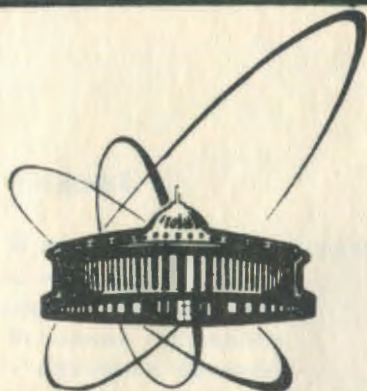


90-195



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

C-44

P7-90-195

Н.К.Скобелев, С.М.Лукьянов, Ю.Э.Пенионжкевич,
С.П.Третьякова, В.А.Горшков

ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ
ЯДЕР ГЕЛИЯ И ЛИТИЯ НА ЯДРАХ СЕРЕБРА

Направлено в Оргкомитет 40 Совещания по ядерной
спектроскопии и структуре ядра, Ленинград,
апрель 1990 г.

1990

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в различных научных центрах начаты работы с использованием вторичных радиоактивных пучков, сформированных из радиоактивных продуктов ядерных реакций.

Основная направленность исследований со вторичными пучками - изучение сечений взаимодействия этих экзотических ядер с ядрами мишени, из которых может быть извлечена информация о структуре ядер, удаленных от области стабильности, а именно: о распределении ядерной материи или радиусах ядер^{/1-3/}.

Получение высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов промежуточных энергий позволило получить в реакциях фрагментации и сформировать вторичные пучки экзотических ядер, а также провести изучение сечений взаимодействия между этими экзотическими ядрами и ядрами мишени^{/2,3/}. Извлеченная из этих данных информация^{/2,3/} о радиусах взаимодействия вошла в противоречие с ранее полученными данными на пучках протонов высоких энергий^{/1/}.

В таких экспериментах с вторичными пучками высоких энергий были получены необычно большие значения радиусов ядер для ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$ и ${}^{17}\text{B}$ ^{/1,3/}.

В связи с этим обстоятельством возникла необходимость получения дополнительной информации о размерах ядер другими методами^{/4/}. Наиболее корректным способом получения такой информации может служить изучение упругого рассеяния экзотических ядер вторичного пучка на ядрах мишени. Нами была сделана попытка получить вторичные пучки ядер легчайших элементов в прямых реакциях при энергии ~ 20 МэВ/А^{/5/}. Основой для постановки таких опытов послужили данные об изученных ранее сечениях образования нейтроноизбыточных изотопов легчайших элементов^{/6/}. В настоящей работе проведены эксперименты по исследованию углового распределения упругорассеянных ядер ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^8\text{Li}$ и ${}^9\text{Li}$, образующихся в реакциях взаимодействия ${}^{11}\text{B}$ с энергией 18,2 МэВ/нуклон с ядрами мишени из ${}^{12}\text{C}$, ${}^9\text{Be}$ или ${}^{181}\text{Ta}$.

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис.1 представлено схематическое изображение экспериментальной установки, используемой в опытах для сепарации и иден-

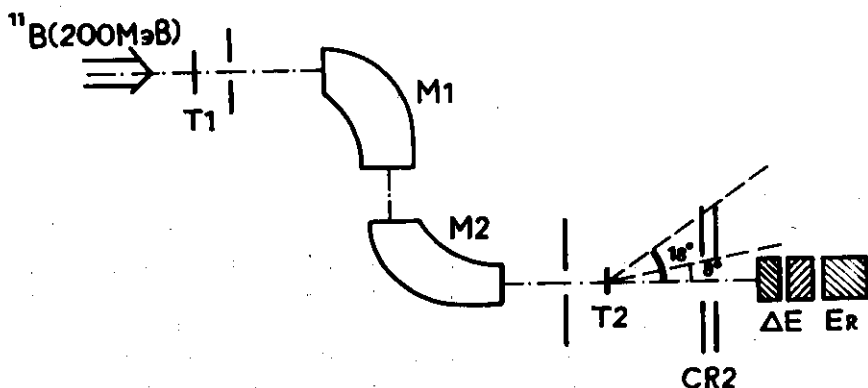


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: T1 - мишень первичного пучка, T2 - мишень для вторичного пучка, CR - телескоп из пластических диэлектрических детекторов, ΔE, E - полупроводниковые детекторы толщиной 120 и 2000 мкм.

