

С 345г

Ш-42

25/2-71

3670/2-71

P9 - 6062

6.

И.А. Шелаев, В.С. Алфеев, Б.А. Загер, С.И. Козлов

И.В. Колесов, А.Ф. Линева, В.Н. Мельников,
Р.Ц. Оганесян, Ю.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ КСЕНОНА
НА ЦИКЛОТРОНАХ ОИЯИ

P9 - 6062

И.А. Шелаев, В.С. Алфеев, Б.А. Загер, С.И. Козлов,
И.В. Колесов, А.Ф. Линев, В.Н. Мельников,
Р.Ц. Оганесян, Ю.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ КСЕНОНА
НА ЦИКЛОТРОНАХ ОИЯИ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Введение

Дальнейшее развитие физики ядерных реакций между сложными ядрами связано с использованием в этих реакциях пучков ионов все более тяжелых элементов с энергией, превышающей кулоновский барьер $\sim 6 \cdot 10$ Мэв/нуклон. Однако с ростом массы ионов приобретаемый ими в дуговом ионном источнике максимальный заряд увеличивается очень медленно, достигая для ионов урана всего лишь 11-13. Вследствие этого удельный заряд тяжелых ионов уменьшается с ростом массы, что создает трудности при их ускорении.

С целью повышения заряда тяжелых ионов их ускорение зачастую проводится последовательно на двух ускорителях с промежуточной перезарядкой ^{/1,2/}. Ионы с относительно низким зарядом, получаемым в источнике, ускоряются до энергии ~ 1 Мэв/нуклон в предускорителе (или инжекторе) и затем проходят через твердую или газообразную обдирочную мишень-стриппер, вследствие чего происходит скачкообразное увеличение заряда ионов. После прохождения стриппера ионы поступают в основной ускоритель, где ускоряются до конечной энергии. Таким образом, первоначальный источник, предускоритель и стриппер можно рассматривать как гигантский сложный "источник" ионов ^{/3/}.

В качестве предускорителя применяется линейный ускоритель ^{/1,2/} или тандем-генератор ^{/4/}, а основного - линейный ускоритель или циклотрон. Интересно рассмотреть также вариант, в котором роль инжектора и основного ускорителя выполняется циклотронами ^{/5/}. Имеющиеся в ОИЯИ два циклотрона тяжелых ионов в течение многих лет работы непрерывно совершенствовались и в настоящее время являются наиболее эффективными машинами по интенсивности пучков, энергии частиц и диапазону масс ускоряемых ионов. Когда была поставлена задача по получению ускоренных ионов ксенона, проведенный анализ показал, что, не останавливая основных физических работ по синтезу сверхтяжелых трансурановых элементов, данную задачу можно успешно решить при совместном использовании двух циклотронов в виде тандемной системы.

Циклотроны Лаборатории ядерных реакций

В Лаборатории с 1960 года действует 310-сантиметровый классический циклотрон - ускоритель У-300 ^{/6/}, работающий при фиксированном уровне магнитного поля и обеспечивающий внешний пучок тяжелых ионов с энергией

$$E = 250 Z^2 / A \text{ Мэв,} \quad (1)$$

где Z и A - заряд и масса иона соответственно. В 1968 году был запущен двухметровый изохронный циклотрон - ускоритель У-200 ^{/7/}, созданный на основе классического полутораметрового циклотрона. Циклотрон У-200 также работает при фиксированном уровне магнитного поля и позволяет ускорить ионы до энергии

$$E = 156 Z^2 / A \text{ Мэв.} \quad (2)$$

Как известно, заряд иона после перезарядки на стриппере зависит от величины энергии иона, а также толщины и материала стриппера. При одной и той же энергии заряд иона после прохождения твердого стриппера примерно на 20% выше, чем после газового, если энергия иона составляет ~ 1 Мэв/нуклон. Поэтому применение твердых стрипперов более эффективно.

Расчетная величина отношения A/Z после перезарядки на мишени из фольги оптимальной толщины ~ 20 мкг/см² приведена на рис. 1 как функция энергии падающего иона^{/5/}. Пользуясь этими данными и выражениями (1) и (2), можно рассчитать конечную энергию ионов для любой комбинации циклотронов. В табл. 1 приведена конечная энергия ряда тяжелых ионов, когда в качестве инжектора используется циклотрон У-200.

