

Изучение механизмов реакций с тяжелыми ионами и получение вторичных радиоактивных пучков с помощью фрагмент-сепаратора КОМБАС.

Тетерев Ю.Г. E-mail: teterev@jinr.ru

Joint Institute for Nuclear Research, Laboratory of Nuclear Reactions, ul. Joliot Curie 6, Dubna, Moscow region, 141980 Russia

Experiments in that Be and Ta targets have been bombarded by heavy ions in series ^{12}C , ^{15}N , ^{18}O , ^{22}Ne and ^{40}Ar are discussed. Ions was accelerated at energy 35-45 MeV/nucleon on the U-400M cyclotron at Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR. The targets were placed at the entrance focus of the COMBAS separator. Reaction products near zero-angle degrees were collected and then analyzed. The telescope formed from silicon detectors was placed at the exit achromatic focus of separator. One from pair of parallel plate avalanche counters (PPAC) has been placed at the dispersive focal plane and the other before the silicon detectors. Reaction products was identified on the mass number A and atomic number Z by the $(\Delta E, E)$ telescope and by the $(\Delta E, T)$ method using time of flight between PPAC. The measurements of the yields of isotopes were carried out by scanning the range of magnetic rigidities covering the velocity distributions of the studied isotopes. The results of the experiments was analyzed and compared with different theoretical models. The generation of radioactive beam of ^{11}Li with maximum intensity and its purity was the objective of this experiment. Achieved maximum intensity is 10^4 nuclei at second.

Механизмы ядерных реакций при взаимодействии тяжелых ионов с ядрами мишени в области энергий до 10 МэВ/нуклон хорошо изучены, созданы теории, их описывающие. Для области энергий выше 200 МэВ/нуклон также набрано достаточно много экспериментального материала, на основании которого созданы соответствующие теоретические модели. Несколько другая ситуация возникла в области вблизи энергии Ферми (30 – 40 МэВ/нуклон). В этой области относительная скорость взаимодействующих ядер близка к скоростям звука в ядерной материи и скоростям нуклонов в ядрах. Хотя в последнее время и появились статьи [1, 2], описывающие эксперименты в этой области энергий, полученные данные не достаточно полны. Теоретических же моделей, удовлетворительно описывающих закономерности ядерных реакций в этой области пока нет. Имеются только некоторые качественные объяснения.

Данная работа в основном написана на материале опубликованных результатов экспериментов [3-5], в которых изучались ядерные реакции тяжелых ионов ^{12}C , ^{15}N , ^{18}O , ^{22}Ne and ^{40}Ar в области энергий 30-40 МэВ/нуклон с легкими Be и тяжелыми ядрами Au и Ta мишеней. Детектирование продуктов ядерных реакций проводилось под нулем градусов относительно пучка для того, чтобы минимизировать вклады возможных вторичных процессов девозбуждения в измеряемые выходы. Тяжелые ионы были ускорены на

изохронном циклотроне У-400М Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований. Пучок ионов был выведен на мишень фрагмент сепаратора КОМБАС [6].

Кинематический фрагмент-сепаратор КОМБАС (рис.1) построен по классической схеме ион-оптических ахроматических устройств. В первой половине сепаратора продукты реакции разделяются по их магнитной жесткости (фактически по их продольным импульсам, которые напрямую связаны с жесткостью), а во второй снова собираются в конечном фокусе сепаратора. Из всех продуктов ядерной реакции, попавших с мишени в сепаратор, с помощью коллиматора, размещенного между этими половинами, были отобраны и пропущены во вторую половину только продукты, лежащие в узком диапазоне импульсов. Эти продукты регистрировались и идентифицировались с помощью детекторов, размещенных в конечном фокусе. При неизменном положении щели, созданной коллиматором, было просканировано и измерено импульсное распределение всех продуктов с $Z \geq 2$, путем синхронного изменения магнитного поля всех элементов сепаратора. Выбранный размер щели коллиматора соответствовал импульсному захвату 0,08%, шаг сканирования составлял 0,15%. При таком способе измерения импульсного распределения, регистрируемые продукты проходили в сепараторе один и тот же путь, что обеспечивало одинаковую

эффективность их транспортировки. Данные, полученные в измерениях на разных жесткостях, были нормализованы на результаты одновременных измерений, проводимых вблизи мишени, выхода

продуктов, летящих под углами $\pm 7^\circ$ к направлению бомбардирующего пучка. Измерения проводились с помощью мониторинговых газовых детекторов.