тификации легких продуктов ядерных реакций. Основу установки составляют два дипольных магнита M1 и M2, которые используются в системе транспортировки и снижения выведенного пучка ускоренных тяжелых ионов на ускорителе У-400^{7/77}. Основные параметры дипольных магнитов и схем преобразования пучка приведены в^{8/}.

Как показали эксперименты^{5/}, вторичные пучки легчайших ядер могут быть сформированы из продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами при энергии ионов до 20 МэВ/нуклон. Для этого перед дипольными магнитами устанавливалась охлаждаемая мишень T1, рассчитанная на полное поглощение ионов ¹¹B с энергией 200 МэВ. Образовавшиеся продукты реакций транспортировались с помощью квадрупольных и дипольных магнитов в реакционную камеру, в которой были установлены вторая тонкая мишень T2 для рассеяния легких частиц вторичного пучка и телескоп ΔEхE для идентификации и мониторинга интенсивности вторичного пучка.

Как показали опыты, при угле захвата магнитного анализатора M1-M2 ~9 мср система транспортировки позволяет получать интенсивность сфокусированного на мишень вторичного пучка ⁶He или ⁹Li до 10³ част./с при первоначальном токе пучка ¹¹B ~ 1 мкА. Интенсивности вторичных частиц ⁶He и ⁹Li при этих условиях были в несколько раз ниже.

Необходимо заметить, что интенсивность вторичного пучка и соотношение выхода частиц на мишени зависит от Z ядра-мише-

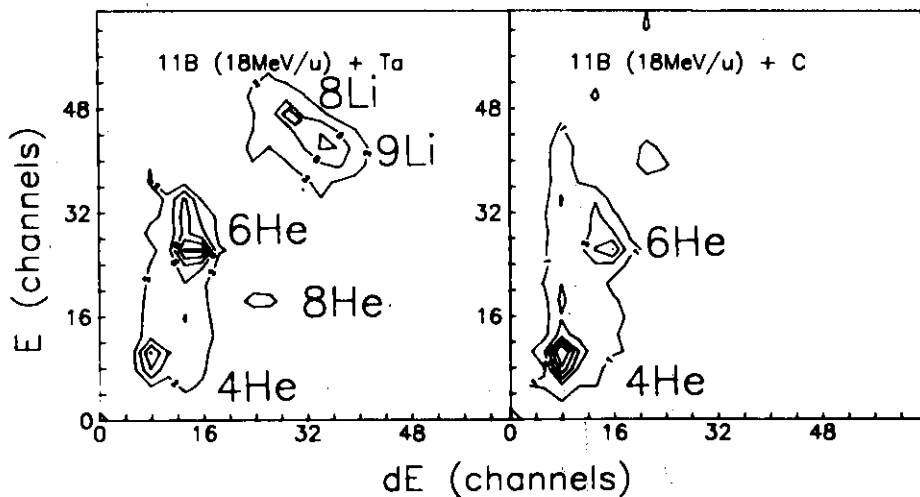


Рис.2. ΔE - E диаграммы для реакции $^{11}\text{B} + \text{C}$ и $^{11}\text{B} + \text{Ta}$.

ни и выбранной магнитной жесткости системы. В ядерных реакциях $^{11}\text{B} / 200 \text{ МэВ} / + ^{12}\text{C}$ или ^9Be преобладает выход изотопов ^4He и ^6He . Измеренное соотношение выходов ^6He при бомбардировке ^{11}B мишеней из ^{181}Ta , ^{12}C и ^9Be близко к величинам 1:2:4. Следует отметить, что наиболее широкий диапазон вторичных продуктов наблюдается в реакции $^{11}\text{B} + ^{181}\text{Ta}$ (500 мг/см^2)^{9/}. В качестве иллюстрации на рис.2 представлена ΔE - E матрица для реакций $^{11}\text{B} + ^{12}\text{C}$ и $^{11}\text{B} + ^{181}\text{Ta}$. Последняя реакция была выбрана для изучения рассеяния образовавшихся радиоактивных ядер, ^6He , ^8He , ^8Li и ^9Li на ядрах серебра. Для этого пучок вторичных частиц был сфокусирован и ограничен в размерах диафрагмами /до 5 мм в диаметре/. На пути сфокусированного таким образом пучка устанавливалась мишень T2 /рис.1/ из естественной смеси изотопов серебра толщиной 300 мкг/см^2 . Мониторинг потока радиоактивных ядер вторичного пучка проводился с помощью ΔE - E -телескопа, а идентификация и измерение числа рассеянных под различными углами ядер осуществлялись с помощью "сэндвича" из двух пластических диэлектрических детекторов типа CR-39/^{10/}. Полупроводниковые кремниевые детекторы для измерения энергии частиц имели толщину чувствительного слоя до 2 мм, а ΔE -детекторы - от 70 до 150 мкм. Набор информации и обработка ΔE - E матриц проводились с использованием персональных компьютеров типа AT. Обработка проводилась с использованием модифицированной программы SPM/^{11/}. Система сепарации продуктов реакции настраивалась так, чтобы обеспечить транспортировку продуктов ^6He , ^8He , ^8Li и ^9Li с энергиями 57,

