является простота и, как следствие, достоверность.

Методы учёта пространственного заряда

При расчётах эффектов пространственного заряда применяются различные модели учёта взаимодействия частиц.

Исторически первой и наиболее понятной является модель, учитывающая кулоновское взаимодействие каждой частицы с каждой, так называемый “метод частица–частица”. Основным недостатком модели является тот факт, что уже при расчётах тысяч частиц требуется слишком много времени и, как следствие, невозможность использования большого числа частиц, что необходимо для изучения формирования гало пучка. Основным достоинством метода является простота используемой модели, что уменьшает вероятность ошибки исследователя.

Метод эквивалентного распределения аппроксимирует банч частиц эллипсоидом с размерами, вычисляемыми по результатам трассировки, и исходя из заданного распределения заряда (нормального в NAJO, равномерного в TRACE3D) каждая частица получает импульсы и наборы энергий, соответствующие положению частицы в пучке. Метод эквивалентного распределения позволяет оценить увеличение размеров сильноточного пучка.

Particle-in-cell метод распределяет заряд частиц по сетке, решает уравнение Пуассона и вычисляет силы по сеточному потенциалу. В результате вычисления происходят гораздо быстрее, таким образом, главным достоинством программ, использующих particle-in-cell принцип, является возможность работы с большим числом частиц. Следует заметить, что для расчётов данного ускорителя крайне важно использовать трёхмерную модель программы, так как только в этом случае учитываются эффекты поперечной компоненты пространственного заряда, которые превалируют над эффектами продольного заряда (из-за крайне малого числа оборотов в циклотроне) и приводят к существенному расширению пучка во всех направлениях.

Параметры циклотрона

В данной работе проводилось моделирование динамики частиц в сильноточном циклотроне с учётом пространственного заряда по методу прямого кулоновского взаимодействия.

Основные параметры циклотрона, принимаемые в расчётах, представлены в таблице.

Таблица

Тип циклотрона		секторный
Количество секторов		4
Ускоряемая частица		H ⁻ -ион
Начальная энергия	(МэВ)	0,5
Конечная энергия	(МэВ)	5
Среднее магнитное поле	(кГс)	4,3
Радиус инжекции	(см)	27,4
Число Δ-электродов		2
Резонансная частота		54.372
Кратность ускорения		8
ВЧ-напряжение	(кВ)	160÷240

Для расчётов была написана программа KASCADS в математическом пакете MATLAB, интегрирующая систему дифференциальных уравнений движения заряженных частиц в электромагнитном поле в цилиндрической системе координат с независимой переменной t(время), вытекающие из[1]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = \frac{e}{m} \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \left\{ \vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{V} \vec{H}] - \frac{1}{c^2} \vec{V} (\vec{V} \vec{E}) \right\},$$

\vec{V} - скорость частицы, e - заряд частицы, m - масса, \vec{E} - напряжённость электрического поля, \vec{H} - напряжённость магнитного поля. Электрическое поле аппроксимировалось аналитическими формулами[2].

Моделирование динамики частиц проводилось в магнитном поле, характеристики которого даны в работе[3], однако при расчётах пришлось несколько уменьшить среднее поле, и только добившись большего изохронизма, мы получили разделение орбит при токах до 30 мА. Средства графической визуализации MATLAB позволяют с высокой точностью контролировать изохронизм движения частиц. На рис.1 показана продольная составляющая напряжённости ускоряющего электрического поля на первом обороте (вверху) и ВЧ-напряжение (внизу). Видно, что частицы проходят ускорительный промежуток в момент максимума напряжения.

