

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-272

P9-96-272

О.Н.Борисов

ВЫВОД ПУЧКА ИОНОВ
ИЗ ЦИКЛОТРОНА VINCY (БЕЛГРАД)
МЕТОДОМ ПЕРЕЗАРЯДКИ

Представлено на V Европейскую конференцию по ускорителям частиц
«EPAC-96», Барселона

1996

Введение

Изохронный циклотрон VINCY [1], создаваемый в Институте ядерных наук VINCA (Белград, Югославия), предназначен как для научных, так и для прикладных задач. На данном ускорителе предполагается получать ускоренные пучки различных ионов: от H^- ($\eta = Z/A = 1.0$) с максимальной энергией $W = 66$ МэВ до Xe_{132}^{+20} ($\eta = 0.15$) с энергией $W = 3$ МэВ/нукл. Основные параметры циклотрона VINCY представлены в таблице 1. Для вывода пучка ускоренных ионов из камеры ускорителя предполагается использовать две взаимодополняющие системы:

- вывод методом перезарядки на фольге для легких ионов, а также некоторых тяжелых ионов с малым зарядом;
- вывод электростатическим deflectором для ионов, которые не могут быть выведены перезарядкой.

В данной работе представлены результаты численного моделирования вывода пучка ионов методом перезарядки. На рис.1 показаны выводные траектории для некоторых ионов.

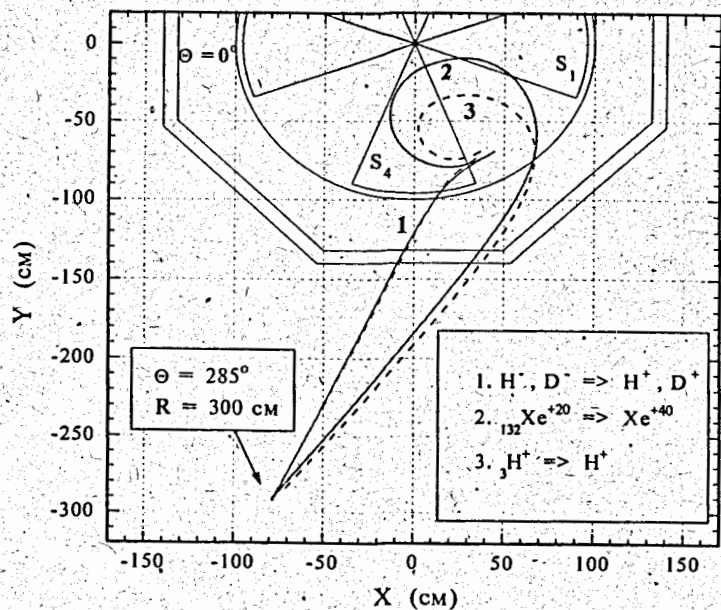


Рис.1. Выводные траектории тестовых ионов после перезарядной фольги

Таблица 1. Основные параметры циклотрона VINCY

Диаметр полюса (мм)	2000
Число секторов	4
Угловой размер сектора (град.)	42
Спиральность сектора (град.)	0
Зазор между полюсами (мм)	51
Зазор между секторами (мм)	31
Магн. поле в центре B_0 (Тл)	$1.3 \div 2.1$
Число дуантов	2
Угловой размер дуанта (град.)	30
Напряжение на дуанте (кВ)	$35 \div 100$
ВЧ - частота (МГц)	$17 \div 31$
Номер гармоники	$1 \div 4$

Требования к системе вывода

Система вывода должна осуществлять высокоэффективный вывод ускоренного пучка различных ионов в требуемом направлении. В качестве основного варианта предполагается использовать вывод пучка за счет перезарядки ускоренных ионов на фольге, установленной вблизи конечного радиуса. Данный метод обладает рядом преимуществ:

- простота конструкции элементов системы вывода;
- 100%-я эффективность;
- варьирование энергии и направления вывода пучка.

В основном данный метод применяется при выводе H^- и D^- ионов [2], которые при прохождении перезарядной фольги теряют электроны и превращаются соответственно в H^+ и D^+ . Образовавшиеся ионы имеют положительный заряд и выводятся из камеры ускорителя с эффективностью $\approx 100\%$.

Но данный метод может быть использован и для вывода тяжелых ионов [3,4]. При прохождении перезарядной фольги заряд иона изменяется с Z_1 на Z_2 , что приводит к изменению радиуса кривизны траектории. При некоторых условиях, определяемых в основном коэффициентом перезарядки Z_2/Z_1 , образовавшиеся ионы могут быть выведены из ускорителя. Необходимо заметить, что после прохождения фольги образуются ионы с различными зарядами и, соответственно, различными

направлениями движения. Для вывода используются ионы только с одним зарядом, что и определяет реальную эффективность вывода.

