

С 345 и + С 345 К

Д - 405

6/xi-67

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Ат. энергии, 1968, т. 24,  
в. ч. с. 323-326

Дубна

Р9 - 3443



В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский,  
Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

КОЛЬЦЕВОЙ ЦИКЛОТРОН  
С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ  
ДЛЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

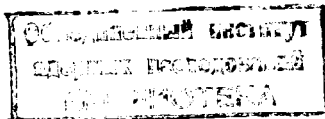
1967.

P9 - 3443

В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский,  
Б.И. Замолодчиков, В.В. Кольга

КОЛЬЦЕВОЙ ЦИКЛОТРОН  
С ЖЕСТКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ  
ДЛЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Направлено в АЭ



5348/1, пр.

Успехи в получении новых трансурановых элементов <sup>/1/</sup>, возможности, которые предсказываются теоретическими исследованиями устойчивости сверхтяжелых элементов <sup>/2/</sup>, а также перспективы использования ускоренных многозарядных ионов в медицине и биологии поставили перед техникой ускорения заряженных частиц новые задачи.

Вопрос оптимального выбора типа ускорителя для ускорения многозарядных ионов является одной из таких задач. Если определена требуемая кинетическая энергия частиц в ускорителе на один нуклон, этот вопрос решается, в основном, на основании экономических соображений, а также перспектив дальнейшего развития каждого типа ускорителя.

Существенной особенностью ускорителей многозарядных ионов по сравнению с протонными или дейтронными ускорителями является наличие эффекта изменения заряда при взаимодействии с молекулами остаточного газа вакуумной камеры. Если основываться на известных сечениях этого процесса <sup>/3/</sup>, то связь между давлением в вакуумной камере и временем ускорения будет определяться неравенством

$$p r \leq 10^{-10},$$

где  $p$  - в мм рт. ст. и  $r$  - в сек.

Таким образом, при эксплуатационных уровнях разрежения в вакуумных камерах современных ускорителей ( $0,5 + 1 \cdot 10^{-6}$  мм) время ускорения не должно превышать  $100 + 200$  мксек, что соответствует циклотронному способу ускорения.

Второй особенностью ускорителей многозарядных ионов является более жесткое ограничение по эффектам пространственного заряда пучка, что связано с большим зарядом каждой частицы и отсутствием релятивистских скоростей (при энергиях 6-10 Мэв/нуклон). Предельное число ионов в секунду по эффекту пространственного заряда для циклотронов пропорционально частоте собственных колебаний и обратно пропорционально массе иона ( $i = \frac{Q \cdot \Delta Q}{A}$ ); магнитную систему для таких ускорителей следует выбирать с максимальной жесткостью, так как при ускорении ионов с  $A \geq 200$  этот эффект становится определяющим.

Изложенные соображения побудили авторов рассмотреть возможность применения кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой для ускорения многозарядных ионов.

Ускоритель состоит из кольцевой магнитной системы, которая обеспечивает жесткую фокусировку по двум ортогональным осям ( $Q_{r,u} > 1$ ) и изохронность замкнутых орбит; системы ускорения, представляющей собой резонансные полости, работающие на постоянной частоте, и инжектора частиц типа Ван-Граафа или Кокфорта-Уолтона.

1. В настоящее время имеется незначительное число исследований на ускорителях прямого действия по пучкам многозарядных ионов с массовым числом  $A > 40$ <sup>3/</sup>. Однако эти исследования показывают, что возможно получение тяжелых ионов с зарядом  $z = 10$  интенсивностью не менее 10 мка. Следует ожидать, что в ближайшее время будут выполнены более подробные исследования этих возможностей на ускорителях прямого действия при потенциалах  $U = 1,5-5$  Мв. При выбранной кольцевой системе ускорителя и заданном напряжении инжекции на радиусе инжекции будет иметь место зависимость

$$\frac{A}{z} \cdot \frac{U}{H_u^2} = \text{const}, \quad (1)$$

где  $H_u$  — среднее поле на радиусе инжекции.

