

М - 141

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

2618/2-78



19/vi-78

P7 - 11393

В.З.Майдиков, Ю.В.Гофман, Г.С.Попеко,  
Н.К.Скобелев

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ МАГНИТНЫЙ  
АНАЛИЗАТОР ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ  
НА ПУЧКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1978

P7 - 11393

В.З.Майдиков, Ю.В.Гофман, Г.С.Попеко,  
Н.К.Скобелев

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ МАГНИТНЫЙ  
АНАЛИЗАТОР ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ  
НА ПУЧКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

*Направлено в ПТЭ*



Майдиков В.З. и др.

P7 - 11393

Широкодиапазонный магнитный анализатор продуктов реакций на пучке тяжелых ионов

Дано сравнение широкодиапазонного магнитного анализатора со ступенчатыми полжосами с другими типами анализаторов. Проведена его калибровка на пучке тяжелых ионов. Определена эффективность регистрации продуктов реакций полного слияния. Показано, что параметры зарядового распределения ионов аргона-40 и ксенона-136 после перезарядки на углеродной фольге удовлетворительно согласуются с эмпирическими расчетными значениями.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Maidikov V.Z. et al.

P7 - 11393

Broad-Range Magnetic Analyzer of Products of Reactions on Heavy Ion Beam

A broad-range stepped-pole magnetic analyzer is compared to other types of analyzers. It has been calibrated on heavy ion beam. The efficiency of detecting full fusion reaction products has been determined. It is shown that parameters of charge distribution of argon-40 and xenon-136 ions passing through a thin carbon foil agree satisfactorily with empirically calculated values.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna 1978

## ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие физики тяжелых ионов, открывшиеся перспективы синтеза трансурановых и сверхтяжелых элементов, интерес к изучению ядер, удаленных от полосы стабильности, вызвали интенсивное развитие методов идентификации и анализа продуктов ядерных реакций.

Большое число возможных открытых каналов реакций с тяжелыми ионами создает определенные трудности для выделения и изучения отдельного канала. Известно, что в ряде случаев продукты реакций приходится регистрировать в условиях фона первичных частиц, который может превышать ожидаемый эффект в  $10^{10}$ - $10^{12}$  раз. Для надежной регистрации и анализа продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами системы такого анализа должны отвечать следующим основным требованиям:

1. Высокая эффективность регистрации /не хуже 10%/ для осуществления возможности изучения реакций, идущих с малыми сечениями образования до  $10^{-35}$  см<sup>2</sup>.
2. Хорошее массовое разрешение /до 1/250/ для изотопного разделения тяжелых продуктов ядерных реакций.
3. Высокое энергетическое разрешение  $\Delta E/E$  порядка  $10^{-3}$ .
4. Высокая степень очистки от нежелательных фоновых частиц вплоть до  $10^{-12}$ .
5. Малое время транспортировки и регистрации, позволяющее исследовать короткоживущие продукты реакций / $\leq 10^{-6}$  с/.

В зависимости от характера и условий эксперимента с тяжелыми ионами применяются различные методы анализа и идентификации продуктов реакции<sup>/1/</sup>. Наиболее удовлетворительными и соответствующими перечисленным требованиям, на наш взгляд, являются комбинации прямых методов избирательной спектрометрии, сочетающие в себе прецизионный анализ заряженных продуктов ядерных реакций в электрических или магнитных полях по электрической  $F_p \sim E/q$  или магнитной  $B_p \sim AE/q^2$  жесткостям, с измерением скорости продуктов во времени пролета или измерением их энергии  $E$  и удельных ионизационных потерь -  $dE/dx$ .

Благодаря пространственному разделению различных продуктов реакций магнитный и электрический анализы в значительной степени облегчают условия работы детекторов по загрузке фоновыми частицами и энергетическому разрешению<sup>/1,2,3/</sup>.

Большие успехи, достигнутые методами комбинированного анализа, сочетающими магнитный анализ и измерения времени пролета, энергии и ионизационных потерь легких продуктов ядерных реакций с многозарядными ионами<sup>/4,5/</sup>, позволяют надеяться на успешное применение этих методов для регистрации более тяжелых ядер. Поэтому было решено применить для сепарации продуктов ядерных реакций с более тяжелыми ионами широкодиапазонный магнитный анализатор со ступенчатыми полюсами<sup>/6,7/</sup>.

### ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ МАГНИТНЫЙ АНАЛИЗАТОР СО СТУПЕНЧАТЫМИ ПОЛЮСАМИ

По своим ионно-оптическим параметрам этот анализатор успешно конкурирует со спектрографом с расщепленными полюсами<sup>/8/</sup>, но значительно проще последнего по конструкции. Несмотря на то, что он рассчитан на регистрацию легких продуктов ядерных реакций с протонами, высокие ионно-оптические параметры анализатора позволяют использовать его и для анализа тя-

желых продуктов ядерных реакций с многозарядными ионами.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики наиболее распространенных типов широкодиапазонных магнитных спектрографов и анализаторов со ступенчатыми полюсами.

Таблица 1

Ионно-оптический параметр	Типы анализаторов			
	Брауна-Бюхнера <sup>9/</sup>	Борггрин, Эльбека <sup>10/</sup>	С расщепленными полюсами <sup>8/</sup>	Со ступенчатыми полюсами <sup>6,7/</sup>
Энергетический диапазон $E_{\max}/E_{\min}$	2,4	7	8	5,2
Дисперсия, $D$ (м)	1,5	2	1,75	1,9
Горизонтальное увеличение, $M_{\text{гор}}$	1	0,8	0,3	0,3
Вертикальное увеличение, $M_{\text{верт}}$			4	2,7
Отношение дисперсии к увеличению $D/M_{\text{гор}}$	1,5	2,5	5,5	6,3
Угол отклонения частицы, град.	90	108,7	114	110,7
Макс. $AxE/q$ (МэВ.а.е.м.)	22	50	90	80
Макс. радиус $R$ (м)	0,57	0,84	0,9	1,25
Телесный угол (миллистерад.)	0,4	1	2,3	5
Энергетическое разрешение $\Delta E/E$	$10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$

Значительный энергетический диапазон и удачное соотношение между дисперсией и увеличением магнитного анализатора со ступенчатыми полюсами особенно ценны при работе с тяжелыми ионами, когда сущест-

венную роль при магнитном анализе играет множественность зарядовых состояний продуктов ядерных реакций. Большой телесный угол и хорошее энергетическое разрешение анализатора со ступенчатыми полюсами позволяют использовать его в экспериментах с малыми сечениями образования продуктов реакций и проводить их прецизионный анализ.

Важными являются также такие характеристики, как линейность фокальной плоскости магнитного анализатора на всей ее длине 1500 мм, а также линейная зависимость дисперсии и разрешения от положения на фокальной плоскости. В конструкции данного анализатора предусмотрена возможность компенсации кинематического разброса регистрируемых частиц в большом телесном угле захвата, что, безусловно, важно в экспериментах с тяжелыми налетающими частицами.

Возможность одновременного анализа частиц широкого диапазона магнитным анализатором при номинальном значении поля в зазоре иллюстрируется рис. 1.

Длина траектории частиц в анализаторе не превышает 3 м, что позволяет анализировать достаточно короткоживущие продукты ядерных реакций  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  с. Недостатком этого анализатора, создающим неудобства при регистрации малоэнергичных продуктов реакций, является довольно большой угол наклона траекторий к фокальной плоскости, близкий к  $42^\circ$ .

### КАЛИБРОВКА АНАЛИЗАТОРА ПУЧКОМ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Результаты предварительной калибровки фокальной плоскости анализатора с помощью источника  $\alpha$ -частиц  $^{244}\text{Cm}$  при относительно невысоких значениях магнитного поля  $^{7/}$  не позволяют провести надежной экстраполяции в область больших магнитных полей в зазоре.

Для калибровки фокальной плоскости анализатора при больших значениях магнитного поля в зазоре /близких к номинальному/ использовались пучки многозарядных ионов  $^{40}\text{Ar}^{+6}$  с энергией 221 МэВ и  $^{136}\text{Xe}^{+9}$  с энергией 144 МэВ, полученные на циклотроне ОИЯИ У-300.

