

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P9-87-92

Г.Г.Гульбемян, Б.Н.Гикал

**РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ
ПО МАССАМ УСКОРЯЕМЫХ ИОНОВ
ЦИКЛОТРОНОВ ЛЯР**

1987

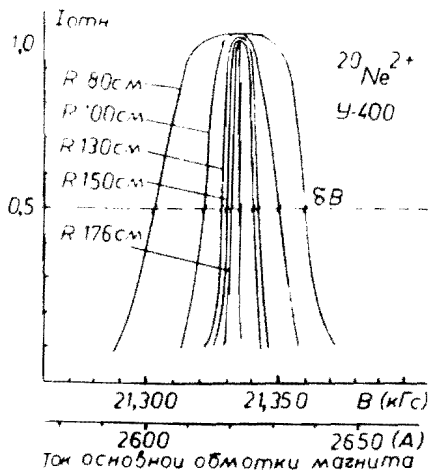
В ионных источниках, применяемых на циклотронах, возможно образование ионов разных элементов с близким отношением массы к заряду. Опыт эксплуатации показал необходимость разделения в процессе ускорения таких ионов. В данной работе проведена оценка возможности разделения в циклотронных системах ионов с близким отношением массы к заряду, приведены экспериментальные данные, полученные на циклотронах У-200 и У-400.

Магнитная система изохронного циклотрона настраивается уровнем возбуждения основной обмотки и радиальными корректирующими катушками в изохронный режим, соответствующий минимальным фазовым потерям пучка при ускорении. Изменение магнитного поля относительно этого состояния соответствует уменьшению интенсивности пучка. Резонансные кривые циклотрона У-400 приведены на рис.1, циклотрона У-200 - в работе^{1/1}. Ширину пика резонансной настройки δB кГс на полувысоте можно оценить по формуле

$$\delta B \approx \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{об}}{n \cdot R^2 \cdot B} \cdot \frac{A}{Z}, \quad //1/$$

B - величина среднего магнитного поля /кГс/, $U_{об}$ - набор потенциала за оборот /МВ/, R - радиус ускорения /м/, n - номер гармоники, A, Z - массовое число и заряд ускоряемого иона.

На рис.2 приведены расчетные и экспериментальные зависимости ширины резонансных настроек /см.рис.1/ магнитного поля циклотронов У-200 и У-400 для различных радиусов ускорения и некоторых типов ионов.



На рис.3 приведены зависимости уровней основного магнитного поля циклотронов У-200 и У-400 и дифференциальные зависимости магнитных полей от токов возбуждения основных об-

Рис.1. Зависимость тока пучка на разных радиусах циклотрона У-400 от тока основной обмотки магнита.

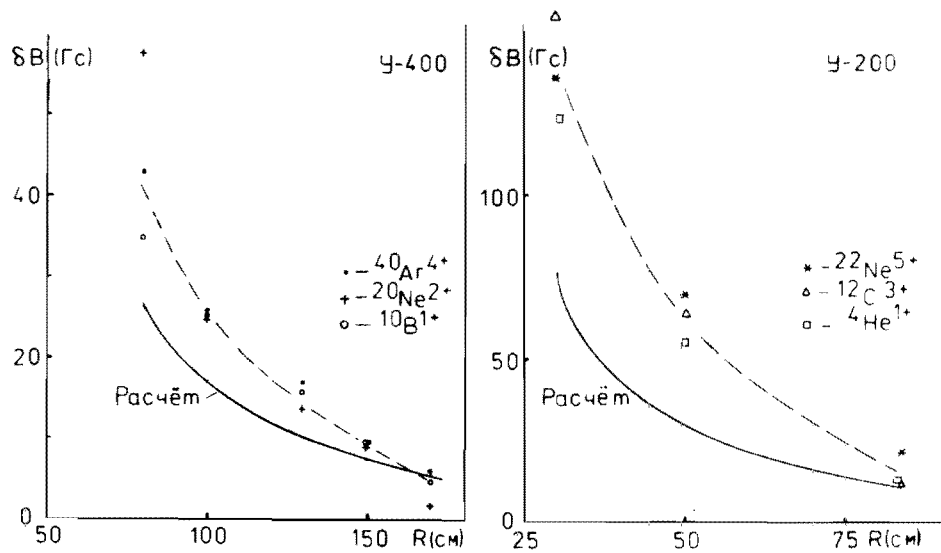


Рис.2. Ширина резонансной настройки магнитного поля У-400 и У-200 /δВ/ в зависимости от радиуса ускорения.

