

283-00



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13-2000-283

С.М.Лукиянов, Ю.Э.Пенионжкевич, Р.Калпакчиева,
Н.К.Скобелев, О.Б.Тарасов, А.А.Александров,
И.А.Александрова, В.Андрейчев¹, З.Длоугы²,
В.А.Маслов, Л.В.Михайлов², Н.О.Порошин, С.Раднев³,
Ю.Г.Соболев

УСТАНОВКА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВТОРИЧНЫХ ПУЧКОВ

¹Институт ядерных исследований и ядерной энергетики БАН, София

²Институт ядерной физики, Ржеж, Чехия

³База развития и внедрения БАН, София

1. Введение

Одним из наиболее эффективных методов получения вторичных пучков нейтроноизбыточных ядер являются реакции фрагментации тяжелых ионов при энергиях 30 МэВ/А и выше, а также реакции передачи несколько нуклонов, глубоконеупругих передач, перезарядки и др. при энергиях 5-20 МэВ/А [1-3].

В реакциях с тяжелыми ионами с энергией ≥ 30 МэВ/А, фрагментация бомбардирующих ядер приводит к образованию ядер в широком диапазоне зарядов и масс, имеющих узкое, направленное вперед угловое распределение и скорости, сравнимые со скоростью первичного пучка. После выделения по Z и A необходимых ядер с помощью магнитных сепараторов можно использовать полученные пучки вторичных (радиоактивных) ядер без их последующего ускорения.

При энергиях 5-20 МэВ/А, реакции передачи нуклонов, срыва нуклонов, перезарядки, неравновесная эмиссия частиц, выбивание частиц и др. могут производить довольно ограниченный по Z и A спектр радиоактивных ядер. Однако эти реакции имеют достаточно высокие сечения до нескольких сотен миллибарн и относительно узкое угловое распределение, что позволяет получать пучки радиоактивных ядер типа ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^{11}\text{C}$, ${}^{15}\text{O}$, ${}^{17}\text{F}$ и др. с интенсивностью до 10^4 - 10^6 с $^{-1}$.

Полученные в последнее время в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ пучки тяжелых ионов с энергией 20-40 МэВ/нуклон дают возможность получать вторичные пучки с энергией 6-35 МэВ/нуклон [2]. Это позволяет проводить эксперименты в широком диапазоне энергий, в том числе и близких к кулоновскому барьеру взаимодействующих ядер, где наиболее сильно проявляется влияние структуры ядер [4,5], например, при вынужденном делении тяжелых ядер, а также упругом рассеянии на вторичных пучках. Получение радиоактивных пучков ядер с широким набором значений изоспина позволяет продвинуться в изучении свойств ядер вплоть до границ нейтронной и протонной стабильности.

В настоящей работе описана установка для регистрации продуктов ядерных реакций, полученных под действием вторичных пучков, размещенная на канале выведенного пучка циклотрона У-400М ЛЯР ОИЯИ, с помощью которой можно исследовать структуру как самих ядер пучка, так и реакции, вызванные ими, например, рассеяние частиц в прямой и инверсной кинематике, а также изучать процесс слияния и деления тяжелых ядер в широком диапазоне энергий.

2. Описание установки

Основными составляющими установки являются:

- первичная (производящая) и вторичная (физическая) мишени;
- магнитный сепаратор продуктов реакции на основе ионно-оптической системы транспортировки первичных пучков ускорителя У-400М;
- система детекторов для регистрации и идентификации частиц-продуктов реакции и измерения их соответствующих характеристик.

2.1. Формирование вторичного пучка

Схема установки для получения вторичных пучков приведена на рис. 1.

