

Многодетекторная установка для регистрации совпадений заряженных частиц и γ -квантов

© М.Ф. Кудояров¹, В.В. Лобанов¹, А.А. Пастернак¹, С.И. Лашаев²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

²Радиевый институт им. В.Г. Хлопина РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 10 сентября 1995 г. В окончательной редакции 21 октября 1997 г.)

Предложена, реализована и протестирована на пучке тяжелых ионов 4 π -позиционно-чувствительная аксиально-симметричная сборка Si–Au детекторов заряженных частиц, размеры и конструкция которой позволяют организовать регистрацию совпадений заряженных продуктов реакции с дискретными γ -квантами, испускаемыми дочерним ядром и регистрируемыми системой сверхчистых Ge детекторов. Получены первые результаты исследования реакции $^{58}\text{Ni}(^{16}\text{O}, \alpha 2p\gamma)^{68}\text{Ge}$ при $E_0 = 74.5 \text{ MeV}$.

Введение

Получение новой информации в ядерной физике низких энергий во многом связано с развитием физических установок, особенно их детектирующих систем. В течение последнего десятилетия усилиями ряда международных коллективов создан ряд крупных установок для регистрации продуктов ядерных реакций с тяжелыми ионами низких и средних энергий, в частности γ -квантов и заряженных частиц. Современные многокристалльные γ -спектрометры типа "кристалл-болл", представляющие собой 4 π -сборки из десятков сверхчистых Ge монокристаллов, часто дополняемые 4 π -BGO-фильтрами множественности γ -квантов, предназначены в основном для изучения физики высокоспиновых состояний атомных ядер [1–6]. Механизмы ядерных реакций с тяжелыми ионами изучаются главным образом с помощью многодетекторных позиционно-чувствительных установок, состоящих из десятков и даже сотен детекторов заряженных частиц различного принципа действия. Это могут быть установки типа "Фобос" [7], предназначенные для регистрации легких заряженных продуктов реакции, а также осколков деления или масс-сепараторы ядер отдачи [8]. Однако крупные габариты этих установок (измеряемые метрами) не позволяют организовать совпадения γ -квантов с частицами и тем самым исследовать большой круг проблем, важных как для физики высокоспиновых состояний, так и для понимания механизмов ядерных реакций. Единственной реальной возможностью является конструирование малогабаритных ($\leq 0.1 \text{ m}$) детектирующих систем заряженных частиц, которые могут быть помещены вовнутрь γ -спектрометра. В принципе можно создать полупроводниковый детектор, имеющий форму части сферы и из таких частей набрать 4 π -геометрию, но требование координатного разрешения, пусть даже грубого, вместе со специфической формой самого детектора делает задачу технологически весьма сложной. Известны опыты изготовления сборок из плоских полупроводниковых детекторов в форме полого куба (OSIRIS

CUBE [9]) и их использования в γ -спектрометрах для выделения тех каналов реакции, в которых испускаются протоны или α -частицы [10]. К недостаткам такой системы можно отнести 1) заметные по размерам мертвые зоны на стыках детекторов; 2) неидентичность условий регистрации частиц, вылетающих из мишени под одинаковым относительно оси пучка углом, но попадающих на плоскость детектора под разными углами, что ведет к ухудшению энергетического разрешения; 3) ограниченные возможности координатного разрешения, особенно в области малых передних углов, реализуемые только путем наращивания числа плоских элементов (DIAMAND) и соответственно электронных трактов.

Конструкция установки

Нами предложена и реализована аксиально-симметричная многодетекторная установка иного типа, обеспечивающая не только 4 π -геометрию регистрации заряженных частиц, но и возможность координатного разрешения по полярному углу. Преимущества такой сборки, состоящей из цилиндрических и дискообразных элементов, состоят 1) в более простой (по сравнению со сферической формой) технологии изготовления элементов; 2) в идентичности условий регистрации частиц по азимутальному углу, чего нет у сборок типа полого куба; 3) в возможности создания на одном кристалле нескольких независимых регистрирующих колец, что дает возможность фиксировать в достаточно узком диапазоне угол вылета частицы из мишени; 4) число электронных спектрометрических трактов для цилиндрических элементов получается в 4 раза меньше, чем потребовалось бы для охвата соответствующей геометрии в системе типа "коробочка"; 5) ширина мертвых зон между соседними детекторами может быть сделана не более 1 mm.