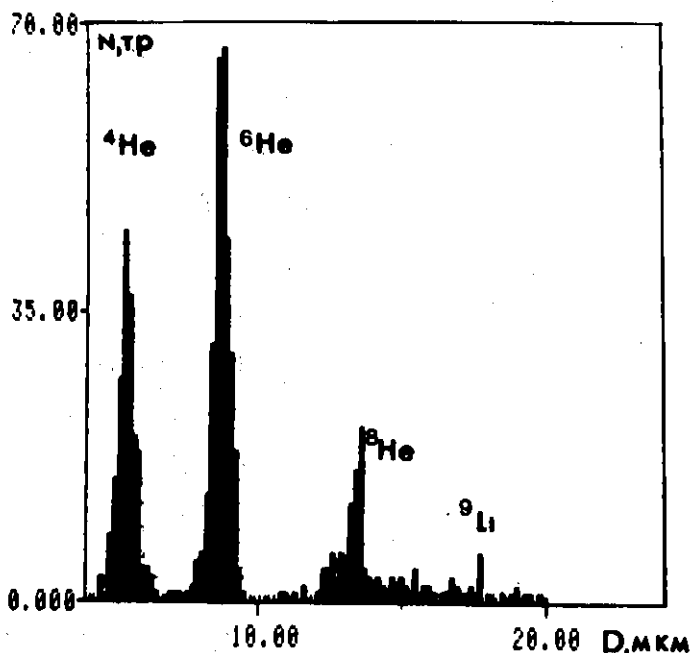


Рис.3. Распределение треков, образованных изотопами ^4He , ^6He , ^8He и ^9Li , в зависимости от диаметров.

43, 94 и 86 МэВ соответственно и энергетическим разбросом ~2%. Расстояния между мишенью и пластиками и размеры пластиков позволяли охватить углы рассеяния от 8° до 22° . Использование пластических детекторов позволило провести эксперименты по рассеянию вторичных радиоактивных частиц при их сравнительно низкой интенсивности. Идентификация рассеянных ядер изотопов гелия и лития с помощью пластиков CR-39 осуществлялась по диаметрам треков, оставляемых частицами с учетом угловой направленности трека по отношению к направлению вторичного пучка. На рис.3 приведены калибровочные распределения диаметров треков от ^4He , ^6He , ^8He и ^9Li с указанными выше значениями энергий этих вторичных частиц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис.4,5 представлены полученные зависимости отношения дифференциальных сечений рассеяния к сечению Резерфордовского рассеяния от угла рассеяния /в лабораторной системе координат/

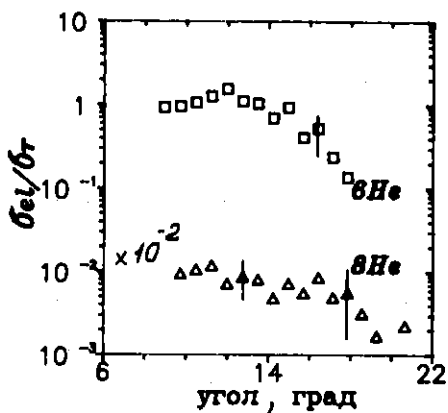
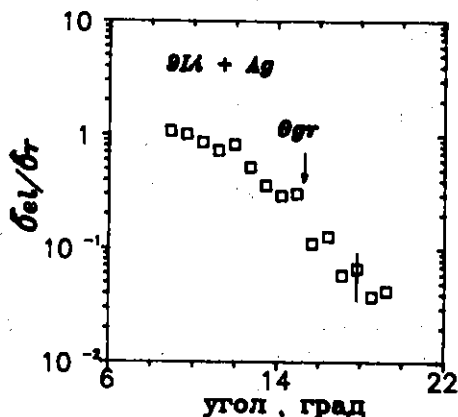


Рис.5. Зависимость величины σ/σ_R от угла в лабораторной системе для ^9Li .