Методика расчетов

Моделирование вывода пучка осуществлялось путем численных расчетов динамики ионов по программе "STRIPEX". Предполагалось, что ускорение как положительных, так и отрицательных ионов происходит в одном направлении - по часовой стрелке. Для выбранного иона задавались его параметры (A , Z , W) до и после перезарядной фольги. Первоначально находилась равновесная орбита ускоряемого иона при заданной энергии. Затем вычислялась выводная траектория иона после фольги. Положение перезарядной фольги задавалось азимутом Θ_f и радиусом R_f , соответствующим радиусу равновесной орбиты. В таблице 2 представлены параметры семи тестовых частиц с различными η и Z_2/Z_1 , использованных в численных расчетах при моделировании системы вывода. Их выбор определялся желанием охватить весь диапазон ускоряемых ионов, а также требованием со стороны экспериментаторов к необходимости вывода конкретных ионов.

Таблица 2. Параметры ионов, выводимых перезарядкой

Ускоряемые ионы	Выводимые ионы	Z_2 / Z_1	Энергия (МэВ/нукл)	Кэф. вывода (%)
$H^- (\eta = 1)$	H^+	-1	40 ÷ 66	≈100
$D^- (\eta = 0.5)$	D^+	-1	20 ÷ 30	≈100
$H_2^+ (\eta = 0.5)$	$2 \times H^+$	2	25 ÷ 30	≈100
$H_3^+ (\eta = 0.33)$	$3 \times H^+$	2	12	≈100
$Ne_{20}^{+3} (\eta = 0.25)$	Ne_{20}^{+10}	2	7	≈15÷20
$Ne_{20}^{+4} (\eta = 0.2)$	Ne_{20}^{+10}	2.5	4	≈15÷20
$Xe_{132}^{+20} (\eta = 0.15)$	Xe_{132}^{+40}	2	3.1	≈15÷20

При проведении расчетов использовались магнитные поля, сформированные с учетом численных расчетов и измерений на модели магнита. На рис.2 показаны зависимости среднего поля и основной гармоники вдоль радиуса для трех типов частиц.

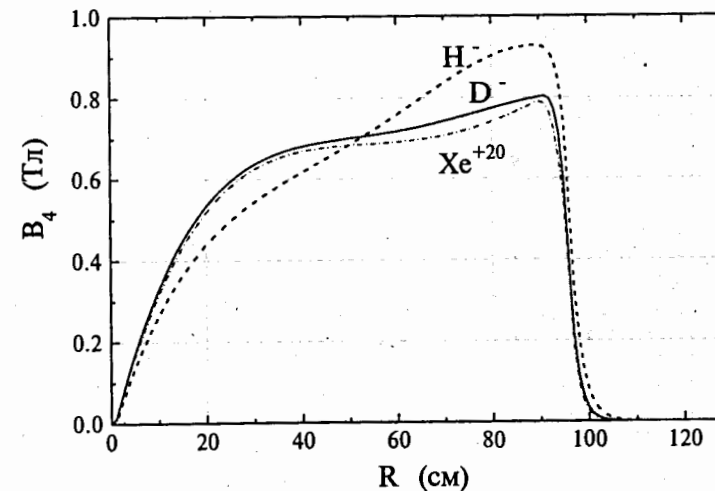
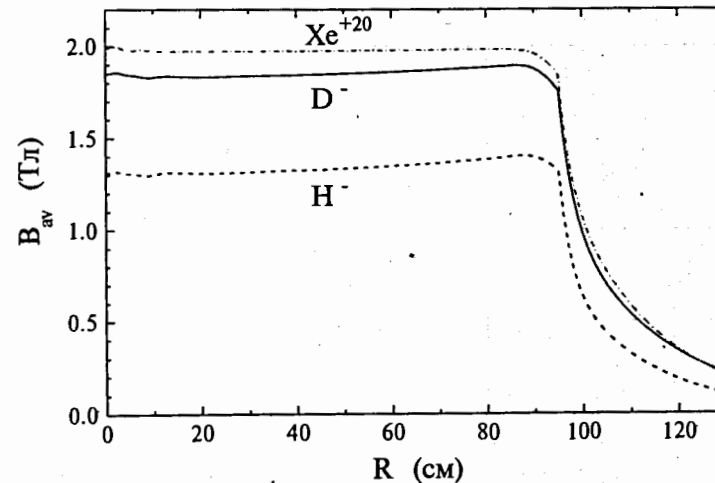


