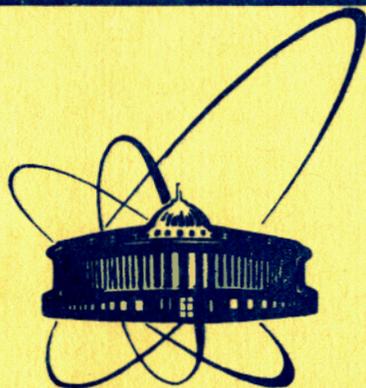


83-285



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

У092/83

8/8-83

P9-83-285

Й.Тучек*, В.Бейшовец*, В.П.Дмитриевский,
В.В.Кольга, З.Трейбал*

ПЕРСПЕКТИВЫ УСКОРЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ У-120М

*Институт ядерной физики ЧСАН. Ржеж, ЧССР.

1983

ВВЕДЕНИЕ

Изохронный циклотрон У-120М^{1/1} работает в Институте ядерной физики ЧСАН с 1978 года. Его основные параметры, по данным на конец 1982 года, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ионы	p	d	α	${}^3\text{He}^{++}$
Энергия, МэВ	10÷38	10÷20	20÷40	17÷52
Ток внешнего пучка, мкА	5÷10	5÷10	2÷5	2÷5
$\Delta W/W$	$7\div 10^{-3}$	$7\div 10^{-3}$	$7\div 10^{-3}$	$7\div 10^{-3}$
горизонт.	50	50	50	50
Эмиттанс: /мм·мрад/верт.	25	25	25	25

На пучках ускоренных ионов ведутся эксперименты по ядерной физике, биологии и ботанике, производятся радиоизотопы для медицинских целей и ведутся прикладные исследования, связанные с машиностроением. Проводятся также работы по усовершенствованию конструкции узлов циклотрона и методики настройки режимов ускорения с целью повышения технологической надежности отдельных узлов и улучшения параметров ускоренного пучка.

В табл. 2 приведены основные данные по распределению рабочего времени эксплуатации циклотрона с 1979 года. Часть этого времени отведена модернизации узлов циклотрона и улучшению таких параметров внутреннего и выведенного пучков, как, например, центровка орбит ускоряемого пучка, улучшение его радиального эмиттанта и энергетического разброса, уменьшение потерь пучка на отдельных этапах вывода из ускорительной камеры, отработка методики настройки элементов тракта выведенного пучка и, в конечном счете, повышение интенсивности. Ведутся работы по расширению диапазона пере-

Таблица 2

Год эксплуатации	Рабочее время за год	Эксперимент		Модернизация, улучшение параметров пучка.		Подготовка эксперимента		Аварийный простой	
		ч.	%	ч.	%	ч.	%	ч.	%
1979		40		1730		718		322	
1980	2530	306	12	1184	47	815	28	242	13
1981	2338	404	17	876	38	739	35	285	10
1982	3057	1472	48	551	18		24		9

стройки энергии, в основном в сторону низких энергий, а также по увеличению набора ускоряемых ионов.

В настоящей работе рассматриваются возможные перспективы ускорения в циклотроне У-120М многозарядных ионов при использовании внешней инжекции, разрабатываемой в ИЯФ ЧСАН.

1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПУЧКОВ

Для получения на ускорителе У-120М ионов тяжелых элементов с энергией выше кулоновского барьера необходимо из ионного источника получать ионы с возможно большим зарядом ($z/A \leq 0,5$).

Предел энергии по магнитному полю в циклотроне У-120М составляет $w = 40 \cdot (z/A)^2$ МэВ/н. Предел по аксиальной устойчивости превышает это значение. Для ионов с $0,4 \leq z/A \leq 0,5$ энергия на нуклон составляет $6,6 \leq w \leq 10$ МэВ/н. Таким образом, необходимо использовать для ускорения ядра и высокозарядные ионы, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Элемент	Заряд	Энергия	Интенсивность ионов из источника (ионов/с)	
		z/A	w (МэВ/н)	
N	+ 7	0,5	10	$1,4 \cdot 10^{12}$
O	+ 8	0,5	10	$1,2 \cdot 10^{12}$
Ne	+10	0,5	10	$1 \cdot 10^{12}$
Ar	+18	0,45	8,1	$5,6 \cdot 10^{11}$
Kr	+34	0,405	6,56	$3 \cdot 10^{11}$
Xe	+52	0,394	6,21	$2 \cdot 10^{11}$