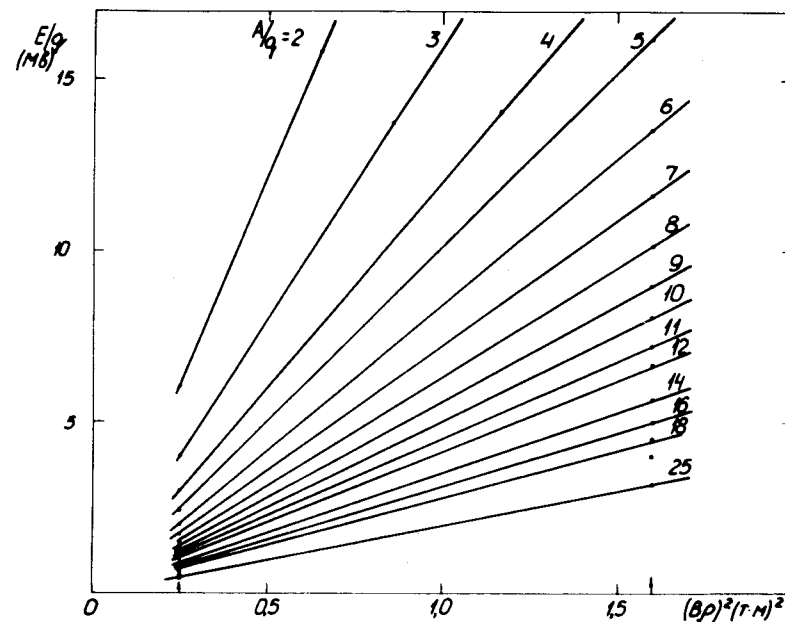


Рис. 1. Связь между "удельной энергией" /отношением энергии частицы к ее ионному заряду  $E/q$  /, "удельной массой" /отношением массового числа частицы к ее ионному заряду  $A/q$  / и магнитной жесткостью  $Bp$ . Стрелками обозначен диапазон одновременного анализа на фокальной плоскости магнитного анализатора со ступенчатыми полюсами.

Эти пучки с монохроматичностью по энергии около 1% позволяют после дополнительной перезарядки на тонкой углеродной мишени получать спектр зарядовых распределений, перекрывающий значительную часть фокальной плоскости анализатора частицами одной энергии.

Значения магнитной жесткости  $Bp$  каждого заряда легко определяются по начальной магнитной жесткости ускоренного иона и соотношениям зарядов. Схема эксперимента представлена на рис. 2.

Коллимированный пучок ускоренных ионов проходил через тонкую углеродную пленку - стриппер - толщиной  $40-50 \text{ мкг/см}^2$ , установленную на месте источника спектрографа. После перезарядки пучок ионов проходил через

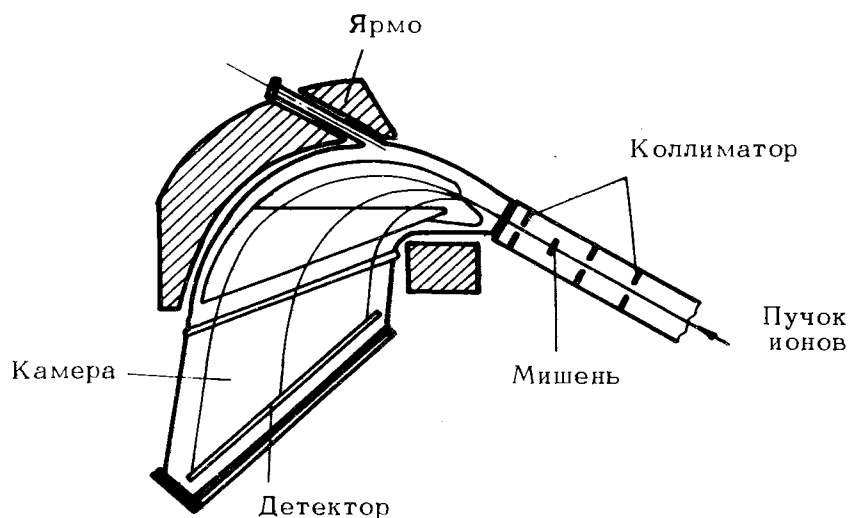


Рис. 2. Схема эксперимента по калибровке магнитного анализатора многозарядными ионами.

коллиматор и попадал в зазор магнитного анализатора, установленного под углом  $0^\circ$  к первичному пучку. Регистрация ионов с различными зарядовыми состояниями на фокальной плоскости осуществлялась двумя способами: трековыми детекторами или подвижным поверхностно-барьерным полупроводниковым детектором.

