

P7-2013-95

Ю. М. Середа<sup>1,2</sup>, С. М. Лукьянов<sup>1</sup>, А. Г. Артюх<sup>1,\*</sup>,  
А. Н. Воронцов<sup>1,2</sup>, Е. И. Воскобойник<sup>1</sup>, М. П. Иванов<sup>1</sup>,  
С. А. Клыгин<sup>1</sup>, Г. А. Кононенко<sup>1</sup>, Д. А. Кислуха<sup>1,3</sup>,  
В. А. Маслов<sup>1</sup>, Т. И. Михайлова<sup>1</sup>, Ю. Э. Пенионжкевич<sup>1</sup>,  
Б. Эрдэмчимэг<sup>1,4</sup>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ ИОНОВ  $^{20}\text{Ne}$  И  $^{40}\text{Ar}$   
НА УСТАНОВКЕ КОМБАС**

Направлено в журнал «Ядерная физика»

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

<sup>3</sup> Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков, Украина

<sup>4</sup> Монгольский государственный университет, Центр ядерных исследований, Улан-Батор

\* E-mail: artukh@jinr.ru

Исследование фрагментации ионов  $^{20}\text{Ne}$  и  $^{40}\text{Ar}$  на установке КОМБАС

Приводятся характеристики фрагмент-сепаратора КОМБАС в сравнении с подобными установками. Описываются результаты экспериментов по получению продуктов в реакциях срыва одного протона с пучка ионов  $^{40}\text{Ar}$  (35 МэВ/А) и срыва двух нейтронов с пучка ионов  $^{20}\text{Ne}$  (52 МэВ/А). Демонстрируется высокая разрешающая способность фрагмент-сепаратора для получения вторичных нейтронно-избыточных и нейтронно-дефицитных пучков ионов  $^{39}\text{Cl}$  и  $^{18}\text{Ne}$  соответственно.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

A Study of Fragmentation of  $^{20}\text{Ne}$  and  $^{40}\text{Ar}$  Ions at the COMBAS Set-up

The main parameters of the COMBAS fragment separator are given in comparison with the world's similar set-ups. The results of experiments to obtain the products in reactions of one-proton stripping from the  $^{40}\text{Ar}$  ion beam (35 MeV/A) and two-neutron stripping from the  $^{20}\text{Ne}$  ion beam (52 MeV/A) are presented. The high resolution power of the COMBAS fragment separator to produce secondary neutron-rich and neutron-deficient beams of  $^{39}\text{Cl}$  and  $^{18}\text{Ne}$  ions, correspondingly, is demonstrated.

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

## ВВЕДЕНИЕ

Пучки ускоренных радиоактивных ядер дают возможность получать и изучать ядра с максимально возможным числом нейтронов (нейтронно-избыточные) или протонов (протонно-избыточные). Это позволяет существенно продвинуться в традиционных направлениях ядерной физики: синтезе новых ядер и изучении их свойств, которые, как показали уже первые эксперименты с радиоактивными пучками, могут существенно отличаться от известных и предсказанных ранее. Принципиально новая информация может быть получена о механизме ядерных реакций при использовании ядер-снарядов с аномальным отношением  $N/Z$ .

Реакции передачи и фрагментация как наиболее распространенные типы реакций для получения экзотических ядер уже в течение многих лет эффективно используются в таких крупных научных центрах, как GANIL (Франция), GSI (Германия), MSU NSCL (США) и RIKEN (Япония).

Целью данной работы было в переднеугловых измерениях на фрагмент-сепараторе КОМБАС изучить выходы и сепарацию изотопа  $^{39}\text{Cl}$ , полученного в реакции срыва одного протона из ядра-снаряда  $^{40}\text{Ar}$  и срыва двух нейтронов из соответствующего ядра-снаряда  $^{20}\text{Ne}$ . Известно, что импульсные распределения продуктов, получаемых в малонуклонных передачах, незначительно отличаются от импульса бомбардирующей частицы, а при использовании толстых мишеней импульсные распределения таких продуктов ядерных реакций могут значительно перекрываться с импульсом налетающей частицы. Продукты ядерных реакций малонуклонных передач представляют наибольший интерес с точки зрения получения вторичных пучков радиоактивных ядер высокой интенсивности, поскольку они образуются с максимальными поперечными сечениями.

