

P13-2001-66

Ю.П.Гангрский, В.П.Доманов, В.И.Жеменик,
Г.В.Мышинский, Ю.Э.Пенионжкевич, О.Селеш

**ТРАНСПОРТИРОВКА ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ
ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ С АЭРОЗОЛЯМИ**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

Введение

В последние годы широкое распространение получили исследования ядер, удаленных от линии β -стабильности, т.е. ядер с большим избытком протонов или нейтронов. К одной из групп таких нуклидов относятся осколки деления тяжелых элементов, которые включают область нейтронно-избыточных ядер от Zn до Sm с массовым числом от 80 до 135 (при делении урана γ -квантами или нейтронами эти осколки имеют выход более 0,1% от числа актов деления [1]). В исследовании структуры этих ядер используется широкий набор различных методик. Одной из частей этих методик является устройство для транспортировки осколков от облучаемой мишени к измерительной установке. Это особенно важно в тех случаях, когда осколки образуются в реакциях с сильно проникающим излучением (нейтроны, гамма-кванты), а для успешных измерений необходимо эффективное подавление фона от этого излучения.

В данной работе представлена методика транспортировки осколков деления потоком инертного газа с добавкой аэрозолей: описывается экспериментальная установка и результаты ее испытаний на пучке тормозного излучения микротрона, вызывающего деление ядер урана, приводятся полученные характеристики установки, обсуждаются области ее применения в исследовании свойств ядер.

Экспериментальная установка

Используемая для транспортировки осколков экспериментальная установка включает реакционную камеру с облучаемой мишенью, приемную камеру для сбора осколков, генератор аэрозолей, форвакуумный насос для откачки газа и капилляр, соединяющий эти части установки (рис. 1).

Реакционная камера представляла собой цилиндр с внутренним диаметром 40 мм и глубиной 30 мм, с входным окном диаметром 25 мм и выходным окном диаметром 40 мм. Симметрично по диаметру реакционной камеры друг напротив друга находились отверстия для ввода и вывода буферного газа с аэрозолями. Мишени

из делящихся материалов располагались с обоих торцов реакционной камеры на ее окнах (алюминиевых фольгах толщиной 0.1 мм), которые отделяли газовый объем камеры от внешней атмосферы. При испытаниях установки использовались также камеры большей длины и диаметра, в которых можно было использовать до 10 мишеней.

Камера для сбора аэрозоли также имела форму цилиндра диаметром 40 мм, высотой 80 мм с отверстиями в торце (входное) и на боковой поверхности (выходное). В качестве сборника использовался алюминиевый диск диаметром 15 мм и толщиной 1 мм, который находился напротив входного отверстия на расстоянии 10 мм от конца капилляра. Эта камера располагалась непосредственно на шибере форвакуумного насоса Рутса производительностью 150 л/с.

Генератор аэрозолей состоял из цилиндрического кварцевого корпуса (внутренний диаметр 14 мм, длина 55 мм) с сужением посередине, которое служило для закрепления ограничителя (кварцевой пробки с продольными разрезами). Ограничитель удерживал внутри цилиндра кварцевый вкладыш диаметром 8 мм. В зазор между стенкой цилиндра и вкладышем вводилась мелкодисперсная соль (их набор обсуждается ниже), которая служила материалом для получения аэрозолей. Кварцевый цилиндр помещался в двухсекционную печь с регулируемой и стабилизированной температурой в каждой секции. При нагревании цилиндра в его верхней части происходило испарение используемой соли. Образующийся пар переносился потоком инертного газа через кварцевую пробку в нижнюю часть цилиндра. В этой, менее нагретой части цилиндра, происходила конденсация пара, в результате чего формировались аэрозоли, которые вместе с потоком газа выносились из цилиндра. Подробное описание генератора аэрозолей и режимов его работы приводится в [2].

Аэрозоли доставлялись в реакционную камеру по полиэтиленовому капилляру длиной 25 м и внутренним диаметром 4 мм. Обе камеры (реакционная и для сбора осколков) соединялись тefлоновым капилляром. Его внутренний диаметр составлял 2 мм, а длина могла меняться от 1 до 30 м для достижения необходимого времени переноса осколков при сохранении в камере сбора осколков давления, достаточно низкого для полного высаживания аэрозоли.

Испытание установки

Для определения параметров установки были проведены ее испытания на осколках фотоделения урана тормозным излучением с граничной энергией 25 МэВ. Источником этого излучения служил микротрон МТ-25 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ (его описание и характеристики представлены в работе [3]). В качестве конвертора, преобразующего пучок электронов в поток тормозного излучения, использовался вольфрамовый диск толщиной 4 мм, охлаждаемый проточной водой. Этот диск служил одновременно и коллектором тока электронов, который измерялся с помощью интегратора электрического заряда. За конвертором располагался алюминиевый цилиндр толщиной 20 мм для поглощения низкоэнергетических электронов. Пучок электронов имел форму эллипса размером 6 мм по вертикали и 7 мм по горизонтали.