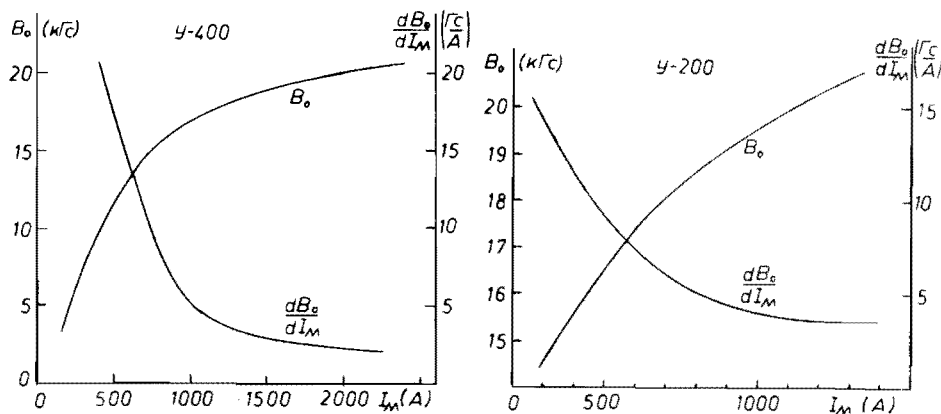


Рис.3. Зависимость магнитного поля в центре циклотронов У-200 и У-400 и дифференциальные зависимости этих полей от токов в основных обмотках.

моток магнитов. Величина возможной рабочей нестабильности магнитного поля циклотрона должна быть в несколько раз меньше ширины резонансной настройки. Из дифференциальных зависимостей можно определить, что необходимая стабильность токов питания основной обмотки должна составлять величину не хуже 10^{-4} , а стабильность питания каждой из 10 пар корректирующих катушек - не хуже $10^{-3/2}$. Следует отметить, что в случае снижения уровня магнитного поля его чувствительность к току питания магнита возрастает в несколько раз, что требует улучшения стабилизации.

Оценим разрешающую способность циклотрона, то есть возможность разделения в процессе ускорения на одной частоте двух пучков ионов с разными отношениями A/Z .

Исходя из циклотронного соотношения

$$V = K \cdot f \cdot \frac{A}{Z}, \quad /2/$$

где f - частота обращения ионов /МГц/, V - среднее магнитное поле в зазоре /кГс/, $K = 0,651213$ - коэффициент. Разделение двух пучков ионов по магнитному полю равно

$$\Delta V = V_1 - V_2 = K \cdot f \left(\frac{A_1}{Z_1} - \frac{A_2}{Z_2} \right). \quad /3/$$

Отсюда можно получить ΔV для ионов, обладающих одинаковым отношением атомного числа к заряду, но отличающихся отношением массы к заряду из-за дефекта масс ядер:

$$\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{\Delta M_1}{M_1} - \frac{\Delta M_2}{M_2} \right) \approx \frac{1}{931,5} \left(\frac{\Delta M_1}{A_1} - \frac{\Delta M_2}{A_2} \right),$$

при условии $V_1, V_2 \approx V$, M_1, M_2 - массы ядер /в МэВ/, $\Delta M_1, \Delta M_2$ - избыток массы ядер по шкале $^{12}\text{C} = 12$ /в МэВ/. Для разделения двух пиков необходимо, чтобы расстояние между пиками было больше ширины каждого пика $\Delta V \geq \delta V$, как показано на рис.5. Разрешающую способность циклотрона по массам можно оценить по следующей формуле:

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{V}{\delta V} \approx \frac{3\pi(BR)^2}{U_{об}} \cdot \frac{Z}{A}. \quad /4/$$

На рис.4 приведены расчетные и экспериментальные зависимости от радиуса ускорения разрешающей способности циклотронов У-200 и У-400.

