

867604603

РИ-22

Радиовый институт им. В. Г. Хлопина

Б. Н. Беляев, Л. Н. Галль, В. Д. Домкин,
Ю. Г. Коробулин, Л. М. Крижанский,
А. В. Ловцюс, М. С. Степанова

МАСС-СПЕКТРОМЕТР
"В ЛИНИИ" С УСКОРИТЕЛЕМ

Ленинград-1974

РИ-22

Радиовый институт им. В.Г. Хлопина

Б.Н. Беляев, Л.Н. Галь, В.Д. Домкин, Ю.Г. Коробулин,
Л.М. Крижальский, А.В. Ловцов, М.С. Степанов

МАСС-СПЕКТРОМЕТР "Э ЛИНИИ" С УСКОРИТЕЛЕМ

Ленинград - 1974

В работе сделано описание наиболее важных элементов и параметров масс-спектрометра, работающего "в линии" с синхротроном ДИФ на выведенном протонном пучке с энергией $E_p = 1$ ГэВ. Этот прибор был опробован с термоионизационным источником ионов, предназначенным для измерения выходов изотопов щелочных продуктов ядерных реакций. При этом получены результаты по сечениям образования изотопов лития (${}^6,7,8,9\text{Li}$) в углеродной мишени. Эти данные представляют интерес при обсуждении проблем образования элементов в космических лучах.

The paper contains the description of some most significant elements and parameters of the on-line mass-spectrometer in the external beam of 1 GeV protons by LNPI (Leningrad Nuclear Physics Institute) synchrocyclotron.

The experimental setup provided with a surface ionization source was tested by measuring the yields of alkaline isotopes from nuclear reaction. The cross sections for lithium isotopes (${}^6,7,8,9\text{Li}$) production in carbon target have been measured. The data are interesting for the discussion of the generation of elements in cosmic rays.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое развитие получила техника электромагнитной сепарации продуктов ядерных реакций, образующихся под действием высокоэнергетических бомбардирующих частиц /1/.

Используя такие установки прямо на пучке ускорителя или реактора (масс-сепараторы "в линии"), можно изучать явления деления, фрагментации, отщепления и др. путем измерения изотопного состава продуктов этих ядерных реакций. Эта же методика электромагнитной сепарации позволяет выделять и накапливать изотопы для спектрометрических исследований.

Возможности этой методики расширились с применением масс-спектрометров "в линии" с ускорителями. Наиболее успешно работает установка, разработанная в лаборатории профессора Бернса /2/. Преимуществами приборов такого типа являются высокая чувствительность и точность измерения относительных выходов изотопов щелочных металлов как стабильных, так и значительно удаленных от линии β -стабильности с временами жизни $0,01 \text{ сек} \leq T_{1/2} \leq \infty/3/$.

В данной работе приведено описание наиболее важных элементов и параметров масс-спектрометра, сконструированного нами для работы "в линии" с синхротроном ЛИФ им. Б.П. Константинова на выведенном пучке с энергией $E_p = 1 \text{ ГэВ}$.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Массо-спектрометр состоит из двух секций. Аналитическая секция, в которой продукты ядерных реакций извлекаются из мишени и разделяются по массам, помещается в зале, где проходит протонный пучок. За защитной стеной из железобетона толщиной 4-6 м помещается измерительная секция, состоящая из комплекса электронной измерительной аппаратуры, блоков питания и управления аналитической секцией.

Мишенное устройство, ионно-оптическая система и детектор помещаются в вакуумную камеру аналитической секции, изготовленную из нержавеющей стали. Высокий вакуум в камере обеспечивается двумя насосами. Турбомолекулярный насос (ТМН-200) помещается непосредственно под мишенным устройством, где достигается вакуум 5×10^{-8} мм Нг. Рядом с детектором ионов установлен электроразрядный насос (НЭМ-100), обеспечивающий вакуум в анализаторе $(2 - 3) \times 10^{-8}$ мм Нг.

Ионы, образовавшиеся в мишени и ускоренные ионно-оптической системой, разделяются по массам с помощью электромагнита, взятого от стандартного масс-спектрометра серии МИ-1305. Магнитное поле фокусирует ионные пучки с радиусом центральной траектории 200 мм и углом отклонения 60° . Дисперсия прибора достигает в фокальной плоскости 1,33 мм на один процент относительной разности масс, а разрешающая способность на уровне 5%-ной интенсивности линий масс-спектра около 400.