2. Требование жесткой фокусировки приводит к необходимости использования кольцевой формы магнита циклотрона. Отношение конечного радиуса к радиусу инжекции определяется выражением:

$$X = \frac{R_k}{R_u} = \frac{\sqrt{W_k/A}}{\sqrt{W_u/A}} \left[ 1 - \frac{3}{4} \frac{(W_k - W_u)}{AE_{op}} \right], \quad (2)$$

где  $W_k/A$  — величина конечной кинетической энергии, отнесенная к одному нуклону ядра,  $W_u/A$  — то же при энергии инжекции. Рост среднего магнитного поля, обеспечивающий изохронность замкнутых орбит, при увеличении энергии должен быть равен

$$H = H_0 \frac{E}{E_0} = H_0 \left( 1 + \frac{W}{AE_{op}} \right), \quad (3)$$

где  $E_{op}$  — энергия покоя протона.

При этом соответствующая изохронная частота иона на орбитах

$$\omega = \frac{z}{A} \omega_p, \quad (4)$$

где  $\omega_p = \frac{e c H_0}{E_{op}}$  — угловая частота протона в магнитном поле  $H_0$ . Так как кинетическая энергия на один нуклон не превышает 6-10 Мэв, то изменение среднего магнитного поля, согласно (3), составляет 0,6-1,0%.

Если создавать жесткую фокусировку ионов при помощи периодической структуры магнитного поля, то, как известно<sup>4/</sup>, частоты собственных колебаний при  $a \ll 1$  можно вычислить по формулам

$$Q_u \approx \epsilon \sqrt{0,5 + \text{tg}^2 a}, \quad (5)$$

$$Q_r = 1 + \frac{\epsilon^2}{N^2} \left( \frac{N^2}{N^2 - 4} + \frac{3}{4} \text{tg}^2 a \right),$$

где  $a$  — угол между спиралью и радиусом-вектором в данной точке;  $N$  — число периодов структуры поля;  $\epsilon = \frac{H_N}{H}$  — относительная амплитуда основной гармоника;  $a$  — показатель среднего магнитного поля.

Линия равной напряженности магнитного поля расположена на кривой (цилиндрическая система координат):

$$r = r_0 e^{\phi \cdot \text{ctg} a}. \quad (6)$$

Так как величина  $a \ll 1$ , выбор параметров  $\epsilon$ ,  $N$  и  $a$  должен выполняться исходя из условия постоянства частот свободных колебаний, а также с учетом резонансных эффектов вблизи частоты  $Q_r = 1$ . Анализ по-

кажется, что при амплитуде радиальных колебаний порядка 2-3 см и  $\epsilon_{\text{га}}=1$  можно избежать нелинейного резонанса  $Q_r = \frac{N}{N}$  при  $N=4$ . В этом случае частота радиальных колебаний будет составлять  $Q_r = 1,10-1,15$  и низшие гармоники не будут вызывать простого и параметрического резонансов при допуске  $\approx 10^{-3}$ .

3. Так как получение из источника ионов высокой зарядности ( $z > 10$ ) затруднено <sup>/5/</sup>, требуется ускорять частицы в широком диапазоне отношения  $\frac{z}{A}$ . Если  $A_{\text{min}} \geq 40$ , то диапазон  $\frac{z}{A} = 1/5 - 1/20$  будет охватывать весь желательный набор ионов

$$\text{Ar}_{40}^{+2} - \text{Ar}_{40}^{+8}; \text{Kr}_{84}^{+6} - \text{Kr}_{84}^{+14}, \text{Xe}_{132}^{+7} - \text{Xe}_{132}^{+26}, \text{U}_{238}^{+12} - \text{U}_{238}^{+46}.$$

Полный диапазон частот ионов при заданном интервале  $\frac{z}{A}$  при соблюдении (1) определяется соотношением:

$$\frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{min}}} = \frac{\sqrt{(z/A)_{\text{max}}}}{\sqrt{(z/A)_{\text{min}}}}. \quad (7)$$