## 1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В эксперименте использовался светосильный высокоразрешающий фрагмент-сепаратор КОМБАС [1], который обеспечивает эффективный сбор и транспортировку высокоэнергичных (вплоть до 150 МэВ/нуклон) ядер-продуктов в широком диапазоне элементов  $2 \leq Z < 30$ . При создании этого сепаратора впервые в мире был использован принцип жесткой фокусировки,

который позволил реализовать рекордные параметры при полной минимизации aberrаций высоких порядков.

Магнитная структура фрагмент-сепаратора КОМБАС основана на использовании широкоапертурных мультипольных магнитов, в которых генерируются квадрупольные, секступольные и октупольные компоненты, необходимые для минимизации aberrаций высоких порядков. Использование таких мультипольных магнитов позволило полностью исключить применение отдельных квадрупольных, секступольных и октупольных линз, апертуры которых в основном и ограничивают апертуру сепарирующего канала.

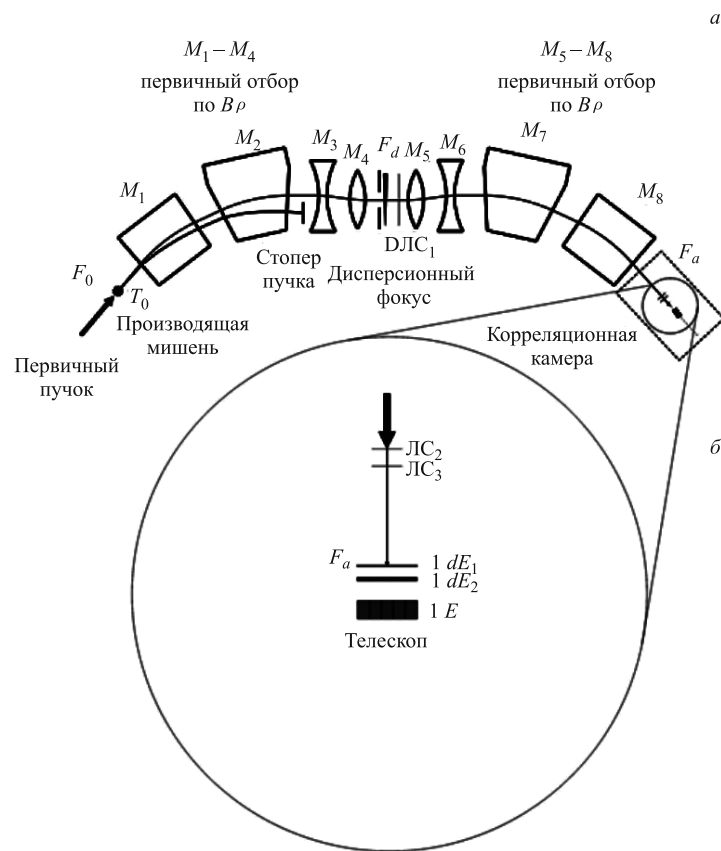


Рис. 1. Схематический вид экспериментальной установки фрагмент-сепаратора КОМБАС: а)  $F_0M_1M_2M_3M_4F_dM_5M_6M_7M_8F_a$  — магнитооптическая система фрагмент-сепаратора; б) реакционная камера с телескопом ( $dE_1$ ,  $dE_2$ ,  $E$ ) детекторов, где  $dE_1$  — кремниевый 32-стриповый 380-мкм  $X$  (по горизонтали) детектор,  $dE_2$  — кремниевый 32-стриповый 1000-мкм  $Y$  (по вертикали) и  $E$  — гранулированная сборка из девяти сцинтилляционных детекторов полного поглощения