Рис.1

Принципиальное отличие сепаратора КОМБАС от всех существующих заключается в том, что он построен на базе только поворотных магнитов. Фокусировка проходящих через сепаратор частиц достигается за счет того, что поворотные магниты являются мультиполюсными. Они имеют достаточно сложную форму полюсов, которая рассчитывалась по специальным программам. Полюсные наконечники изготавливались на металлообрабатывающих станках с программным управлением. На рис.2 показан один из таких поворотных

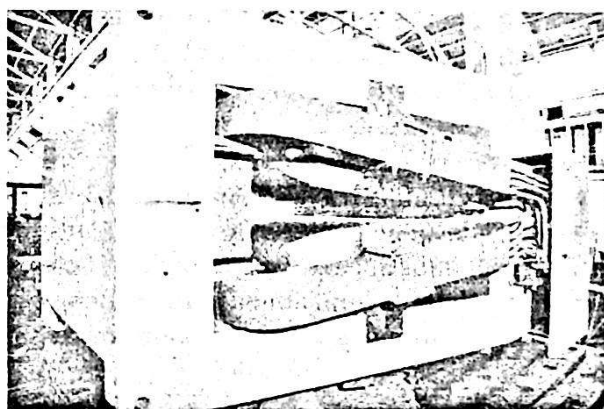


Рис.2

магнитов. В состав сепаратора входит 8 поворотных магнитов. При такой конфигурации удалось создать сепаратор с большой апертурой, и вследствие этого с рекордно большим импульсным и угловым захватом. С другой стороны при относительно небольшом числе магнитных элементов достаточно легко перестроить весь сепаратор на любую жесткость, что не так легко и быстро может быть сделано на других сепараторах. Это позволило провести эксперименты в широком

диапазоне масс и зарядов продуктов реакции и их импульсов.

Для регистрации и идентификации изотопов были использованы две методики. В одной из них, ΔE -E методике, для регистрации продуктов реакции используются два детектора. Первый из них - тонкий, в котором проходящая частица теряет только небольшую часть своей энергии ΔE . В первом приближении, энергия, потерянная в тонком детекторе ΔE , а, следовательно, и амплитуда сигнала с детектора, пропорциональна $\sim Z^2/(\Delta E)$. Следующий за ним детектор - толстый. В нем теряется вся оставшаяся энергия E. Следовательно, амплитуда сигнала с детектора также пропорциональна E. Если зарегистрированные одновременно в обоих детекторах события размещать на двухмерном графике, по одной из координат которого откладывается амплитуда сигнала с детектора ΔE , а по другой - с детектора E, то все события разбиваются на некоторые изолированные области, называемые локусами. В каждой из этих областей зарегистрированы события, связанные с определенным изотопом, и число этих событий связано с выходом данного изотопа в изучаемой реакции при установленной на сепараторе жесткости этого продукта (Рис.3).

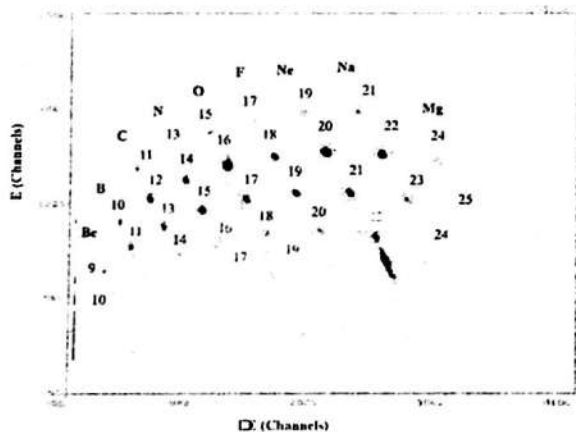


Рис.3

Здесь приведен двухмерный плот, полученный при облучении тонкой Be мишени пучком ионов ^{22}Ne , имеющих энергию 40 МэВ/нуклон.