Если использовать ускорение на кратных частотах, диапазон (7) можно реализовать на одной частоте резонансной системы. Обозначая кратность ускорения на этой частоте  $q_0$ , получим интервал значений  $q$  для заданного диапазона частот

$$q_{\text{max}} = q_0 \frac{\sqrt{(z/A)_{\text{max}}}}{\sqrt{(z/A)_0}}, \quad q_{\text{min}} = q_0 \frac{\sqrt{(z/A)_{\text{min}}}}{\sqrt{(z/A)_0}}, \quad (8)$$

где индекс "0" соответствует иону, ускоренному на кратности  $q_0$ . Ускоряющая система представляет собой несколько резонансных полостей (число которых  $m \leq q_0$ ), равномерно размещенных по азимуту кольцевой магнитной зоны. При угловой протяженности каждого ускоряющего электрода  $\delta = \frac{\pi}{q_0}$  набор энергии ионом, ускоряемым на кратности  $q \neq q_0$ , будет отличаться от резонансного набора на каждой полости

$$\frac{\Delta E}{\Delta E_{\text{рез.}}} = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{q}{q_0}\right). \quad (9)$$

Если ускоряющий потенциал на каждой полости равен  $V$ , то полное число оборотов иона в ускорителе

$$\nu = \frac{A}{z} \cdot \frac{W_k / A}{m e V} \quad (10)$$

даже при потенциалах  $V = 20-25$  кв незначительно превышает числа оборотов, которые имеют место в обычных циклотронах. Смещение иона по фазе в процессе ускорения будет в  $q$  раз больше по сравнению с циклотроном, что приводит к необходимости стабилизации магнитного поля с точностью  $10^{-4}$ .

4. Шаг частиц по радиусу в кольцевом циклотроне определяется из выражения

$$\Delta R = \frac{z}{2A} \cdot \frac{m e V}{W_k / A} \cdot R_k. \quad (11)$$

Множитель  $mz$  в (11) позволяет доводить шаг иона за один оборот на конечном радиусе до величины 0,5-1 см, что практически делает проблему вывода частиц из камеры ускорителя элементарной.

5. Предельная интенсивность пучка в кольцевом циклотроне с жесткой фокусировкой по эффекту поперечного пространственного заряда будет значительно превышать предельную интенсивность циклотрона. Отношение этих предельных интенсивностей

$$i_{\text{ж.п.}} / i_{\text{п.}} = \frac{Q_1 \cdot \Delta Q}{Q_2^2} \quad (12)$$

где  $Q_1, Q_2$  — соответствующие частоты аксиальных колебаний кольцевого и обычного циклотрона. Так как в обычных циклотронах  $Q_2 \leq 0,1$ , то при  $Q_1 > 1$  и  $\Delta Q_1 \geq 0,1$  из отношения (12) следует, что интенсивность внутреннего пучка в циклотроне с жесткой фокусировкой по крайней мере на порядок может превышать интенсивность в циклотроне. В настоящее время основным ограничивающим интенсивность фактором для такого ускорителя будет являться интенсивность инжектора.

6. Для уменьшения кольцевой зоны магнитного поля возможен вариант ускорителя с повторным циклом ускорения. Если выведенный из ускорителя пучок ионов с зарядом  $z_1$  дополнительно ионизировать до заряда  $z_2$ , то при условии

$$\frac{z_2}{z_1} \approx \frac{R_k}{R_u} \quad (13)$$

возможен второй цикл ускорения без перестройки магнитного поля с общим увеличением энергии за оба цикла на один нуклон в  $\chi^4$  раз. Дополнительная ионизация после первого цикла ускорения осуществляется при прохождении пучком твердой мишени, установленной на радиусе инжекции, как показано на рис. 2, которая не вызывает заметного рассеяния. На рис. 1 приведена зависимость равновесного заряда от энергии иона для различных ионов /6/. При двух циклах, наряду с возможностью ускорять ионы урана, существенно понижается энергия инжекции.