Рис.4. Зависимость отношения упругого рассеяния к резерфордскому σ/σ_R от угла в лабораторной системе для ^6He и ^8He .



для ядер ^6He , ^8He , ^9Li . Полученные зависимости сечений рассеяния в области малых углов характерны для реакций упругого рассеяния. При увеличении угла рассеяния наблюдается уменьшение отношения σ/σ_R , что объясняется включением канала ядерного поглощения. В рамках квазиклассического приближения из полученных экспериментальных данных определялось значение угла грейзинга^{14/}.

Согласно дифракционной модели при угле грейзинга $\theta_{1/4}$ отношение сечений σ/σ_R должно равняться $0,25^{12/}$.

При увеличении угла рассеяния возникают проблемы разделения упругого и неупругого процессов. Как показывают оценки и эксперименты по рассеянию легких стабильных ядер, неупругие процессы в области угла $\theta_{1/4}$ могут вносить вклад $\sim 1 \pm 10\%$ ^{13, 14/}. В частности, в работе^{14/} измеренная вероятность возбуждения M1- и E2-состояний в ядре мишени ^{197}Au ионами ^8Li не превышает $6 \cdot 10^{-2}$ от упругого канала. Таким образом, при рассмотрении соотношения σ/σ_R для определения $\theta_{1/4}$ в первом приближении можно было пренебречь вкладом неупругих каналов.

Полученные таким образом значения углов грейзинга представлены в таблице. Из этих значений углов $\theta_{1/4}$ определялись эффективные радиусы взаимодействия^{12, 15/}:

$$R_c \sim \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 e}{E} \right) \cdot \left(1 + \text{Cosec} \frac{\theta_{1/4}}{2} \right),$$

Таблица

Ядро	$\theta_{1/4}$ лаб. /град/	R_C , фм	r_C , фм	r_0 , фм	R , фм
${}^6\text{He}$	16	9,7	$1,49^{+0,04}_{-0,04}$	$1,08^{+0,03}_{-0,04}$	$1,95^{+0,05}_{-0,08}$
${}^8\text{He}$	20,5	10,61	$1,57^{+0,05}_{-0,07}$	$1,17^{+0,04}_{-0,05}$	$2,33^{+0,07}_{-0,1}$
${}^9\text{Li}$	14,4	10,35	$1,57^{+0,03}_{-0,05}$	$1,12^{+0,02}_{-0,04}$	$2,32^{+0,05}_{-0,08}$

значения которых также приведены в таблице. Там же представлены значения параметра r_C :

$$r_C = \frac{R_C}{(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})}$$

Заметим, что значения r_C близки к величинам, полученным из экспериментов по упругому рассеянию легких ионов, но выше значений r_C , полученных из экспериментов по рассеянию ионов ${}^{40}\text{Ar}$ и ${}^{48}\text{Ca}^{4/}$.

В работах ^{/12,16/} показано, что при энергиях налетающих ионов $E/A \sim 5-10$ МэВ/А радиус эффективного взаимодействия R_C и радиус сильного поглощения R_{int} совпадают.

В работах ^{/12,17/} была проведена систематизация экспериментальных данных по радиусам атомных ядер и получен ряд экспериментальных соотношений, связывающих R_{int} с радиусом половинной плотности. В частности, в работе ^{/17/} дается простое соотношение, связывающее эффективные радиусы взаимодействия с радиусами половинной плотности:

$$R_{int} = R_C = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3}) + 2,72 \quad (\text{фм}).$$

На основании экспериментальных значений R_C из вышеуказанного соотношения были определены значения r_0 и на основании полученных значений r_0 оценены радиусы (R) половинной плотности ядер ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$ и ${}^9\text{Li}$ /см. таблицу/.

На рис.6 представлена зависимость полученных значений радиусов изотопов гелия от массового числа. Полученные значения хорошо согласуются с результатами работы ^{/18/}.