Рис. 2. Зависимость среднего магнитного поля B_{av} и основной гармоники B_4 вдоль радиуса

Выбор направления вывода

Система вывода должна обеспечивать вывод пучков различных ионов в требуемом диапазоне энергий в заданном направлении. Траектории всех выводимых ионов должны иметь общую точку пересечения. Исходя из конструкции ускорителя и его расположения в экспериментальном зале эта точка должна находиться на радиусе ≈ 300 см. Для определения ее азимутального положения были проведены исследования по влиянию азимутального положения фольги на направление вывода пучка. На рис.3 показана величина азимута, на котором выводимые ионы достигают радиуса 300 см, в зависимости от азимутального положения перезарядной фольги. Полученные результаты показали возможность сведения траекторий для всех рассматриваемых тестовых частиц в общую пространственную точку с координатами $R=300$ см и $\Theta = 285^\circ$.

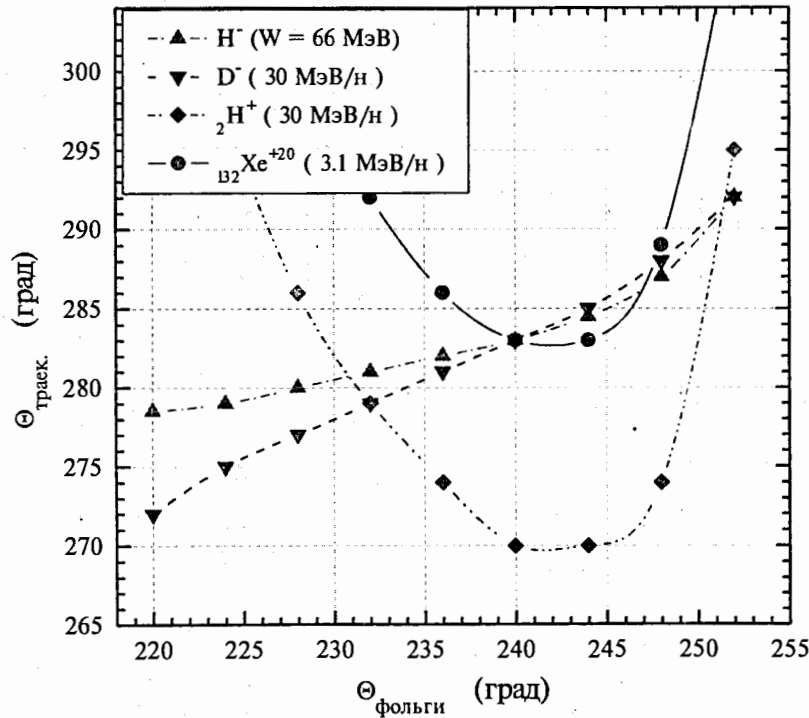


Рис.3. Зависимость азимута, на котором траектория достигает радиуса 300 см, от азимута перезарядной фольги

Использование метода перезарядки для вывода позволяет довольно просто изменять энергию выводимого пучка в широком диапазоне за счет перемещения перезарядной фольги. Ряд расчетов был проведен для определения радиального и азимутального положения фольги. На рис.4 приведены требуемые положения перезарядной фольги для различных ионов в координатах (Θ, R) . Проведенные расчеты подтвердили возможность вывода рассматриваемых ионов в требуемом направлении с энергиями, указанными в таблице 2. При этом диапазон перемещения перезарядной фольги составляет: $\Theta = 228 \div 261^\circ$, $R = 69 \div 84$ см.