Фрагмент-сепаратор КОМБАС (рис. 1, *a*) построен из восьми ( $M_1-M_8$ ) мультипольных магнитов, формирующих широкоапертурный сепаратор с тройной фокусировкой частиц в выходном фокусе  $F_a$  (по энергии, горизонтали и вертикали). Конфигурация сепаратора komponуется в виде двух идентичных секций  $M_1-M_4$  и  $M_5-M_8$  с плоскостью симметрии в средней части (дисперсионный фокус  $F_d$ ). Первая анализирующая секция  $M_1-M_4$  выполняет функции фильтра высокоэнергетичных частиц по импульсу с режекцией первичного пучка, а вторая секция  $M_5-M_8$  компенсирует дисперсию первой и минимизирует эффекты aberrаций в выходном ахроматическом фокусе  $F_a$ . Наличие симметрии между обеими секциями сепаратора позволяет без нарушения оптики использовать прострельную фольгу (деградер) в позиции  $F_d$ . Деградер дает дополнительную изотопную сепарацию второй секцией вследствие различных ионизационных потерь энергии частицами в фольге для сепарируемых и сателлитных продуктов ядерных реакций. Кроме того, база пролета второй секции, в которой отсутствует интенсивный пучок первичных частиц, может быть эффективно использована для времяпролетных измерений TOF. Измерения TOF крайне необходимы для дополнительной сепарации изотопов по  $A$  и  $Z$  в тех случаях, когда их импульсные распределения перекрываются или существенный вклад дают зарядовые состояния транспортируемых ионов.

В таблице приведено сравнение основных характеристик аналогичных фрагмент-сепараторов, функционирующих в исследовательских лабораториях Франции, США, Японии и Германии. Из таблицы видны преимущества широкоапертурного фрагмент-сепаратора КОМБАС по импульсному (в 4–10 раз) и угловому (в 1,5–6,4 раз) акцептансам, величины которых являются важными для увеличения сбора вторичных пучков радиоактивных ядер.

**Сравнение параметров существующих фрагмент-сепараторов**

Сепаратор	$\Omega$ , мср	$dp/p$ , %	$B\rho$ , Тл · м	Разрешающая способность
LISE (Франция) [2]	1,0	5,0	3,2	800
A1200 (США) [3]	0,8–4,3	3,0	5,4	700–1500
RIPS (Япония) [4]	5,0	6,0	5,76	1500
FRS (Германия) [5]	0,7–2,5	2,0	9–18	240–1500
КОМБАС (Россия) [1]	6,4	20	4,5	4300

Для эффективной регистрации всего многообразия продуктов ядерных реакций, транспортируемых в выходной фокус  $F_a$ , детектирующая система (рис. 1, *b*) сформирована в виде телескопа из трех детекторов. Это необходимо для одновременной регистрации всего спектра частиц как длиннопробежных

легких продуктов ядерных реакций (заняты все три детектора в регистрации), так и короткопробежных сильноионизирующих частиц с большими атомными номерами, когда используются в основном два первых по пучку детектора.

Структура телескопа состоит из детекторов ( $dE_1$ ,  $dE_2$ ,  $E$ ). Детектор  $dE_1$  — кремниевый 32-стриповый 380 мкм толщины площадью  $64 \times 64$  мм  $X$  детектор для измерения координаты частицы по горизонтали, детектор  $dE_2$  — кремниевый 32-стриповый 1000 мкм толщины площадью  $64 \times 64$  мм  $Y$  для измерения координаты частицы по вертикали и  $E$  — гранулированная сборка из девяти сцинтилляционных детекторов полного поглощения толщиной 20 мм каждый с общей площадью сборки  $64 \times 64$  мм. Стриповая структура прострельных  $dE_1$ - и  $dE_2$ -детекторов выполняла также важную роль при настройке продуктов пучка в выходной фокус  $F_a$  с минимальными потерями в апертуре телескопа. В ходе экспозиции мониторинговые функции стриповых детекторов позволяли корректировать пучок фрагментов по  $X$  и  $Y$  в фокус  $F_a$ .