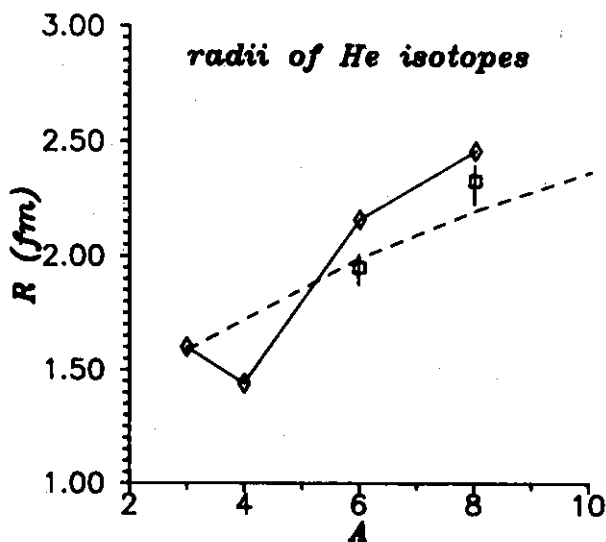


Рис.6. Зависимость радиусов изотопов гелия от массового числа. ○ - данные работы [18], □ - результаты настоящей работы.

Из рисунка видно, что радиусы ядер тяжелых изотопов гелия нельзя описать зависимостью $A^{1/3}$ с одним и тем же параметром G_0 .

Такое сравнение двух независимых результатов указывает

на то, что описанный способ измерения радиусов взаимодействия и извлечения данных о радиусах ядер половинной плотности может быть применен к другим экзотическим ядрам. С этой точки зрения, наибольший интерес представляют исследования по упругому рассеянию ядер ^{11}Li , ^{14}Be и ^{17}B , для которых из данных по измерению сечений взаимодействия следует значительное увеличение радиусов.

Получение интенсивных пучков этих экзотических ядер может быть реализовано при более высоких энергиях первичного пучка.

В заключение авторы выражают благодарность группе циклотрона У-400 за обеспечение работы на пучках ионов, авторы благодарят К.И.Меркину, обеспечившую просмотр пластинок CR-39, В.Е.Жучко, предоставившего программу накопления экспериментальной информации, А.Г.Артюха, А.Н.Мезенцева и Ю.С.Цыганова за помощь в подготовке к работе Е-ΔЕ телескопов, Г.Ф.Гриднева за помощь в работе по накоплению данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tanihata I. - Preprint LBL-20245, University of California, Berkeley, 1985.
2. Mittig W., Chouvel J.M. et al. - Preprint GANIL P87-07, GANIL National Facility, 1987.
3. Saint-Laurent M.G. et al. - Z.Phys.A. - Atomic Nuclei, 1989, v.332, p.457.

4. Oganessian Yu.Ts. et al. - Nucl.Phys., 1978, A 303, p.259.
5. Белозеров А.В. и др. - В сб.: Тезисы докладов 38 Совещания по ядерной спектроскопии и структуре ядра. Баку, апрель 1988, Л.: Наука, 1988, с.379.
6. Белозеров А.В. и др. - Известия АН СССР, серия физическая, 1988, т.52, № 11, с.2171.
7. Кленин Б.А. и др. - Сообщение ОИЯИ 9-84-357, Дубна, 1984.
8. Тарантин Н.И. - Сообщение ОИЯИ Р9-11536, Дубна, 1978.
9. Скобелев Н.К. и др. - В сб. аннотаций Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов, Дубна, октябрь 1989 г. ОИЯИ Д7-89-531, Дубна, 1989, с.118.
10. Tretyakova S.P., Borcea C., Kalpakchieva R. - Nucl. Instr. and Meth., 1984, A221, p.371.
11. Жучко В.Е., Цыганов Ю.С. - Сообщение ОИЯИ Р7-89-451, Дубна, 1989.
12. Bass R. - Nuclear Reactions with Heavy Ions. Springer-Verlag, 1980.
13. Eck J.S. et al. - Nucl. Phys., 1980, A341, p.178.
14. Beechetti F.D. et al. - Preprint UN-NP-BE-89-11, University of Michigan, 1989.
15. Wilcke W.W. et al. - Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1980, v.25, p.3897.
16. Birklund J.R. et al. - Phys.Rev., 1976, C13, p.113.
17. Christensen P.R., Winter A. - Phys. Lett., 1976, 65B, p.19.
18. Tanihata I. - Nucl. Phys., 1988, A488, p.113.
Preprint LBL-19904, University of California, Berkeley, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 марта 1990 года.