Первичный пучок ускоренных ионов из У-400М фокусируется на охлаждаемую производящую мишень, толщина которой оптимизируется с учетом нужной интенсивности и энергии изотопа, из которого далее формируется вторичный пучок [6]. Сепарация и формирование продуктов реакции во вторичные пучки осуществляется с использованием ионно-оптической системы линии транспортировки пучка на У-400М. Максимальная магнитная жесткость такого спектрометра составляет 4,5 Тм, а телесный угол около 9 мр. В данном спектрометре сепарация ионов по магнитной жесткости производится с использованием диполей М5 и М6. Для сепарации по энергетическим потерям используется дополнительная фольга (так называемый дегрейдер) из Al или полимерных материалов, как это делается на установке LISE [7]. Для лучшей сепарации вторичных частиц в дисперсионной фокальной плоскости между дипольными магнитами (М6 и М7) установлены щелевые диафрагмы и профиломер пучка. В каждом эксперименте значения магнитной жесткости системы выбирались из условия энергии интересующих нас частиц и наилучшей очистки вторичного пучка. Данный спектрометр является дважды ахроматичным (по импульсу и по углу) в фокальной плоскости. Спектрометр симметричен относительно дисперсионной фокальной точки. Основные характеристики этой системы приведены в таблице 1. На рис. 2 для иллюстрации показаны вертикальные и горизонтальные огибающие пучка в "симметричной (зеркальной)" моде.

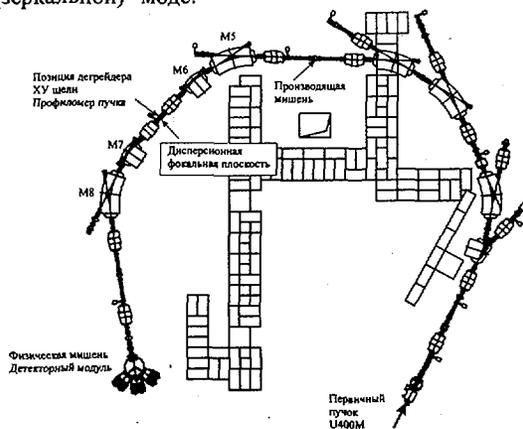


Рис. 1. Схема спектрометра для получения вторичных пучков

Таблица 1. Основные характеристики ионно-оптической системы для получения вторичных пучков на ускорителе У-400М

Магнитная жесткость	4,5 Тм
Изображение пучка	5×5 мм
Дисперсия	13,4 мм/%
Импульсный аксептанс	±1,4 %
Угловой аксептанс	9 мрад
Разрешающая способность	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Длина установки	16,8 м

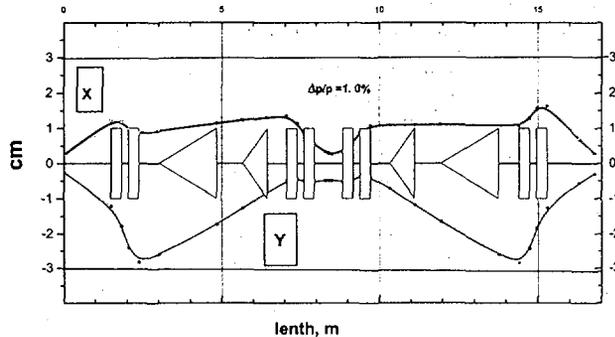


Рис. 2. Горизонтальная и вертикальная огибающие пучка в случае "симметричной" моды

После дипольного магнита М7 и квадрупольных линз сфокусированный вторичный пучок попадает на вторичную мишень.

2.2. Описание системы регистрации

Система регистрации была выбрана таким образом, чтобы обеспечить возможность исследования реакций, идущих с сечениями меньше 10^{-26} см² (таких, как вынужденное деление тяжелых ядер, упругое рассеяние, реакции передачи нескольких частиц и др.) на вторичных пучках с интенсивностью на много порядков меньше, чем первичные пучки. Кроме этого, она позволяет проводить идентификацию исследуемых продуктов реакции по Z и A на большом фоне других частиц и обеспечивает высокую эффективность регистрации в телесном угле, близком к 4π . Она также позволяет проводить корреляционные измерения продуктов реакции.

На рис. 3 представлена схема размещения детекторов в установке, основу которой составляет реакционная камера. Мишенный узел позволяет установить в камере несколько мишеней и вводить их под пучок во время эксперимента без нарушения вакуума. В камере имеется вращающаяся платформа для установки различных детекторов. К реакционной камере возможно также присоединение подвижных "рукавов" для размещения позиционно-чувствительных времяпролетных детекторов большой площади. Вращение камеры с целью изменения угла регистрации времяпролетных детекторов по отношению к направлению пучка обеспечивается с помощью вакуумно-плотной ленты, что позволяет изменять условия измерения без нарушения вакуума.