Нами была разработана и апробирована технология изготовления Si–Au детекторов, представляющих из се-

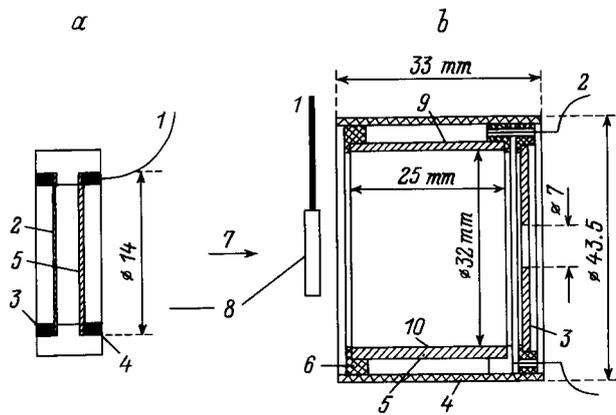


Рис. 1. Фрагмент (передняя часть) реакционной камеры в разрезе. *a* — в увеличенном масштабе устройство мишени: 1 — контактный провод, 2 — мишень, 3 — диэлектрическое кольцо, 4 — металлическое кольцо, 5 — Ta фольга ($3 \times 8 = 24 \mu\text{m}$); *b* — 1 — держатель мишени, 2 — контактный провод, 3 — Si кольцо (чувствительный слой $\approx 500 \mu\text{m}$), 4 — Al оболочка, 5 — Si цилиндр (чувствительный слой $\approx 300 \mu\text{m}$), 6 — изолятор; 7 — пучок, 8 — блок мишени, 9 — Ni слой, 10 — Au слой.

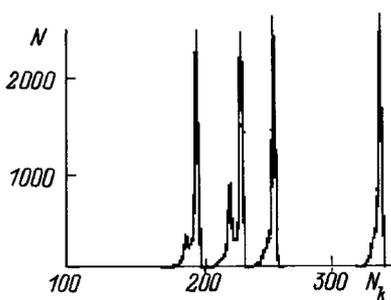


Рис. 2. Спектр α -частиц ^{226}Ra , полученный с цилиндрического Si-Au детектора.

бя тонкостенный ($\approx 1 \text{ mm}$) цилиндр с чувствительным слоем, расположенным на внутренней поверхности. Отработана также технология создания нескольких независимых детекторов на одном кристалле кремния без взаимного влияния детекторов друг на друга. Мертвые зоны между ними не превышают 1 mm. Цилиндр изготавливается из монокристалла высокоомного *n*-кремния высверливанием его внутренней части. Дальнейшая обработка поверхности и создание рабочей зоны близки по технологии к известным методам, применяемым при создании обычных Si-Au детекторов. Фрагмент установки в разрезе, включающий полупроводниковые детекторы, приведен на рис. 1.

Ввод пучка осуществляется через отверстие в заднем кольцевом детекторе диаметром 8 mm. Мишень располагается на автономном держателе между двумя идентичными цилиндрами так, чтобы зазор между торцами цилиндров был минимальным. Держатель мишени предусматривает размещение непосредственно за мишенью

(по направлению пучка) фольги из тяжелого металла (в нашем случае тантала) для защиты детектора от прямого попадания частиц пучка, прошедших мишень без взаимодействия. Дальние от мишени торцы цилиндров закрыты съемными кольцевыми Si-Au детекторами с толщиной рабочей зоны до $500 \mu\text{m}$, что обеспечивает полное поглощение α -частиц с энергией $\approx 40 \text{ MeV}$. В наших экспериментах используются различные виды кольцевых детекторов, в частности детектор из трех аксиально-симметричных колец, выполненных на одном кристалле. Это позволяет выделять в определенных интервалах углы вылета продуктов реакций из мишени, что в совокупности с измерением энергии позволяет с нужной точностью фиксировать продукты реакции и таким образом выделять при дальнейшей обработке нужные каналы. Площадь рабочей поверхности цилиндрического детектора составляет 20 cm^2 , емкость его $\approx 1000 \text{ pF}$, что потребовало применения специальных предусилителей [11].