При распределении зарядов после прохождения мишени по кривой Гаусса число ионов, имеющих равновесный заряд, составляет не менее 10-20%.

Ниже в таблицах I и II приведены основные параметры двух возможных ускорителей многозарядных ионов на базе кольцевого циклотрона с жесткой фокусировкой, а на рис.2 показана схема каскадного ускорения.

Из приведенных таблиц видны возможности ускорителей, а также масштабы этих сооружений. Основным дальнейшим критерием при выборе параметров для такого типа ускорителей будут, по-видимому, являться экономические соображения.

Существенное различие требований, которые предъявляются к ускорителям, предназначенным для исследований в области медицины и биологии (400-500 Мэв/нуклон при интенсивности 0,1 мка) по сравнению с исследованиями в области сверхтяжелых элементов (6-10 Мэв /нуклон при интенсивности 10-20 мка) приводит к целесообразности разделения этих задач по типам ускорителей. Если для первой задачи весьма близким к оптимальному решению является использование синхрофазатрона с жесткой фокусировкой и накопительным кольцом (типа "Омнитрон"), то вторая задача более оптимально решается ускорителями циклотронного типа.

## Литература

1. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, Ю.В.Лобанов, В.И.Кузнецов и др. Атомная энергия, 17, 310(1984).
2. W.D. Myers, J.W.Swiatecki. Nuclear Phys., 81, 1,(1966).
3. The Omnitron: a Multipurpose Accelerator, UCRL-11746,(1964).
4. Д.П.Василевская, А.А.Глазов, и др. Атомная энергия, 8, 189(1960).
5. A. Ghiorso, R.M.Main, B.H.Smith. Trans. on Nuc. Sci., 13, 4, 280(1966).
6. И.С.Дмитриев, В.С.Николаев, ЖЭТФ, 47, 615(1964).

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 июля 1987 года.

ТАБЛИЦА I

ИОН	$R_u$ [М]	$R_k$ [М]	$z$	$\frac{z}{\Lambda}$	$U$ [МВ]	$\frac{W_u}{\Lambda}$ [ $\frac{МэВ}{НУК}$ ]	$\frac{W_k}{\Lambda}$ [ $\frac{МэВ}{НУК}$ ]	$H_u$ [эс]	$H_k$ [эс]	$i_{об}$ [Мэч]	$q$	$N$	$\epsilon$	$\sigma_{га}$	$Q_z$	$Q_r$	$i_0$ [Мэч]
$Ar_{40}$	1,0	5,0	+3	0,075	4,47	0,335	8,53	III4I	II242	I,276	I2						
$Kr_{84}$	1,0	5,0	+5	0,0595	4,79	0,285	7,25	I2960	I3060	I,178	I3	4	0,5	0,436	I,2	I,08-I,09	I5,3I4
$Xe_{136}$	1,0	5,0	+7	0,053	4,64	0,246	6,24	I35I7	I3606	I,094	I4						
$Cd_{138}$	1,0	5,0	+9	0,057	5,0	0,285	7,24	I3530	I3650	I,178	I3						