В качестве детектора ионов, прошедших через анализатор, используется вакуумный электронный умножитель от счетчика ионов с коэффициентом усиления не менее 10^6 , что позволяет измерять интенсивность ионных пучков как в токовом режиме (при ионных токах $10^{-12} - 10^{-18}$ А), так и в режиме счета отдельных ионов (при ионных

токах 10^{-15} - 10^{-19} А) /4/.

В данном масс-спектрометре при измерениях изотопного состава щелочных продуктов ядерных реакций используется термоионизационный источник ионов. В связи с большой массой мишенного устройства (I - 3 г) в источнике выделяется большая тепловая мощность 200-500 Вт, что предъявляет определенные требования к конструкции ионно-оптической системы прибора, показанной на рис. I.

КОНСТРУКЦИЯ ИОННОЙ ОПТИКИ

В современной масс-спектрометрии обычно используются источники ионов с коллимирующими щелевыми ионно-оптическими системами (типа Нира). С целью максимального приближения такой ионно-оптической системы к ее идеальной схеме, электроды изготавливаются из тонких металлических пластин с прорезями по оси ионного пучка. Периодические разогревы до высоких температур (300-500°C) делают невозможным использование такой классической ионно-оптической системы, так как это приводит к нестабильности работы такого источника и невоспроизводимости параметров формируемого им ионного пучка.

Для удовлетворения требованиям стабильности параметров ионно-оптической системы, в ее основу положен принцип массивного электрода. Электроды образуют щелевую систему, состоящую из трех цилиндрических линз. При выборе и разработке ионно-оптической системы для нашего источника необходимо было обеспечить высокую эффективность прибора в целом при номинальном его разрешении (300-400). Поэтому были проведены стендовые испытания нескольких вариантов ионно-оптической системы с целью определения оптимальных ее параметров для получения светосилы оптики (U) лучше 10% при угле горизонтальной расходимости (2α) около 1° и для согласования

ионного источника с масс-анализатором спектрометра.

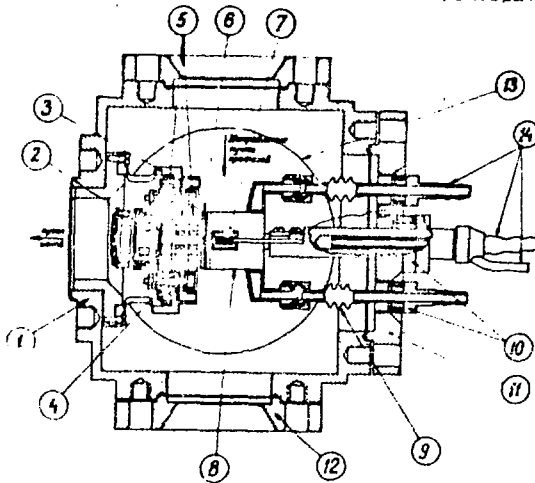


Рис. 1. Схематический чертеж камеры с ионным источником.

1. Корпус камеры ионного источника. 2. Коллиматор ионного пучка. 3. Стакан, фиксирующий положение ионной оптики в камере. 4. Болты крепления электродных плат с изолирующими керамическими шайбами. 5. Электродные платы ионно-оптической системы. 6. Вытягивающая линза. 7. Мишень. 8. Держатель вытягивающей линзы. 9. Сильфоны. 10. Металлокерамические вводы. 11. Фланец мишени устройства. 12. Фланец с окном из фольги (0,15 мм нержавеющей стали) для протонного пучка. 13. Вакуумная магистраль (трубопровод). 14. Поддача термостатированной воды.

ПРИМЕЧАНИЕ: На рисунке не показан фланец с восьмиштырьковым гнездом, через который подаются потенциалы на электроды ионно-оптической системы и коллиматора. (Он расположен на камере со стороны зрителя).

Схема ионно-оптической системы и расположение ее в вакуумной камере показаны на рис. 1 и 2. Фокусирующие электроды "Ф1" и "Ф2" крепятся к ускоряющему электроду "У" с помощью двух болтов

через керамические шайбы.