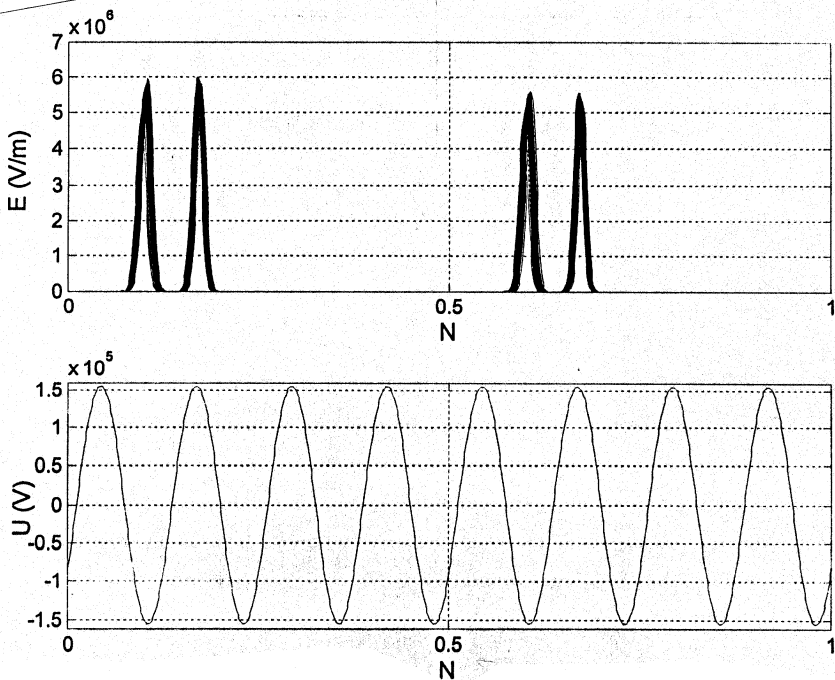


Рис.1. Продольная составляющая напряжённости ускоряющего электрического поля на первом обороте (вверху) и ВЧ-напряжение (внизу)

После выбора оптимального режима ускорения и уточнения изохронизма поля были проведены тестовые расчёты для различных начальных распределений частиц; использовались два распределения: нормальное и равномерное, практически никакого различия в динамике пучка обнаружено не было. В дальнейшем в расчётах применялось нормальное распределение частиц. Из-за ограниченности по времени в расчётах рассматривалось движение 1000 частиц. Стартовые положения пучка на фазовых плоскостях радиального и аксиального движения представлены на рис.2а,б соответственно.

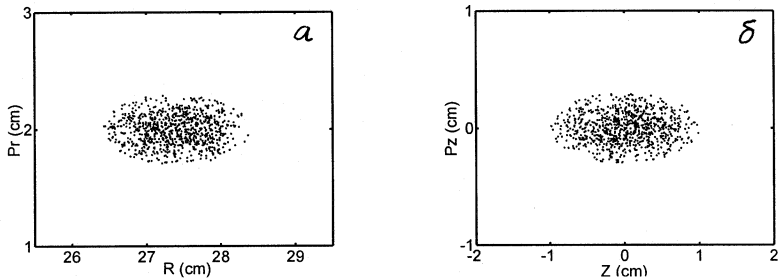
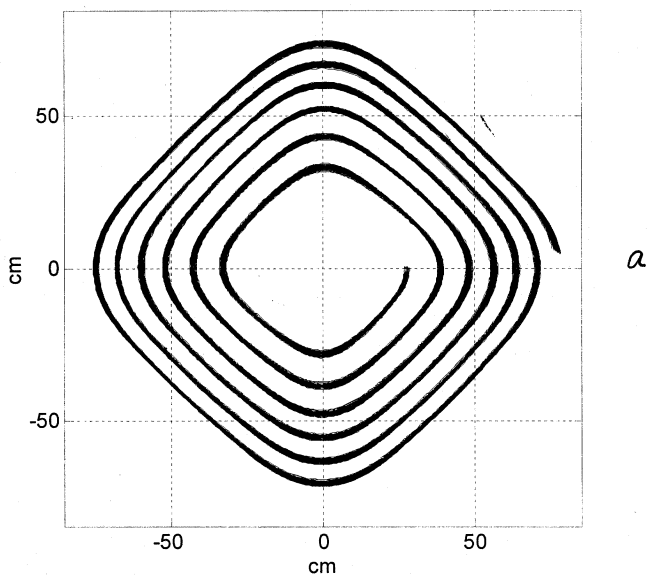


Рис.2. Стартовые положения пучка на фазовых плоскостях

Результаты моделирования динамики частиц

Набор энергии происходил в течение 6 оборотов. На рисунке 3а,б,в представлены траектории частиц при токах $I=0\text{мА}$, 10мА , 30мА соответственно. Заметим, что для получения хорошего разделения орбит в зоне вывода особенно важно обеспечить сохранение качества пучка в процессе ускорения, что обеспечивается в первую очередь точным изохронизмом ускорения.