Для исследования характеристик реакций под действием вторичных пучков используется конфигурация, состоящая из вторичной (физической) мишени, нескольких широкоапертурных позиционно-чувствительных лавинных счетчиков (ПЧЛС) и сцинтилляционных детекторов CsI(Tl), подобных описанным в работах [8,9]. Система детекторов, расположенных на линии пучка, используется для мониторинга интенсивности и качества вторичного пучка. Другие детекторы, расположенные по обе стороны по отношению к оси пучка, используются для регистрации продуктов реакций, вызванных этими вторичными частицами.

Первый ПЧЛС размером 150×150 мм устанавливается на пути пучка перед вторичной мишенью и используется для оптимизации трансмиссии вторичного пучка, а также для определения траектории частиц. С помощью ПЧЛС (250×200 мм), расположенных после физической мишени, определяются углы вылета зарегистрированных продуктов реакций. Угловой захват этих ПЧЛС составляет $5 \div 40^\circ$ в лабораторной системе координат (ЛСК) с угловым разрешением $\Delta\theta \approx 0,7^\circ$. С помощью ПЧЛС измеряются векторы скоростей продуктов реакций. Энергия и информация о массе и заряде (A, Z) продуктов реакций извлекаются при анализе сигналов с ПЧЛС и CsI(Tl)-детекторов. Сцинтилляционные детекторы настраиваются для работы в режиме “фосвич”.

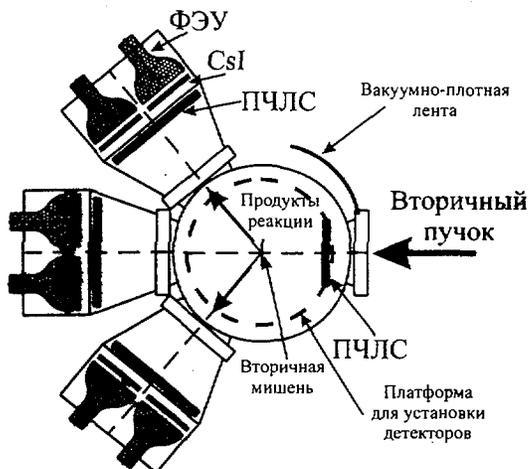


Рис. 3. Схема детекторной части установки

Таким образом, созданная установка позволяет работать в режиме “меченых событий”, т.е. регистрировать каждый ион вторичного пучка при прохождении через вторичную мишень.

2.2.1. Лавинные счетчики

Схематическое изображение лавинного счетчика и блок-схема электроники представлены на рис. 4. Как уже указывалось, ПЧЛС имеют рабочую площадь 250×200 мм или 150×150 мм. Счетчик состоит из трех электродов: центрального общего катода и двух анодных плоскостей. На краю каждой анодной плоскости перпендикулярно нитям размещены линии задержки, на которых индуцируются сигналы от тех нитей, вблизи которых пролетела детектируемая частица. Быстрый “временной” сигнал формируется с центрального катода. В качестве рабочего газа для ПЧЛС применяется пентан (C_5H_{12}) при давлении $3 \div 5$ торр. На лавинные счетчики подается напряжение $-500 \div -600$ В.

Место прохождения частицы (координата) определяется по разности времен прихода сигналов с катода и линий задержки соответствующих анодов [8]. Таким образом определяются X- и Y-координаты попадания частиц в детектор. Временное и пространственное разрешения лавинных счетчиков $\Delta t \approx 250$ пкс и $\Delta x, \Delta y \approx 0,5$ мм соответственно.