Единственной реальной возможностью получения таких ионов является создание системы внешней инжекции и специфического ионного источника, обеспечивающего получение ядер и высокозарядных ионов достаточной интенсивности. Проектом У-120М было предусмотрено создание систем аксиальной инжекции пучка ионов от внешнего источника в центральную область ускорителя для последующего ускорения. Для этого имеются аксиальные отверстия в ядрах электромагнита. В настоящее время в ИЯФ ЧСАН разрабатываются электростатический тракт ввода пучка в центральную область и спиральный инфлектор для поворота пучка в медианную плоскость циклотрона^{/2/}. Процесс ускорения высокозарядных ионов и ядер близок к режиму ускорения дейтронов, который в настоящее время полностью

освоен на У-120М. Возможно плавное уменьшение энергии дейтронов примерно в 2,5 раза. Вывод ускоренных ядер может осуществляться электростатической системой в режиме, примерно соответствующем выводу дейтронов / $U_g \leq 50$ кВ/, с эффективностью около 70%.

2. ИОННЫЙ ИСТОЧНИК

Из существующих в настоящее время источников высокозарядных ионов ^{3/} наиболее разработан и уже используется на ускорителях электронно-лучевой источник EBIS, который был предложен и впервые реализован в ЛВЭ ОИЯИ ^{4/}.

В последние годы этот источник начал разрабатываться во многих лабораториях, имеющих изохронные циклотроны. Существенный прогресс в направлении сокращения времени ионизации, применение сверхпроводящих соленоидов и другие усовершенствования позволили рассматривать EBIS как инжектор для циклотронов.

При токе электронов около 1 А и длине ионизатора 1 м есть возможность получать ядра элементов вплоть до Ne и, может быть, до Ag, в количестве $10^{11}/Z$ в импульсе с временем ионизации около 10 мс. Следовательно, при частоте работы источника 100 Гц можно достичь его интенсивности $\sim 10^{12}$ ядер/с для Ne⁺¹⁰ и $\sim 5,6 \cdot 10^{11}$ - для Ag⁺¹⁸.

Дальнейшие исследования ^{3/} суперкомпрессии электронного пучка положительными ионами позволят существенно уменьшить время ионизации и, возможно, перейти на частоту 1000 Гц, как это запланировано в нескольких проектах ^{5/}.

Интенсивности других источников высокозарядных ионов и ядер тяжелее азота не могут, как видно из обзора ^{3/}, конкурировать с источником EBIS. По своей экономичности электронно-лучевой источник также имеет существенное преимущество перед другими источниками, например, типа ECR.

3. ПОТЕРИ ИОНОВ НА ОСТАТОЧНОМ ГАЗЕ ПРИ УСКОРЕНИИ

При ускорении тяжелых ионов существенное значение приобретают потери интенсивности пучка в результате перезарядки /потери или захвата электронов/ ионов на остаточном газе в процессе ускорения. Если предположить, что остаточный газ азот /оценка будет несколько завышена/, и что давление в камере постоянно, то из работы ^{6/} получим выражение для уменьшения интенсивности пучка в процессе ускорения

$$I/I_0 = \exp[-10^{27} \cdot p \cdot \int_0^{t_k} \sigma(\beta) \cdot \beta \cdot dt], \quad /1/$$

где p - давление в Торр, σ - сечение потерь на перезарядку /см²/, t_k - время ускорения одного иона /с/.

Более удобно для изохронного циклотрона выразить интеграл через энергию иона на нуклон / w /. Тогда получим

$$I/I_0 = \exp\left[-\frac{1,41 \cdot 10^{27} \cdot p}{f_0 \cdot e\bar{V} \cdot \sqrt{E_{op}}} \cdot \frac{A}{Z} \int_{w_H}^{w_K} \sigma(w) \sqrt{w} \cdot dw\right], \quad /2/$$

где E_{op} - 938 МэВ, f_0 - частота обращения иона /Гц/, $e\bar{V}$ - набор энергии единичным зарядом за оборот /МэВ/, w_H , w_K - начальная и конечная энергии иона на нуклон.

Для циклотрона У-120М при потенциале внешнего инжектора $U_{ин.} = 20$ кВ и $z/A = 0,5$ имеем $w_H = 0,01$ МэВ/н, $w_K = 10$ МэВ/н.

$\sigma(w)$ является при данном рассмотрении сечением захвата электрона ядром. Диапазон скоростей ионов для У-120М составляет $v_H = 1,38 \cdot 10^8$ см/с, $v_K = 4,4 \cdot 10^9$ см/с. Для этого диапазона скоростей можно определить $\sigma_c(v)$ с помощью экспериментальных данных и полуэмпирических формул ^{7/}.