В качестве трековых детекторов использовалась лавсановая пленка толщиной 20-30 мкм, размещенная в фокальной плоскости внутри вакуумной камеры анализатора. Специальное устройство позволяло проводить смену лавсановой ленты без нарушения вакуума и обеспечивало около 100 различных экспозиций при одной зарядке ленты. Эффективный размер детектора для одной экспозиции составлял 1500x50 мм. Для проявления треков лавсановая пленка обрабатывалась в 20% растворе NaOH при температуре  $60^\circ\text{C}$  в течение двух часов. Число треков и положение центроидов зарядовых состояний определялось сканированием на микроскопе МБИ-8 или фотометрированием, в зависимости от плотности треков.

Перемещение и остановка полупроводникового поверхностно-барьерного детектора в любой точке фокальной плоскости осуществлялись с помощью дистанционного привода, который позволял также проводить непрерывное сканирование детектором с вертикальной щелью  $2 \times 20$  мм всей длины фокальной плоскости. Положение детектора на фокальной плоскости определялось потенциалом на многооборотном потенциометре, жестко связанном с приводом детектора. Положение детектора и число ионов в данной точке фокальной плоскости определялось из двумерных амплитудных спектров по известной схеме<sup>/11/</sup>.

Результаты калибровок согласуются в обоих опытах в пределах точности эксперимента, определяемой стабильностью первичного пучка ионов во времени.

Идентификацию зарядовых состояний ионов производили, исходя из магнитной жесткости наибольшего возможного зарядового состояния  $+18/$  аргона-40. Типичные зарядовые спектры ионов  $^{40}\text{Ar}$  и  $^{136}\text{Xe}$  представлены на рис. 3 и 4. На этих рисунках представлены также доли полученных отдельных зарядовых состояний ионов аргона и ксенона. Зарядовые распределения ионов, полученные в эксперименте, представлены точками. Сплошные линии отражают расчетные зарядовые распределения в предположении, что они отвечают нормальному распределению. В табл. 2 представлены экспериментальные значения равновесных зарядов  $\bar{q}$  и дисперсии  $\sigma$  зарядовых распределений, а также расчетные значения этих величин, полученные из эмпирических соотношений<sup>/12/</sup>, предложенных Бетцом<sup>/12/</sup>, Николаевым и Дмитриевым<sup>/13/</sup>.

Таблица 2

Ион	Энергия (МэВ)	Эксперимент		Расчет			
		$\bar{q}$	$\sigma$	$\bar{q}$	$\sigma$	Работа <sup>/13/</sup>	Работа <sup>/12/</sup>
$^{40}\text{Ar}$	221	$16,1 \pm 0,5$	0,84	15,9	0,86	16,9	1,15
$^{136}\text{Xe}$	144	$27,7 \pm 0,5$	1,77	27,8	2,16	30,2	1,98

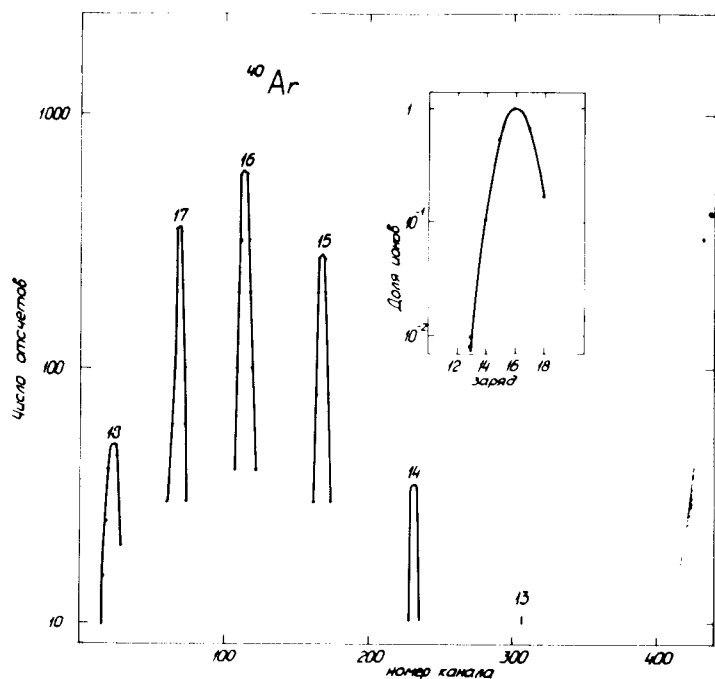


Рис. 3. Зарядовое распределение ионов  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 221 МэВ после прохождения углеродной фольги.