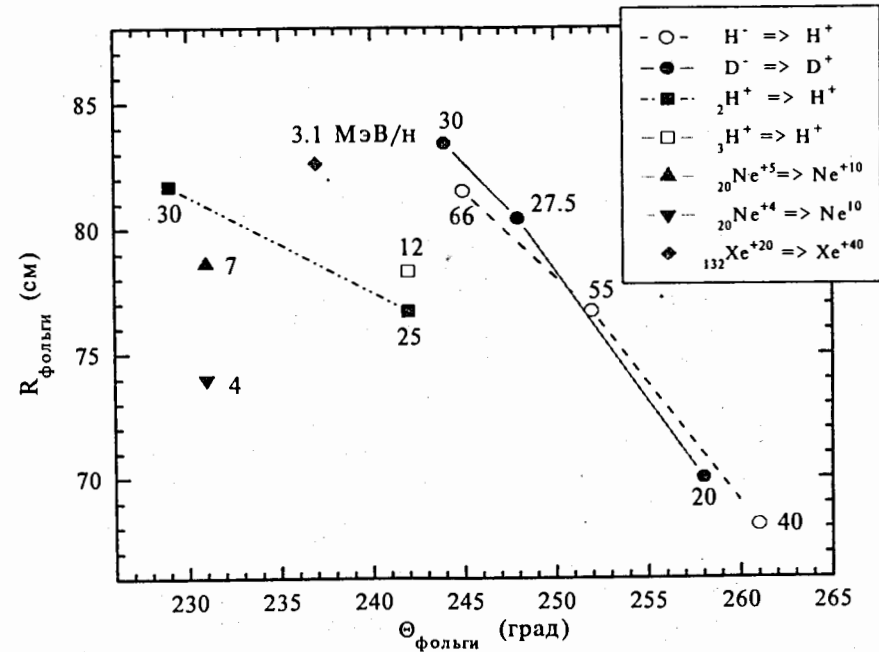


Рис.4. Положение перезарядной фольги в координатах (Θ, R) , при котором ионы выводятся в выбранную точку пересечения $\Theta=285^\circ$, $R=300$ см

Корректировка направления движения пучка

Как видно из рис.1, выводимые траектории сходятся в одну точку, но имеют при этом различные направления. Для D^+ и H^+ ионов с различными энергиями угол между направлением движения и осью сектора S4 составляет $\gamma = 16 \div 25^\circ$. Для остальных ионов этот угол практически одинаковый и составляет величину $\gamma \approx 37 \div 39^\circ$. Таким образом, суммарный

разброс углов между различными выводными траекториями составляет 24° . Для согласования направления выводимых пучков с системой транспортировки необходимо применять корректирующий магнит, расположенный вблизи точки пересечения и изменяющий направление движения пучка в диапазоне $\pm 12^\circ$.

Огибающие пучка

В предыдущих расчетах исследовалось движение одной частицы. При моделировании поведения выводимого пучка были использованы величины радиального и аксиального эмиттансов: $\mathcal{E}_R = 7.5 \pi \times \text{мм} \times \text{мрад}$, $\mathcal{E}_z = 2.5 \pi \times \text{мм} \times \text{мрад}$, разброс энергии $\delta W = \pm 1\%$. Данные параметры были получены из моделирования динамики пучка в процессе ускорения.

Ионы H^+ и D^+ , образующиеся после перезарядки на фольге ионов H^- и D^- , быстро проходят краевое магнитное поле в направлении, близком к радиальному. В этом случае градиент магнитного поля в направлении, перпендикулярном направлению движения пучка, значительно меньше радиального дефокусирующего градиента краевого магнитного поля. Анализ огибающих показал, что данные ионы возможно выводить без дополнительной фокусировки. На рис.5-6 показаны радиальная и вертикальная огибающие для пучков H^+ и D^+ ионов с максимальной энергией и эмиттансы в точке пересечения. Данные зависимости аналогичны и для других энергий. Полный размер пучка в точке пересечения составляет величину ≈ 3 см как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении.

Анализ поведения пучка для остальных ионов, траектории которых значительно дольше находятся в краевом магнитном поле, показал необходимость использования фокусирующего в радиальном направлении магнитного канала. Выводные траектории для всех этих ионов практически совпадают после $\Theta \approx 230^\circ$. В связи с этим предполагается использовать один и тот же фокусирующий магнитный канал для всех типов выводимых ионов, изменяя его положение в пределах нескольких сантиметров. В результате проведенных расчетов были выбраны следующие параметры канала: азимутальное положение $230 \div 245^\circ$, $R_n \approx 103$ см, $R_k \approx 122$ см, длина ≈ 40 см, фокусирующий радиальный градиент магнитного поля $G \approx 650 \div 700$ Гс/см.

На рис.7-9 показаны огибающие и эмиттансы пучка для некоторых ионов при наличии данного фокусирующего канала. Вертикальный и горизонтальный размеры пучка в точке пересечения составляют величину $\approx 2 \div 5$ см.