На рис. 2 в качестве иллюстрации представлен спектр α -частиц ^{226}Ra , полученный с цилиндрического детектора. Источник помещался на место мишени, т. е. падение α -частиц на детектор было "косым", что дополнительно ухудшало энергетическое разрешение за счет затягивания левого края пика. Несмотря на это, в приведенном случае разрешение составило $\approx 70 \text{ keV}$, что вполне достаточно для практических приложений.

В наших первых экспериментах, представляющих главным образом методический и демонстрационный интерес, γ -кванты вместо "кристалл-болла" регистрировались имеющимися в нашем распоряжении двумя γ -детекторами из особо чистого германия объемом по 90 cm^3 производства "Canberra". Блок-схема установки представлена на рис. 3. Сигналы с детекторов после предусилителя разветвляются: быстрый (с фронтом 10 ns) со специального *T*-выхода поступает на быстрый формирователь стандартных импульсов и далее на схему

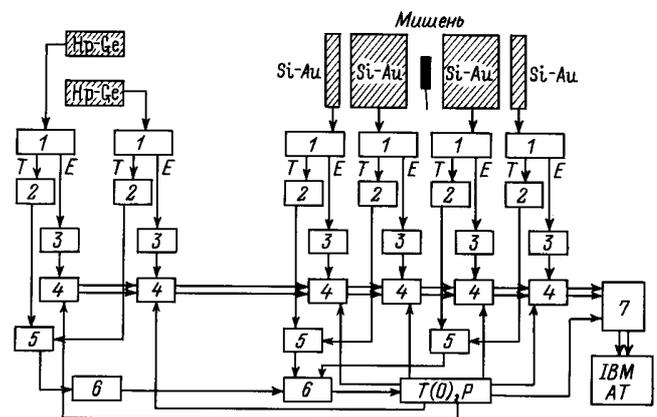


Рис. 3. Блок-схема регистрации совпадений. 1 — предусилитель, 2 — формирователь, 3 — линейный усилитель, 4 — аналого-цифровой преобразователь, 5 — смеситель логических импульсов, 6 — схема совпадений. *T*(0), *P* — одновибратор, 7 — контроллер крейта CAMAC.

совпадений, а спектрометрический сигнал, усиленный и сформированный линейным усилителем, поступает на аналого-цифровой преобразователь. Многоходовая схема совпадений позволяет организовать совпадения сигналов практически в любой комбинации. Сигналом схемы совпадений, расширенным до $5 \mu\text{m}$ одновибратором, открываются ворота аналого-цифровых преобразователей.

Таким образом, обеспечивается регистрация спектрометрической информации только в случае, если произошло одновременное срабатывание детекторов в комбинации, заранее заданной с помощью схемы совпадений. Это позволяет эффективно выделять интересующие каналы реакций, а регулировкой нижнего и верхнего порогов усилителей "вырезать" нужные энергетические диапазоны.

Электронные тракты Ge и Si-Au детекторов унифицированы, различие состоит только в типе применяемых преобразователей. Для Ge детекторов применены преобразователи на 4096 каналов с улучшенной линейностью и повышенной стабильностью, что позволяет, применяя спектрометрические усилители "Canberra", сохранять энергетическое разрешение $2.0\text{--}2.1 \text{ keV}$ на протяжении всего времени эксперимента (несколько суток).