Мишень из  $15 \text{ мг/см}^2$  бериллия облучалась первичным пучком ядер  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 35 МэВ/нуклон (или  $^{20}\text{Ne}$  с энергией 52 МэВ/нуклон). Размер первичного пучка на мишени коллимировался диафрагмой диаметром 6 мм. Интенсивность первичного пучка, облучающего мишень, измерялась токовым прибором в емкА (электрические микроамперы). Измерения тока на мишени затем использовались для нормировки выходов продуктов ядерных реакций на число частиц пучка для определения поперечных сечений их образования.

Импульсные распределения продуктов ядерных реакций определялись сканированием магнитной жесткостью  $B\rho$  выходов измеряемых продуктов в выходном фокусе  $F_a$ , отсчеты которых нормировались на величину первичного пучка, измеряемого в каждой экспозиции токовым прибором в единицах емкА. Для увеличения скорости счета импульсные спектры продуктов ядерных реакций измерялись 2%-м окном по импульсу, ширина которого задавалась щелью коллиматора в дисперсионной плоскости  $F_d$ . Для изучения сепарирующей способности изотопов, например  $^{39}\text{Cl}$  (или  $^{18}\text{Ne}$ ), с помощью деградера магнитная жесткость  $B\rho$  устанавливалась в максимумы импульсных распределений измеряемых изотопов. Степень очистки изотопа  $^{39}\text{Cl}$  (в реакции  $^{40}\text{Ar}$  (35 МэВ/нуклон) +  $^9\text{Be}$ ) и изотопа  $^{18}\text{Ne}$  (в реакции  $^{20}\text{Ne}$  (50 МэВ/нуклон) +  $^9\text{Be}$ ) от сателлитных продуктов реакции определялась сравнением долевого вклада отсчетов изотопа  $^{39}\text{Cl}$  (или  $^{18}\text{Ne}$ ) в общей сумме изотопов, зарегистрированных сначала в экспозиции без деградера в дисперсионной плоскости  $F_d$ . После установки деградера в  $F_d$  повторялась экспозиция для определения долевого вклада отсчетов  $^{39}\text{Cl}$  (или  $^{18}\text{Ne}$ ) в новой общей сумме зарегистрированных продуктов. При этом магнитную жесткость  $B\rho$  второй секции сепаратора  $M_5$ – $M_8$  необходимо было уменьшить на величину потерь энергии изотопом  $^{39}\text{Cl}$  (или  $^{18}\text{Ne}$ ) в толщине Al-фольги деградера.

## 2. СЕПАРАЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФРАГМЕНТОВ

Значения величины ионного заряда  $q$ , массового числа  $m$  и атомного номера  $Z$  определялись из формул

$$mv \sim qBR, \quad dE \sim \left(\frac{Z}{v}\right) \quad \text{и} \quad \frac{mv^2}{2} = dE + E_r.$$

Были проведены эксперименты по проверке возможности получения вторичных радиоактивных пучков, образующихся в реакциях фрагментации ионов  $^{20}\text{Ne}$  (52 МэВ/нуклон) и  $^{40}\text{Ar}$  (35 МэВ/нуклон).

На рис. 2 показаны примеры экспериментальных двумерных матриц событий, зарегистрированных в реакции  $^{20}\text{Ne}$  (52 МэВ/нуклон) +  $^9\text{Be}$ , а именно распределение событий в плоскости  $dE$  и  $E_r$  (левая диаграмма) и распределение событий по  $dE$  и TOF (правая диаграмма).