Во второй методике $\Delta E - T$ для регистрации продуктов реакции также используется тонкий детектор для измерения ΔE и два очень тонких быстрых детектора, размещенных на значительном расстоянии друг от друга по ходу регистрируемой частицы, с

помощью которых измеряется время пролета этого расстояния. То есть фактически измеряется скорость частицы. Так же как и в предыдущем случае, если зарегистрированные в некотором коротком временном интервале события размещать на двухмерном графике, по одной из координат которого откладывается амплитуда сигнала с детектора ΔE , а по другой - время пролета между двумя быстрыми детекторами, события разобьются на локусы (Рис.4).

Преимуществом этого метода регистрации и идентификации частиц является то, что зарегистрированные частицы продолжают лететь дальше, потеряв лишь небольшую часть своей энергии, и могут быть использованы для других целей, например, для изучения ядерных реакций с их участием. В нашем эксперименте этому методу был присущ тот недостаток, что легкие ядра He, Li и Be регистрировались с эффективностью много меньшей 100%. Комбинация же двух методов $\Delta E - E$ и $\Delta E - T$ одновременно в одном измерении позволила нам легко идентифицировать зарегистрированные частицы и добиться 100% эффективности.

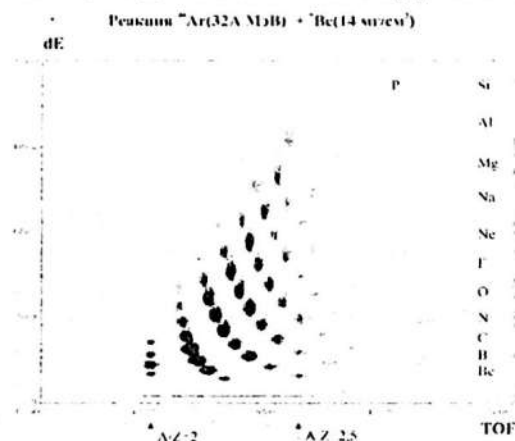


Рис.4

В качестве ΔE -детектора был использован кремниевый толщиной 0,38 мм, имеющий размер 60x60 мм. E-детектор тоже был кремниевый, но толщиной 7 мм и диаметром 60 мм. В качестве быстрых детекторов были использованы лавинные счетчики, наполненные пропаном под давлением 4 торр. Один из них был размещен сразу после коллиматора, а второй непосредственно перед конечным фокусом сепаратора. Расстояние между детекторами составляло 7,5 м.

После того как были обработаны все $\Delta E - E$ и $\Delta E - T$ плоты при каждом значении жесткости, то есть, посчитано количество

событий в каждой области, соответствующей определенному зарегистрированному изотопу, и сделана нормировка на счет мониторингового детектора, были построены скоростные распределения для всех образующегося в реакции изотопов, имеющих заряд $Z \geq 2$. Скорость продуктов для этих распределений рассчитана в единицах относительных к скорости ядра-снаряда. На рисунке 5 в качестве примера приведены скоростные распределения изотопов азота, кислорода, фтора и неона, образующихся в результате ядерной реакции ^{22}Ne с бериллиевой мишенью при энергии пучка 40 МэВ/нуклон. Можно обратить внимание на то, что для всех изотопов, образовавшихся путем потери нуклонов ядром-снарядом, максимум распределения наблюдается при скорости равной скорости пучка. Для тех же изотопов, которые могли образоваться за счет обмена нуклонами с ядрами мишени, например, ^{21}O и ^{22}F , или подхвата нуклонов, ^{23}F , ^{23}Ne и ^{24}Ne , максимум распределения смещен в область более низких скоростей пропорционально числу подхваченных с ядра мишени нуклонов.