Первые экспериментальные результаты

В наших первых экспериментах, проведенных на пучке тяжелых ионов циклотрона ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, исследовались спектры совпадений γ -квантов с α -частицами и протонами в реакции $^{58}\text{Ni}(^{16}\text{O}, \alpha 2p\gamma)^{68}\text{Ge}$ при $E_0 = 74.5 \text{ MeV}$ (выбор этой реакции определялся тем, что в циклотронной лаборатории ФТИ с помощью техники совпадений γ -квантов с α -частицами, регистрируемыми обычным кольцевым Si-Au детектором уже был обнаружен неравновесный характер испуска-

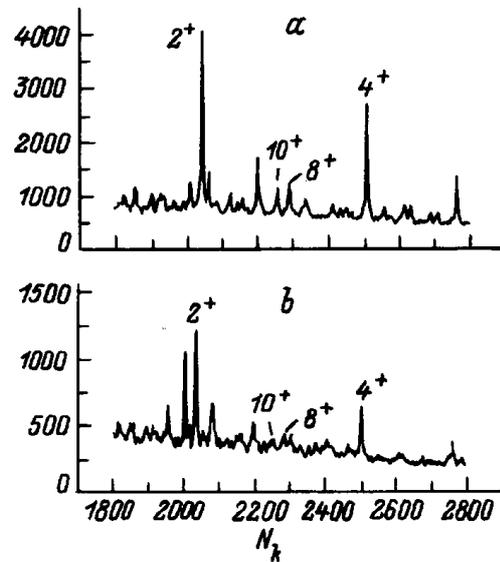


Рис. 5. *a* — γ -спектр в совпадении с передним Si-Au детектором, *b* — прямой γ -спектр.

ния последних [12], эти эксперименты и послужили стимулом для разработки описываемой в настоящей работе установки). Бомбардирующие частицы тормозились Ta фольгой толщиной $\approx 40 \text{ mg/cm}^2$, позволяющей проходить сквозь нее α и p , вылетающим в передние углы. В данных условиях эксперимента разделение α и p осуществляется за счет различия в регистрируемых энергетических спектрах и угловых распределениях. Таким образом, отбирая события, связанные с попаданием α -частицы в передний дискообразный детектор и p в два цилиндрических детектора, можно выделить канал реакции ($\alpha, 2p$), а с помощью совпадений с γ -квантами конечного ядра оценить долю сечения и форму спектра частицы, соответствующей образованию двойной ядерной системы. Всего в проведенном эксперименте было накоплено $\approx 2.5 \cdot 10^6$ событий.

Не вдаваясь в рамках данной статьи в физическую интерпретацию результатов все же можно сделать два основных вывода.

1. Как видно из рис. 4, спектры α -частиц, зарегистрированных в совпадении с γ -квантами, резко отличаются как от прямого спектра, содержащего высокоэнергетичный вклад от развала ^{16}O , так и от квазииспарительного (типа распределения Максвелла с максимумом в районе $12\text{--}15 \text{ MeV}$), что характерно для механизма неполного слияния.

2. Имеет место, как это качественно иллюстрирует рис. 5, существенное изменение (по отношению к прямому спектру) характера заселения высокоспиновых состояний ^{68}Ge при отборе событий, соответствующих совпадениям с неравновесными α -частицами, испущенными в передние углы в результате механизма неполного слияния.

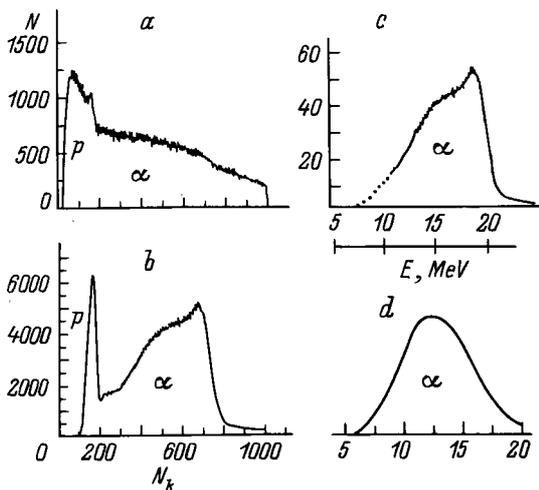


Рис. 4. Прямой спектр заряженных частиц от переднего Si-Au детектора (*a*), спектр тройных совпадений γ -Si-Au передний — Si-Au цилиндр (*b*), спектр в системе центра масс (*c*), расчетный спектр испарительных α -частиц (*d*).