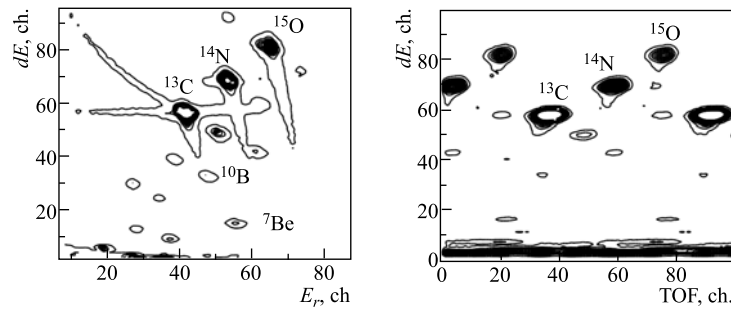


Рис. 2. Идентификационные матрицы зарегистрированных фрагментов в  $F_a$  в зависимости от измеряемых величин:  $dE$  и  $E_r$  (левая диаграмма) и  $dE$  и TOF (правая диаграмма). Настоящие диаграммы получены в реакции  $^{20}\text{Ne}$  (52 МэВ/нуклон) +  $^9\text{Be}$

Как видно из представленных диаграмм, комбинация фрагмент-сепаратора с детектирующей системой имела высокую разрешающую способность и позволяла абсолютно определять значения  $m$ ,  $Z$  и  $q$ .

На рис. 3 представлены двумерные диаграммы: выход продуктов от удельных потерь  $dE$  и остаточной энергии  $E_r$ . Верхняя диаграмма получена в реакции фрагментации ионов пучка  $^{40}\text{Ar}$  (35 МэВ/нуклон) на  $^9\text{Be}$ -мишени (толщина 80 мкм). Нижняя диаграмма получена в той же реакции, но при использовании алюминиевого поглотителя (wedge) в дисперсионной плоскости  $F_d$  сепаратора. Видно, что высокая дисперсия сепаратора позволяет эффективно сепарировать из множества образовавшихся фрагментов достаточно чистый моноизотопный пучок (78 %) ионов  $^{39}\text{Cl}^{+17}$  в фокальной  $F_a$  плоскости сепаратора. Примесь ионов  $^{37}\text{S}^{+16}$  около 10 %, остальные ионы, такие

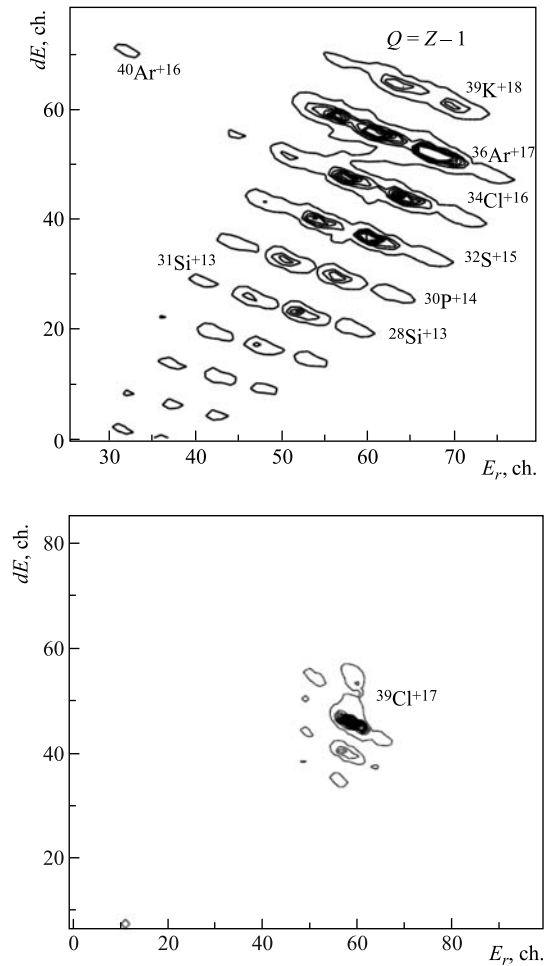


Рис. 3. Двухмерные диаграммы: выход продуктов от удельных потерь  $dE$  и остаточной энергии  $E_r$ . Верхняя диаграмма получена в реакции фрагментации ионов пучка  $^{40}\text{Ar}$  (35 МэВ/нуклон) на  $^9\text{Be}$ -мишени (толщина 80 мкм). Нижняя диаграмма получена при использовании 400-мкм алюминиевого поглотителя (wedge) в дисперсионной плоскости сепаратора  $F_d$