Для получения осколков деления использовались мишени из ^{238}U в виде его окиси U_3O_8 толщиной от 1 до 14 $\text{мг}/\text{см}^2$, нанесенные на алюминиевую подложку толщиной 20 мкм. Вылетевшие из мишени осколки тормозились в газе, адсорбировались на аэрозолях и переносились по капилляру в камеру для их сбора. В качестве газа-носителя использовались гелий, азот и аргон повышенной чистоты (марки М-60). Давление газа в реакционной камере выбиралось таким, чтобы пробег осколков в газе был меньше размеров камеры, и все они останавливались бы в газовом объеме. В камеру вводились аэрозоли - микрочастицы различных солей размерами 0.1 - 0.2 мкм. Их концентрация в газе задавалась режимом работы генератора и могла меняться в пределах до десятков $\text{мкг}/\text{л}$.

Сборники с высаженными на них осколками переносились к $\text{Ge}(\text{Li})$ -детектору, на котором измерялись спектры их γ -излучения. Эти измерения позволяли идентифицировать осколки (приписать им атомный номер Z и массовое число A). Для идентификации осколков использовались известные γ -спектры осколков деления [4,5]. Для ряда идентифицированных нуклидов были определены характеристики установки - эффективность и скорость транспортировки при различных условиях (толщина мишени, концентрация аэрозолей, длина капилляра). Для этого сравнивались интенсивности γ -излучения выбранных осколков, принесенных на сборнике и остановившихся в мишени.

С целью оптимизации условий, при которых проводились эксперименты, были выполнены измерения углового распределения тормозного излучения и зависимости выхода осколков от толщины мишени. В первом случае использовался метод активации мишеней, перекрывающих все распределение тормозного излучения. Мишенями служили урановая фольга толщиной 10 мкм и диаметром 33 мм с алюминиевым сборником осколков деления и никелевая фольга толщиной 100 мкм и диаметром 15 см. Первая фольга располагалась на расстоянии 5 см, а вторая - на расстоянии 14 см от конвертора. После облучения алюминиевый сборник и никелевая фольга разрезались на квадраты $5 \times 5 \text{ мм}^2$, в которых определяли выход продуктов реакции с γ -квантами. В урановой фольге это был осколок фотоделения ^{97}Zr (порог реакции 6 МэВ), а в никелевой фольге - изотоп ^{57}Ni , образующийся в реакции $^{58}\text{Ni}(\gamma, n)$ с порогом 12.2 МэВ. Из сравнения выходов этих изотопов для всех квадратов можно было восстановить угловое распределение тормозного излучения для различных участков его энергетического спектра (в случае U - $6 \div 25$ МэВ, в случае Ni - $12.2 \div 25$ МэВ). Полученное угловое распределение можно было аппроксимировать лоренцевой кривой с полушириной 11.5° по горизонтали и 8° по вертикали. Разница полуширин, очевидно, объяснялась различной угловой расходимостью в этих направлениях пучка электронов. Знание углового распределения позволяло выбрать оптимальные размеры мишени при различных расстояниях их от конвертора для получения максимального выхода осколков деления.

Для определения зависимости выхода осколков деления от толщины мишени сравнивались интенсивности γ -излучения выбранных осколков, вылетевших из слоя урана и остановившихся в сборнике и оставшихся в мишени или в подложке. Для этого использовали набор мишеней со слоем окиси урана U_3O_8 различной толщины (от 1 до 14 мг/см^2), нанесенных на алюминиевую подложку толщиной 20 мкм (больше пробега осколков в алюминии). Между мишенями размещались алюминиевые сборники той же толщины. После облучения стопки мишеней и сборников измерялись их γ -спектры Ge(Li) детектором. Измерения показали, что из мишеней толщиной менее 1 мг/см^2 вылетает до 50% осколков (сравнение производилось для осколков ^{97}Zr и ^{132}J). С увеличением толщины слоя доля вылетевших осколков падает (так, при толщине слоя 3 мг/см^2 она составляет 35%, а при толщине 14 мг/см^2 падает до 15%).

Эти зависимости позволяют выбрать оптимальную толщину мишени при минимальном расходе вещества.

Характеристики установки

При выбранных таким образом оптимальных условиях были определены основные характеристики установки: эффективность транспортировки для различных осколков и время их доставки от облучаемой мишени к сборнику. Была изучена также зависимость этих характеристик от параметров установки и условий транспортировки: длины и диаметра капилляра, объема камеры, давления и состава газа, концентрации и состава аэрозолей.

Для определения эффективности транспортировки использовался тот же способ, что и при оптимизации толщины мишени - сравнение интенсивности γ -излучения выбранных осколков в облучаемой мишени и на сборнике в приемной камере. В большинстве экспериментов для транспортировки осколков использовался аргон, его давление в реакционной камере выбиралось таким, чтобы все осколки, вылетевшие из урановой мишени толщиной 1 мг/см^2 , тормозились в объеме камеры и адсорбировались на аэрозолях. При глубине камеры 30 мм выбранное давление составляло 1 атм. В качестве аэрозолей использовались частицы NaCl, получаемые описанным выше способом в генераторе аэрозолей.