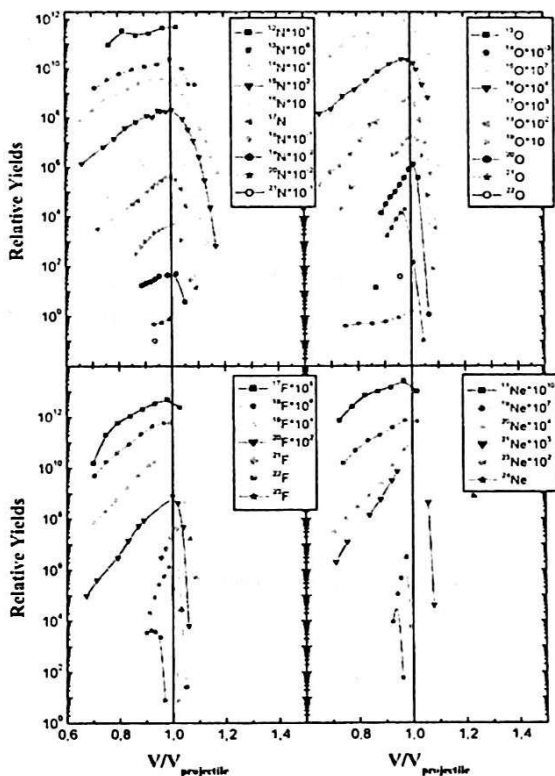


Рис.5

Скоростные распределения были проинтегрированы и эти полученные данные о выходе изотопов использованы для выяснения дополнительных закономерностей изучаемых реакций.

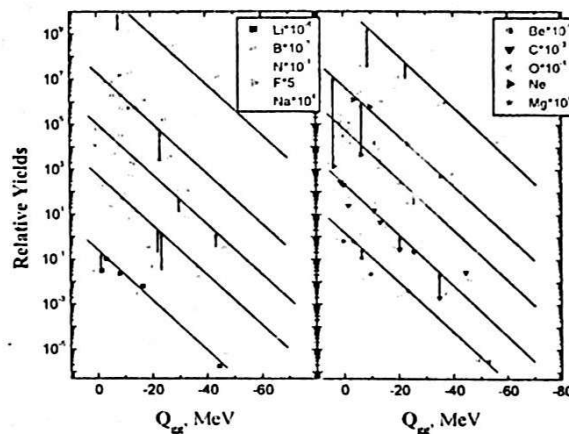


Рис.6

Например, на рис.6 все зарегистрированные изотопы представлены в зависимости их выхода от энергии реакции $Q_{gg} = (M_1 + M_2) + (M_3 + M_4)$ в предположении, что в результате реакции изотопы образуются в основном состоянии. Видно, что в диапазоне более пяти порядков изотопные выходы ядер удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальной функцией. Эта систематика является критерием бинарного характера реакции образования изотопов.

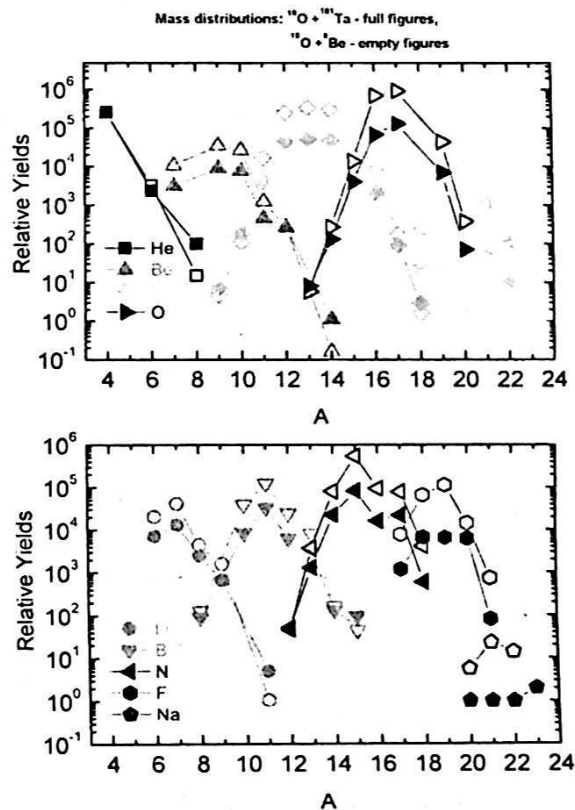


Рис.7

На рис.7 представлены результаты, полученные для относительных выходов продуктов в реакциях ^{18}O с ядрами легкой

Be и тяжелой Ta мишеней. Из сравнения следует, что нет радикального различия в изотопных распределениях при использовании этих мишеней. Это означает, что незначительна роль кулоновского взаимодействия. Распределения симметричны по данным и объяснить отмеченные закономерности. К сожалению, эти попытки не были полностью успешными, особенно, при описании реакций с легкими ядрами. Например, если описание относительных выходов продуктов реакций с помощью теоретических расчетов еще можно считать удовлетворительным, то этого никак нельзя признать при описании скоростных распределений.