В табл. 2 приведена конечная энергия пучка тех же ионов, что и в табл. 1, но с использованием в качестве инжектора циклотрона У-300. Как видно из табл. 1 и 2, каждая из рассмотренных комбинаций представляет интерес и в то же время обе они позволяют получить пригодные для использования в опытах пучки ионов до ионов ксенона включительно. Для осуществления "тандем-циклотронов" была выбрана вторая схема: У-300 → У-200, по следующим причинам. Во-первых, учитывая значительную временную загрузку ускорителя У-300 проводимыми физическими экспериментами, следовало выбрать вариант, требующий для подготовки минимального времени остановки циклотрона У-300. Во-вторых, значительно сокращается объем вспомогательных работ, что связано с сильно развитой системой внешних пучков на циклотроне У-300.

Опыты по перезарядке ионов ксенона

На циклотроне У-300 экспериментально изучалась величина равновесного заряда и распределение интенсивности ионов по зарядам вблизи равновесного. С этой целью на циклотроне в режиме третьей гармоники (частота генератора в.ч. - 4,590 Мгц, напряженность магнитного поля в центре - 16,7 кэ) ускорялся пучок ионов Xe_{132}^{+8} до энергии 0,9 Мэв/нуклон. Внешний пучок этих ионов фокусировался на мишень из золотой фольги толщиной 0,2 мк (~ 380 мкг/см²), и заряд ионов после мишени анализировался с помощью магнитного сепаратора типа БЭМС^{18/}. В фокальной плоскости сепаратора пучок регистрировался твердотельным детектором с записью результатов на многоканальном амплитудном анализаторе. Изменяя величину магнитного поля сепаратора, на детектор направляли пучок ионов с различным зарядом. После обработки экспериментальных данных была получена кривая распределения интенсивности ионов в зависимости от заряда, представленная на рис. 2.

Как видно, наибольшая доля ионов ($\sim 13\%$) имеет заряд, равный 27, причём интенсивность пучков ионов с зарядом 24 и 29 всего лишь вдвое меньше, чем интенсивность пучка с максимальным равновесным зарядом. Это обстоятельство позволяет после перезарядки ускорять в циклотроне У-200 без заметной потери интенсивности пучки ионов с зарядом от 24 до 29 включительно. Аналогичные опыты были проведены с мишенью из алюминиевой фольги толщиной 0,5 мк (130 мкг/см²), и существенного отличия в величине равновесного заряда не наблюдалось.

Трасса ионопровода от У-300 до У-200

Инжекция ионов в циклотрон У-200 осуществлялась таким образом, чтобы траектория ионов до перезарядки проходила бы в месте расположения стриппера по касательной к равновесной орбите тех же ионов после перезарядки. С этой целью была разработана специальная вычисли-

тельная программа, с помощью которой на ЭВМ типа CDC -1604A были проведены расчёты траектории инжектируемых ионов Xe_{132}^{+8} , ускоренных до энергии 0,9 Мэв/нуклон. В этих расчётах использовалась ранее полученная карта магнитного поля циклотрона У-200^{19/}.

Азимутальное положение стриппера на равновесной орбите в циклотроне У-200 выбиралось с тем условием, чтобы перезарядное устройство находилось бы в одной из двух свободных долин циклотрона, "восточной" или "западной", т.к. разместить стриппер в холме, зазор которого равен всего 30 мм, не представляется возможным. В результате проведенных расчётов выбрано такое положение стриппера, при котором полный угол поворота пучка ионов Xe_{132}^{+8} вдоль всей трассы являлся минимальным, с целью снижения суммарной величины произведения $H\rho$ поворотных магнитов. Тем не менее, расположение циклотронов таково, что полный угол поворота пучка составляет для принятой трассы почти 180° .

Выбранный вариант трассы ионопровода схематически показан на рис. 3, а схема инжекции ионов в циклотрон У-200 - на рис. 4. Стриппер расположен в западной долине циклотрона У-200 на специальном пробнике.

В связи с тем, что на циклотроне У-200 при ускорении ионов ксенона отсутствует обычный дуговой источник, натекание газа в камеру ускорителя снизилось в рабочих условиях с 1,5 до 0,2 см³/мин. Благодаря этому, рабочий вакуум в камере циклотрона У-200 составляет $(6\pm 9) \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.

Конструктивно стриппер представляет собой кольцо диаметром 70 мм, выполненное из алюминиевой фольги толщиной 0,5 мк, которое вращается в вертикальной плоскости с частотой 200-300 об/мин. Радиальная протяженность кольца равна 1 см, что обусловлено шагом по радиусу ускоряемого пучка ионов Xe_{132}^{+27} , который на радиусе 32 см составляет 0,9 см. Вращение кольца позволяет значительно снизить тепловую нагрузку на единицу площади стриппера и тем самым увеличить его долговечность.