6

ТАБЛИЦА II

ИОН	$R_u$ [М]	$R_k$ [М]	$z$	I ЦИКЛ								2 ЦИКЛ								$i_0$ [Мэч]
				$\frac{z}{\Lambda}$	$U$ [МВ]	$\frac{W_u}{\Lambda}$ [ $\frac{МэВ}{НУК}$ ]	$\frac{W_k}{\Lambda}$ [ $\frac{МэВ}{НУК}$ ]	$H_u$ [эс]	$H_k$ [эс]	$i_{об}$ [Мэч]	$q$	$z$	$\frac{z}{\Lambda}$	$\frac{W_u}{\Lambda}$ [ $\frac{МэВ}{НУК}$ ]	$\frac{W_k}{\Lambda}$ [ $\frac{МэВ}{НУК}$ ]	$H_u$ [эс]	$H_k$ [эс]	$i$ [Мэч]	$q$	
$Kr_{84}$	0,7	2,09	+7	0,0833	I,66	0,138	I,24	9I86	9232	I,168	39	+2I	0,25	I,24	II,16	9I86	9232	3,504	I3	45,55
$Xe_{136}$	0,7	2,09	+9	0,0682	I,48	0,10I	0,9I	96I4	9662	I,00I	45	+27	0,205	0,9I	8,19	96I4	9662	3,003	I5	45,04
$Cd_{138}$	0,7	2,09	+10	0,0633	I,42	0,090	0,8I4	98I4	9863	0,949	48	+30	0,190	0,8I4	7,33	98I4	9863	2,847	I6	45,55
$U_{238}$	0,7	2,09	+13	0,0546	I,48	0,08I	0,73	I0757	I08II	0,897	5I	+39	0,164	0,73	6,57	I0757	I08II	2,69I	I7	45,75

