

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P13-85-256

Н.И.Тарантин

НЕКОТОРЫЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ  
ПО МАСС-СЕПАРАЦИИ,  
ПРЕЦИЗИОННОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ  
И УСКОРЕНИЮ РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ

Направлено на 4-й Всесоюзный семинар  
"Программа экспериментальных исследований  
на мезонной фабрике ИЯИ АН СССР"  
/24-27 апреля 1985 г., Звенигород/

1985

Сильноточные ускорители заряженных частиц - протонов, тяжелых ионов и других, являются эффективным средством получения радиоактивных ядер в широком диапазоне значений порядкового номера  $Z$  и массового числа  $A$  в количествах, достаточных для их детального изучения, а также для использования в качестве бомбардирующих ускоренных частиц с целью получения новых экзотических ядер. В настоящем сообщении излагаются предложения по созданию на пучке заряженных частиц сильноточного ускорителя установок, предназначенных для изучения и ускорения радиоактивных продуктов ядерных реакций.

## 1. МАСС-СЕПАРАТОР ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Для выделения и идентификации исследуемых радиоактивных нуклидов широко применяются быстродействующие электромагнитные масс-сепараторы, установленные непосредственно на пучках бомбардирующих частиц. Эффективное использование масс-сепаратора во многом зависит от магнитного анализатора сепаратора - от его разрешающей способности, акцептанса, оптической схемы трансмиссии ионов. Один из возможных вариантов магнитного анализатора масс-сепаратора с достаточно хорошими указанными выше характеристиками рассматривается ниже.

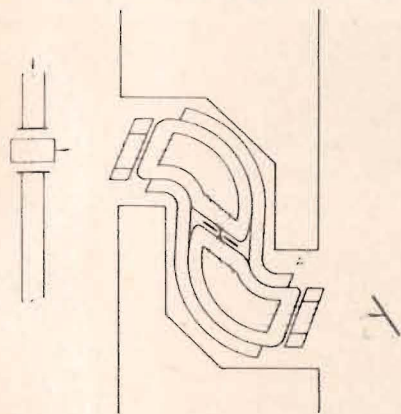


Схема магнитного анализатора масс-сепаратора на пучке заряженных частиц.

Схема магнитного анализатора масс-сепаратора в линии с сильноточным ускорителем заряженных частиц изображена на рисунке. Магнитный анализатор  $A$  содержит два двухполюсных магнита, отклоняющих пучок ионов в разные стороны. В радиальном сечении пучка /в горизонтальной плоскости/ используется общее преобразование "точка в точку" ( $\gamma_a = 0$ ) с промежуточным фокусом, в аксиальном сечении /по вертикали/ - преобразование "параллели в точку" ( $Z_z = 0$ ). Схема преобразования пучка ионов предполагает использование сильноточного плазменного источника ионов  $S$  уни-



версального назначения с эмиссионным отверстием в виде вертикальной щели, формирующей клиновидный пучок. При использовании термоионизационного источника с предпочтительным в этом случае круглым эмиссионным отверстием необходимо преобразование начального конусообразного пучка ионов в клиновидный с помощью электростатических линз.

Двухполюсные магниты имеют однородное поле, простое для формирования и с устойчивой топографией при изменении магнитной индукции. Аксиальная фокусировка обеспечивается краевым полем наклонных границ магнитов. Магнитный анализатор имеет следующие параметры:  $L_{11} = L_{22} = 2,00R_0$ ,  $L_{21} = L_{12} = 0,50R_0$ ,  $\Phi_1 = \Phi_2 = 90^\circ$ ,  $\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 23,80^\circ$ ,  $\epsilon_{21} = \epsilon_{12} = -43,15^\circ$ . Здесь использованы общепринятые обозначения с дополнительным индексом, указывающим порядковый номер магнита в анализаторе. Магнитный анализатор имеет следующие значения основных характеристик: коэффициент дисперсии анализатора  $Y_\delta = Y_{\delta 2} - Y_{y 2} Y_{\delta 1} = 2 Y_{\delta 1} / Y_{y 1} = 7,76$ , коэффициент относительной дисперсии, определяющий максимально достижимую разрешающую способность,  $Y_\delta / Y_y = Y_\delta / |Y_{y 2} Y_{y 1}| = 2 Y_{\delta 2} = 7,76$ , коэффициент удельной относительной дисперсии, т.е. относительной дисперсии, приходящейся на единицу длины пути ионов в анализаторе,  $Y_\delta R_0 / Y_y L_{SC} = 0,95$ . Заметим, что для классического полукругового магнитного анализатора с однородным полем приведенные выше характеристики хуже и равны соответственно 2,00; 2,00 и 0,64.