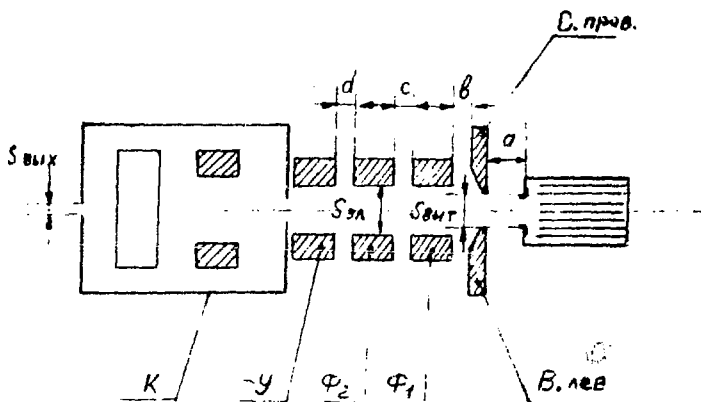


Рис. 2. Схема ионно-оптической системы:

- Φ_1, Φ_2 - фокусирующие электроды; $У$ - ускоряющий электрод;
- $В_{лев.}$ и $В_{прав.}$ - пластины вытягивающего электрода; a, b, c, d - расстояния между электродами.
- $S_{вых.}$ - выходная щель, $S_{эл.}$; $S_{выт.}$ - щели между ускоряющим, фокусирующими, вытягивающими электродами;
- $К$ - коллиматор с линзами.

Отдельно от них перед мишенным устройством располагается вытягивающий электрод ("В_{лев.}" и "В_{прав.}"), играющий одновременно и роль теплового экрана. К ускоряющему электроду крепится коллиматор источника с выходной щелью ($S_{вых.}$), которая при испытаниях оптики имела ширину 0,05 - 0,1 мм и высоту 6 мм. Цилиндрические линзы, размещенные в корпусе коллиматора, обеспечивают коррекцию пучка ионов в двух взаимно перпендикулярных направлениях, которая

необходима для согласования эмиттанса пучка ионов (площадь пучка в фазовом пространстве координат и импульсов) с акцептансом масс-анализатора (площадь фазового пространства, содержащая координаты тех ионов, которые будут пропущены данным устройством) /5/.

Испытания ионно-оптической системы проводились на автоматическом траектографе и вакуумном испытательном стенде с ленточным ионным источником, на который наносилась водная суспензия толченой слюды, являющаяся эмиттером ионов калия. Так как полный расчет ионно-оптической системы затруднителен, то при испытаниях с применением математических методов планирования эксперимента устанавливалась оптимальная геометрия ионной оптики с целью получения максимальной светосилы (\mathcal{V}), равной отношению величины ионного потока на выходе оптики ($I_{\text{вых}}^+$) к потоку ионов с ионизатора ($I_{\text{полный}}^+$), при ограничении угла горизонтальной расходимости $2\alpha = 0,5 - 2,5^\circ$. При этом варьировались потенциалы на электродах (V) и шесть геометрических параметров: расстояния между электродами (a, b, c, d) и ширина щелей ($S_{\text{вых.}}$, $S_{\text{эл.}}$). Лучшие результаты этого испытания сведены в табл. I. На вакуумном испытательном стенде (рис. 3) для второго случая с оптимальной геометрией (табл. I) определялись эмиттансы ионного пучка в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для этого при полностью раскрытых щелях (S_2 и S_3) источник ионов настраивался по максимальному ионному току на коллекторе "К". Затем щелью S_2 вырезалась малая часть ($1/15$) ионного пучка как по направлению "X", так и по "Y", (после поворота источника ионов на 90°), а щелью S_3 с шагом $0,1$ мм измерялось распределение интенсивности в этом элементарном пучке по тем же направлениям. Из этих данных для n ($n = 15$) элементарных пучков определялось направление распространения полного пучка ионов, вылетающих из источника, его расходимость на задан-

Таблица I

a	c	b	e	S _{ВЫХ}	S _{ЭЛ}	V _B лев	V _B прав	V _И	V _{С₂}	γ	2α
в миллиметрах						в вольтах				в °	в градусах
1,5	1,5	1,0	4,0	1,0	5,0	107	92	1090	2380	14	2°34'
2,0	2,0	1,3	4,5	1,3	6,5	186	182	2480	2400	16	1°09'
1,0	1,0	1,3	4,5	0,7	3,5	270	295	570	2100	10	0°55'
1,0	2,0	0,7	3,5	0,7	6,5	230	220	1540	2500	11	1°09'
1,0	1,0	0,7	4,5	1,3	6,5	290	260	1420	2500	9,5	1°09'
1,0	1,0	0,7	4,5	0,7	3,5	190	192	1580	2540	3,5	0°36'

Во всех режимах ускоряющее напряжение 3 кВ.