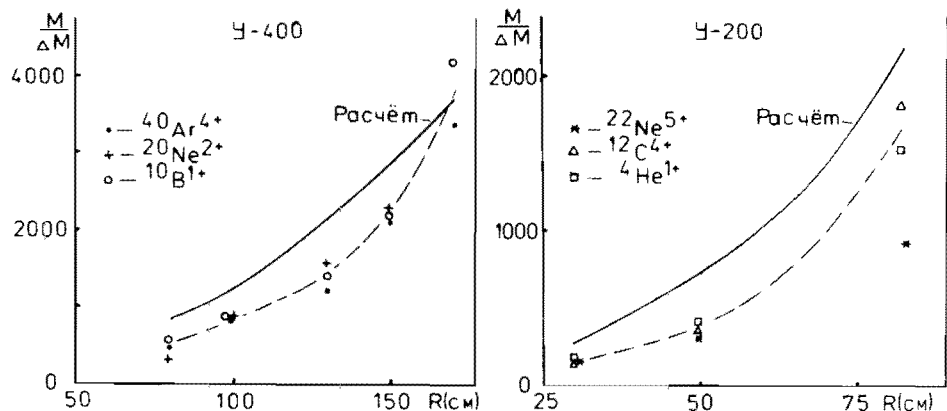


Рис.4. Разрешающая способность циклотронов У-200 и У-400 в зависимости от радиуса ускорения.

На рис.5 приведены характерные зависимости тока пучка на внутреннем пробнике У-400 от уровня магнитного поля при одновременном ускорении $^{40}\text{Ar}^{4+}$ и $^{10}\text{B}^{1+}$. В данном случае величина $\frac{\Delta M_2}{M_2} - \frac{\Delta M_1}{M_1} = 2,2$ МэВ/нуклон.

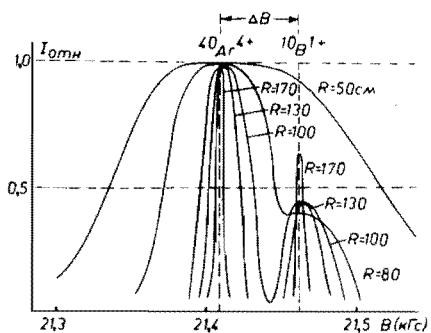


Рис.5. Разделение ионов $^{40}\text{Ar}^{4+}$ и $^{10}\text{B}^{1+}$ при одновременном их ускорении в циклотроне У-400.

В таблице для циклотрона У-400 приведены группы ионов с $\frac{A}{Z} = 7,8,9,10$, их избыток массы на единицу массы - $\frac{\Delta M}{A}$

и разница в избытках масс ядер $(\frac{\Delta M_1}{A_1} - \frac{\Delta M_2}{A_2})/3$. Рамками выделены ионы, которые отделяются друг относительно друга на конечном радиусе ускорения. В случае вывода пучка ионов из циклотрона и транспортировки его на удаленную физическую мишень при помощи системы квадрупольных линз и поворотных магнитов ширина

пика резонансной настройки уменьшается и, следовательно, разрешающая способность всей системы увеличивается для ускорителя У-400 с 3600 до 5400, для ускорителя У-200 с 1500 до 2500.

Таблица

A/Z = 7

	$\frac{\Delta M}{A}$	^7Li	^{14}N	^{21}Ne	^{28}Si	^{35}Cl	^{56}Fe	^{63}Cu	^{70}Ge
^7Li	2,13		1,9	2,4	2,9	3,0	3,2	3,2	3,1
^{14}N	0,20			0,5	1,0	1,0	1,3	1,2	1,2
^{21}Ne	-0,27				0,5	0,8	0,8	0,8	0,7
^{28}Si	-0,77					0,1	0,3	0,3	0,2
^{35}Cl	-0,83						0,3	0,2	0,2
^{56}Fe	-1,08							0,0	-0,1
^{63}Cu	-1,04								0,0
^{70}Ge	-1,01								

A/Z = 8

	$\frac{\Delta M}{A}$	^{16}O	^{24}Mg	^{32}S	^{40}Ar	^{48}Ti	^{56}Fe	^{64}Cu	^{70}Ge
^{16}O	-0,50		0,2	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7
^{24}Mg	-0,56			0,2	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4
^{32}S	-0,81				0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
^{40}Ar	-0,88					0,1	0,2	0,1	0,1
^{48}Ti	-1,01						0,1	0,0	0,0
^{56}Fe	-1,08							-0,1	-0,1
^{64}Cu	-1,02								0,0
^{70}Ge	-1,01								