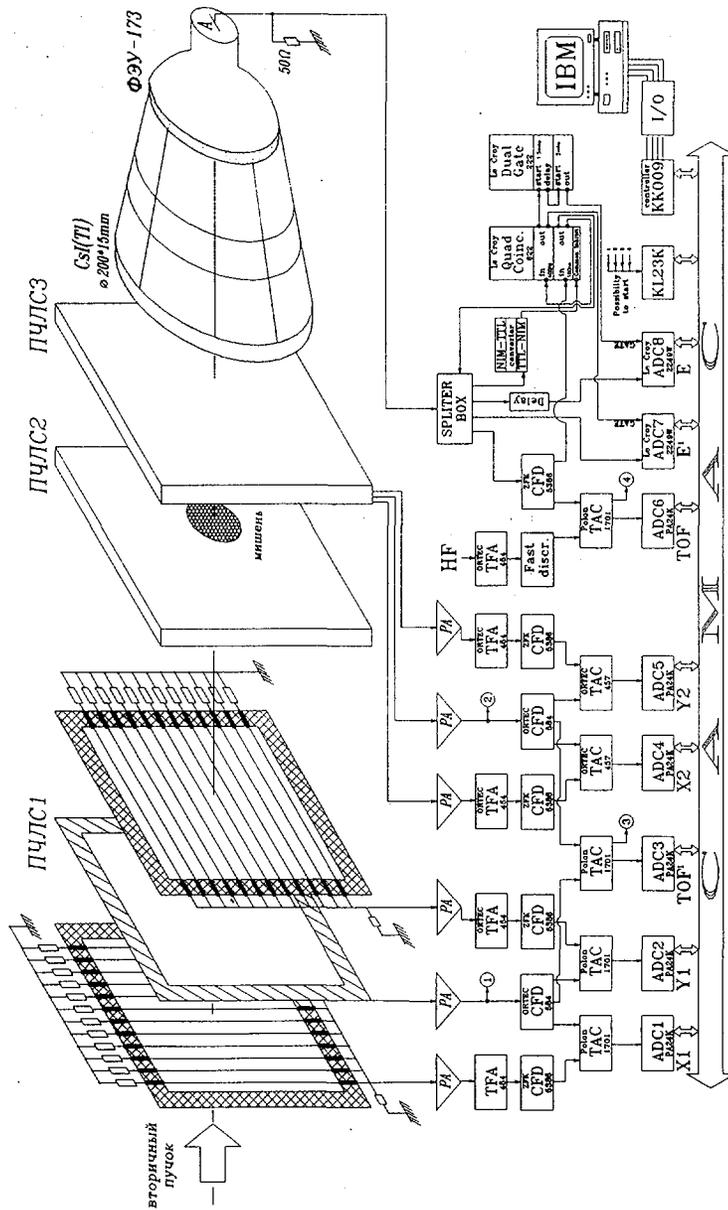


Рис. 4. Схематическое изображение лавинного счетчика и блок-схема электроники.

Для калибровки лавинных счетчиков применяются специальные трафареты, закрепленные непосредственно перед ПЧЛС. Калибровки проводятся по α -частицам из стандартного α -источника. Двухмерный спектр по X - и Y -координатам, соответствующий изображению трафарета, представлен на рис. 5. Аналогичные спектры были получены при использовании вторичного пучка ${}^6\text{He}$. Эффективность регистрации в этом случае при энергии ${}^6\text{He}$, равной 70 МэВ, составляла 60%.

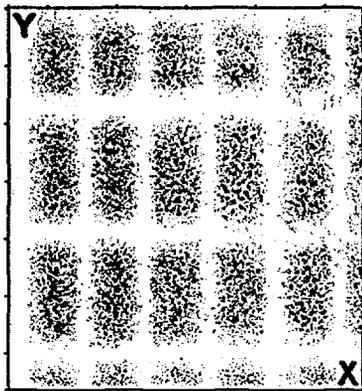


Рис. 5. Двухмерный спектр X - Y -координат, полученный с помощью трафарета, помещенного перед ПЧЛС

2.2.2. Сцинтилляционный детектор CsI(Tl)

Для измерения энергии рассеянных частиц и их идентификации используется детектор на основе кристалла CsI(Tl) . Конструкция сцинтилляционного детектора описана в работе [9]. Кристалл CsI(Tl) имеет две постоянные времени высвечивания. Быстрая компонента (время высвечивания $\approx 400 \div 750$ нс) зависит от сорта регистрируемой частицы, медленная компонента имеет время высвечивания около 7 мкс и слабо зависит от сорта частиц, что в совокупности и позволяет разделять частицы по Z и A . В данной работе используется кристалл CsI(Tl) $\varnothing 200 \times 15$ мм, диапазон регистрации и идентификации которого для легких частиц по Z не превышает 10. На рис. 6 представлена матрица идентификации частиц по форме импульса высвечивания кристалла CsI(Tl) .

