

Д-321

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

7 - 7011

ДЕМЬЯНОВ Александр Васильевич

МАГНИТНЫЙ АНАЛИЗАТОР  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МАСС-СЕПАРАТОРА  
И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ  
ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПУЧКЕ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Специальность 01.04.01 - экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1973

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук Н.И.Тарантин

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук В.С.Золотарев,  
кандидат физико-математических наук А.Ф.Малов.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физи-  
ко-технический институт АН УССР (г.Харьков).

Автореферат разослан " " 1973 года  
Защита диссертации состоится " " 1973 го-  
да в " " часов на заседании Объединенного Уче-  
ного совета Лаборатории нейтронной физики и лабора-  
тории ядерных реакций Объединенного института ядерных  
исследований (г. Дубна).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ОИЯИ.

Отзывы и замечания просим направлять по адресу:  
г. Дубна, Московской области, Объединенный институт  
ядерных исследований. Ученому секретарю Объединен-  
ного Ученого совета ЛЯР и ЛНФ.

Ученый секретарь Совета

Э.Н.Каржавина

" " 1973 года

7 - 7011

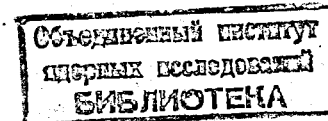
ДЕМБЯНОВ Александр Васильевич

МАГНИТНЫЙ АНАЛИЗАТОР  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МАСС-СЕПАРАТОРА  
И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ  
ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПУЧКЕ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Специальность 01.04.01 -- экспериментальная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Во многих задачах ядерной физики важным и сложным этапом исследования является идентификация радиоактивных продуктов ядерных превращений. Это обусловлено, в частности, тем, что характерной чертой ядерных реакций под действием, например, энергичных протонов или ускоренных тяжелых ионов является разнообразие протекающих процессов, приводящих к образованию широкого спектра радиоактивных ядер. По мере удаления от области стабильности в сторону нейтронного дефицита или избытка продукты ядерных реакций имеют все более короткие времена жизни, а выход их уменьшается <sup>/1/</sup>. Помимо идентификации неизвестных нуклидов не менее важной задачей является селекция продуктов ядерных реакций. Это необходимо, в частности, для уменьшения фона побочных излучений при изучении радиационных свойств исследуемых ядер.

Эти особенности современных задач ядерной физики обусловили развитие новых эффективных и быстрых методов идентификации и селекции продуктов ядерных реакций с целью изучения свойств ядер в процессе образования <sup>/2-8/</sup>. Для расширения возможностей исследования ядер, образующихся в реакциях под действием ускоренных тяжелых ионов (как некоторых изотопов уже известных элементов - нейтроноизбыточных и нейтронодефицитных, так и новых элементов), в дополнение к существующим в ЛЯР методам необходимо было разработать методику надежной и быстрой идентификации по массам продуктов

ядерных реакций и непрерывной селекции их в широком диапазоне массовых чисел.

Одним из таких методов является способ электромагнитной масс-сепарации продуктов реакций на пучке, в котором применяются ионные источники с системой быстрой доставки продуктов ядерных реакций, магнитные и электрические анализаторы, обеспечивающие необходимую фокусировку и сепарацию пучка ионов <sup>3-8/</sup>.

Создание электромагнитного масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов включает в себя:

1. Выбор типа и расчет магнитного анализатора.
2. Изготовление магнитного анализатора, измерение магнитного поля, исследование фокусирующих свойств анализатора.
3. Исследование диффузии продуктов ядерных реакций как одного из возможных способов быстрой доставки продуктов реакций в ионный источник.
4. Исследование поведения ультрамалых количеств радиоактивных атомов в газоразрядном ионном источнике для выяснения специфики работы в режиме на пучке. Выполнению этих работ и посвящена настоящая диссертация.

Диссертация состоит из четырех глав.

В главе I приведен обзор литературы по изучаемому вопросу с детальным анализом возможностей метода электромагнитного масс-сепаратора с ионным источником на пучке.

В главе II рассмотрены электрические и магнитные анализаторы, которые применяются в масс-сепараторах. На основе анализа для масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов выбран магнитный анализатор секторного типа с однородным магнитным полем, магнитными экранами на входе и выходе ионов и неортогональным выходом осевой траектории. Такой анализатор удовлетворяет основным требованиям поставленной задачи. Он обеспечивает получение стигматической фокусировки пучка ионов, необходимость которой обусловлена применением счетчиков малых размеров, позволяет получить относительно большую дисперсию, что необходимо для расположения счетчиков ядерных излучений в камере масс-сепаратора непосредственно на фокальной плоскости. Кроме того, такой анализатор характеризуется простотой изготовления плоскопараллельных полюсных наконечников и формирования основного и краевых полей, неизменностью расчетного поля в широком диапазоне индукций.

В главе III диссертации рассматривается движение ионов в однородном поле, как в медианной плоскости, так и в аксиальном сечении.