ном уровне интенсивности по осям "X" и "Y" и строились эмиттансы пучка в поперечных фазовых плоскостях (X, \dot{X}) - на рис. 4 и (Y, \dot{Y}) - на рис. 5 (при условии использования 80% ионов пучка).

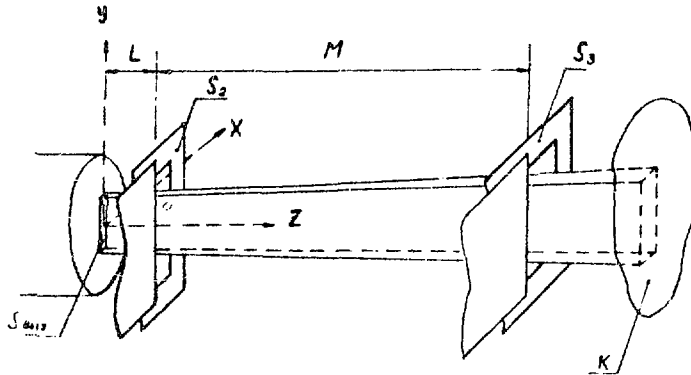


Рис. 3. Схема испытательного стенда для определения эмиттанса ионного пучка.

$S_{\text{вых.}}$ - выходная щель источника ионов; S_2, S_3 - щели стенда, коллимирующие ионный пучок; K - коллектор; $L = 18$ мм, $M = 150$ мм - расстояния между источником и коллимирующими щелями.

○ На рис. 5 показан акцептанс масс-анализатора. Необходимая подстройка эмиттанса ионного пучка осуществлялась фокусирующей линзой коллиматора, которая формирует слабосходящийся в вертикальной плоскости пучок ионов с энергией 3кэВ при напряжении на электродах линзы около 300 В. Эта линза позволяет также увеличить высоту выходной щели ($S_{\text{вых.}}$) до 9 мм.

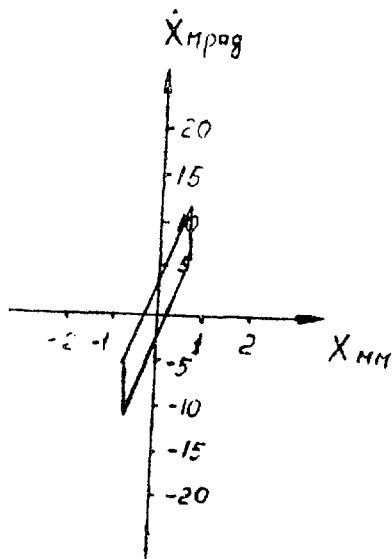


Рис. 4. Эмиттанс пучка на расстоянии $L = 18$ мм от щели источника на плоскости X, \dot{X} . Координаты $\dot{X} = \frac{dx}{dz}$ в мрад., а X в мм.

Таким образом, примененная ионно-оптическая система с малыми углами расходимости в горизонтальной плоскости обеспечивала получение высокой разрешающей способности масс-спектрометра (≈ 400) при светосиле $I_4 - I_6$.

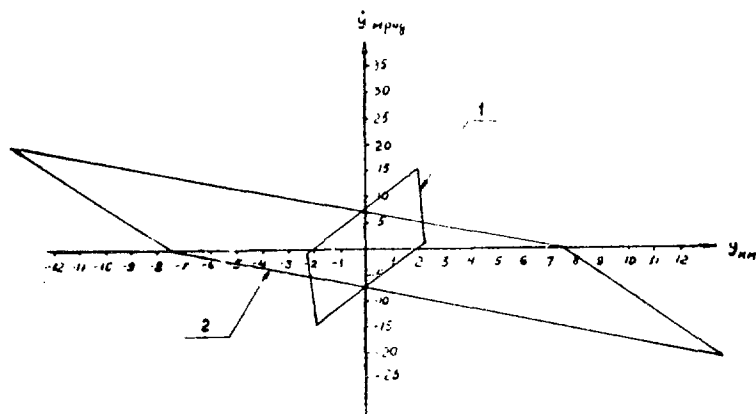


Рис. 5. 1) Эмиттанс пучка на расстоянии $L = 18$ мм от цели источника на плоскости Y, \dot{Y} . 2) Абертанс масс-спектрометра "в лънии". Координаты $\dot{Y} = \frac{dY}{dz}$ в град., а Y в мм.