Для светосбора применяется мал шумящий фотоумножитель ФЭУ-173 с диаметром фотокатода 150 мм и спектральной чувствительностью в области $\lambda = 300 \div 800$ нм. Рабочее напряжение ФЭУ $-1100 \div -1300$ В.

Вместо традиционных световодов из оргстекла свет от CsI(Tl) собирается через пустотелый световод высотой 120 мм. Внутренняя боковая поверхность световода экранирована зеркальным материалом, что позволяет устранить перерассеяние нейтронов, а эффект полного внутреннего отражения света от боковых сторон будет значительно больше, чем в случае использования световода из оргстекла.

3. Тестовые эксперименты

Данная методика, как показано выше, позволяет идентифицировать частицы с помощью кристалла $CsI(Tl)$, используя его в качестве фосвич-детектора (рис. 6). Применяя метод TOF-E (время пролета-полная энергия), как показано на рис. 7, также можно надежно проводить идентификацию частиц. В этом случае в роли сигнала "стоп" выступает сигнал высокой частоты генератора, а в роли сигнала "старт" берется "быстрый" сигнал с одного из лавинных счетчиков.

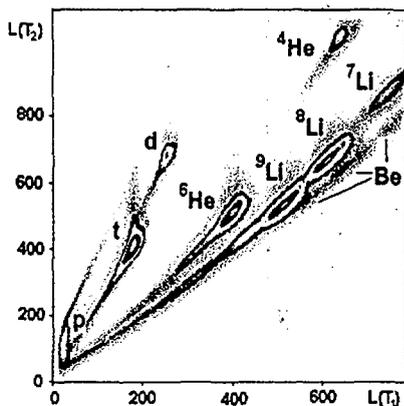
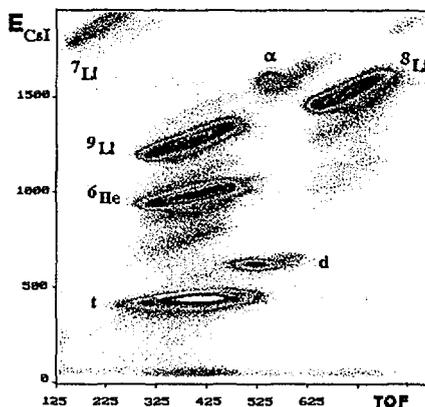


Рис. 7. Идентификация частиц по методу энергия-время пролета, полученных в реакции $^{11}B(30 \text{ МэВ/А})+Ta$

Рис. 6. Идентификация частиц по форме импульса высвечивания кристалла $CsI(Tl)$, полученных в реакции $^{11}B(30 \text{ МэВ/А})+Ta$, при интегрировании анодных сигналов во временных интервалах $T_1=0,0; 0,4$ мкс и $T_2=1,5; 2,0$ мкс соответственно, где первое число обозначает задержку, а второе – длительность сигнала



На рис. 6, 7 представлены матрицы всех продуктов реакции $^{11}B(30 \text{ МэВ/А})+Ta$. Далее, в зависимости от цели эксперимента, настройкой ионно-оптической системы и подбором толщины дегрейдера, выделяется нужный изотоп и подается на физическую мишень в качестве вторичного пучка.

Для получения вторичного пучка ионов 6He в качестве производящей мишени использовался образец 9Be толщиной до 1,5 мм, облучаемый пучком 7Li с энергией 34 МэВ/А. Использование системы из четырех дипольных и квадрупольных магнитов позволило получить интенсивность пучка $^6He \sim 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ при токе первичного пучка $^7Li \sim 1 \text{ мкА}$. Для лучшей очистки 6He от других вторичных частиц, в частности от ядер

третия, между дипольными магнитами были установлены шелевые диафрагмы и дегрейдер из полипропилена толщиной 2000 мкм. На рис. 8 представлена матрица идентификации частиц, из которой видно, что использование вышеописанной техники позволяло получить степень очистки ${}^6\text{He}$ от других частиц до 98%. Полученный вторичный пучок ${}^6\text{He}$ при длительной работе ионно-оптической системы транспортировки ионов практически не менял своих характеристик, а содержание примесей при длительных экспериментах варьировалось от 2 до 5%. На нижней части рис.8 проиллюстрирован энергетический разброс вторичного пучка, который составляет $\pm 0,6$ МэВ.