При относительно небольшом радиусе кривизны оптической оси анализатора  $R_0 = 75$  см масс-сепаратор имеет дисперсию, равную 29,1 мм на 1% изменения массы ионов. Максимальная разрешающая способность масс-сепаратора, ожидаемая после устранения aberrаций, должна равняться  $R_{\max} = 10^4$  при ширине щели источника 1 мм. Устранение aberrаций второго порядка обеспечивается кривизной четырех границ двухполюсных магнитов, эффективно действующей из-за сильного различия параметров  $L_1$  и  $L_2$ ; устранение aberrаций третьего порядка достигается дополнительными плоскими витками с октупольным полем, расположенными на плоских поверхностях полюсов магнитов.

Высокая разрешающая способность анализатора обеспечит выделение продуктов реакций с низким выходом без существенных примесей продуктов с высоким выходом. Этому должно способствовать диафрагмирование промежуточного фокуса пучка ионов.

Высота стигматического фокуса пучка ионов на приемнике масс-сепаратора, определяемая угловым разбросом начальных траекторий ионов в аксиальном сечении, должна составить  $\Delta z_2 = |Z_{22} Z_{\beta 1}| \cdot R_0 \Delta \beta_1 = 1,96 R_0 \cdot \Delta \beta_1 = 0,7$  см при  $\Delta \beta_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ , характерном для плазменного источника с эмиссионным щелевым отверстием.

Входной зрачок магнитного анализатора определяется в радиальной плоскости шириной апертуры вакуумной камеры в наиболее широком месте пучка, лежащем при  $\phi = 43^\circ$ , в аксиальном сечении - высотой апертуры камеры на входной границе анализатора. При ширине апертуры вакуумной камеры  $\Delta r = 0,5 R_0$  радиальный угловой

аксептанс масс-сепаратора равен  $\Delta \alpha_1 = 14^\circ$ , что достаточно для трансмиссии сильноточных пучков с большим начальным угловым раствором траекторий.

Два двухполюсных электромагнита анализатора выполнены с единым магнитопроводом, но с отдельными обмотками возбуждения. Чередование полярностей полюсов магнитов дает возможность снизить поток магнитной индукции через боковые стойки магнитопровода, а следовательно, снизить толщину этих стоек за счет усиления потока через верхнюю и нижнюю балки. Для нормализации распределений краевых полей на входе и выходе магнитного анализатора установлены магнитные шунты. S-образное размещение магнитов в толще защиты препятствует проникновению излучений из зоны мишени в зону приемника С и спектрометрической аппаратуры.

## 2. МАСС-СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ АТОМНЫХ МАСС ПРОДУКТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Известны два класса масс-спектрометров, применяемых в линии с ускорителями для непосредственного измерения атомных масс радиоактивных нуклидов, образующихся в ядерных реакциях. В первом из них обеспечивается относительно невысокая разрешающая способность, позволяющая измерять только разности масс изотопов одного химического элемента. Выделение химического элемента производится в результате селективной поверхностной ионизации только щелочных элементов. Второй класс масс-спектрометров обеспечивает разрешающую способность, достаточную для измерения разностей масс изобаров различных химических элементов.

В настоящее время планируется создание масс-спектрометров для применения в линии с ускорителями с целью измерения дублетов не только изотопов и изобаров, но и изомеров одних и тех же нуклидов. Наряду с классическими статическими анализаторами с фокусировкой ионов по скорости, состоящими из двухполюсного магнита и электростатического deflectора, предполагается использовать динамические масс-спектрометры - радиочастотный и ионно-циклотронного резонанса, уступающие статическим масс-спектрометрам по чувствительности вследствие импульсного характера работы, но превосходящие их по разрешающей способности в силу использования многих оборотов траектории иона в магнитном поле.