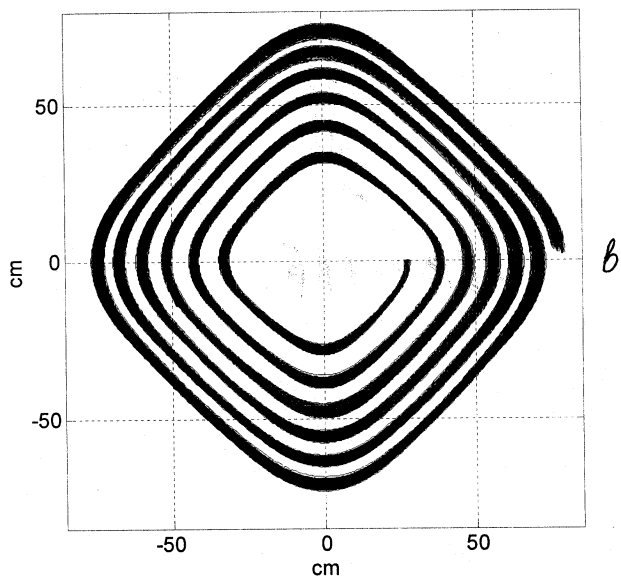
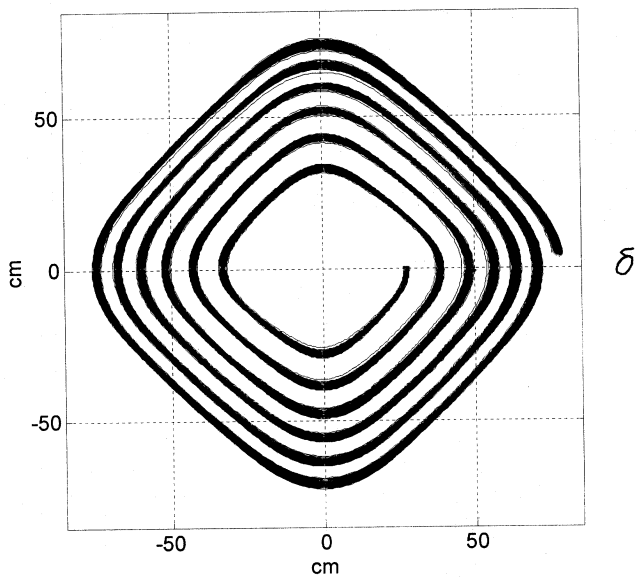


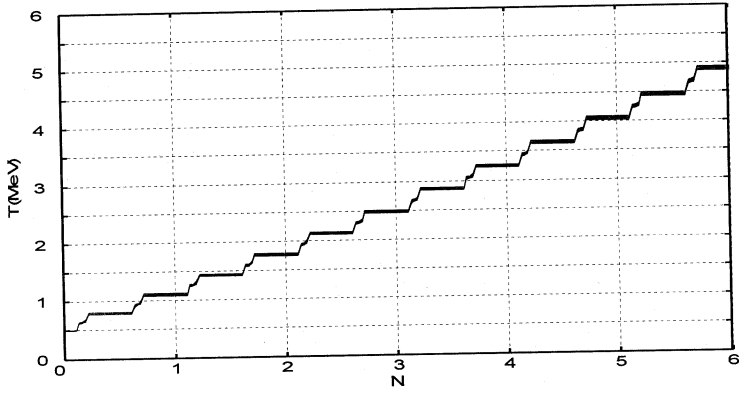
Рис.3. Орбиты частиц в ускорителе ($I=0\text{mA}$, $I=10\text{mA}$, $I=30\text{mA}$)

Из рисунка 3а видно, что в данном поле полностью сохраняется качество пучка в процессе ускорения, а разделение орбит присутствует во всех трёх вариантах, хоть и существенно уменьшается с увеличением тока пучка: для $I=30\text{мА}$ зона, свободная от частиц, равна $\sim 2\text{см}$ в секторах и $\sim 3\text{см}$ в долинах. Шаг орбит в зоне вывода (радиальное расстояние между двумя последними орбитами) составляет $\sim 6\text{см}$.