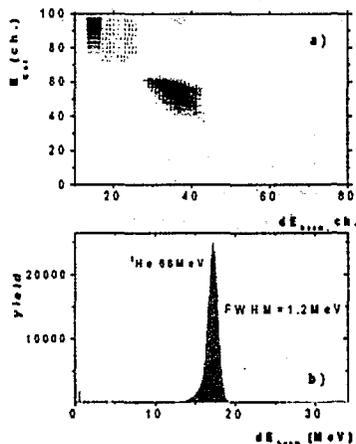


Рис. 8. (а) Двумерная матрица удельных потерь полной энергии, $dE \times E_{tot}$, (б) одномерный энергетический спектр для вторичного пучка ${}^6\text{He}$ с энергией ~ 95 МэВ

Имея такую детектирующую систему, можно контролировать состав и энергию частиц вторичного пучка, а также исследовать продукты реакций под действием этих вторичных частиц. В частности, ПЧЛС могут располагаться в такой геометрии, которая необходима для регистрации коррелированных осколков деления, что позволяет измерить сечения реакции слияния-деления и угловые распределения осколков деления [4,10]. Такая установка позволяет также изучать структуру ядер вторичного пучка, таких как ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ и др., путем исследования индуцированных ими реакций. Необходимо упомянуть, что в таких исследованиях перспективным считается применение легких мишеней ($p, d, t, {}^3\text{He}$ и т.д.), которые открывают возможность изучать простые реакции с относительно большими сечениями, такие как (p, p'), (d, p), (p, d), ($d, {}^3\text{He}$), (p, t) и др. Преимуществом этих реакций является реализация больших телесных углов из-за направленного вперед углового распределения продуктов.

Авторы благодарят Н. Яневу и Л. Костова за полезные обсуждения в процессе выполнения данной работы, Х. Пачеджиева за конструкторские разработки деталей установки, Г.Ф. Исаева за помощь в сборке ПЧЛС. Эта работа была выполнена в рамках целевой программы сотрудничества Болгарии и Чехии с ОИЯИ.

Литература

- [1] Detraz C., Vieira D.J. – Ann. Rev. Nucl. Part. Sci, 1989, v. 39, p. 409.
- [2] Пенионжкевич Ю.Э. – ЭЧАЯ, 1994, т. 25, стр. 930.
- [3] Калпакчиева Р. и др. – ЭЧАЯ, 1998, т. 29, стр. 832.
- [4] Penionzhkevich Yu.E. – Nucl. Phys., 1995, v. A588, p. 259c.
- [5] Лукьянов С.М. и др. – Препринт ОИЯИ Р7-91-224, Дубна, 1991.
Lukyanov S. M. et al. – In: Proc. of Int. Conf. on Exotic Nuclei, FOROS, Crimea (1991), World Scientific, ed. Penionzhkevich Yu.E. & Kalpakchieva R., Singapore (1992), p. 415.
- [6] Tarasov O., Bazin D., Lewitowicz M., Sorlin O. – In: Proc. of RNB2000, The Fifth International conference on Radioactive Nuclear Beams, April 3-8, 2000, DIVONNE, France, to be published in "Nuclear Physics A".
- [7] Anne R. et al. – Preprint GANIL P-86-23 (1986).
- [8] Shilling K.D. et al. – Nucl. Instrum. Meth, 1987, v. A257, p. 197.
- [9] Fomichev A.S. et al. – Nucl. Instrum. Meth., 1994, v. A344, p. 378.
Фомичев А.С. и др. – Препринт ОИЯИ Р15-92-50, Дубна, 1992.
- [10] Skobelev N.K. et al. – JINR Rapid Communications, 1993, No. 4 (61)-93, p. 36.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 ноября 2000 года.