УСТРОЙСТВО МИШЕНИ

Мишень представляла собой стопку тонких пластин из графита марки МПГ-6 (20-30 штук) толщиной 0,1 мм и площадью $9 \times 18 \text{ мм}^2$, которые с помощью узких прослоек из того же материала (размером $1 \times 10 \text{ мм}^2$) устанавливались на расстоянии 0,1 мм друг от друга, что ускоряло извлечение продуктов реакции из мишени. /2/. Мишень помещалась в танталовую коробочку с толщиной стенки 0,03 мм, через которую пропусклся электрический ток для разогрева ее до нужной температуры. В коробочке со стороны вытягивающего электрода сделана прорезь ($1,5 \times 15 \text{ мм}^2$), через которую продукты реакции извлекались из мишени. Для повышения эффективности дозирования продук-

тов ядерной реакции на края прорези наваривались полоски из рения. Коробочка с мишенью окружалась тепловым экраном из тантала толщиной 0,01 мм и вместе с ним приваривалась к молибденовым держателям, которые, в свою очередь, крепились к охлаждаемым водой металлокерамическим вводам. Для нагрева мишени использовался регулируемый стабилизированный выпрямитель с амплитудой пульсации менее 0,8% при напряжении 0-20 В и токе 0-200 А. В зависимости от того, какой химический элемент исследовался, для обеспечения оптимальных условий диффузии и ионизации мишень нагревалась до температуры 1500-1800°C. Температура калибровалась по мощности тока, выделяемой в мишени, с помощью пирометрирования через стеклянное окно в камере. Чтобы защитить ионно-оптическую систему от сильного разогрева, вытягивающая линза и мишенное устройство крепились на четырех металлокерамических вводах, сваренных в отдельный фланец. В вводах и в держателе электродов вытягивающей линзы сделаны каналы, в которых циркулировала вода, температура которой стабилизировалась термостатом. Перед измерениями мишень отжигалась в вакууме при $T \approx 1800^\circ\text{C}$ в течение двух суток с целью удаления из нее примесей щелочных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫХОДА ИЗОТОПОВ ЛИТИЯ

Продукты ядерных реакций, возникающие в мишени под действием протонного пучка, формировались в графитовых пластинках.

Мишенное устройство с графитовыми пластинками, имеющими массу 0,64 г, разогревалось до 1740°C. При этом атомы лития термоионизировались и быстро диффундировали в район прорези в коробочке. Оттуда ионы лития вытягивались электрическим полем, формировались в ленточный пучок с помощью ионно-оптической системы и поступали в коллекторный канал сор, где они разделялись по массам.

Масс-спектр продуктов реакции с помощью электронного умножителя, усилителя с коэффициентом усиления около 10^5 и дискриминатора на туннельном диоде регистрировался в цифровом виде на многоканальном анализаторе (АН-1024) в режиме медленного временного анализа /4/. Для этого напряжение на ионном источнике изменялось по линейному закону с амплитудой 40 В и периодом 5 мсек. Ускоряющее напряжение и развертка многоканального анализатора синхронизировались с моментом прохождения протонного пучка. Длительность протонных импульсов была 0,3 - 0,4 мсек, а интервалы между ними 22 - 25 мсек. Переход при измерениях от одного изотопа лития к другому осуществлялся изменением величины магнитного поля в масс-анализаторе, которая контролировалась прибором с датчиком Холла.

При измерении выходов изотопов ${}^7,8,9\text{Li}$ время облучения мишени составило 15 мин, а для ${}^6\text{Li}$ - 3 мин. Для каждой линии масс-спектра проводилось измерение фона в отсутствие протонного пучка. Точное измерение фона особенно необходимо для изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ в связи с загрязнением мишени природным литием. Контроль за интенсивностью протонного пучка осуществлялся ионизационной камерой с точностью $\pm 5\%$. Масс-спектр изотопов ${}^6,7,8,9\text{Li}$, полученный на графитовой мишени с протонным пучком интенсивностью около 10^{10} протонов в секунду с энергией $E_p = 1$ ГэВ, изображен на рис. 6 сплошной линией, штриховой линией показан спектр при выключенном ускорителе.