Из сопоставления данных видно, что экспериментальные значения равновесных зарядов удовлетворительно согласуются с расчетными значениями. Отметим, однако, что ни одно из эмпирических выражений не может претендовать на полное описание зарядовых распределений ионов после перезарядки на твердотельном стриппере. Из таблицы видно, что экспериментальные значения равновесных зарядов для указанного диапазона энергий ионов находятся в наилучшем согласии с расчетными значениями работы <sup>13/</sup>. Дисперсии же лучше согласуются с расчетными значениями Бетца <sup>12/</sup>. Хочется отметить, что расширение экспериментальной информации о характере зарядовых распределений тяжелых ионов представляет большой практический интерес для развития физики тяжелых ионов, а также для изучения процессов атомных столкновений.

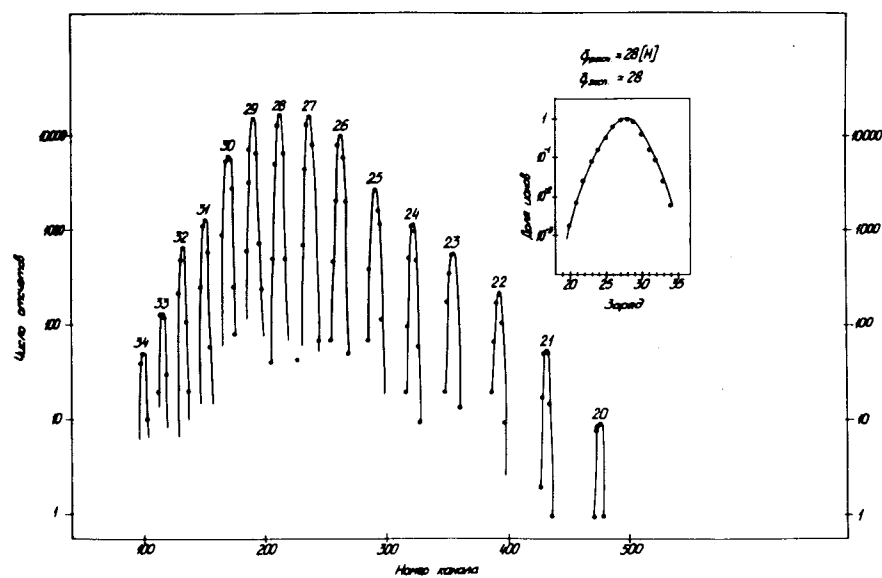


Рис. 4. Зарядовое распределение ионов  $^{136}\text{Xe}$  с энергией 144 МэВ после прохождения углеродной фольги.

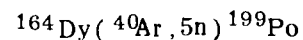
Данные о положении различных зарядовых состояний ионов известной магнитной жесткости служили основанием для построения калибровочных кривых, связывающих магнитную жесткость ионов с их положением на фокальной плоскости /рис. 5/.

#### ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНОГО АНАЛИЗАТОРА

Для проверки эффективности регистрации продуктов ядерных реакций магнитного анализатора были выбраны известные реакции полного слияния



и



с относительно большими сечениями, причем для первой из них имеются данные по угловым распределениям продуктов реакции <sup>14,15/</sup>.