Для измерения атомных масс радиоактивных нуклидов в линии с масс-сепаратором может быть применен статический многооборотный масс-спектрометр с фокусировкой ионов по скорости, предложенный в<sup>1</sup>. Масс-спектрометр состоит из двухполюсного электромагнита с полем тороидального типа  $V_\phi = V_0 r_E / r$  в клиновидном междуполосном промежутке и из электростатического цилиндрического зеркала с полем  $E_r = -E_0 r_E / r$ , расположенных друг против



друга и имеющих общую ось симметрии. Ионы вводятся в электростатическое зеркало под углом  $45^\circ$  к его оси и после отклонения на угол  $90^\circ$  электрическим полем направляются в магнитный анализатор. В поле магнитного анализатора ионы отклоняются на угол  $270^\circ$ , дополнительный до полного оборота, и после этого повторно вводятся в электростатическое зеркало, но по новой траектории, смещенной относительно начальной. Такое движение повторяется несколько раз, после чего ионы попадают на коллектор. Совместное действие магнитного и электрического полей обеспечивает фокусировку ионов по скорости и многократное суммирование диспергирования ионов по массам, производимого магнитным анализатором.

Рассмотрение особенностей магнитного анализатора с полем тороидального типа, а именно наклонных входной и выходной границ поля и их действий в радиальном и азимутальном сечениях пучка заряженных частиц, дается в параксиальном и линейном приближениях в работе <sup>12/</sup>.

Конечное значение дисперсии магнитного анализатора по массам вдоль нормали к оси пучка ионов определяется формулой  $Y_{\delta} \Gamma_{\max} = 1,39 \Gamma_{\max}^2$ , где  $\Gamma_{\max}$  - максимальное удаление оси пучка от оси симметрии поля, эквивалентное радиусу кривизны оптической оси в анализаторах с круговой равновесной орбитой,  $\pi$  - число проходов ионами через магнит масс-спектрометра.

При  $\Gamma_{\max} = 30$  см и  $\pi = 10$ , реализуемых в масс-спектрометре с габаритными размерами анализатора  $100 \times 100$  см, дисперсия равняется 42 мм на 1% изменения массы ионов. При ширине виртуального источника, в качестве которого используется фокус пучка ионов масс-сепаратора, равной 0,1 мм, ожидаемая после устранения aberrаций второго и третьего порядков разрешающая способность масс-спектрометра равняется  $R_{\max} = 10^5$ . Такой разрешающей способности достаточно для измерения разности масс изомеров нуклидов одного сорта, равной 0,1 МэВ при  $A = 10$  и 1 МэВ при  $A = 100$ .

Устранение геометрических aberrаций второго и третьего порядков масс-спектрометра осуществляется обмотками с секступольным и октупольным полями, удобно располагаемыми в широкой части клиновидного междуполусного промежутка и эффективно действующими на ионы широкого в радиальном сечении и сфокусированного в азимутальном сечении пучка в месте расположения корректирующих обмоток.

### 3. ЦИКЛОТРОН ДЛЯ УСКОРЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ НУКЛИДОВ

Ускорение радиоактивных нуклидов с аномальным соотношением протонов и нейтронов в ядре представляет интерес для получения в реакциях ядер вблизи границ их нуклонной устойчивости, и в том числе вблизи границы существования элементов. Из-за ограниченного количества радиоактивных нуклидов, получаемых в ядерных реакциях, к источнику ионов и ускорителю предъявляются требова-

ния высокой их эффективности. Это делает предпочтительным источник однозарядных или двухзарядных ионов с эффективностью, измеряемой десятками процентов, и ускоритель, предназначенный для ускорения малозарядных ионов.

Относительно компактный классический циклотрон для ускорения тяжелых ионов с малым начальным зарядом, использующий обдирку ионов в процессе ускорения, рассмотрен в работе <sup>13/</sup>. В таком циклотроне однозарядные или двухзарядные ионы ускоряются в резонансе с третьей или пятой низшей гармоникой ускоряющего напряжения и по достижении определенной энергии проходят через тонкую обдирочную фольгу, увеличивая свой заряд в три или пять раз. Ободраные ионы продолжают ускорение в резонансе с основной частотой ускоряющего напряжения и по достижении конечного радиуса выводятся из циклотрона. Известные трудности обхода ионами источника или инфлектора после сокращения радиуса орбиты в результате обдирки, а также трудности, обусловленные прецессией в осесимметричном поле смещенного после обдирки центра траекторий ионов, исключаются применением плоскосимметричного поля. Плоскость симметрии поля совпадает с плоскостью раздела дуантов, а само поле уменьшается по мере удаления от этой плоскости для обеспечения аксиальной фокусировки. В таком плоскосимметричном поле обдирка ионов в промежутке между дуантами вызывает простое смещение центра в плоскости раздела, не препятствующее ускорению ионов и нужное вместе с преднамеренным смещением орбиты для обхода источника или инфлектора. Преднамеренное смещение центра траекторий обеспечивается или небольшой асимметрией магнитного поля, создаваемой дополнительными токовыми обмотками, или асимметрией ускоряющего напряжения на дуантах.