После учета доли изотопов ${}^8\text{Li}$ и ${}^9\text{Li}$, распавшихся за время диффузии /2/, определялись величины сечений образования изотопов лития из углерода в реакции ${}^{12}\text{C}(p, 4p \alpha n)\text{Li}$ для данной энергии протонов. Эти результаты отмечены в табл. 2 звездочкой. Там же приведены данные разных авторов по относительным и абсолютным сечениям этой реакции для других значений энергии протонов /6, 7, 8/. При вычислении сечений нами вводилась поправка на распад со-

Таблица 2

Энергия протонов ГэВ	Относительные сечения				Абсолютные сечения, в мбн.				Ссылка на работу
	${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$	${}^8\text{Li}/{}^6\text{Li}$	${}^9\text{Li}/{}^6\text{Li}$	${}^6\text{Li}$	${}^7\text{Li}$	${}^8\text{Li}$	${}^9\text{Li}$		
0,15	$0,79 \pm 0,08$	-	-	$9,8 \pm 2,0$	$7,8 \pm 1,5$	$0,20 \pm 0,05$	$0,020 \pm 0,005$	6	
0,15	$0,79 \pm 0,08$	-	-	$11,6 \pm 1,6$	$9,2 \pm 1,6$	-	-	6	
0,60	$0,88 \pm 0,05$	-	-	$15,5 \pm 2,2$	$13,6 \pm 2,0$	-	-	6	
1,0	$0,93 \pm 0,04$	$0,042 \pm 0,009$	$0,007 \pm 0,002$	15,5	14,4	0,65	0,11	ж	
1,0	-	-	-	-	-	-	0,216	7	
1,0	-	-	-	9,5	7	-	-	8 расчет	



Рис. 6. Масс-спектр изотопов лития.

По оси масс в районе пиков масштаб увеличен в 5 раз.

седних с литием изотопов бериллия, гелия, а также учитывались выходы изотопов лития из коробочки мишени путем аппроксимации имеющихся данных для тантала и соседних ядер для близких значений энергии протонов /7/. Эти поправки составляют 5-10% от величины относительных сечений образования лития.

В определенных нами относительных сечениях учтена статистическая ошибка в мониторинговании протонного пучка. Для определения абсолютных сечений мы исходили из основанного на расчетах /8/ грубого приближения, что сечения образования ${}^6\text{Li}$ из ${}^{12}\text{C}$ для энергии протонов 660 МэВ и 1 ГэВ одинаковы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами был сконструирован и запущен масс-спектрометр "в линии" с синхротриклотроном ЛММ им. Б.П. Константинова. Этот прибор был опробован с термоионизационным источником ионов, предназначенным для измерения выходов изотопов щелочных продуктов ядерных реакций, которые образуются в мишени под действием протонов с энергией $E_p \approx 1$ ГэВ.

При этом получен ряд результатов по сечениям образования изотопов лития (6,7,8,9Li) в углеродной мишени, которые представляют интерес при обсуждении проблем образования легких элементов в космических лучах.

В заключение авторы считают приятным долгом поблагодарить А.А. Воробьева за поддержку и предоставление возможности выполнения работы, Э.Б. Берловича за сотрудничество, А.В. Куликова и коллектив синхротриклотрона ЛММ им. Б.П. Константинова за помощь при монтаже и наладке установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. Int. Conf. Electromagnetic Isotope Separators and their Applications, Marburg Sept 7 to Sept 10, 1970, ВМВ-РВ К 70-28.
2. Klapisch R. e. a. Nucl. Instr. Meth. 1967, 53, N 2, 216.
3. Klapisch R. e. a. Phys. Rev. Lett. 1972, 29, N 19, 1254.
4. Беляев В.И., Домкин В.И., Колбин В.В., Ловцес А.В. ПТЭ, 1973, N 4, 190.
5. Бенфорд А. Транспортировка пучков заряженных частиц Москва, Атомиздат, 1969.
6. Gaisbeck G.M., Lestringuez J. and Yiou. Phys. Rev. 1972, 66, N 3, 685.

7. Dostrovsky I e. a. Phys. Rev. 1965, 139, N 6B, 1513.

8. Абдинов О.Б., Барашенков В.С. СИНТ, Р2-5291, Дубна, 1971.



Редактор М. А. Бутымо

РТИ РИ Подп. в печ. 29/х-74 г. 60х90/16 Уч.-изд. л. 5,9
Тир. 200 экз. Зак. № 207 Т - 05329. Цена 6 коп.