как  $^{38,40}\text{Cl}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ , вместе менее 13%. Общая загрузка используемого для идентификации фрагментов полупроводникового телескопа составляла около 2000 частиц в секунду при токе первичного пучка  $^{40}\text{Ar} \sim 100$  енА.



Возможность получения легких протонно-избыточных изотопов была продемонстрирована на первичном пучке ионов  $^{20}\text{Ne}$  (52 МэВ/нуклон). Для этого были выбраны ионы  $^{18}\text{Ne}$ , которые получались в реакции срыва двух нейтронов из ионов  $^{20}\text{Ne}$  первичного пучка при энергии 52 МэВ/нуклон на мишени  $^9\text{Be}$  (толщина 200 мкм). Полученная в этих условиях двухмерная диаграмма (выход продуктов от удельных потерь  $dE$  и остаточной энергии  $E_r$ ) представлена на рис. 4.

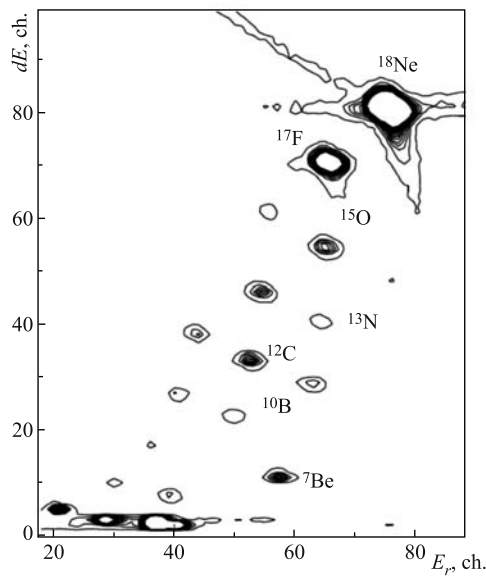


Рис. 4. Двухмерная диаграмма: выход продуктов от удельных потерь  $dE$  и остаточной энергии  $E_r$  в реакции срыва двух нейтронов с ядра ионного пучка  $^{20}\text{Ne}$  (52 МэВ/нуклон) на  $^9\text{Be}$ -мишени (толщина 200 мкм) при использовании 400-мкм алюминиевого поглотителя (wedge) в дисперсионной плоскости сепаратора  $F_d$

Как видно из представленных диаграмм, высокая дисперсия сепаратора позволяет эффективно сепарировать из множества образовавшихся фрагментов достаточно чистый моноизотопный пучок ионов  $^{18}\text{Ne}^{+10}$  (60 %) в фокальной плоскости сепаратора  $F_a$ . Примесь ионов  $^{17}\text{F}^{+9}$  около 20 %, остальные ионы,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{N}$ , вместе дают вклад менее 15 %. Общая загрузка используемого для идентификации фрагментов полупроводникового телескопа составляла около 2000 частиц в секунду при токе первичного пучка  $^{20}\text{Ne} \sim 100$  нА.

### 3. СЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ФРАГМЕНТОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ ПРОЦЕССА ФРАГМЕНТАЦИИ

Исключительное многообразие ядерных реакций с тяжелыми ионами, огромное число возможных комбинаций ион – ядро мишени открывают благоприятные перспективы для получения неизвестных изотопов известных элементов с большим избытком или недостатком нейтронов, лежащих на границе или даже за границей нуклонной стабильности. Важное значение при получении максимального выхода экзотических ядер занимает выбор реакции, дающей наибольшее сечение образования интересующих продуктов.