Особенностью реакций тяжелых ионов с ядрами мишени является то, что при энергиях выше 30 МэВ/нуклон основная часть продуктов реакции летит в узкой области передних углов (в лабораторной системе координат). Эту особенность используют для получения радиоактивных вторичных пучков. Очистка полученных продуктов от ядер первичного пучка осуществляется за счет того, что при почти одинаковой скорости ядер-снарядов и ядер-продуктов последние имеют отличающееся отношение N/Z , следовательно, они по-другому будут отклоняться в магнитных или электростатических системах. Фрагмент-сепаратор КОМБАС как раз и является такой магнитной системой.

Угловой захват продуктов реакции с помощью этого сепаратора $\Theta = \pm 2,5^\circ$

отношению к областям как нейтронного, так и протонного избытка, но отличаются шириной.

В различных научных группах, в том числе и в нашей, была предпринята попытка в рамках существующих теорий описать полученные экспериментальные (горизонтальный угол) и $\phi = \pm 2^\circ$ (вертикальный угол относительно направления первичного пучка). Импульсный захват продуктов составляет $\pm 6\%$. Учитывая, что этот фрагмент сепаратор предназначен для работы с пучками, имеющими по сравнению с другими построенными в мире наименьшую энергию первичного пучка, нашей следующей задачей было выяснить, какая интенсивность вторичного пучка может быть получена с его помощью. Для сравнения установок в качестве пробного вторичного пучка был выбран изотоп ^{11}Li . Были использованы первичные пучки ^{15}N и ^{18}O , которые бомбардировали толстую бериллиевую мишень. Это наиболее часто используемые сочетания для получения ^{11}Li с наибольшим выходом. В таблице I приведены полученные результаты. Там же для сравнения приведены данные, извлеченные из различных источников, об интенсивностях вторичных пучков достигнутых на других крупнейших в мире фрагмент-сепараторах. Данные приведены для случаев использования максимальных токов первичных пучков, достижимых на соответствующих ускорителях

Таблица I.

Установка и условия получения	Интенсивность вторичного пучка ^{11}Li .
1. GANIL ^{18}O (45 AMeV) + Be (187 mg/cm ²), $I_0 = 10^{12}$ pps	10^3 pps
2. RIKEN ^{18}O (100 AMeV) + Be (1108 mg/cm ²), $I_0 = 10^{11}$ pps	$2 \cdot 10^4$ pps
3. NSCL, Michigan, ^{15}N (85 AMeV) + ^6Li (675 mg/cm ²), $I_0 = 10^{11}$ pps	$2.7 \cdot 10^4$ pps
4. COMBAS ^{18}O (35 AMeV) + Be (200 mg/cm ²), $I_0 = 10 \mu\text{Ae}$	$6 \cdot 10^3$ pps
^{15}N (47 AMeV) + Be (450 mg/cm ²), $I_0 = 10 \mu\text{Ae}$	10^4 pps

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что фрагмент-сепаратор КОМБАС в сочетании с ускорителем У-400М по интенсивности вторичного пучка вполне может быть включен в их число.

Литература

- [1]. G.A.Souliotis, D.J.Morrissey, N.A.Orr, B.M.Sherrill and J.A.Winger, Phys. Rev. C 46, 1383, 1992.
- [2]. R. Pfaff et al., Phys. Rev. C 51, 1348, 1995.
- [3]. A.G.Artukh et al, Yad. Fiz. 65 (3), 2002, 1.
- [4]. A.G.Artukh et al, Nucl. Phys., A 701, 2002, 96.
- [5]. A.G.Artukh et al, Proc. Of Int. Symp. On Exotic Nuclei, July 24-28, 2001, 269, Baikal Lake, Russia.
- [6]. A.G.Artukh et al, Nucl. Instr. and Meth. A 426, 1999, 605.