Расстояние  $y_2$  произвольного луча от оси  $x_2$  в медианной плоскости в точке фокуса первого порядка ( $x_2 = l_2$ ) для параксиального пучка частиц ( $\alpha_1 \ll 1, \beta_1 \ll 1$ ), испускаемых источником малых размеров, ( $y_1 \ll 1, z_1 \ll 1$ ) с точностью до членов второго порядка малости по  $y_1$ ,

$z_1, a_1, \beta_1, \gamma, \delta$  дается выражением:

$$y_2 = y_1 A_y + a_1 A_a + \gamma A_\gamma + \delta A_\delta + y_1^2 A_{yy} + y_1 a_1 A_{ya} + \\ + y_1 \gamma A_{y\gamma} + y_1 \delta A_{y\delta} + a_1^2 A_{aa} + a_1 \gamma A_{a\gamma} + a_1 \delta A_{a\delta} + \gamma^2 A_{\gamma\gamma} + \\ + \gamma \delta A_{\gamma\delta} + \delta^2 A_{\delta\delta} + z_1^2 A_{zz} + z_1 \beta_1 A_{z\beta} + \beta_1^2 A_{\beta\beta}.$$

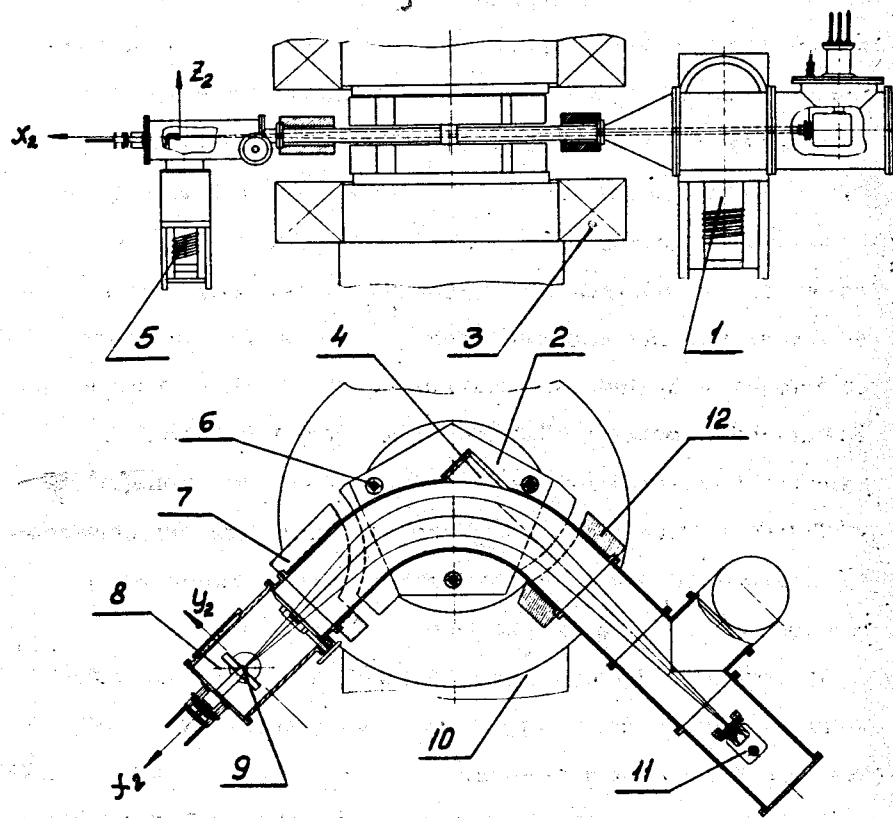


Рис. 1. Схематический чертеж масс-сепаратора. 1 - насос; 2 - полюсный наконечник; 3 - катушка магнита; 4 - камера; 5 - насос; 6 - опора; 7 - магнитный экран; 8 - фокальная плоскость; 9 - детектор; 10 - ярмо магнита; 11 - ионный источник; 12 - магнитный экран.

Здесь  $\delta = \frac{M - M_0}{M}$ ,  $\gamma = \frac{E - E_0}{E_0}$ , где  $M_0$  и  $E_0$  - масса и энергия иона, движущегося по осевой траектории (см. рис. 1).

Рассмотрение движения заряженных частиц в аксиальном сечении в представлении, что действие рассеянного поля реального магнита с экранами на заряженную частицу эквивалентно действию тонкой линзы, расположенной на эффективной границе магнита, позволяет существенно упростить расчетные формулы и дает простой метод определения изображения в вертикальной плоскости с помощью законов геометрической оптики не только для точечного, но и для протяженного по вертикали источника<sup>/9/</sup>.

Расстояние  $z_2$  в аксиальном направлении произвольного луча от оси  $x_2$  в точке фокуса первого порядка с точностью до членов первого порядка по  $z_1$  и  $\beta_1$  определяется выражением:

$$z_2 = z_1 V + \beta_1 W, \quad (2)$$

где

$$V = V_0 + \frac{c}{R} V_c + a_1 V_a, \quad (3) \quad W = W_0 + \frac{c}{R} W_c + a_1 W_a, \quad (4)$$

а  $V_0, V_c, V_a$  и  $W_0, W_c, W_a$  сравнительно просто выражаются через основные параметры магнитного анализатора ( $\phi, R, l_1, l_2, \epsilon_1, \epsilon_2$ ). В диссертации обсуждаются условия угловой и линейной фокусировки пучка

и даются рекомендации относительно целесообразности выбора того или иного типа фокусировки (таблица 1), как в медианной плоскости, так и в аксиальном направлении.