На рис. 5 приведены экспериментальные значения сечений образования изотопов в реакциях фрагментации  $^{40}\text{Ar} + ^9\text{Be}$  в зависимости от их массы при различных энергиях ионов  $^{40}\text{Ar}$ .

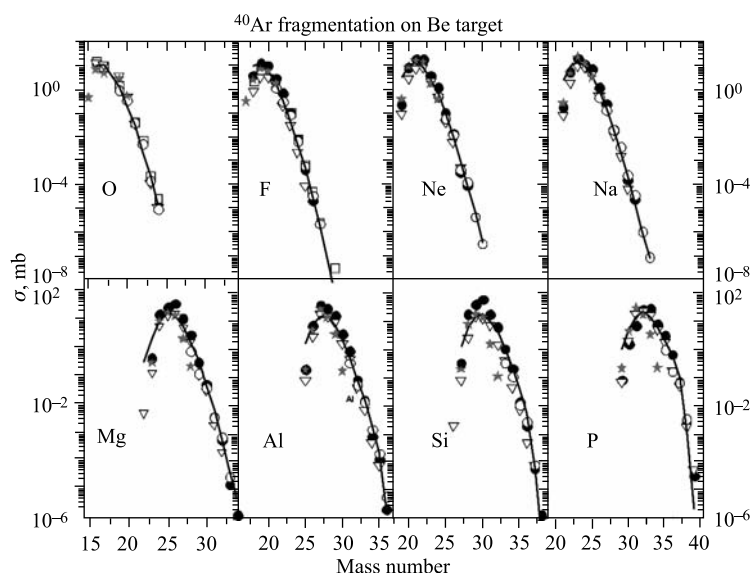


Рис. 5. Сечения образования изотопов в реакциях фрагментации  $^{40}\text{Ar} + ^9\text{Be}$  в зависимости от их массы при различных энергиях ионов  $^{40}\text{Ar}$ : 1000 МэВ/нуклон — □ [6], 57 МэВ/нуклон — ▽ [7], 120 МэВ/нуклон — ○ [8] и 90 МэВ/нуклон — ● [9] и ★ — результаты, полученные в настоящей работе при энергии 35 МэВ/А

Как следует из представленных зависимостей на рис. 5, при энергии 57 МэВ/нуклон [7] сечение фрагментации в несколько раз меньше, чем для больших значений энергии налетающих ионов. Одно из возможных объяснений наблюдаемых различий в сечениях фрагментации основано на различных систематических ошибках в измерениях [6–9]. Главным источником

систематической ошибки является значение величины трансмиссии, используемой для вычисления значений сечения фрагментации. По сути, приведенные значения сечений фрагментации являются полуэмпирическими, поскольку во внимание принимаются расчетные значения трансмиссии, полученные из расчетов углового и импульсного захватов используемого фрагмент-сепаратора.

Возможно другое объяснение [10] — большая энергия может приводить к каскадным процессам и, как следствие, к увеличению вклада продуктов вторичных реакций. Таким образом, при больших энергиях пучка возможен вторичный процесс фрагментации в веществе мишени уже образовавшихся фрагментов. Этот процесс должен приводить к повышенному образованию более легких изотопов, что видно из представленных зависимостей: разница в сечениях образования при 57 и 120 МэВ/А, например, изотопов неона-магния, составляет фактор 3–5, а уже для нейтронно-избыточных изотопов фосфора такой разницы не наблюдается.

В целом следует отметить, что наблюдаемая разница в значениях сечений фрагментации является незначительной и не приводит к значительным расхождениям в оценках выхода продуктов фрагментации. На основании представленных на рис. 5 зависимостей можно сделать вывод об инвариантности сечений фрагментации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены характеристики фрагмент-сепаратора КОМБАС в сравнении с подобными установками. На основании представленных сравнительных ионно-оптических характеристик и технической реализации широкоапертурный кинематический сепаратор КОМБАС является одним из лучших среди существующих в настоящее время фрагмент-сепараторов в других лабораториях мира.