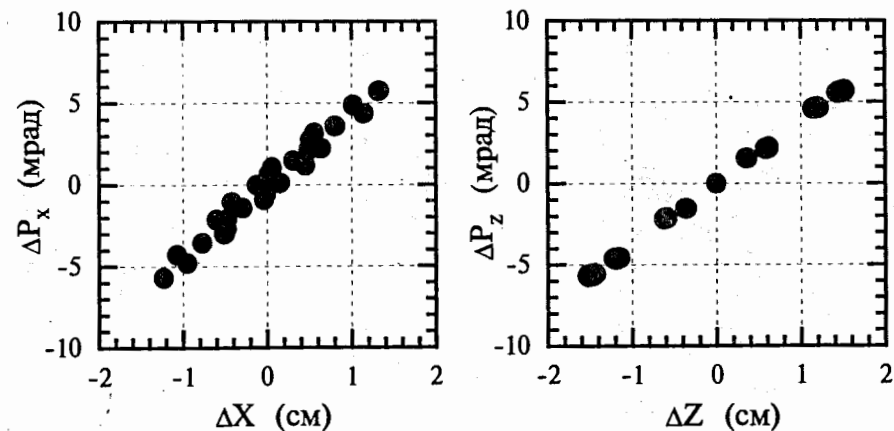
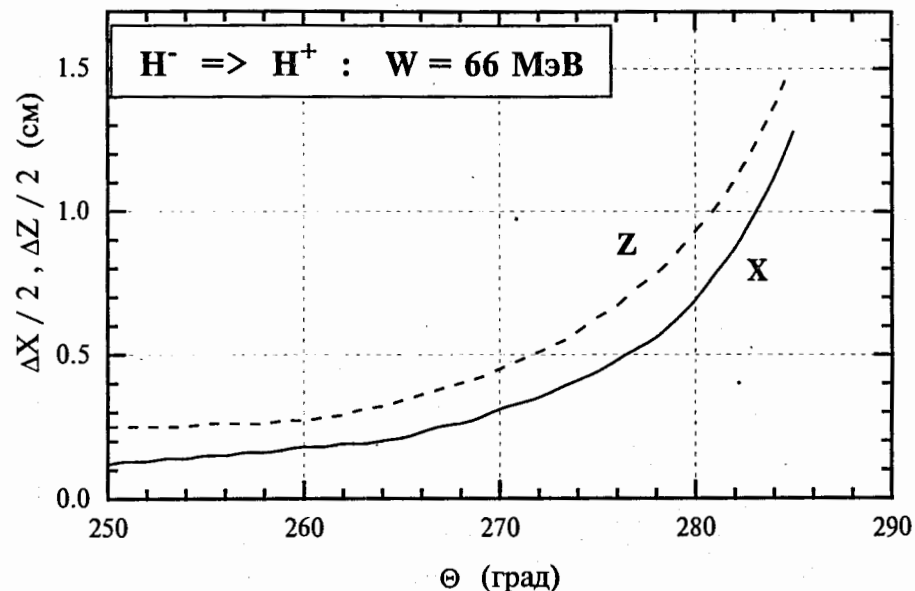


Рис.5. Огибающие и эмиттансы для H^+ с энергией 66 МэВ

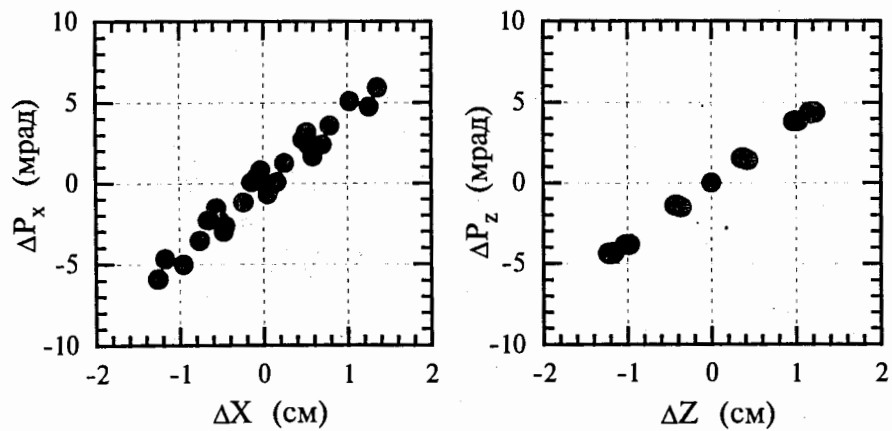
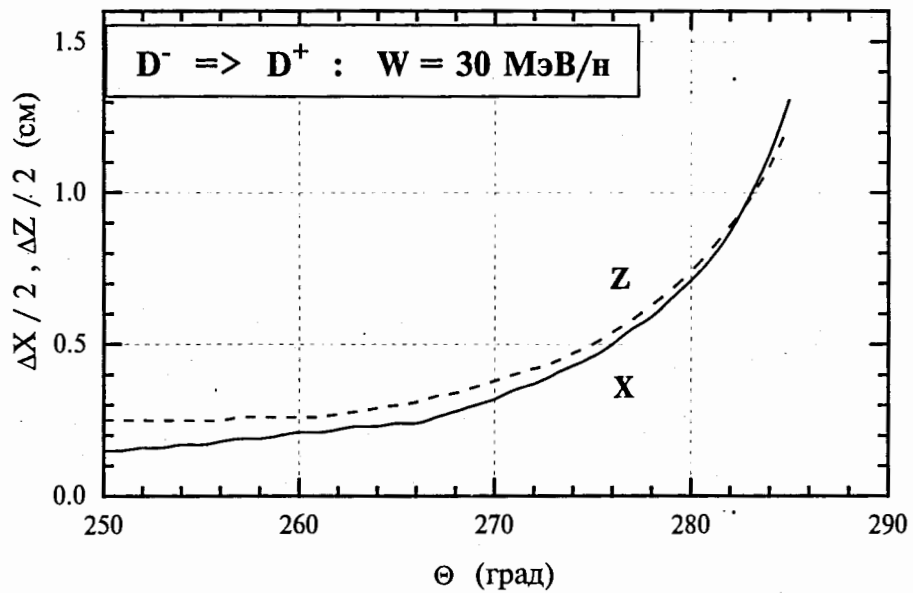