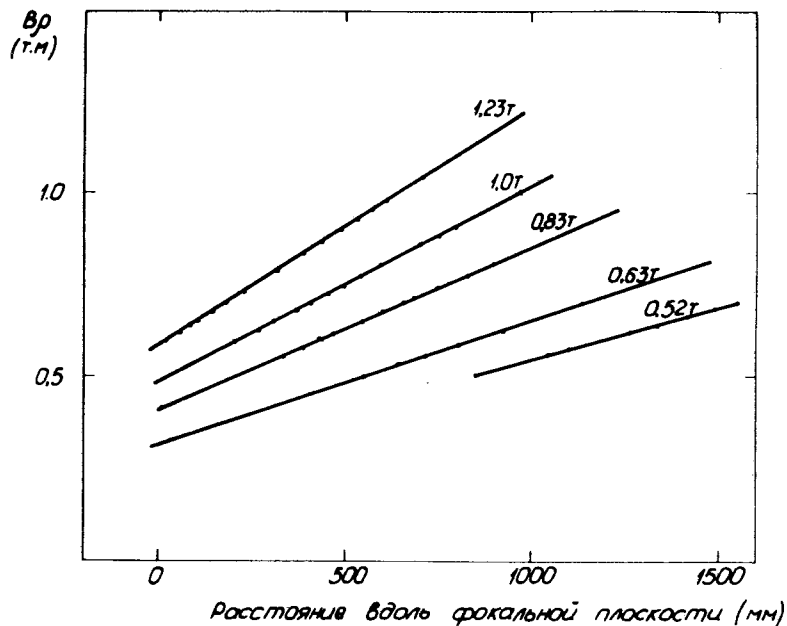


Рис. 5. Связь магнитной жесткости частиц с их положением на фокальной плоскости магнитного анализатора при различных значениях магнитного поля в зазоре.

Измерение эффективности транспортировки проводилось путем сравнения полного сбора продуктов ядерных реакций на входе анализатора с продуктами, собранными на его фокальной плоскости, в двух последовательных опытах. Эти продукты ядерных реакций собирались на алюминиевый сборник, их регистрация и идентификация осуществлялись Ge(Li)-детектором по известным  $\gamma$ -спектрам изотопов  $^{147}\text{Gd}$  и  $^{199}\text{Pb}$  - дочерних продуктов распада  $^{147}\text{Dy}$  и  $^{199}\text{Po}$ .

Мониторинг пучка ионов аргона проводился по интенсивности рассеянных ионов аргона под углом  $20^\circ$  к мишени, а также по выходу изотопа  $^{147}\text{Dy}$  на узкой полоске фольги естественного кадмия. Входная апертура анализатора ограничивалась телесным углом  $5 \cdot 10^{-3}$  ср. Размер пучка был ограничен до 10 мм в диаметре, что обеспечивало светимость источника  $0,4 \text{ мм}^2 \cdot \text{ср}$ .

Измерения показали, что для обеих вышеуказанных реакций эффективность транспортировки продуктов полного слияния на фокальную плоскость анализатора составила  $60 \pm 10\%$ .

Авторы выражают свою признательность Ю.Ц.Оганесяну и Г.М.Тер-Акопяну за постановку этой работы, постоянный к ней интерес и обсуждение результатов. Авторы благодарят Б.В.Шилова, И.И.Штоня, И.Ф.Волкова, а также сотрудников механических мастерских, электромеханического отдела и отдела базовых установок ЛЯР за большую помощь в размещении, монтаже, запуске магнитного анализатора и проведении экспериментов. Авторы благодарят П.Ю.Апеля, проводившего обработку трековых детекторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Armbruster P. *Proc. of the III Int. Conf. on Nuclei Far from Stability*. Corgesse, 1976, CERN-76-13, p.3.
2. Арифов У.А. и др. ДАН СССР, сер. физ., 1972, 204, с.586.
3. Moll E. *GSI-Bericht 73-3*, 1973, p.49.
4. Artukh A.G. e.a. *Nucl.Phys.*, 1971, A176, p.284.
5. Jacmart J.C. e.a. *Nucl.Phys.*, 1975, A242, p.175.
6. Басаргин Ю.Г. и др. Прикладная ядерная спектроскопия, 1974, вып. 4, с.253.
7. Basargin Yu.G. e.a. *Nucl.Instr. and Meth.*, 1975, 126, p.413.
8. Spencer J.E., Enge H. *Nucl.Instr. and Meth.*, 1967, 49, p.181.
9. Browne C.P., Buechner W.W. *Rev. of the Sci.Instr.*, 1956, 27, p.899.
10. Borggreen J. e.a. *Nucl.Instr. and Meth.*, 1973, 24, p.1.
11. Карнаухов В.А. и др. ОИЯИ, 13-4454, Дубна, 1969.
12. Betz H.D. *Rev. of Mod. Phys.*, 1972, 44, p.465.
13. Николаев В.С., Дмитриев И.С. ЖЭТФ, 1960, 39, с.905; *Phys. Lett.*, 1968, 28A, p.277.
14. Alexander J.M., Simonoff G.N. *Phys. Rev.*, 1964, 133B, p.93.
15. Lebeyec J. e.a. *Phys.Rev.*, 1976, C14, p.1038.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 марта 1978 года.