Описана процедура регистрации, идентификации и изотопной сепарации продуктов ядерных реакций.

Результаты экспериментов по измерению выходов изотопов с  $Z = 4-23$ , полученных в реакции фрагментации первичного пучка ионов  $^{40}\text{Ar}$  (35 МэВ/нуклон) на  $^9\text{Be}$ -мишени, демонстрируют высокую изотопную сепарацию in-flight сепаратора КОМБАС. Разрешающая способность продуктов по  $Z$  и  $A$  показана на рис. 3 на примере сепарации изотопа  $^{39}\text{Cl}$ , полученного в реакции срыва одного протона. Известно, что импульсные распределения продуктов, получаемых в малонуклонных передачах, незначительно отличаются от импульса бомбардирующей частицы, а при использовании толстых мишеней могут и частично перекрываться с импульсом налетающей частицы. Эти ядерные продукты представляют наибольший интерес с точки зрения получения вторичных пучков радиоактивных ядер высокой интенсив-

ности, поскольку они образуются с максимальными поперечными сечениями. С использованием непрофилированного Al-деградера в дисперсионной плоскости  $F_d$  в эксперименте была достигнута высокая степень очистки пучка нейтронно-избыточных ядер  $^{39}\text{Cl}$  (порядка 78 %) от примеси сателлитных продуктов фрагментации и фона паразитных частиц первичного пучка.

Изучены также выходы изотопов с  $Z = 2-11$  в реакции фрагментации  $^{20}\text{Ne}$  (52 МэВ/нуклон) на  $^9\text{Be}$ -мишени. Для нейтронно-дефицитных ядер  $^{18}\text{Ne}$ , перспективных для исследования прямого двухпротонного распада, получена 60 %-я степень очистки от примесей сателлитных продуктов фрагментации первичного пучка.

Достигнутая степень очистки изотопов, получаемых в реакциях срыва одного протона с бомбардирующей частицы  $^{40}\text{Ar}$  и двух нейтронов с  $^{20}\text{Ne}$ , позволяет формировать практически моноизотопные вторичные пучки  $^{39}\text{Cl}$  и  $^{18}\text{Ne}$  достаточной интенсивности для спектроскопических исследований.

С использованием известных данных по фрагментации первичных частиц  $^{40}\text{Ar}$  при разных энергиях показано, что поперечные сечения образования фрагментов в широком диапазоне  $Z$  и  $A$  слабо зависят от энергии бомбардирующей частицы.

Настоящая работа проводилась при поддержке РФФИ (грант № 13-02-00533), грантов целевого финансирования Чешской и Польской республик в ОИЯИ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Artukh A. G. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 426. P. 605;  
Artukh A. G. et al. // Instr. Exp. Techn. 2011. V. 54, No. 5. P. 668–681.
2. Anne R. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 1987. V. 257. P. 215–232.
3. Sherrill B. M. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1991. V. 56/57. P. 1106–1110.
4. Kubo T. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1992. V. 70. P. 309–319.
5. Geissel H. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1992. V. 70. P. 286–297.
6. Ozawa A. et al. // Nucl. Phys. A. 2000. V. 673. P. 411–422.
7. Zhang X. H. et al. // Phys. Rev. C. 2012. V. 85. P. 024621.
8. Kwan E. et al. // Phys. Rev. C. 2012. V. 86. P. 014612.
9. Momota S. et al. // Nucl. Phys. A. 2002. V. 701. P. 150c–155c.
10. Lukyanov S. et al. // J. Phys. (London) G. 2010. V. 37. P. 105111.

Получено 27 августа 2013 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 06.11.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,95. Тираж 260 экз. Заказ № 58102.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)