Рис.6. Огибающие и эмиттансы для D^+ с энергией 30 МэВ/н

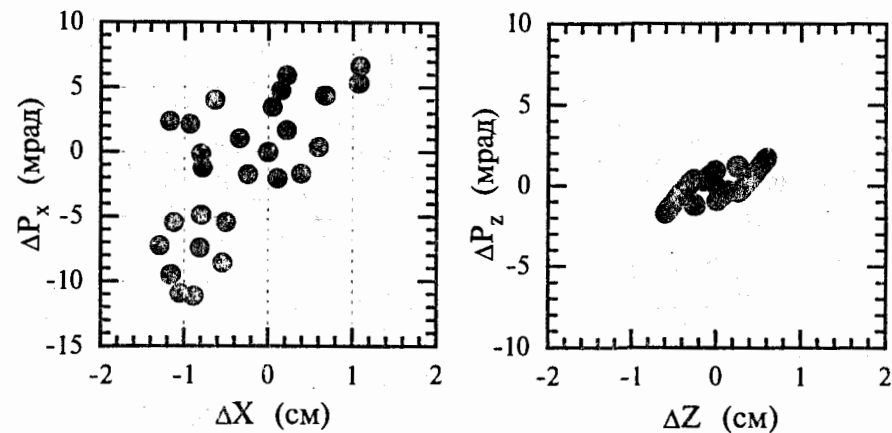
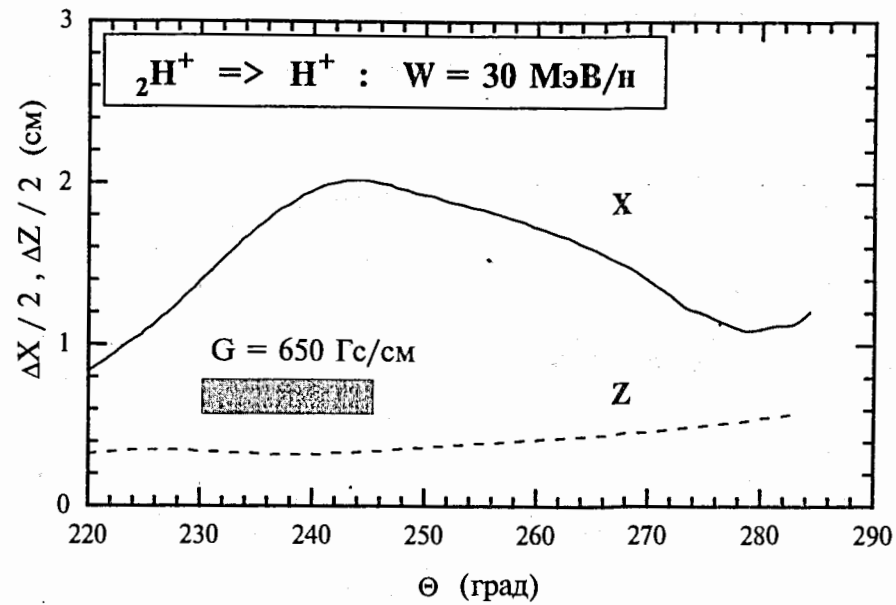