A/Z = 9

	$\frac{\Delta M}{A}$	^9Be	^{18}O	^{27}Al	^{36}Ar	^{54}Cr	^{54}Fe	^{63}Cu	^{72}Ge
^9Be	1,26		1,5	1,9	2,1	2,3	2,3	2,3	2,3
^{18}O	-0,04			0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0
^{27}Al	-0,64				0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
^{36}Ar	-0,84					0,2	0,2	0,2	0,2
^{54}Cr	-1,05						0,0	0,0	0,0
^{54}Fe	-1,04							0,0	0,0
^{63}Cu	-1,04								0,0
^{72}Ge	-1,01								

A/Z = 10

	$\frac{\Delta M}{A}$	^{10}B	^{20}Ne	^{30}Si	^{40}Ar	^{50}Ti	^{60}Ni	^{70}Ge	^{80}Kr
^{10}B	1,21		1,6	2,0	2,1	2,2	2,3	2,2	2,2
^{20}Ne	-0,35			0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,6
^{30}Si	-0,81				0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
^{40}Ar	-0,88					0,2	0,2	0,1	0,1
^{50}Ti	-1,03						0,0	0,0	-0,1
^{60}Ni	-1,07							-0,1	-0,1
^{70}Ge	-1,01								0,0
^{80}Kr	-0,97								

Применение перезарядки на тонких мишенях при выводе пучка из циклотрона позволяет разделить неразделяющиеся внутри циклотрона пучки ионов вследствие различной кратности перезарядки. Например, неразделяющиеся внутри циклотрона У-400 ионы $^{48}\text{Ti}^{6+}$ и $^{56}\text{Fe}^{7+}$ разделяются при выводе пучка методом перезарядки, так как имеют несопадающие величины кратности перезарядки.

На циклотроне У-300 с электростатическим выводом применение перезарядки в системе транспортировки приводит к разделению после поворотных магнитов неразделяющихся в процессе ускорения ионов $^{14}\text{C}^{3+}$ и $^{14}\text{N}^{3+}/4$.

Высокая избирательная способность к массе и заряду ускоряемых ионов в циклотронных системах позволила на их основе создать установки специально для разделения частиц^{15/}. В таких установках применяются специальные меры для повышения разрешающей способности, вытекающие из формулы^{14/}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гикал Б.Н. и др. ОИЯИ, 9-83-311, Дубна, 1983.
2. Оганесян Ю.Ц. и др. ОИЯИ, 9-11992, Дубна, 1978.
3. Кравцов В.А. Массы атомов и энергии связи ядер. М.: Атомиздат, 1985.
4. Ефремов А.А. и др. - В кн.: Труды девятого Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1984, том 1, с.87.
5. David J.Clark. - In: Tenth International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Michigan, USA, 29 April - 3 May 1984. IEEE, p.534.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

Д9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
ДЗ,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
Д11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
Д7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике глязлых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
Д2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.
Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/	7 р. 75 к.
Д10,11-84-818	Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983	3 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984 /2 тома/	13 р. 50 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра, Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р.
Д13-85-793	Труды XП Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна 1985.	4 р. 80 к.
ДЗ,4,17-86-747	Труды У Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986.	4 р. 50 к.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 февраля 1987 года.

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

Гульбежян Г.Г., Гикал Б.Н.

P9-87-92

Разрешающая способность по массам ускоряемых ионов циклотронов ЛЯР

Рассматривается возможность разделения в процессе ускорения в циклотроне ионов, различающихся отношением массы к заряду. Расчетным и экспериментальным путем показано, что разрешающая способность по массам ускоряемых ионов циклотрона У-400 составляет около 3600, циклотрона У-200 - около 1500. Применение перезарядки на тонких мишенях для вывода пучка из циклотрона дополнительно позволяет разделять пучки ионов, не разделяющиеся внутри ускорителя вследствие разной кратности перезарядки.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод авторов

Gulbekjan G.G., Gikal B.N.

P9-87-92

Mass Resolution of Accelerated Ions of LNR Cyclotrons

The possibility of separating cyclotron accelerated ions with different mass-to-charge ratios is considered. The calculations and experiment have demonstrated that mass resolution of accelerated ions for the U-400 cyclotron is approximately 3600; for U-200 cyclotron, approximately 1500. Ion beams which have not been separated in the cyclotron may be separated during beam extraction by means of the charge exchange method.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987