Вторая гармоническая составляющая магнитного поля вызывает всего лишь практически не опасный резонанс второго порядка в радиальном движении ионов. Резонансы связи, проявляющиеся в аксиальном движении ионов, также не представляют практической опасности из-за сильного различия частот радиальных и аксиальных отклонений ионов от равновесной орбиты.

Рассмотренный в <sup>13/</sup> вариант классического циклотрона может быть дополнительно усовершенствован введением линейной вариации магнитного поля, обеспечивающей изохронное ускорение ионов на одном из двух этапов ускорения или квазиизохронное ускорение на обоих этапах. Требования к ускоряющему напряжению при этом снижаются при сохранении аксиальной фокусировки.

Необходимые размеры циклотрона определим, исходя из примера возможного физического использования ускоренных радиоактивных нуклидов. Для получения наиболее стабильных нуклидов из области сверхтяжелых элементов представляет интерес нейтронообогащенный изотоп серы-50. Этот изотоп серы должен иметь достаточно большое сечение образования в реакциях фрагментации тяжелых ядер под действием энергетических ускоренных заряженных частиц в силу проявления стабилизирующего действия оболочки  $N = 28$ . Для осу-



щесвления реакции  $^{252}\text{Cf} + ^{50}\text{S} = ^{298}\text{114} + 4n$  требуется энергия ионов серы не выше 220 МэВ. Ионы серы-50 с такой энергией могут быть получены в результате начального ускорения двухзарядных ионов, их обдирки и ускорения шестизарядных ионов на циклотроне с радиусом полюсов полтора метра. Необходимая для удаления шести электронов энергия ионов серы составляет 7 МэВ и приобретается двухзарядными ионами на радиусе 75 см.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тарантин Н.И. Авторское свидетельство СССР, №1076983 от 20.04.82. Бюл. ОИ 1984, №8, с.182.
2. Тарантин Н.И. ЖТФ, 1983, 53, с.2203.
3. Тарантин Н.И. АЭ, 1976, 29, с.122.

Рукопись поступила в издательский отдел  
10 апреля 1985 года.

### Вниманию организаций и лиц, заинтересованных в получении публикаций Объединенного института ядерных исследований

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.



В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "Краткие сообщения ОИЯИ". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "Сообщений ОИЯИ", статьи, вошедшие в сборник, имеют, как и другие издания ОИЯИ, статус официальных публикаций.

Сборник "Краткие сообщения ОИЯИ" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the JINR Communications and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

Physics of elementary particles and atomic nuclei.  
Theoretical physics.  
Experimental techniques and methods.  
**Accelerators.**  
Cryogenics.  
Computing mathematics and methods.  
Solid state physics. Liquids.  
Theory of condensed matter.  
Applied researches.

Being a part of the JINR Communications, the articles of new collection like all other publications of the Joint Institute for Nuclear Research have the status of official publications.

*JINR Rapid Communications* will be issued regularly.



Тарантин Н.И.

P13-85-256

Некоторые предложения по масс-сепарации, прецизионной масс-спектрометрии и ускорению радиоактивных нуклидов

Предлагается вариант магнитного анализатора масс-сепаратора на пучке ускоренных заряженных частиц. Рассматриваются возможности применения статического многооборотного масс-спектрометра с фокусировкой ионов по скорости на пучке сепарированных радиоактивных нуклидов для непосредственного измерения их масс. Рассматриваются возможности относительно компактного циклотрона с варьированным плоскосимметричным полем для ускорения выделенных масс-сепаратором радиоактивных нуклидов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Tarantin N.I.

P13-85-256

Some Proposals on Mass-Separation,  
Precision Mass-Spectrometry  
and Acceleration of Radioactive Nuclides

A possible variant of the magnetic analyzer of the mass separator on the accelerated charge particle beam is considered. The possibility of using static multirevolution mass spectrometer with velocity focusing on the beam of mass separate radioactive nuclides for direct mass measurement is considered. The possibilities of using relatively small cyclotron with variation of the plane symmetric magnetic field for the acceleration of mass separate radioactive nuclides is considered.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985