Рис.7. Огибающие и эмиттансы для H^+ с энергией 30 МэВ/н

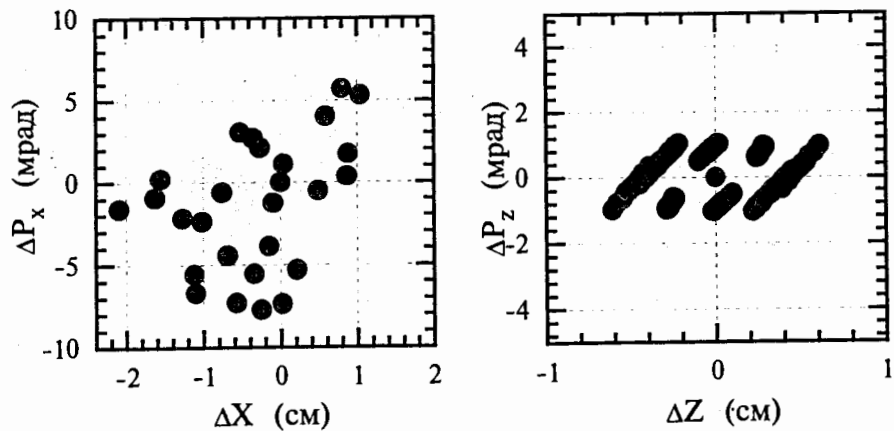
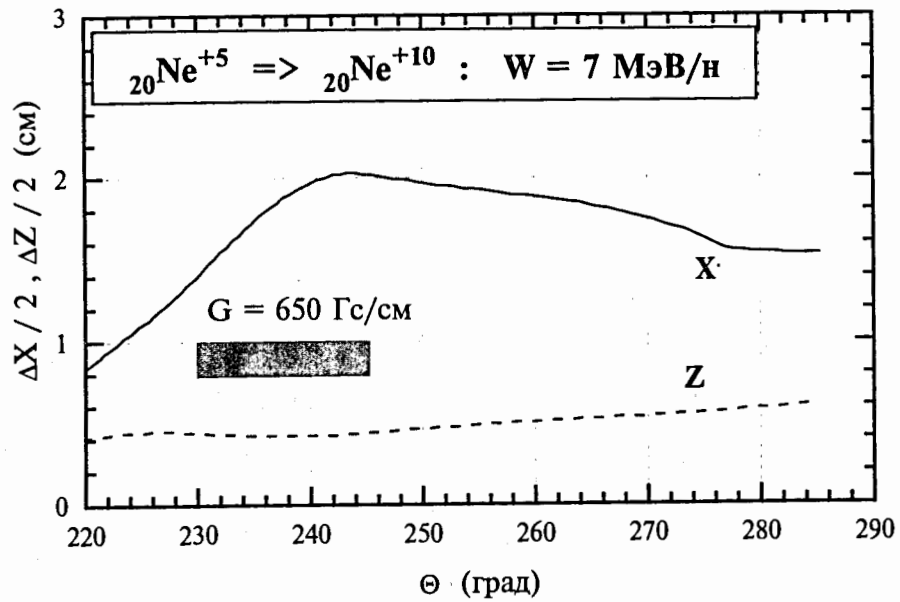