II

$$N=4; \quad \epsilon=0,7; \quad \sigma_{га}=0,638;$$

$$Q_z=I,2; \quad Q_r=I,10+I,II;$$

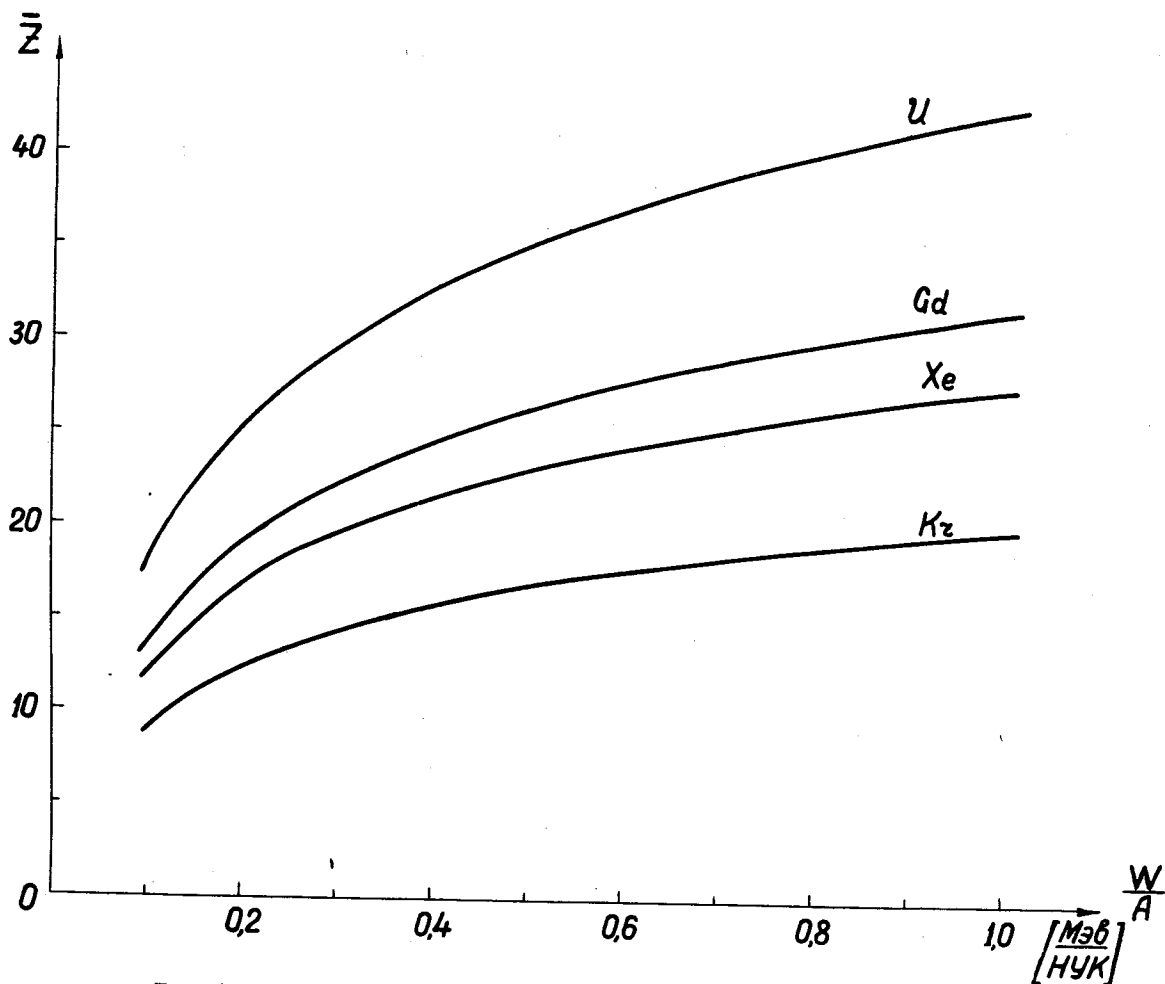


Рис. 1. Равновесный заряд ионов после прохождения твердой мишени.

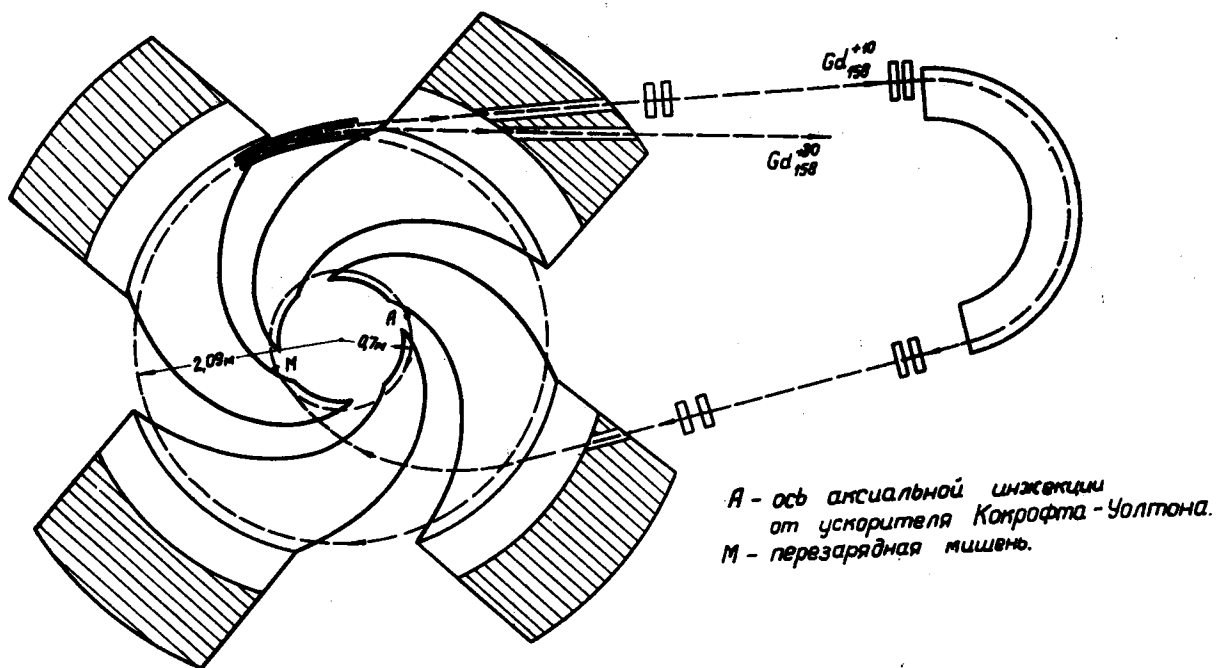


Рис. 2. Схема двухциклового ускорения многозарядных ионов в кольцевом циклотроне.