Для обеспечения ускорения ионов ксенона с различным зарядом после обдирки имеется возможность дистанционного перемещения стриппера как по радиусу, так и по азимуту. Предусмотрено также шлюзование пробника, на котором установлен стриппер, что позволяет без нарушения вакуума в камере циклотрона быстро осуществлять смену перезарядной фольги.

Общая длина трассы, связывающей оба ускорителя, составляет около 70 м. Вдоль всей трассы пучок последовательно проходит через пять поворотных электромагнитов, задающих направление пучка в медианной плоскости. Последний по ходу пучка электромагнит расположен непосредственно у входа в камеру циклотрона У-200 и служит для точной юстировки положения пучка на перезарядной мишени.

Помимо указанных электромагнитов, приблизительно в середине ионопровода установлена дополнительная пара электромагнитов "уровня", предназначенная для "снижения" пучка из медианной плоскости циклотрона У-300 в медианную плоскость циклотрона У-200. Разность уровней этих плоскостей составляет 50 мм. Расстояние между центрами электромагнитов уровня равно 2,5 м, а один из промежуточных фокусов пучка находится на середине этого расстояния.

Фокусировка пучка ионов в ионопровode осуществлялась с помощью семи пар квадрупольных магнитных линз. Последние расставлены по трассе так, что аксептанс системы транспортировки пучка составляет 120 мм. мрад. Предварительно проведенные измерения эммитанса выведенного пучка на циклотроне У-300 показали, что горизонтальный эммитанс равен 80 мм. мрад., а вертикальный - 35 мм. мрад.

Расположенные равномерно вдоль ионопровода 7 шт в/в насосов типа ВА-0,5 обеспечивают рабочее давление в ионопровode $(2+4) \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.

Подбор рабочих значений токов в электромагнитах и линзах проводился экспериментально путем последовательной настройки пучка в каждом промежуточном фокусе. Размеры и форма пучка наблюдались на кварцевой мишени с помощью переносной телеустановки типа ПТУ-2М.

Проведенная оценка интенсивности ускоренного пучка ксенона на циклотроне У-200 показывает, что она должна составлять 0,1-0,3% от величины инжектируемого тока. Тогда при интенсивности внешнего пучка циклотрона У-300, равной 10^{12} - 10^{13} част/сек, соответствующая интенсивность пучка, ускоренного до конечной энергии, составит 10^9 - 10^{10} част./сек.

Авторы выражают глубокую благодарность академику Г.Н. Флерову за постановку задачи и постоянный интерес к этой работе.

Л и т е р а т у р а

1. E.L. Habburd et al. Rev.Sci.Instr., 32, 6 (1961).
2. M. Lefort and A. Gabrespine. Proc.Intern.Conf.Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, 1969, Heide, Heidelberg, p. 557.
3. J.D. Daugherty et al. IEEE Trans. NS-16, 51, 1969.
4. R.S. Livingston. Proc. Intern. Conf. Nucl. Reactions Induced by Heavy Ions, 1969, Heidelberg, p. 500.
5. O. Böttger. Kerntechnik, 12, 1969.
6. В.С. Алфеев и др. ОИЯИ, Р-2693, Дубна, 1966.
7. I.A. Shelaev et al. IEEE Trans. NS-16, 802, 1969.
8. И. Бачо, Д.Д. Богданов, Ш. Дароши, В.А. Карнаухов, Л.А. Петров, Г.М. Тер-Акопян. ОИЯИ, Р13-4453, Дубна, 1969.
9. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Б.А. Клеин. ОИЯИ, Р9-5033, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 сентября 1971 года.

Таблица I

Z_1	Kr ⁸⁴					:	Xe ¹³²					
	4	5	6	7	8		5	6	7	8	9	10
E_I	0,345	0,525	0,765	1,035	1,365	:	0,21	0,3150	0,42	0,555	0,69	0,855
A/Z_2	6,4	5,2	4,4	4,0	3,5	:	8,9	7,2	6,4	5,6	5,1	4,7
E_K	6,1	9,25	12,925	15,625	20,4	:	3,15	4,825	6,1	7,975	9,625	11,325

10

Z_1	Pb ²⁰⁹					:	U ²³⁸						
	6	7	8	9	10		6	7	8	9	10	11	12
E_I	0,12	0,165	0,225	0,285	0,345	:	0,09	0,135	0,165	0,21	0,27	0,315	0,375
A/Z_2	13,1	11,3	10,2	9,1	8,2	:	17,4	15,2	13,1	11,6	10,2	9,6	8,7
E_K	1,45	1,95	2,4	3,025	3,725	:	0,825	1,075	1,45	1,85	2,4	2,725	3,3