Рис.8. Огибающие и эмиттансы для Ne^{+10} с энергией 7 МэВ/н

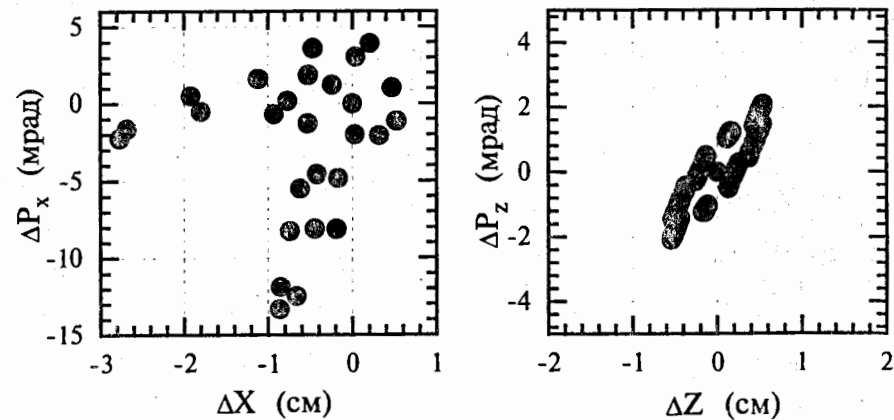
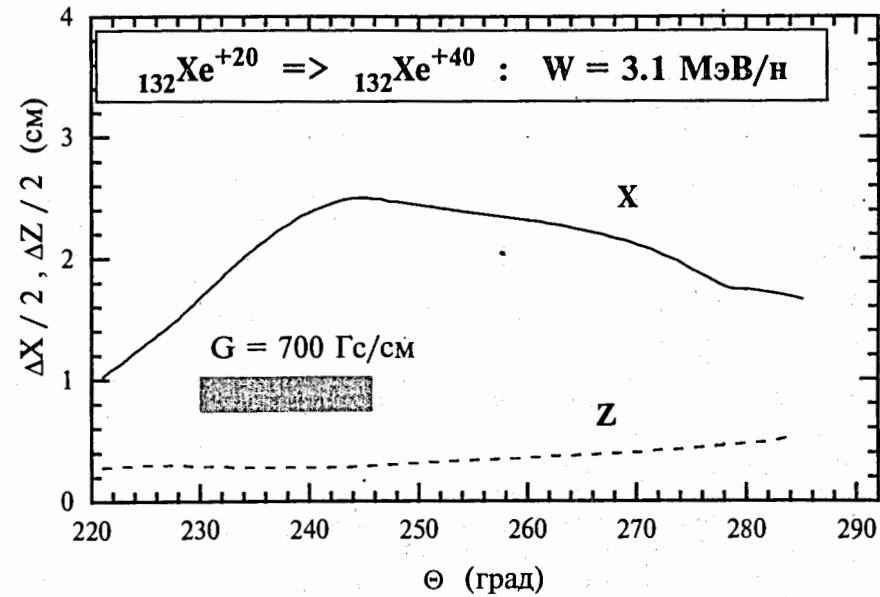


Рис.9. Огибающие и эмиттансы для Xe^{+40} с энергией 3.1 МэВ/н

Выводы

Результаты проведенных исследований по выводу пучка методом перезарядки из циклотрона VINCY можно сформулировать следующим образом:

- Показана возможность вывода перезарядкой пучков как легких, так и тяжелых (при $Z_2 / Z_1 \geq 2$) ионов с разными энергиями (см. таблицу 2);
- Выбрана, с учетом конструкции циклотрона, точка пересечения выводных траекторий для всех ионов: $R = 300$ см, $\Theta = 285^\circ$;
- Угол между направлением выведенного пучка после корректирующего магнита и осью сектора S_4 составляет величину $\gamma \approx 28^\circ$;
- Требуемый диапазон перемещения перезарядной фольги, расположенной в долине между секторами S_1 и S_4 , равен соответственно $\Theta = 228 \div 261^\circ$, $R = 69 \div 84$ см;
- Определены требования к корректирующему магниту;
- Исходя из анализа огибающих пучков, определено расположение и требуемые параметры магнитного фокусирующего канала;
- Получены расчетные эмиттансы пучков в точке пересечения, что позволяет начать расчеты системы транспортировки.

Дальнейшие исследования данной системы вывода пучка предполагаются в следующих направлениях:

- Возможность вывода пучков тяжелых ионов перезарядкой при малых коэффициентах перезарядки $Z_2 / Z_1 \leq 2$;
- Возможность использования 2- и 3-оборотного вывода тяжелых ионов перезарядкой, что позволит расширить диапазон энергии выводимых ионов.

Литература

- [1] N. Neskovic et al. "Tesla accelerator installation" Proc. of EPAC-92, Berlin, 1992, v.1, p. 415.
- [2] A.C. Paul, B.T. Wright, IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1966, v. NS-13, N.4, p.74
- [3] И. А. Шелаев и др. ПТЭ, 1970, т.3, с. 53.
- [4] О. Н. Борисов, Г. Г. Гульбеян. В сб.: Труды XIII Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1993, т.1, с.116.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 июля 1996 года.

Борисов О.Н.

P9-96-272

Вывод пучка ионов из циклотрона VINCY (Белград) методом перезарядки

Представлены результаты численного моделирования вывода пучка перезарядкой в циклотроне VINCY. Выполнены расчеты для семи тестовых ионов с различными $\eta = Z/A$ и Z_2/Z_1 . Выбрано положение перезарядной фольги, положение и характеристики необходимых корректирующего и фокусирующего магнитных каналов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод автора

Borisov O.N.

P9-96-272

Ions Beam Extraction from the VINCY Cyclotron by Stripping

The results of the numerical simulation of the beam extraction by stripping in the VINCY Cyclotron are present. The calculations for seven test ions with different $\eta = Z/A$ and Z_2/Z_1 are carried out. The positions of the stripping foil, positions and characteristics of necessary correction and focusing magnetic channels are chosen.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996