Перспективы использования системы в составе многодетекторных γ -спектрометров

Как видно из краткого описания конструкции установки и результатов первых экспериментов, в настоящее время уже можно планировать пакет задач для использования в установках типа "ball". С точки зрения физики ядерных реакций актуальной темой будущих исследований представляется изучение механизма неполного слияния ядер, сопровождающегося вылетом быстрой α -частицы вперед и образованием быстровращающегося квазинеравновесного ядра-остатка, испускающего легкие частицы, а затем γ -кванты. Отбирая события, связанные с дискретными γ -переходами конечного ядра в узкой области спинов, появляется возможность не только однозначно фиксировать конечный канал реакции, но и величину переданного углового момента, связанного с прицельным параметром периферических столкновений. Это позволит прояснить многие неясные вопросы физики массовых передач при взаимодействии тяжелых ионов. Наоборот, отбирая γ -кванты, соответствующие тем событиям регистрации заряженных частиц, которые связаны с механизмом неполного слияния в периферических столкновениях, можно выделить отдельные полосы высокоспиновых состояний дочерних ядер, что открывает дополнительные возможности их исследования методами γ -спектроскопии. В частности, появляется дополнительный инструмент поиска новых областей супердеформации и гипердеформации в легких ядрах, для которых сечения образования в реакциях с тяжелыми ионами, сопровождающихся вылетом заряженных частиц, достаточно велики по сравнению с нейтронными каналами.

Круг перспективных для созданной установки задач не исчерпывается изучением спектров совпадений заряженных частиц с дискретными γ -квантами. В частности, в нашем первом совместном с коллегами из ОИЯИ эксперименте регистрировался спектр высокоэнергетичных γ -квантов, детектируемых ВГО-кристаллом в совпадении с α -частицами в реакции $^{58}\text{Ni}(^{16}\text{O}, \alpha 2p\gamma)^{68}\text{Ge}$ при $E_0 = 74.5 \text{ MeV}$ [13]. Первые результаты показали перспективность применения нашей установки для исследований гигантских резонансов с использованием ВГО-сборок (в частности, типа "ball").

Авторы благодарят Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку нашей работы.

Список литературы

- [1] Gammasphere. A. National Gamma-Ray Facility / Ed. M.A. Deleplanque, R.M. Diamond. PUB-5202. Berkley, 1988.
- [2] *Diamond R.M.* // Instrumentation for Heavy-ion Nuclear Research / Ed. D. Shapira. New York, 1985. P. 259.
- [3] *Sharpey-Schafer J.F., Simpson J.* // Part. and Nucl. Phys. 1988. Vol. 21. P. 293.
- [4] *Herskind B.* // Nucl. Phys. 1985. Vol. A447. P. 395–412.
- [5] Eurogam. Imprime au Centre de Recherches Nucleaires. Strasbourg, 1990. P. 1–72.
- [6] *Martin J.P.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1987. Vol. A257. P. 301.
- [7] *Ortlep H.-G.* et al. // Heavy Ion Physics Ed. Yu. Ts. Oganessian. Dubna, 1993. Vol. 2. P. 466–477.
- [8] *Sinha A.R.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. 1994. Vol. A339. P. 543–549.
- [9] *Shwengner R.* et al. // Annual Rep. 1991. FZR 92-09. P. 37.
- [10] *Winter G.* et al. // Z. Physic. 1992. Vol. A344. P. 229.
- [11] *Духанов В.Н., Жернов Н.В., Мазуров И.Б.* // ВАНТ. Сер. Общая и ядерная физика. 1988. № 12(42). С. 87–88.
- [12] *Антропов А.Е., Кудояров М.Ф.* и др. // Тез. докл. XXXVIII совещания по ядерн. спектр. и структ. ат. ядра. Л.: Наука, 1988. С. 384.
- [13] *Кудояров М.Ф., Лобанов В.В.* и др. // Тез. докл. Междунар. совещания по ядерн. спектр. и структ. ат. ядра. СПб., 1995. С. 384.