Таблица 2

Z_1	Kr ⁸⁴					:	Xe ¹³²					
	4	5	6	7	8		5	6	7	8	9	10
E_I	0,575	0,875	1,275	1,725	2,275	:	0,35	0,525	0,7	0,925	1,15	1,425
A/Z_2	5,1	4,2	3,8	-	-	:	6,9	5,9	5,2	4,5	4,3	4,0
E_K	5,775	8,5	10,395	-	-	:	3,15	4,305	5,55	7,41	8,115	9,375

11

Z_1	Pb ²⁰⁹					:	U ²³⁸						
	6	7	8	9	10		6	7	8	9	10	11	12
E_I	0,2	0,275	0,375	0,475	0,575	:	0,15	0,225	0,275	0,35	0,45	0,525	0,625
A/Z_2	10,6	9,1	8,0	7,2	6,7	:	14,0	11,2	10,0	9,0	8,1	7,5	7,1
E_K	1,335	1,815	2,34	2,895	3,345	:	0,765	1,2	1,5	1,845	2,295	2,67	2,97

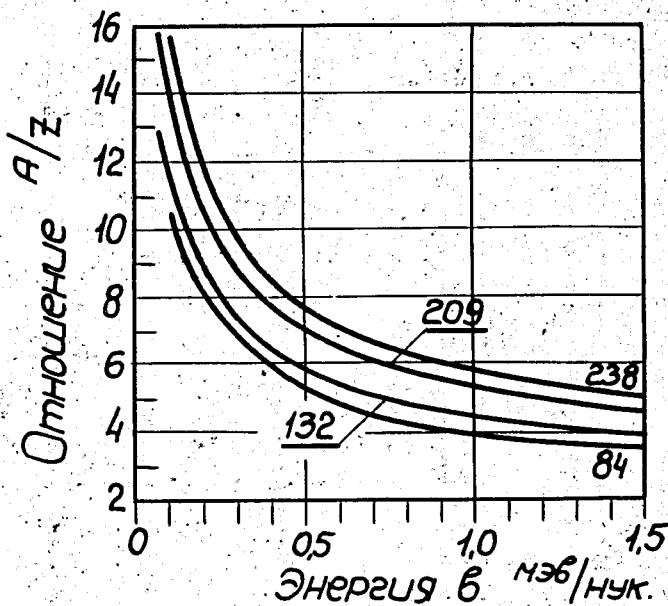


Рис. 1. Зависимость от энергии расчетной величины отношения A/Z ионов после перезарядки на фольге.

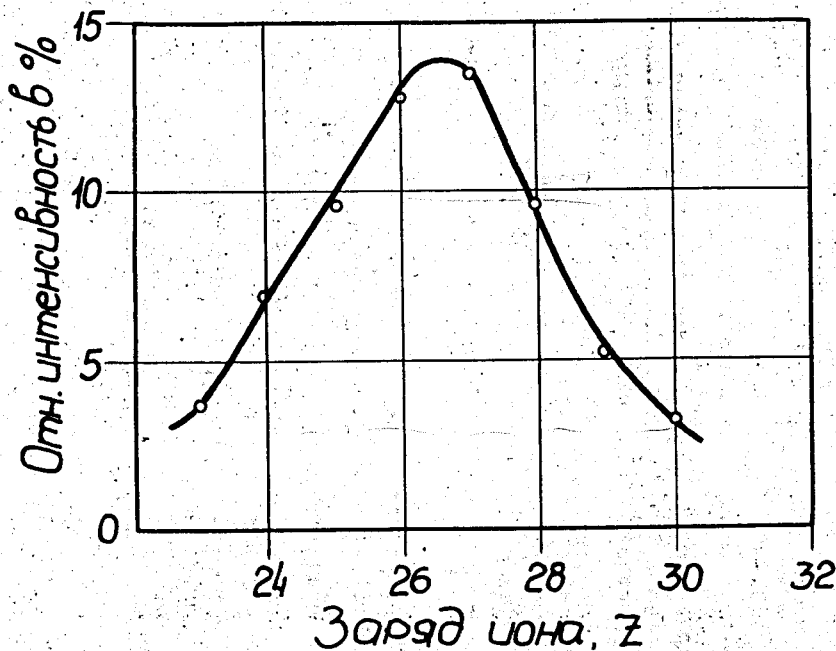


Рис. 2. Зарядовое распределение ионов Xe^{+8}_{132} , ускоренных на циклотроне γ -300, после перезарядки на фольге из золота толщиной 380 мкг/см^2 .