Решения уравнений двойной (стигматической) фокусировки первого порядка для секторных магнитных анализаторов с однородным полем, линейной и угловой фокусировкой даются в виде графиков-номограмм. Эти графики позволяют сравнительно просто находить физические параметры всех возможных вариантов реальных магнитных анализаторов со стигматической фокусировкой первого порядка.

Расчет магнитного анализатора масс-сепаратора был сделан, исходя из условия использования электромагнита СП-57 промышленного изготовления. Поэтому выбор основных параметров магнитного анализатора - радиуса кривизны центральной траектории  $R$  и угла поворота главного луча  $\phi$  - в нашем случае был в значительной степени предопределен необходимостью поместить полюсные наконечники магнитного анализатора в этот электромагнит.

Задача расчета состояла в том, чтобы определить другие параметры магнитного анализатора ( $l_1, l_2, \epsilon_1, \epsilon_2, \rho_1, \rho_2$ ), обеспечивающего нужное разделение по массам продуктов ядерных реакций непосредственно на счетчики малых размеров, т.е. обеспечить стигматическую фокусировку пучка, сравнительно большую дисперсию

Таблица 1

Медианная плоскость		Аксиальная плоскость	
линейная фок.	угловая фок.	линейная фок.	угловая фок.
1 порядка	2 порядка	для главных лучей	
лучей ( $\alpha_1=0$ )		лучей фок. ( $\alpha_1 \neq 0$ )	
$A_y = 0$	$A_{yy} = 0$	$A_\alpha = 0$	$A_{\alpha\alpha} = 0$
$V_0 + \frac{C}{R} V_c = 0$	$V_0 + \frac{C}{R} V_c = 0$	$V_0 + \frac{C}{R} V_c = 0$	$V_0 + \frac{C}{R} V_c = 0$
$W_0 + \frac{C}{R} W_c = 0$	$W_0 + \frac{C}{R} W_c = 0$	$W_0 + \frac{C}{R} W_c = 0$	$W_0 + \frac{C}{R} W_c = 0$
$V_\alpha = 0$	$V_\alpha = 0$	$W_\alpha = 0$	$W_\alpha = 0$

( $D \approx 10$  мм на 1% изменения массы) и разрешение  $\geq 300$ .

Расчет велся для ионного источника с выходной щелью размером  $2y_1 \times 2z_1 = 1 \times 30$  мм<sup>2</sup>, углом расходимости пучка в горизонтальной плоскости  $2\alpha_1 = 6^\circ$  и примерно параллельным в аксиальном сечении, т.е. требовалась угловая фокусировка в медианной плоскости и линейная - в аксиальном направлении.

Необходимо было улучшить фокусировку в медианной плоскости, поскольку при выполнении условия фокусировки первого порядка вклад угловых аббераций, обусловленный членом  $a_1^2 A_{aa}$ , слишком велик ( $a_1^2 A_{aa} = 4,2$  мм при  $\alpha_1 = \pm 3^\circ$ ). Угловые абберации второго порядка были исключены путем применения круговых границ с радиусами кривизны  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , удовлетворяющими условию угловой фокусировки второго порядка:

$$\left(\frac{\cos\psi_1}{\cos\epsilon_1}\right)^3 \frac{1}{\rho_1} + \left(\frac{\cos\psi_2}{\cos\epsilon_2}\right)^3 \frac{1}{\rho_2} = R \left[ \frac{1}{\ell_1^2} (3 \operatorname{tg}\psi_1 - 2 \frac{R}{\ell_1}) \cos^3\psi_1 + \frac{1}{\ell_2^2} (3 \operatorname{tg}\psi_2 - 2 \frac{R}{\ell_2}) \cos^3\psi_2 \right], \quad (5)$$

где

$$\operatorname{tg}\psi_{1,2} = \operatorname{tg}\epsilon_{1,2} + \frac{R}{\ell_{1,2}}. \quad (6)$$

При этом круговые границы были использованы также для улучшения вертикальной фокусировки, а именно: была обеспечена линейная фокусировка и вдоль всех других траекторий во всем диапазоне угла горизонтальной рас-

ходимости пучка. Для этого необходимо, чтобы  $\rho_1$  и  $\rho_2$  удовлетворяли также уравнению  $V_a = 0$ .

Основные параметры магнитного анализатора:  $R=70$  см,  $\phi = 90^\circ$ ,  $\ell_1 = 1,86$  м,  $R = 130$  см,  $\ell_2 = 1,16$  м,  $R = 81$  см,  $\epsilon_1 = 0^\circ$ ,  $\epsilon_2 = 45^\circ$ ,  $\rho_1 = 0,83$  м,  $\rho_2 = -0,7214$  м,  $R = -505$  мм.

Расчетное распределение поля рассеяния на входе и выходе магнитного анализатора задается выбором и расчетом размеров и расположения магнитных экранов.

Дисперсия рассчитанного анализатора:

$$D_0 M / \Delta M = (1/2)(\ell_2 \operatorname{tg}\psi_2 - G_0 \ell_1 \operatorname{tg}\psi_1), \quad (7)$$

характеризующая расстояние между пиками двух соседних масс, составляет  $D_0 = 11,6$  мм на процент изменения массы, разрешающая способность  $\sim 390$ . Угол наклона фокальной плоскости  $\mu_0$  по отношению к направлению главного луча равен  $\sim 45^\circ / 10^\circ$ .

Таким образом, расчеты показали, что выбранный магнитный анализатор с плоскопараллельным зазором, круговыми границами и наклонным выходом пучка обеспечивает получение требуемых параметров.

В этой же главе дается описание электромагнитного масс-сепаратора, его конструкция, а также приводятся результаты измерения магнитных полей и сравнения их с расчетом (рис. 1). Описаны методы экспериментального изучения ионно-оптических характеристик магнитных анализаторов и приводятся результаты изучения харак-

характеристик магнитного анализатора масс-сепаратора методом  $\alpha$ -частиц и методом ионного источника с поверхностной термоионизацией. В качестве  $\alpha$ -излучателя, согласно сделанным оценкам диапазона периодов полураспада радиоактивного вещества, пригодного для изготовления источника  $\alpha$ -частиц с требуемыми характеристиками (высокая моноэнергетичность пучка  $\alpha$ -частиц, максимально возможная в этом случае интенсивность и др.), был выбран изотоп кюрия  $^{244}\text{Cm}$  с  $T_{1/2}=17$  лет.

Этим методом экспериментально уточнялось положение источника и приемника ( $l_1$  и  $l_2$ ). Было установлено, что отклонение положения источника от оптимального (приблизительно совпадающего с расчетным) на  $\pm 20$  мм вдоль направления главного луча (ось  $X_1$ ) увеличивает ширину изображения не более чем в 1,5 раза. Это показывает, что разрешающая способность магнитного анализатора не слишком критична к точности установки источника, что существенно в случае применения плазменных ионных источников.

Была исследована зависимость ширины распределения пучка  $\alpha$ -частиц на выходе анализатора от угла расходимости ( $2^\circ \leq 2\alpha_1 \leq 12^\circ$ ) и начальной ширины пучка ( $1 \text{ мм} \leq 2y_1 \leq 2,5 \text{ мм}$ ).

Коэффициент пропускания магнитного анализатора для  $\alpha$ -частиц с различными радиусами кривизны траектории (изменялось поле в зазоре магнита) оказался

равным  $\sim 1$  для частиц с  $r = R = 70$  см и  $\sim 0,9$  для частиц с  $r = (1 \pm 0,04) R$ .

Более полно характеристики масс-сепаратора в целом с термоионным источником изучены в опытах по разделению естественной смеси изотопов таллия ( $^{203}\text{Tl}$ ,  $^{205}\text{Tl}$ ). Таллий был выбран как элемент, имеющий достаточно высокий атомный вес и пригодный для получения достаточных ионных токов с помощью простого источника с поверхностной термоионизацией.

Распределение тока однозарядных ионов  $^{203}\text{Tl}$  и  $^{205}\text{Tl}$  в зависимости от положения коллектора на фокальной плоскости при движении пучка ионов  $^{205}\text{Tl}$  по главной траектории магнитного анализатора ( $r = R = 70$  см,  $B = 4510$  гс) дано на рис. 2. Расстояние между максимумами двух пиков соответствует дисперсии  $D_0 = 11,5$  мм на 1% изменения массы. Ширина пиков на уровне 0,01 от максимума составляет  $\sim 3$  мм, что обеспечивает разрешающую способность прибора на этом уровне, равную  $\sim 300$ . Оценка ширины пиков на полувысоте дает  $\sim 0,6$  мм, а разрешение прибора на этом уровне равно  $\sim 2000$ . В этих же измерениях было определено положение фокальной плоскости по минимуму ширины распределения пучка ( $\mu_0 = 45^\circ$ ) и изучены некоторые другие характеристики масс-сепаратора. Так, например, зависимость ширины распределения пучка ионов таллия на полувысоте и у основания пика ( $\sim 0,01$  от максимума) для различных значений радиусов кривизны



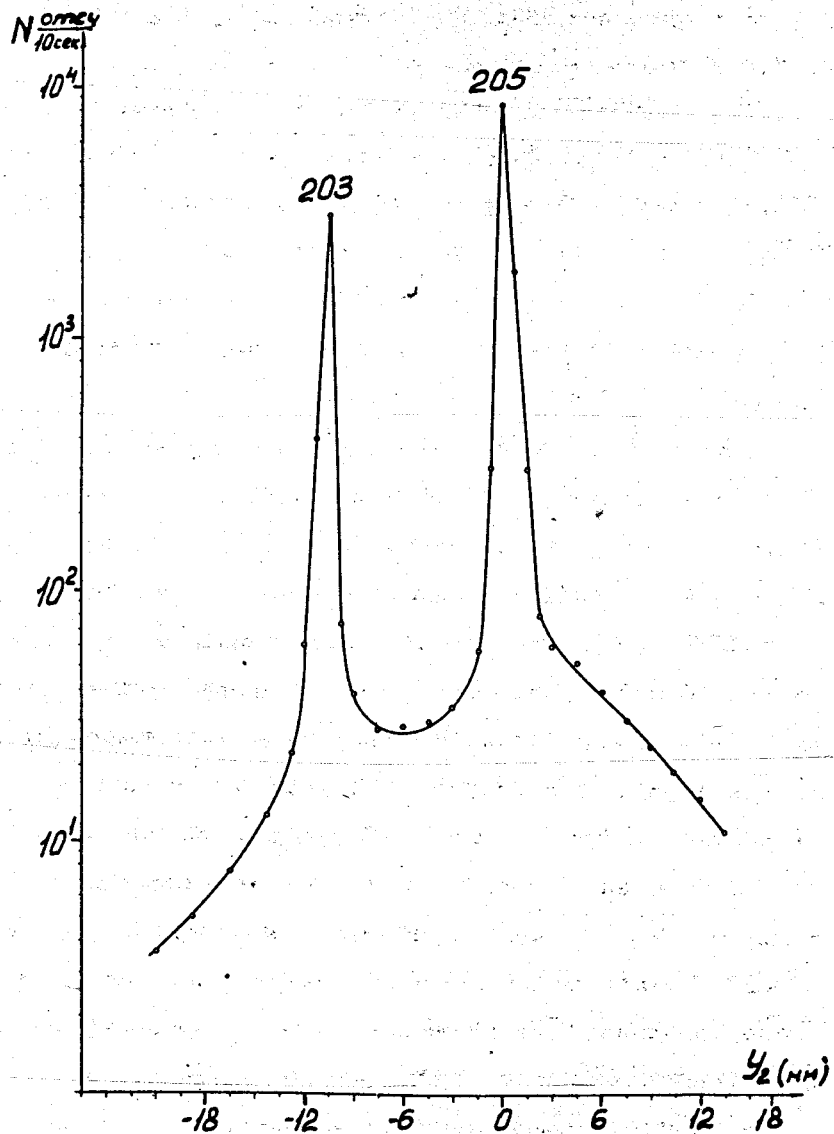


Рис. 2. Распределение тока ионов  $^{203}\text{Tl}$  и  $^{205}\text{Tl}$  на фокальной плоскости в зависимости от положения коллектора на оси  $Y_2$ ; 1 отсчет =  $6 \cdot 10^{-10}$  кулона.

траекторий в пределах  $(1 \pm 0,04)R$  показывает, что диапазон принимаемых на фокальную плоскость анализатора масс с расчетным разрешением и коэффициентом пропускания, близким к 1, составляет  $\sim \pm 7\%$  <sup>/11-13/</sup>.

Таким образом, исследование ионно-оптических свойств магнитного анализатора масс-сепаратора показало, что его основные характеристики достаточно хорошо согласуются с результатами расчета, выполненного с учетом влияния краевых полей рассеяния.

Два других аналогичных магнитных анализатора, изготовленных согласно настоящим расчетам и чертежам, используются в масс-сепараторах в ЛЯП и ЛЯР, и также показали хорошее соответствие измеренных характеристик с расчетом <sup>/14/</sup>.

Глава IV посвящается описанию исследований некоторых вопросов возможности использования электромагнитного масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов.

Были проведены исследования диффузии продуктов ядерных реакций из различных материалов при высокой температуре ( $1700^\circ - 1900^\circ$ ) как одного из возможных способов доставки продуктов реакций в ионный источник. В диссертации дается описание этих опытов и приводятся результаты исследований. В частности, показано, что 50% атомов диспрозия, образующихся в реакции  $^{142}\text{Nd} (^{12}\text{C}, 4n) ^{150}\text{Dy}$  и внедренных в нагретую танталовую пластину, эмиттируют из нее за время, не большее, чем 0,1 сек. Исследовалась эмиссия вбитых

атомов и из других материалов: вольфрама, молибдена, графитизированной фильтровальной бумаги и промышленного графита.

Полученные экспериментальные результаты дали непосредственный ответ на вопрос о времени эмиссии некоторых продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами, внедренных в нагретые пластинки из тугоплавких материалов, и послужили основой для разработки ионного источника электромагнитного масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов (ЭМСНАПТИ) /15-18/.

Одна из особенностей работы электромагнитного масс-сепаратора на пучке состоит в том, что количество радиоактивных атомов, образующихся в ядерных реакциях и подлежащих электромагнитной сепарации, очень мало. Поведение в ионном источнике таких малых количеств вещества, измеряемых миллионными долями микрограмма, может существенно отличаться от поведения более весомых количеств. Это, в частности, связано с тем, что разрозненные атомы не образуют единой твердой или жидкой фазы и, например, их испарение не характеризуется соответствующими макрофизико-химическими константами данного вещества: температурой и теплотой парообразования. Поэтому температурный и другие режимы работы ионного источника, оптимальные, например, для обеспечения максимальной эффективности, могут быть различными при работе с макро- или ультрамакроколичествами одного и того же веществ-

ва. Выявление этого возможного различия проводилось с газоразрядным ионным источником. Электрический разряд в ионном источнике горел на аргоне, к которому в небольшой доле добавлялся ксенон или радиоактивный свинец  $^{212}\text{Pb}$ . Закономерности выхода отдельных компонент ионного пучка исследовались путем регистрации ионного тока в фокальной плоскости магнитного анализатора.

Некоторые результаты этих исследований для макроколичеств аргона (скорость поступления газа  $\kappa = 0,1 - 1,0 \text{ см}^3 / \text{мин}$ , ток однозарядных ионов аргона  $0,4 - 8,0 \text{ ма}$ ), микроколичеств ксенона ( $\sim 1\%$  от аргона, ток однозарядных ионов ксенона  $\sim 10 - 200 \text{ мка}$ ) и ультрамикроколичеств радиоактивного свинца  $^{212}\text{Pb}$  ( $\sim 3 \cdot 10^{-13} \text{ г}$ ) даются на рис. 3. Оптимальные значения параметров разряда выбирались непосредственно по максимальному или наибольшему возможному току однозарядных ионов на коллектор при фиксированном значении  $\kappa$ . В опытах с ультрамалыми примесями использовался радиоактивный свинец  $^{212}\text{Pb}$  - продукт распада  $^{232}\text{Th}$ . Количество  $^{212}\text{Pb}$  определялось с помощью сцинтилляционного счетчика по интенсивности  $\alpha$ -излучения продуктов его распада. Экспериментальные результаты, полученные для свинца, представлены на рисунке треугольниками. Как видно из рисунка, кривая изменения эффективности сепарации для свинца аналогична кривым для аргона и ксенона. Меньшая величина эффективности, по-видимому,

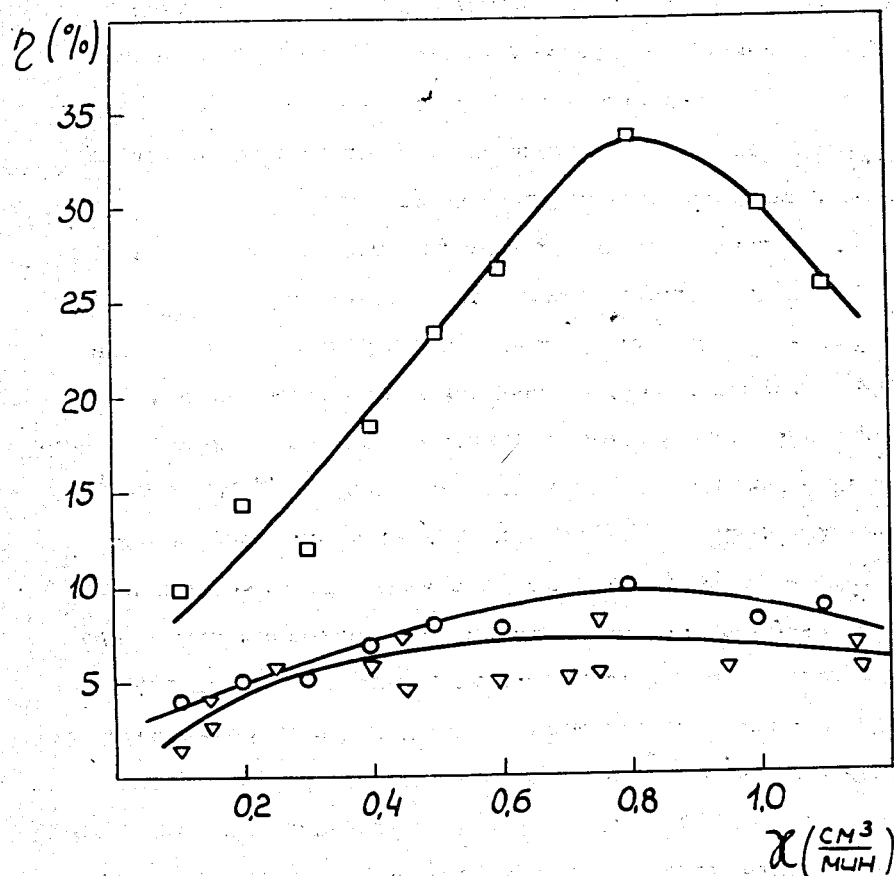


Рис. 3. Эффективность сепарации в зависимости от скорости поступления газа: (o) - аргон, ( $\square$ ) - примесь ксенона, ( $\nabla$ ) - свинец-212.

обусловлена худшей летучестью свинца и его возможной частичной сорбцией внутри разрядной камеры ионного источника /19/.

Полученные результаты показали, что эффективность электромагнитной сепарации зависит, примерно, одинаково от параметров разряда как для основной компоненты питающего газа (Ar), так и для малых (Xe) или чрезмерно малых ( $^{212}\text{Pb}$ ) примесных компонент. Поэтому при работе сепаратора в режиме на пучке настройку ионного источника, например, на максимальную эффективность ионизации можно производить (и это практически удобнее), используя газообразные примеси, специально добавленные в газ, питающий источник.

Нами производилось также сравнение качества фокусировки пучка ионов примеси (~1%) ксенона и радиоактивного свинца  $^{212}\text{Pb}$  (~ $3 \cdot 10^{-13}$  г). Режим ионного источника, потенциал фокусирующего электрода, положение приемной плоскости сепаратора подбирались так, чтобы получить минимальную ширину фокальных пятен пучков ионов изотопов ксенона. Ток ионов изотопов ксенона составлял при этом 10-50 мка. Для определения качества фокусировки пучка ионов  $^{212}\text{Pb}$  на приемнике сепаратора укреплялась тонкая алюминиевая фольга, которая после окончания сепарации разрезалась на полоски шириной 2,5 мм, а активность каждой полоски измерялась.

На рис. 4 дается относительное распределение  $^{212}\text{Pb}$  вдоль плоскости приемника масс-сепаратора. На рисунке

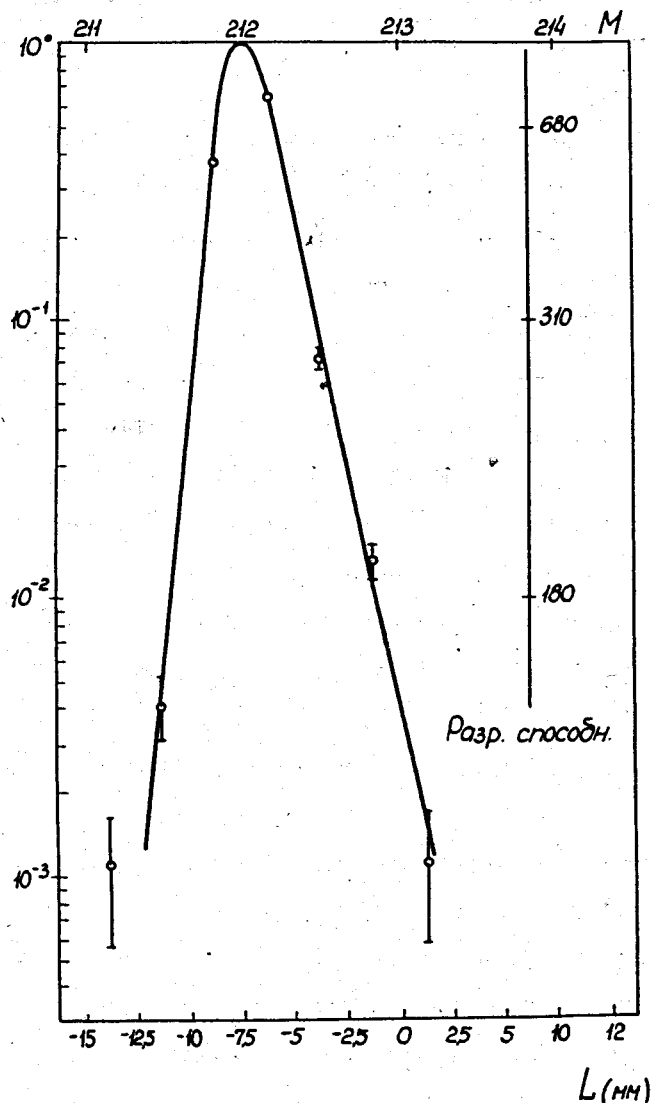


Рис. 4. Распределение ионов  $^{212}\text{Rb}^+$  на фокальной плоскости масс-сепаратора.

дается также шкала разрешающей способности на различном уровне от максимума, построенная по данным полученного распределения. Результаты опытов показывают, что при настройке режима источника и сепаратора в целом на хорошую фокусировку пучка ионов ксенона, добавленного в количестве ~1% в питающий газ - аргон, одновременно обеспечивается фокусировка приблизительно того же качества и пучка ионов свинца ничтожно малой интенсивности. Эти исследования облегчили выбор конструкции и дали методику наладки и работы с быстродействующим ионным источником для электромагнитного масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов /20/.

Возможности электромагнитного масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов были проиллюстрированы в работах /21-23/ по исследованию радиационных свойств короткоживущих изотопов висмута  $^{192-197}\text{Bi}$ , нового изотопа неона  $^{25}\text{Ne}$ , фтора  $^{22}\text{F}$ , образующихся в реакциях с ускоренными тяжелыми ионами.

Основные результаты диссертации:

1. Проведен расчет магнитного анализатора масс-сепаратора, исходя из условия использования электромагнита СП-57, выпускаемого промышленностью. Магнитный анализатор рассчитан так, чтобы обеспечить радиальную фокусировку второго порядка по углу расходимости пучка, относительно большую дисперсию (~12 мм на 1% изменения массы) и улучшенную вертикальную фокусировку. Основные параметры магнитного анализа-

тора, полученные в результате расчета:  $\phi = 90^\circ$ ,  $l_1 = 130$  см,  $l_2 = 81$  см,  $R = 70$  см,  $\epsilon_1 = 0$ ,  $\epsilon_2 = 45^\circ$ ,  $\rho_1 = 58,1$  см,  $\rho_2 = -50,5$  см.

2. В процессе расчета предложено упрощение метода определения параметров первого порядка магнитных анализаторов секторного типа с однородным магнитным полем, обеспечивающих стигматическую фокусировку пучка, путем применения методики номограмм.

3. Для более точного учета эффекта краевого поля рассеяния при аксиальной фокусировке пучка применены и рассчитаны магнитные экраны на входе и выходе магнитного анализатора.

4. На основе расчета в ЛЯР сконструирован и изготовлен магнитный анализатор масс-сепаратора на пучке тяжелых ионов. Два других аналогичных магнитных анализатора изготовлены по разработанным в ЛЯР чертежам в отделе ядерной спектроскопии ЛЯП и для разделительных установок в ЛЯР.

5. Проведены исследования фокусирующих свойств магнитного анализатора при помощи методики  $\alpha$ -частиц и на ионных пучках изотопов таллия, а затем и других элементов (Ar, Xe,  $^{212}\text{Pb}$ ). Эти исследования показали, что основные характеристики магнитного анализатора достаточно хорошо согласуются с результатами расчета. Разрешение прибора ( $\sim 1000$  на полувысоте пика с плазменным ионным источником и  $\sim 2000$  с термоионным и  $\sim 400$  на уровне  $\sim 1/100$  от максимума в пике) и дис-

персия ( $\sim 11,6$  мм на 1% изменения массы) достаточны для надежной идентификации по массам продуктов ядерных реакций вплоть до самых тяжелых.

6. Проведены опыты по исследованию выхода и скорости диффузии внедренных атомов в различных материалах, как метода доставки продуктов ядерных реакций в ионный источник. Использовались молибден, графит, вольфрам и тантал. Эти опыты показали, что быстрота обратной диффузии атомов отдачи - продуктов ядерных реакций под действием ускоренных тяжелых ионов (на примере диспрозия) при температуре  $\sim 1750^\circ\text{C}$  составляет  $\sim 0,1$  сек. Полученные результаты послужили основой для разработки ионного источника с быстрой доставкой продуктов ядерных реакций непосредственно в разрядную камеру источника.

7. Исследовано поведение очень малых количеств радиоактивных атомов в газоразрядном ионном источнике. На примере разделения малого количества радиоактивного свинца  $^{212}\text{Pb}$  ( $\sim 3,2 \cdot 10^{-13}$  г) отработана методика настройки ионного источника на оптимальный режим.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в работах /9,10,12,15,19/ и были представлены на Международную конференцию по электромагнитным масс-сепараторам в Аархусе в 1965 году /11/ доложены на Международном рабочем совещании по масс-сепараторам и их применению в ядерной физике, проходившем в Дубне 19-22 мая 1965 года /13/.

Литература

1. Г.Н. Флеров. Сборник "Ядерные реакции при малых и средних энергиях". 14, 489, 1958 г. Препринт ОИЯИ, P15-43-15, Дубна, 1969.
2. Г.Н. Флеров, Н.И. Тарантин. "Развитие физики в СССР", Изд. "Наука", М., 1967 г.
3. Г.Н. Флеров, Н.И. Тарантин, Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Klasse fur Mathematik, Physik und Technik, Jahrgang 1967, Nr. 1, Seite 49.
4. G. Rudstam. Proc. Intern. Conf. on Electromagnetic Isotope Separators, Aarhus, Denmark, June 14-18, 1965; Nucl. Instr. Meth., 38, 282, 1965.
5. I. Amarel, R. Bernas et al., Proc. Intern. Symp. on "Why and How Should We Investigate Nuclides Far Off Stability Line?", Lysekil, Sweden, August 21-27, 1966.
6. R. Klapisch. Intern. Conf. on the Properties of Nuclei far from the Region of Beta-Stability, Leysin, Switzerland, August 31-September 4, 1970, vol. 1, p.21.
7. W.L. Talbert, Jr., NP Division, Proc. Intern. Conf. on Electromagnetic Isotope Separators and the Techniques of their Applications, Marburg, Sept. 7-10, 1970, p.14.
8. W.L. Talbert, Jr. and J.R. McConnell, *ibid* p.78.
9. Н.И. Тарантин, А.В. Демьянов, ЖТФ, 39, 186, 1965 г.
10. Н.И. Тарантин, А.В. Демьянов, ПТЭ, 1, 41, 1966 г.
11. N.I. Tarantin, A.V. Demyanov, Yu.A. Dyachikhin, A.P. Kabachenko, Nucl. Instr. Meth., 38, 103, 1965.

12. А.В. Демьянов, Н.И. Тарантин, Ю.А. Дьячихин, А.П. Кабаченко, ПТЭ, 2, 28, 1966.
13. Н.И. Тарантин, А.В. Демьянов, А.П. Кабаченко, О.П. Логинов. "Международное совещание по масс-спектрометрам и их применению в ядерной физике", Препринт ОИЯИ, 2377, Дубна, 1965.
14. В.П. Афанасьев и др. Препринт ОИЯИ, 13-4763, 6-4487, Дубна, 1969.
15. Н.И. Тарантин, В.В. Гордеев, А.В. Демьянов. Атомная энергия, 22, 280, 1967.
16. Н.И. Тарантин, А.В. Демьянов, Н.С. Иванов, А.П. Кабаченко, О.П. Логинов, В. Пермяков. Авторское свидетельство, 245929 от 3 апреля 1969 г. Бюллетень "Открытия, изобретения, товарные знаки". №20, Москва, 1969.
17. Н.И. Тарантин, А.В. Демьянов, Н.С. Иванов, А.П. Кабаченко. Атомная энергия, 27, 304, 1969.
18. Н.И. Тарантин, А.П. Кабаченко, А.В. Демьянов. Атомная энергия, 27, 432, 1969.
19. А.В. Демьянов, А.П. Кабаченко, О.П. Логинов, Н.И. Тарантин, Х. Тыррофф, Атомная энергия, 27, 308, 1969.
20. N.I. Tarantin, A.P. Kabachenko, A.V. Demyanov, N.S. Ivanov, Proc. Intern. Conf. on Mass Spectroscopy, Kyoto, Japan, Sept.-8-12, 1969, p.548.
21. Н.И. Тарантин, А.П. Кабаченко, А.В. Демьянов. Ядерная физика. 12, 455, 1970.
22. А.П. Кабаченко, И.В. Кузнецов, К. Сивек-Вильчинска, Е.А. Скакун, Н.И. Тарантин. "Конференция по физике тяжелых ионов", Д7-5769, 204, 1971.
23. H. Guratzsch, A.P. Kabachenko, I.V. Kuznetsov, K. Siwek-Wilczynska, N.I. Tarantin, JINR Preprint E6-6664, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел  
22 марта 1973 года