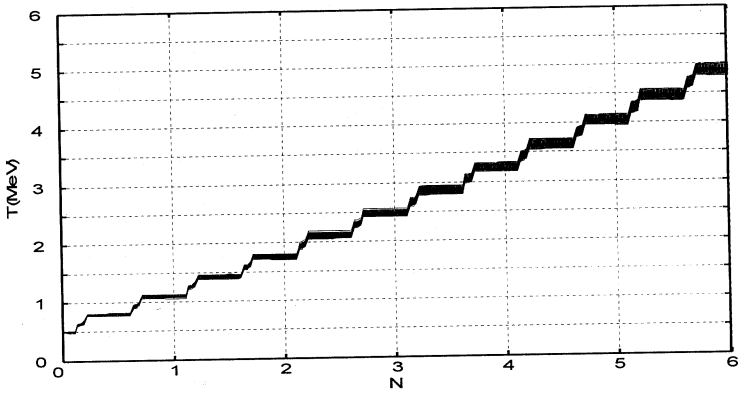
Расширение пучка в радиальном направлении, наблюдаемое при увеличении интенсивности (см. рис. 3б,в), происходит за счёт увеличивающегося энергетического разброса, вызванного продольной компонентой пространственного заряда, и за счёт эффектов поперечного пространственного заряда (его радиальной компоненты). Так как частоты аксиальных и радиальных колебаний примерно равны, эффекты поперечного пространственного заряда приводят примерно к одинаковому расширению пучка в радиальном и аксиальном направлениях. Радиальное увеличение размеров пучка, в свою очередь, приводит к увеличению энергетического разброса.

На рисунке 4а,б,в показаны зависимости энергии частиц от номера оборота для токов $I=0\text{мА}$, 10мА , 30мА соответственно. Видно, что энергетический разброс при токе 30мА заметно увеличился, но не превышает 0.3МэВ .

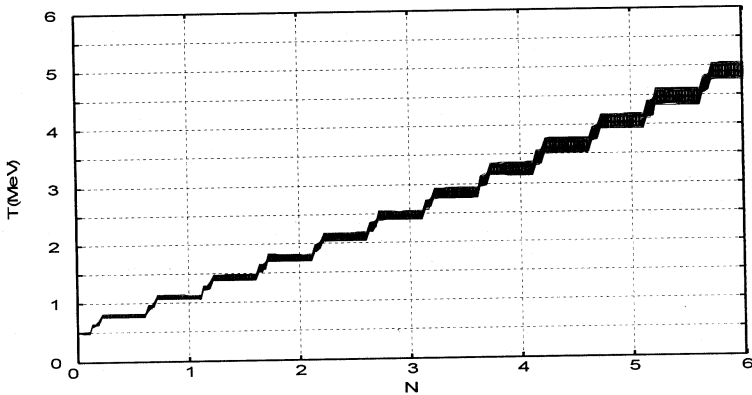
На рисунке 5а,б,в показано аксиальное движение частиц, также для трёх значений интенсивности пучка. Наблюдается увеличение размера пучка при увеличении интенсивности. Видно, что при данной вариации магнитного поля, при токе 10мА и 30мА аксиальный размер пучка меньше 3см .



a



b



b

Рис.4. Зависимость энергии частиц от номера оборота (для трёх значений интенсивности: $I=0\text{mA}$, $I=10\text{mA}$, $I=30\text{mA}$)

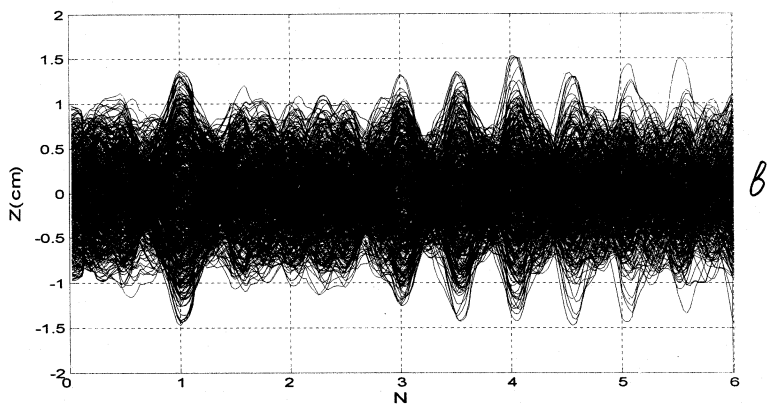
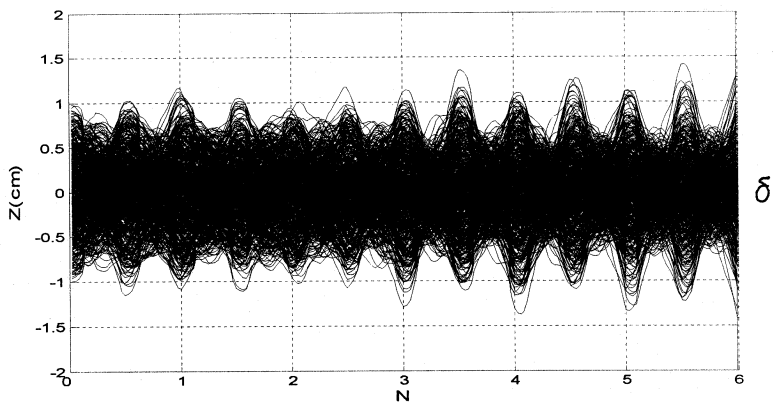
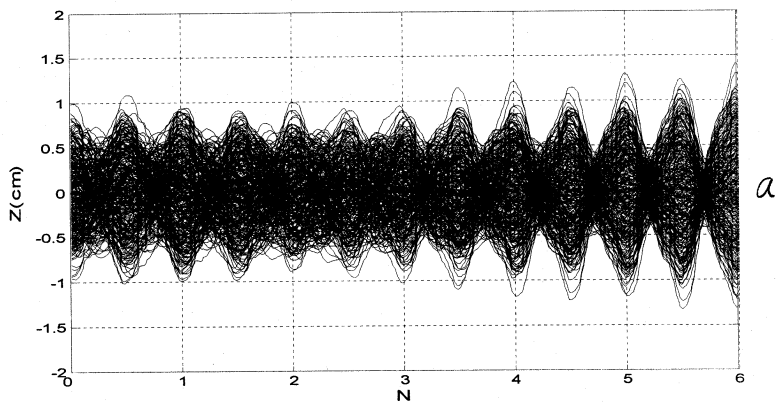