Анализ, проведенный в работе ^{7/}, показал, что между сечениями захвата электронов σ_c для ядер с зарядом z и сечением перезарядки протонов $\sigma_c(H^+)$ в этом же газе существуют приближенные соотношения, слабо зависящие от среды, причем при $v \geq 4 \cdot 10^8$ см/с / $w = 0,084$ МэВ/н/ эти соотношения выполняются не только для ядер, но и для тяжелых высокозарядных ионов. Соотношения имеют вид:

$$\sigma_c \approx \sigma_c(H^+) \cdot z^2 \cdot (v/2v_0)^s, \quad /3/$$

где $v_0 = e^2/\hbar = 2,19 \cdot 10^8$ см/с, $s = 1,75$, если $v = /2,5 \div 5/ \cdot 10^8$ и $s = 3$, если $v = /5 \div 20/ \cdot 10^8$ см/с.

Таким образом, по известному значению $\sigma_c(H^+)$ в зависимости от энергии ^{8/}, можно оценить сечения захвата для других ядер и высокозарядных ионов. Проведем расчет для ядер Ne / $z = 10$ / при ускорении в У-120М. В таком случае сечение захвата аппроксимируется двумя зависимостями: $\sigma = 10^{-14}$ см² при $0,01 \leq w \leq 0,12$ МэВ/н и $\sigma = 10^{-14} \cdot 0,12/w^{2,4}$ при $0,12 \leq w \leq 10$ МэВ/н. Подставляя эти сечения в выражение /2/ и принимая $e\bar{V} = 0,1$ МэВ/оборот., $f_0 = 13$ МГц, найдем $I/I_0 = \exp(-5,43 \cdot 10^4 \cdot p)$. Отсюда следует, что при $p = 5 \cdot 10^{-6}$ Торр. $I/I_0 = 0,76$, при $p = 10^{-6}$ Торр. $I/I_0 = 0,95$.

При ускорении ядер аргона / $z = 18$ / показатель экспоненты увеличится примерно в 3 раза и при $p = 10^{-6}$ Торр. $I/I_0 = 0,85$. Проведенные оценки показывают, что для ускорения в У-120М ядер до аргона включительно достаточен вакуум $\sim 10^{-6}$ Торр. Такое значение вакуума при существующей системе откачки в отсутствие газа получается в У-120М.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное рассмотрение показывает, что применение в циклотроне У-120М внешней инжекции и электронно-лучевого источника ионов позволит расширить набор ускоряемых ионов вплоть до ксенона с энергией на нуклон, превышающей кулоновский барьер. Это даст возможность, в принципе, использовать существующие циклотронные лаборатории для проведения ядерно-физических и прикладных исследований на пучках тяжелых ионов путем реконструкции классических циклотронов в изохронный циклотрон У-120М с внешней инжекцией.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Е.Д.Донцу за ряд полезных обсуждений выводов этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аленицкий Ю.Г. и др. Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М., "Наука", 1977, т. 1, с. 154.
2. Бейшовец В. и др. Труды седьмого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1981, т. II, с. 70.
3. Clark D.J. Proc. 9th Intern. Conf. on Cyclotron and their Applications, Caen, 1981, p. 231.
4. Донец Е.Д., Овсянников В.П. ОИЯИ, P7-80-515, Дубна, 1980.
5. Arianer J. et al. IEEE Trans.Nucl.Sci., v. 26, 1979, p.3713; Preprint GSI-P-3-77, Darmstadt, 1977, p. 65.
6. White M.J. et al. Proc. 8th Conf.High Energy Accelerators, Geneva, CERN, 1971, p. 678.
7. Васильев А.А. и др. Труды Радиотехнического института АН СССР, 1975, №22, с. 200.
8. Николаев В.С. ЖЭТФ, 1966, т. 51, вып. 4, с. 1263.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 апреля 1983 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12036	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Д1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Р18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Тучек Й. и др.
Перспективы ускорения тяжелых ионов
в изохронном циклотроне У-120М

P9-83-285

Исследуются возможности ускорения тяжелых высокозарядных ионов в изохронном циклотроне У-120М до энергий $6 \div 10$ МэВ/нуклон. Показано, что применение электронно-лучевого источника и внешней аксиальной инжекции позволит ускорить в циклотроне У-120М ядра до аргона включительно и высокозарядные ионы до ксенона до вышеуказанных энергий. Проведен расчет возможной интенсивности ионных пучков и потерь ядер и ионов на атомах остаточного газа при ускорении в камере У-120М.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Tuchek J. et al.
Prospects of the Heavy Ion Acceleration
on the U-120M Isochronous Cyclotron

P9-83-285

The possibilities of accelerating heavy ions of high charge on the U-120M isochronous cyclotron for $6 \div 10$ MeV/n are considered. It is shown that with the EBIS and axial injection it is possible to accelerate on the U-120M nuclei up to argon and high charge state ions up to xenon with these energies. The calculations of the ion beam intensities and scattering losses of nuclei and ions on atoms in the vacuum chamber during acceleration are performed.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой.