

1959

Экз. Чит. Зала

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 4454



В.А.Карнаухов, Л.А.Рубинская, Г.М.Тер-Акопьян,  
В.Н.Титов, В.А.Чугреев

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
ГАЗОНАПОЛНЕННОГО МАСС-СЕПАРАТОРА

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1969

13 - 4454

В.А.Карнаухов, Л.А.Рубинская, Г.М.Тер-Акопьян,  
В.Н.Титов, В.А.Чугреев

МАГНИТООПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
ГАЗОНАПОЛНЕННОГО МАСС-СЕПАРАТОРА

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

1. Газонаполненный масс-сепаратор предназначен для изучения короткоживущих продуктов ядерных реакций на пучке тяжелых ионов. Принцип его для осколков деления был предложен и осуществлен в 1958 году Фулмером и Коэном<sup>/1/</sup> и позднее использовался Армбрустером<sup>/2/</sup>. Имеется магнитооптическая система, заполненная газом при давлении 0,1-10 мм рт. столба. В месте источника этой системы расположена мишень, облучаемая пучком тяжелых ионов. Продукты реакций вылетают из нее со значительным импульсом и попадают в магнитную систему в виде ионов. По мере движения эти ионы испытывают соударения с атомами газа и статистическим образом меняют свой заряд. Соответственно меняется и радиус кривизны траектории. Однако усредненный по всему пути радиус кривизны  $\bar{R}$  будет близок к радиусу, отвечающему равновесному заряду  $\bar{e} \approx Z^{1/3} v^{1/3}$  ( $Z$  - порядковый номер ионов,  $v$  - скорость). В усредненном радиусе, таким образом, выпадает зависимость от скорости и заряда ионов:  $\bar{R} \approx \frac{Av}{\bar{e}} \approx \frac{A}{Z^{1/3}}$  ( $A$  - массовое число).

2. Магнитооптическая система газонаполненного масс-сепаратора должна удовлетворять определенным требованиям. Во-первых, для получения приемлемой эффективности регистрации продуктов реакций светосила спектрометра должна быть максимально возможной. Данные об угловом распределении<sup>/4/</sup> показывают, что в телесном угле около  $10^{-2}$  стерадиан в направлении пучка тяжелых ионов движется 10-20% продуктов реакций полного слияния. Во-вторых, нужен спектрометр с умеренной дисперсией. Дисперсия - расстояние на фокальной плоскости между двумя частицами

с радиусами кривизны в магнитном поле, отличающимися на 1%. Обычно в магнитных спектрометрах дисперсия и абберации определяют разрешающую способность прибора. Разрешение газонаполненного масс-сепаратора ограничено многократным рассеянием и статистикой перезарядки ионов. Относительное массовое разрешение для осколков деления равно 3-6%/1,2/. Поэтому дисперсия газонаполненного масс-сепаратора определяет не разрешение, а размер изображения по горизонтали.

Из принципа работы газонаполненного масс-сепаратора видно, что разрешение прибора будет лучше при увеличении длины пути в магнитном поле с одновременным уменьшением общей длины траектории частицы. Действительно, при этом будет улучшаться статистика перезарядки ионов и меньше будет сказываться многократное рассеяние.

Перечисленным требованиям может удовлетворить, по-видимому, секторный спектрометр с однородным магнитным полем. Максимальная светосила достигается при стигматической угловой фокусировке<sup>/8/</sup>. Известно также<sup>/5/</sup>, что угол захвата в направлении, параллельном медианной плоскости (условимся считать это направление горизонтальным), существенно увеличивается, если границы секторного магнита являются круговыми.

В спектрометрах с однородным магнитным полем фокусировка в вертикальном направлении обеспечивается взаимодействием заряженных частиц с горизонтальной компонентой рассеянного поля на границах магнита<sup>/7/</sup>. Достаточно точный расчёт вертикального движения можно выполнить при условии, что известен характер спада магнитного поля на границах магнита. Эта задача была решена Н.Г.Афанасьевым и другими<sup>/8-10/</sup> в предположении линейного спада поля на границе. Оно справедливо в том случае, когда у входной и выходной границ магнита располагаются магнитные экраны. Афанасьев и др. показали, что в отношении горизонтальной фокусировки реальный магнит с магнитными экранами эквивалентен идеальному магниту с резким спадом поля на границах.

3. Параметры стигматического магнитного спектрометра определяются из условия радиальной фокусировки<sup>/11/</sup> первого порядка

$$\Psi_1 + \Psi_2 = \Phi.$$

(1)

где  $\operatorname{tg} \Psi_{1,2} = \operatorname{tg} \epsilon_{1,2} + \frac{R}{\ell_{1,2}}$ , и условия вертикальной фокусировки, полученного в простой форме в работе [12],

$$\omega_1 + \omega_2 = \Phi, \quad (2)$$

где  $\omega_{1,2} = \frac{1}{\operatorname{tg} \epsilon_{1,2} - \frac{c}{R} - \frac{R}{\ell_{1,2}}}$ . В выражениях (1) и (2) введены следующие обозначения (см. рис. 1):  $\Phi$  - угол поворота центральной частицы,  $\ell_{1,2}$  - расстояние от источника (1) (изображения (2)) до входной (1) (выходной (2)) границы идеального магнита,  $R$  - радиус кривизны центральной траектории на участке однородного поля,  $\epsilon_{1,2}$  - угол между направлением входа (1) (выхода (2)) частицы и внешней нормалью к входной (1) (выходной (2)) границе магнита,  $\epsilon_{1,2} > 0$ , если нормаль и центр кривизны траектории частицы лежат по разные стороны от траектории частицы.  $c$  - протяженность области краевого спада поля, которая определяется геометрией магнитных экранов и расстоянием от них до границы магнита.

Уравнения (1) и (2) связывают пять параметров ( $\Phi, \ell_{1,2}$  и  $\epsilon_{1,2}$ ). Определенная свобода в выборе трех параметров позволяет удовлетворить в некоторой степени тем требованиям, которые обсуждались выше.

Светосила прибора при органических размерах магнита и межполюсного зазора обратно пропорциональна  $\ell_1^2$ , поэтому входное плечо спектрометра должно быть минимальным. С другой стороны, сильное уменьшение  $\ell_1$  приводит к большому росту  $\ell_2$  и к росту дисперсии прибора и коэффициента вертикального увеличения, что связано с нежелательным увеличением размеров изображения. Далее, если  $\epsilon_{1,2} > 0$ , на границах магнита имеет место фокусировка в вертикальном направлении, в противном случае происходит дефокусировка частиц. Целесообразно выбрать  $\epsilon_1$  с положительным знаком и возможно большим по абсолютной величине. Такой выбор  $\epsilon_1$  увеличивает светосилу масс-сепаратора, так как сразу после входа в межполюсный зазор исключаются потери частиц из-за попадания на полюса. Многократное рассеяние ионов также приводит к частичной потере на полюсах. Большое положительное значение угла  $\epsilon_1$  уменьшает потери, так как при этом уменьшается размер пучка внутри зазора по вертикали.

Наконец, выбор максимально большого угла поворота  $\Phi$  уменьшает общую длину спектрометра при одновременном увеличении пути частиц в магнитном поле. Увеличение  $\Phi$ , однако, связано с увеличением размеров магнита. Ввиду того, что за основу конструкции масс-сепаратора был взят стандартный электромагнит СП-57А, в выборе этой величины имелись определенные ограничения.

Учитывая изложенные здесь соображения, мы выбрали следующие параметры магнитного спектрометра:  $R = 80$  см,  $\Phi = 60^\circ$ ,  $l_1 = 122,25$  см,  $l_2 = 211,36$  см,  $\epsilon_1 = 53^\circ$ ,  $\epsilon_2 = -23^\circ 30'$ . Дисперсия прибора равна 18 мм на 1%  $H_p$ , вертикальное увеличение - 3,26, горизонтальное увеличение - 0,78.

Светосила магнитных спектрометров с прямолинейными границами невелика ( $\approx 10^{-3}$  стерадиан). Увеличение угла захвата частиц приводит к резкому возрастанию aberrаций, так что даже умеренные требования к разрешению, которые предъявляются к спектрометру при работе в системе газонаполненного масс-сепаратора, оказываются невыполненными. Применение в спектрометре секторного магнита с круговыми границами позволило существенно увеличить светосилу прибора и одновременно обеспечить хорошую разрешающую способность. Вопрос о наиболее целесообразных путях выбора радиусов кривизны границ рассмотрен в работе /10/. Наименьшие aberrации получаются, если в уравнениях для горизонтальных траекторий частиц положить минимальной сумму членов, пропорциональных  $a^2$  и  $a^3$ , одновременно приравняв нулю член, пропорциональный  $a\gamma$  в уравнениях для вертикальных траекторий ( $a$  и  $\gamma$  - углы захвата частиц по горизонтали и по вертикали). Такой подход к выбору кривизны границ дал в нашем случае следующие результаты (см. рис. 1). Входная идеальная граница спектрометра вогнута и представляет собой дугу окружности с радиусом  $a = 114,95$  см. Выходная граница (выпуклая) составлена из двух окружностей, сопряженных в точке пересечения с центральной траекторией. Радиусы этих окружностей:  $b^+ = 268,85$  см и  $b^- = 341,17$  см. При углах захвата спектрометра  $\alpha = \pm 5^\circ 30'$  и  $\gamma = \pm 2^\circ 20'$  - ( $\gamma$  определяется межполюсным зазором в 10 см) телесный угол равен  $1,4 \cdot 10^{-2}$  стерадиан. Расчётное разрешение прибора

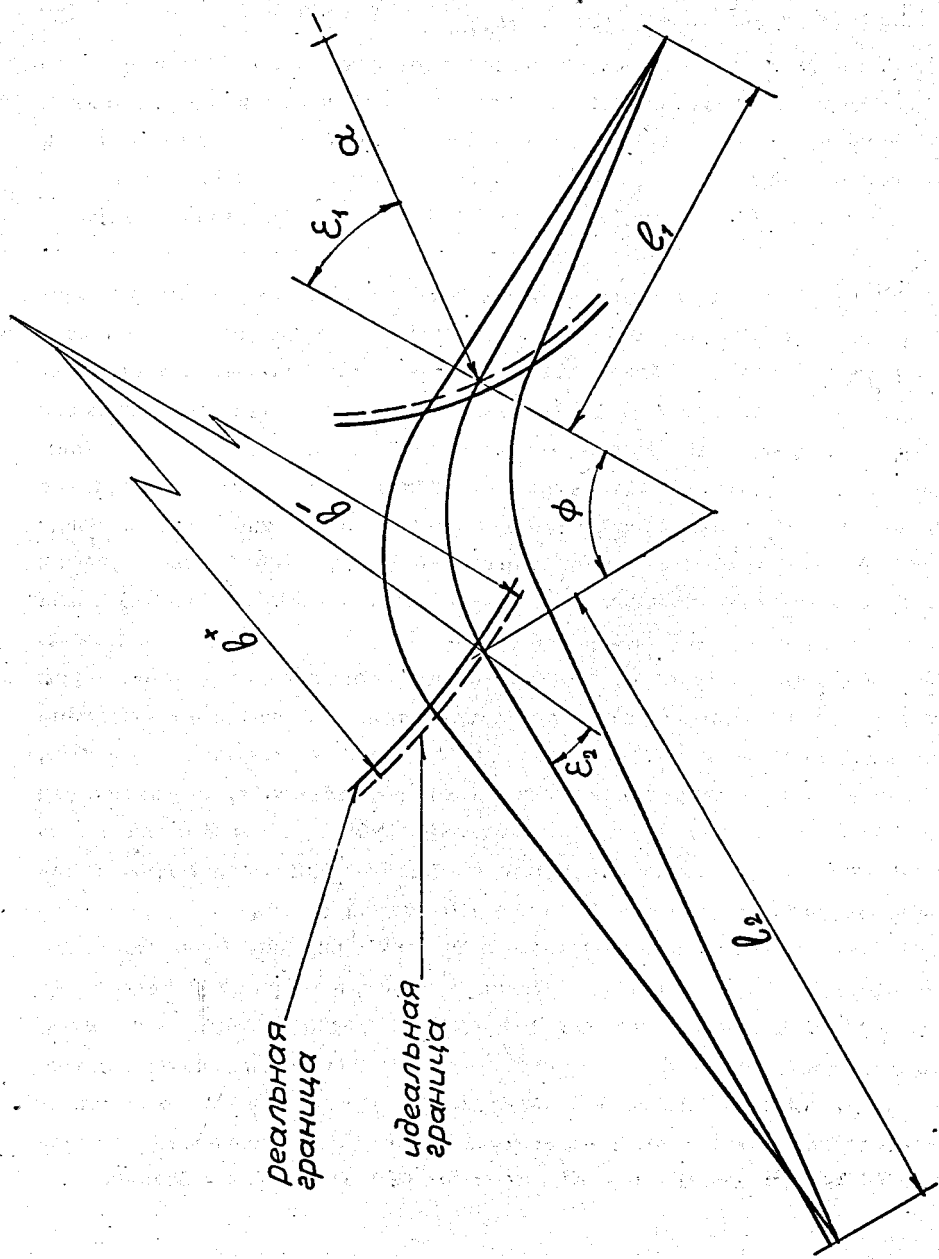


Рис. 1. Схема магнитооптической системы.

для точечного монохроматического источника (отношение ширины линии у основания к дисперсии)  $0,15\%$  по  $H\beta$ .

4. Магнитный спектрометр газонаполненного масс-сепаратора был сконструирован и изготовлен на основе стандартного электромагнита СП-57А (внутренний диаметр катушек - 120 см, магнитный зазор - 10 см, максимальная напряженность поля в центре зазора - 15 кгаусс). Общий вид его показан схематически на рис. 2. Полюсные наконечники магнита толщиной 200 мм и магнитные экраны были изготовлены по профилю, отвечающему расчётным границам спектрометра. Размер наконечников позволяет получить достаточно однородное магнитное поле по всей ширине пучка ионов при горизонтальном угле захвата  $\pm 5^{\circ} 30'$ . Без уменьшения светосилы могут анализироваться частицы с импульсами, отличающимися от центрального на  $\pm 3\%$ . Размеры магнитных экранов были рассчитаны так, чтобы экраны пропускали падающий на них поток при максимальной напряженности магнитного поля (15 кгаусс) без насыщения железа. Ввиду того, что экраны находятся непосредственно в потоке индукции катушек (см. рис. 2), для его уменьшения полюса электромагнита СП-57А были обработаны по профилю, близкому к профилю полюсных наконечников.

Для получения максимально возможной вертикальной апертуры (10 см) вакуумная камера сконструирована так, что полюсные наконечники служат одновременно ее крышками. Входной и выходной патрубки, составляющие часть вакуумной системы масс-сепаратора, герметически соединены с отверстиями в камере. Части патрубков, примыкающие к камере, сделаны из нержавеющей стали и сварены вакуумноплотно с остальными частями, изготовленными из магнитной стали.

Профиль полюсных наконечников и границы экранов были изготовлены с допусками 0,1 мм. Межполюсный зазор выдержан с точностью 0,5 мм, допуск на установку экранов относительно камеры - не хуже 0,2 мм. Для достижения таких точностей профили полюсных наконечников, экранов и фиксирующих прокладок между ними размечались по рассчитанной координатной сетке. Затем по этой разметке были изготовлены шаблоны, служившие для контроля и подгонки размеров готовых изделий.



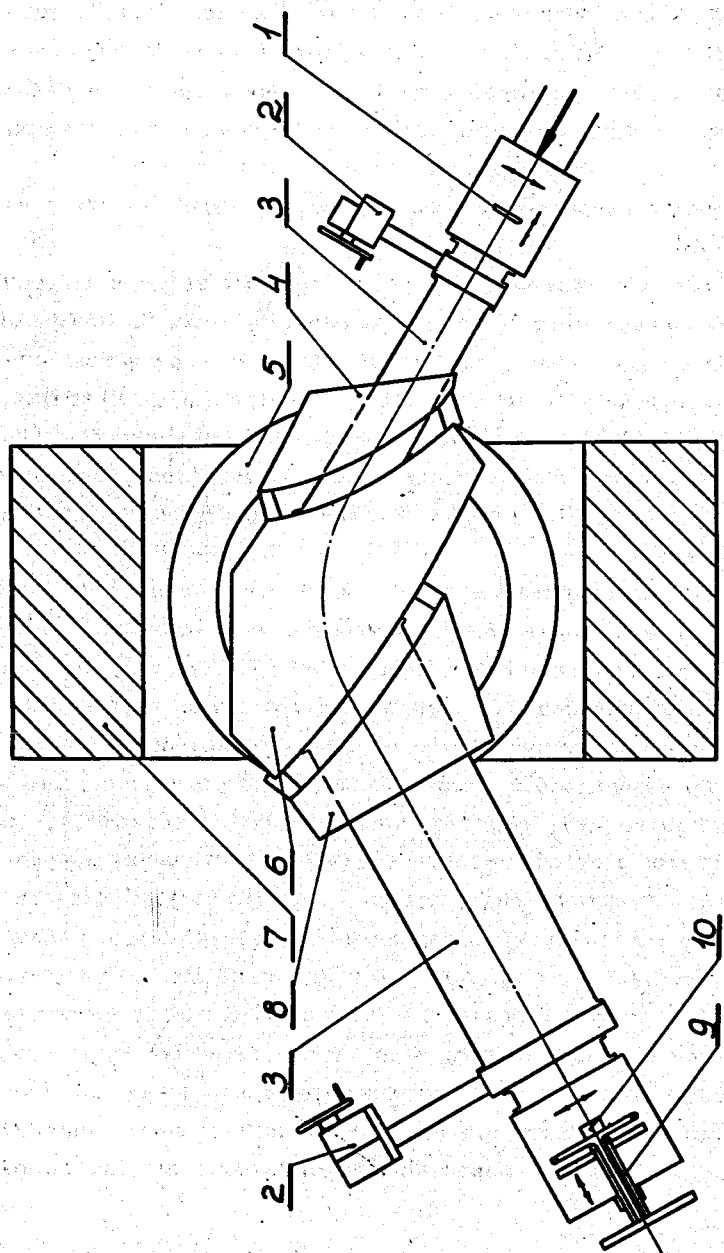


Рис. 2. Общий вид конструкции масс-сепаратора: 1 - мишень, 2 - шибберные затворы, 3 - входной и выходной патрубки, 4 - входной экран, 5 - катушка магнита, 6 - камера, 7 - ярмо магнита, 8 - выходной экран, 9 - сканирующее устройство, 10 - кремниевый поверхностно-барьерный детектор.

5. Проверка свойств магнитооптической системы включала в себя, в первую очередь, магнитные измерения: определение полей рассеяния на границах и проверку однородности поля в центральной части магнита. Измерения проводились с помощью прибора ИМИ-3 (датчик Холла), точность показаний прибора - 1,5%. Датчик Холла закреплялся на алюминиевой штанге в специальном приспособлении и мог перемещаться в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Поля рассеяния измерялись по всей длине границ вдоль нормалей к идеальной границе. Нормали проводились через 3 см, на каждой из них поля промерялись через 1-2 см.

Типичные кривые распределения краевого поля на входе и выходе магнита при двух значениях поля в центре показаны на рис. 3. Прямыми линиями показано рассеянное поле, которое фигурировало в расчётах. Измерения внутри зазора показали, что при поле в центре  $H_0 \leq 10$  кгаусс, магнитное поле однородно. При переходе к большим напряженностям (до  $H_p = 15$  гаусс) однородность поля несколько нарушается. Расчёты показывают, однако, что для работы газонаполненного масс-сепаратора эти отклонения несущественны.

При определении оптимального положения источника и положения фокальной плоскости масс-сепаратора использовался  $\alpha$  - источник  $^{244}\text{Pu}$ , имеющий две  $\alpha$  - линии с энергиями 5,801 Мэв (76,7%) и 5,759 Мэв (23,3%). С помощью механического устройства источник мог перемещаться в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Регистрация  $\alpha$  - частиц при калибровке производилась с помощью кремниевого детектора, который крепился на одной из двух кареток сканирующего устройства (см. рис. 2). Одна из кареток могла перемещаться в горизонтальном направлении, перпендикулярно пучку частиц, другая - по вертикали. В качестве привода служили нихромовые нити, выведенные через вакуумные уплотнения наружу, и намотанные на вращающийся барабан. Все устройство могло перемещаться также вдоль траектории частиц. Координата детектора была однозначно связана с показанием поворотного потенциометра (см. рис. 4). Пилообразное напряжение с потенциометра поступало на вход линейных ворот. Сигнал с детектора после усиления и дискриминации подавался на разрешающий вход ворот. В результате, с выхода ворот

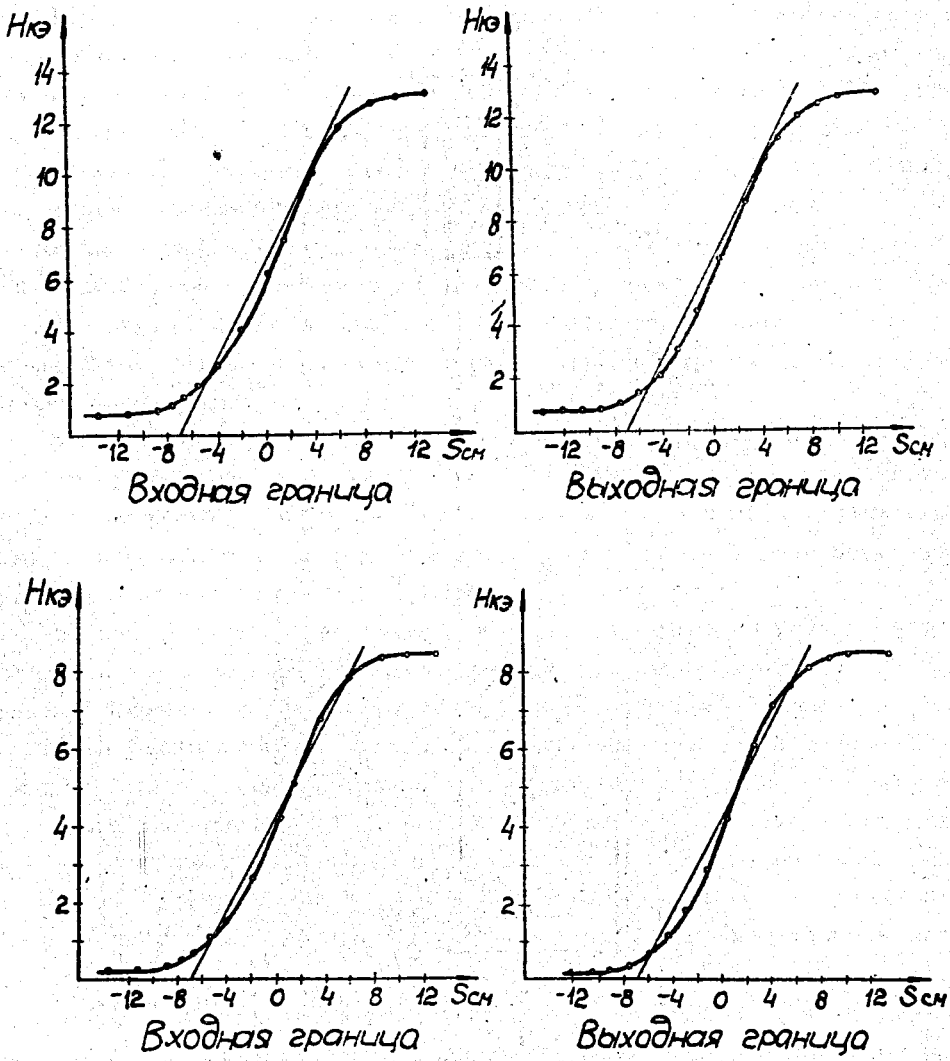


Рис. 3. Распределение поля на границах магнита.

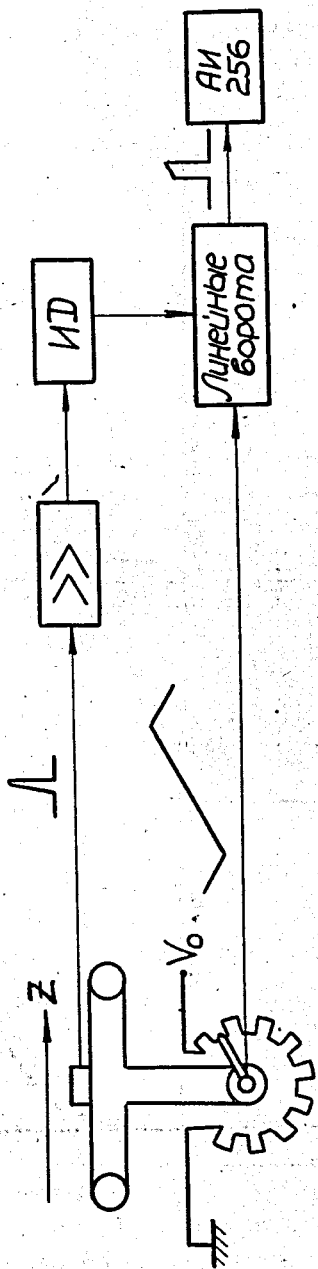


Рис. 4. Блок-схема к измерению распределения  $\alpha$  - частиц на выходе спектрометра.

на вход амплитудного анализатора поступали импульсы, амплитуда которых пропорциональна координате детектора. Спектр, записанный на анализаторе, непосредственно изображал форму линии от  $\alpha$  - источника в горизонтальном либо вертикальном направлении.

Горизонтальная форма линии, снятая в точке наилучшей фокусировки с максимальной светосилой при ширине источника 1 мм, показана на рис. 5. Относительная ширина  $\alpha$  - линии на полувывоте равна 0,3% (разрешение по  $H\beta$  - 0,15%). Ширина линии практически не менялась при уменьшении угла захвата спектрометра по горизонтали. Следовательно, полученное разрешение определяется толщиной  $\alpha$  - источника  $^{244}\text{Pu}$ . Оптимальное положение источника совпало с расчётным. Точка наилучшей горизонтальной фокусировки сдвинута от расчётного положения на 70 мм в сторону магнита. Изменение разрешения спектрометра при смещении детектора от точки наилучшей горизонтальной фокусировки вдоль траектории частиц показано на рис. 6.

По расстоянию между двумя  $\alpha$  - линиями на рис. 5 находим дисперсию прибора -  $18,5 \pm 1,0$  мм на 1%  $H\beta$ . По смещению  $\alpha$  - линии в фокальной плоскости, вызванному горизонтальным смещением источника перпендикулярно главной входной траектории, было найдено горизонтальное увеличение спектрометра -  $0,78 \pm 0,03$ .

На рис. 7 показана вертикальная форма  $\alpha$  - линии при высоте источника 5 мм и ширине 4 мм, измеренная при максимальной светосиле прибора. Ширина линии на полувывоте в точке наилучшей фокусировки равна 28 мм. Коэффициент вертикального увеличения был найден путем перемещения  $\alpha$  - источника по вертикали, он равен -  $2,65 \pm 0,25$ . Эта величина меньше расчётной (-3,26), что естественно, так как расчётное увеличение получено в предположении резкого спада поля на границах магнита. Большая ширина линии на рис. 7 вызвана аберрациями, пропорциональными  $\alpha^2 \gamma$ . Это подтверждается тем, что при горизонтальном угле захвата  $+4^\circ$  ширина вертикального изображения близка к утроенной высоте источника. Положения вертикального и горизонтального изображений не совпадают и сдвинуты между собой на 30 мм. Однако в точке горизонтального изображения ширина линии по вертикали увеличивается всего на 8%.

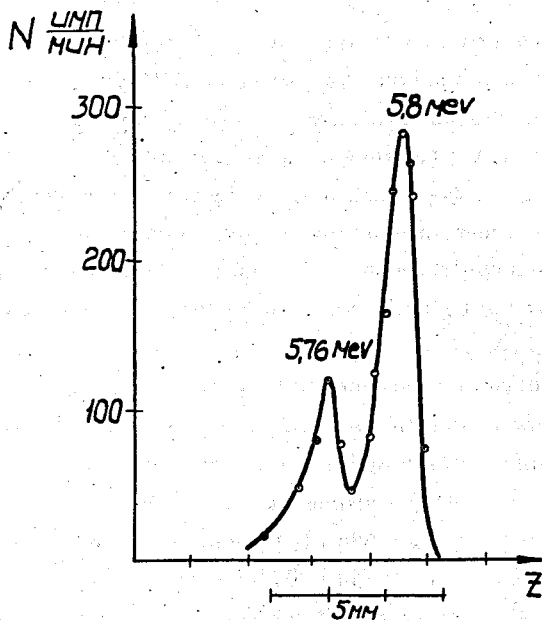


Рис. 5. Горизонтальная форма линии  $\alpha$  - частиц.

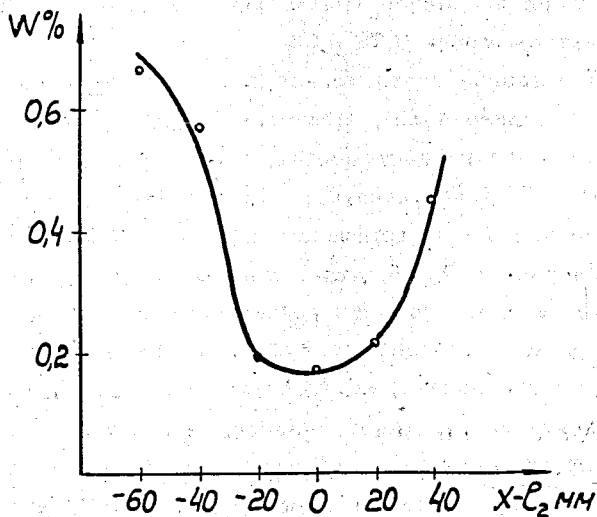


Рис. 6. Зависимость разрешения от положения детектора вдоль главной выходной траектории (ось  $x$ ).

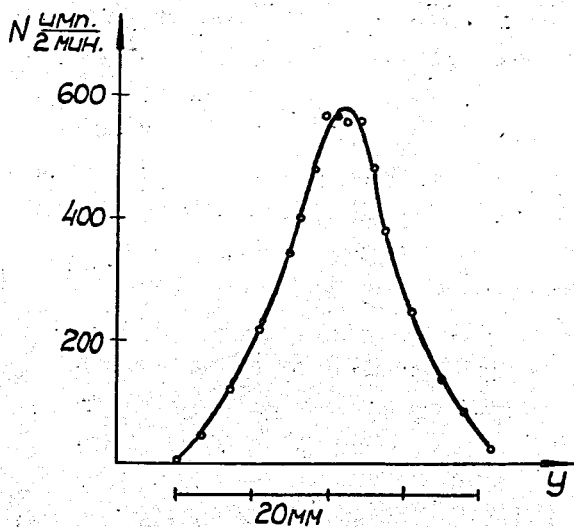


Рис. 7. Вертикальная форма линии  $\alpha$  - частиц.

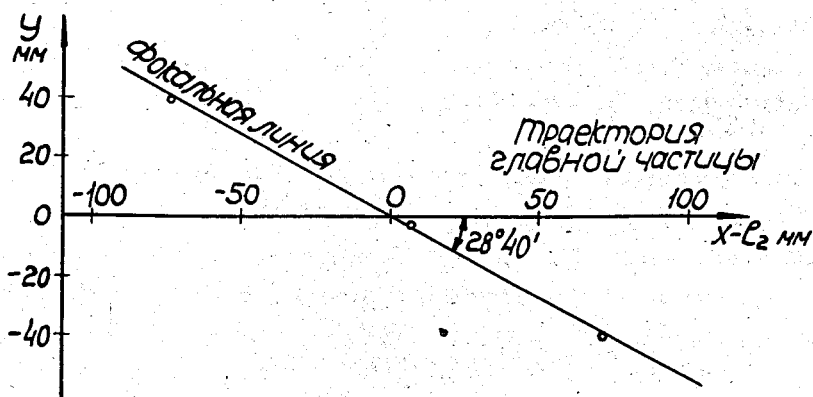


Рис. 8. Положение фокальной линии масс-сепаратора.

В проверку оптических свойств спектрометра входило, наконец, определение положения фокальной плоскости и исследование фокусирующих свойств прибора при импульсе частиц, отличающемся от центрального. С этой целью магнитное поле изменялось на  $\pm 2\%$  от величины, соответствующей импульсу  $\alpha$ -частиц  $^{244}\text{Pu}$ . При этом ухудшения разрешения спектрометра не было заметно. Через центральную точку наилучшей фокусировки и через две точки, соответствующие изменению  $H\rho$  на  $\pm 2\%$ , можно провести линию пересечения фокальной плоскости спектрометра с медианной плоскостью (рис. 8). Угол наклона этой линии к главной траектории -  $28^\circ 40' \pm 40'$ .

В заключение авторы выражают признательность академику Г.Н.Флеорову за интерес к работе и поддержку.

#### Л и т е р а т у р а

1. B.L.Cohen, C.B.Fulmer. *Nucl. Phys.*, 6, 547 (1958).
2. P.Armbruster, *Nukleonik*, 3, 188 (1961).
3. N.Bohr, J.Lindhardt. *Kgl. Danske Videnskab. Selskab. Mat. Fys. Medd.*, 28, N 7 (1954).
4. В.А.Друин, С.А.Карамян, Ю.Ц.Оганесян. Препринт ОИЯИ 1970 (1964).
5. H.Hintenberger *Zs. Naturforsch.*, 3a, 669 (1948);  
6a, 275 (1951).
6. W.G.Cross, *Rev. Sci. Instrum.*, 22, 717 (1951).
7. M.Cotte. *Ann. Phys.*, 10, 333 (1938).
8. Н.Г.Афанасьев. Изв. АН СССР, сер. физ. 24, №9, 1157 (1960).
9. Н.Г.Афанасьев, А.В.Высоцкая, В.А.Гольдштейн ПТЭ, 5, 29 (1963).
10. Н.Г.Афанасьев, А.В.Высоцкая, В.А.Гольдштейн ПТЭ. 5. 34 (1963).
11. R.Herzog. *Zs. Phys.*, 89, 447 (1934).
12. Н.И.Тарантин, А.В.Демьянов. ЖТФ 35, 186 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел

25 апреля 1969 года.