Рис.5. Аксиальное движение частиц ($I=0$ mA, $I=10$ mA, $I=30$ mA)

Заключение

Расчёты показали, что возможно получение разделённых орбит в циклотроне на энергию 5 МэВ при токах до 30 мА (ускоряющее напряжение от 160 кВ в центре до 240 кВ в зоне вывода). Апертура ускорителя при данной вариации поля должна быть не меньше 3 см.

Таким образом, предельным током для циклотрона с вышеперечисленными параметрами, позволяющим получить разделённые орбиты в зоне вывода, является ток в 30 мА. Рабочим током можно считать ток ~10 мА, так как при данном токе эффекты пространственного заряда не столь существенны. Данные выводы подтверждают результаты, полученные ранее по методу эквивалентного распределения [4].

Авторы выражают глубокую признательность Онищенко Л.М. и Самсонову Е.В. за полезные обсуждения и рекомендации.

Литература

- 1 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Теория поля, Т.2, Москва, «Наука», 1988, с.74.
- 2 N.Hazewindus N. et al., "The magnetic Analogue Method as Used in the Study of a Cyclotron Central region", NIM, 118(1974), p.125.
- 3 Onischenko L.M., Samsonov E.V., "Code Phascol for computation of space charge effects in the cyclotrons and synchrocyclotrons", Problems of Atomic Science and Technology, Kharkov, 2001, N.5, p163.
- 4 Карамышева Г.А. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Дубна, 2001г.

Получено 28 марта 2002 г.

Калиниченко В. В., Карамышева Г. А.
Моделирование эффектов пространственного заряда
в циклотроне-инжекторе в фазотрон ОИЯИ

P9-2002-57

Проводилось моделирование динамики частиц в сильноточном циклотроне с учетом пространственного заряда по методу прямого кулоновского взаимодействия. Для этих целей была написана программа KASKADS в интегрированном математическом пакете MATLAB.

Расчеты показали, что возможно получение разделенных орбит в циклотроне на энергию 5 МэВ при токах до 30 мА (ускоряющее напряжение от 160 кВ в центре до 240 кВ в зоне вывода). Апертура ускорителя при данной вариации поля должна быть не меньше 3 см.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Kalinichenko V. V., Karamysheva G. A.
Computer Modeling of Beam Space Charge Effects
in Cyclotron Injector into JINR Phasotron

P9-2002-57

Charge particle beam dynamics including space charge by direct Coulomb particle-to-particle method was simulated. For this purpose in MATLAB a new code KASKADS was developed.

Numerical simulations of the particle motion confirm that it is possible to achieve separated orbits in a 5 MeV, 30 mA separated sector cyclotron (accelerating voltage varies depending on radius from 150 kV in the centre to 240 kV in the extraction region). The aperture of the accelerator must be greater than 3 cm.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Е. В. Сабатовой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 03.06.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,67. Тираж 280 экз. Заказ № 53340.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.