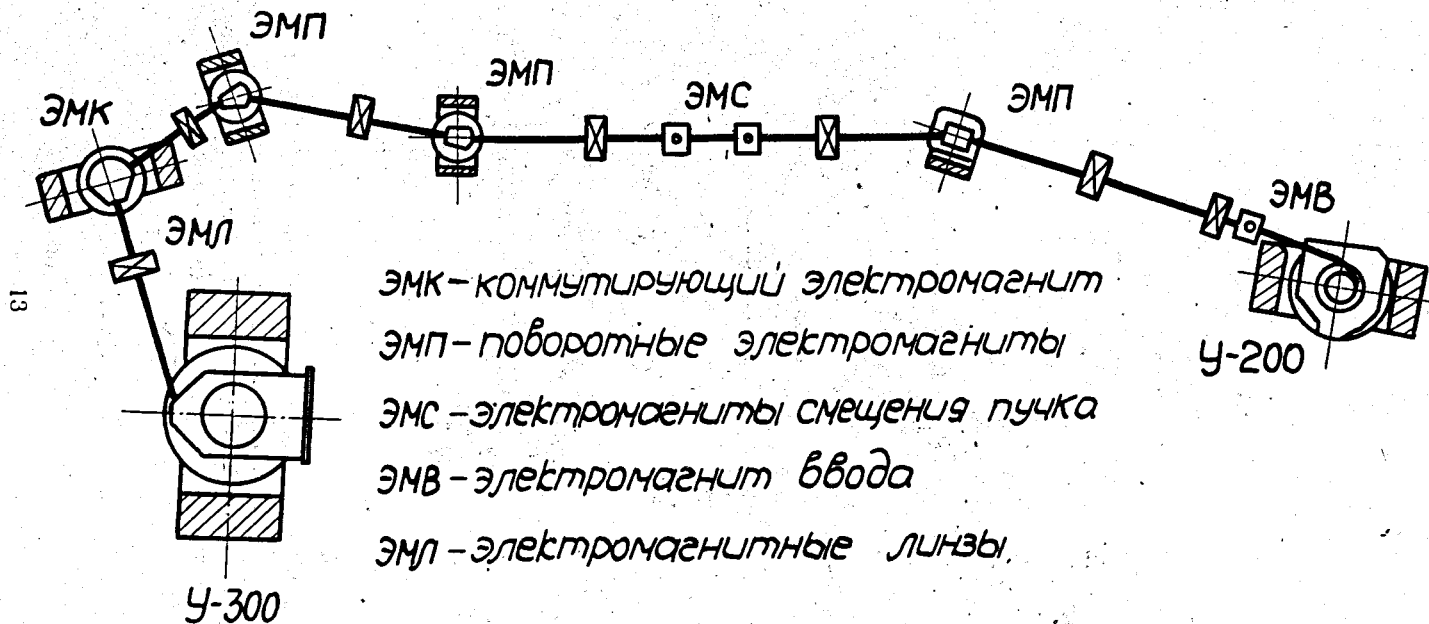


Рис. 3. Схематическое изображение трассы ионпровода между циклотронами Y-300 и Y-200.

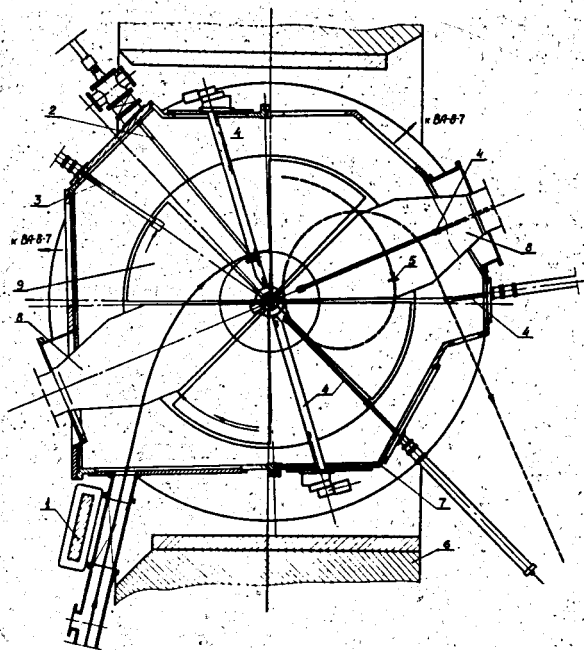


Рис. 4. Схема инъекции ионов в циклотрон У-200. 1 - электромагнит ввода пучка, 2 - стриппер для вводимого пучка, 3 - физический пробник, 4 - токовые пробники, 5 - обдирочная фольга для вывода пучка, 6 - ярмо электромагнита СП-72А, 7 - вакуумная камера, 8 - дуанты, 9 - сектора.