Анализ γ -спектров облученной мишени и сборника позволил идентифицировать среди осколков 11 различных нуклидов - от ^{91}Sr до ^{153}Sm . В действительности число переносимых нуклидов больше, т.к. каждому массовому числу соответствует 2 - 3 элемента (например, для $A=91$ это Rb и Sr, для $A=97$ это Sr, Y и Zr и т.д.). Оказалось, что при длине капилляра 10 м и концентрации аэрозолей более 20 мкг/л эффективность транспортировки всех наблюдаемых осколков практически одинакова и составляет $(70 \pm 10)\%$. Исключением являются инертные газы криптон и ксенон, для которых не наблюдалось γ -излучения на сборнике и которые, очевидно, не адсорбируются на аэрозолях и не осаждаются на сборнике. Использование вместо аргона других газов - гелия или азота при соответствующем давлении, а также других аэрозолей (KCl, NaBr, KBr) дало те же значения эффективности транспортировки.

Измерялась эффективность транспортировки при том же давлении аргона и той же концентрации аэрозолей NaCl при различных длинах капилляра в диапазоне от 1 до 30 м. Оказалось, что эта эффективность остается практически постоянной. Это означает, что потери осколков происходят, по-видимому, при входе в капилляр и на начальном участке (<1 м) транспортировки.

При тех же условиях была измерена зависимость эффективности транспортировки от концентрации аэрозолей NaCl. Последняя регулировалась температурой в генераторе, а ее величина определялась по активности изомера ^{34m}Cl ($T_{1/2}=32$ м, $E_\gamma=145$ и 2127 кэВ), который образовывался наряду с осколками в реакции $^{35}\text{Cl}(\gamma, n)$. Измеренная таким способом зависимость (при длине капилляра 15 м) представлена на рис. 2. Виден рост эффективности в диапазоне концентраций аэрозолей от 0.02 до 20 мкг/л и далее выход на плато. Из этой зависимости следует, что можно достигнуть достаточно высокой эффективности транспортировки осколков (~50%) при сравнительно низкой концентрации аэрозолей, которая соответствует скорости осаждения NaCl на сборник ~ 0.1 мг/мин. При такой низкой скорости осаждения образуется очень тонкий слой NaCl, позволяющий проводить спектроскопические измерения мягкого β - и γ -излучения осколков деления.

Важной характеристикой транспортировки является время переноса осколков от облучаемой мишени до сборника. Оно, очевидно, складывается из двух составляющих: время дрейфа аэрозолей с адсорбированными осколками в реакционной камере до входа в капилляр (оно равно отношению объема камеры к скорости ее откачки) и время движения их по капилляру. Для определения этих составляющих измерялась зависимость давления в камере от времени после перекрытия притока газа. В этих измерениях использовались камеры различного объема и капилляры различной длины. Примеры таких зависимостей представлены на рис. 3. Из этих зависимостей были определены составляющие времени транспортировки в предположении, что концентрация аэрозолей с осколками пропорциональна давлению в камере. Для этого путем дифференцирования полученных кривых находилась скорость откачки камеры при различных давлениях, что характеризовало среднее время задержки аэрозолей с осколками в реакционной камере $T_{\text{кам}}$. Сравнение с вычисленной по известным формулам [5] скоростью откачки при заданных длине и диаметре капилляра позволяло получить время переноса по

такому капилляру $T_{\text{кап}}$. Полученные значения этих времен транспортировки при различных значениях объема камеры и длинах капилляра приведены в таблице. Видно, что при минимальном объеме реакционной камеры (36 см^3) полное время транспортировки аэрозолей при длине капилляра 1 м составляет 0.22 с, а при длине 10 м - 1 с. Такие времена транспортировки позволяют проводить эксперименты с короткоживущими осколками деления (с временами жизни вплоть до долей секунды).

Установка была использована в экспериментах по измерению массового и зарядового распределения осколков фотоделения тяжелых элементов ^{232}Th , ^{238}U и ^{244}Pu на пучке тормозного излучения микротрона. В этих экспериментах были измерены γ -спектры осколков, принесенных на сборник газовым потоком с аэрозолями NaCl. В измеренных спектрах были идентифицированы 16 продуктов деления и определены их выходы. Измеренные таким способом массовые распределения кумулятивных выходов осколков фотоделения хорошо согласуются с известными данными, полученными другими методами [6-8]. Проведенные измерения показали, что данная установка может быть успешно использована для исследования механизма деления тяжелых ядер и свойств образующихся осколков.

В заключение авторы выражают благодарность Ю.Ц.Оганесяну, М.Г.Иткису, С.Н.Дмитриеву и Я.Климану за постоянную поддержку работы и многочисленные полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 00-02-16674, 01-02-16455).

Таблица. Время транспортировки аэрозолей к сборнику

$L, \text{ м}$	$V_{\text{кам}}, \text{ см}^3$	$T_{\text{кап}}, \text{ с}$	$T_{\text{кам}}, \text{ с}$	$T_{\text{об}}, \text{ с}$
1	36	0.01	0.21	0.22
15	36	0.7	0.8	1.5
30	36	2.4	1.4	3.8
1	100	0.01	0.58	0.6
15	100	0.7	2.2	2.9
30	100	2.4	3.8	6.2

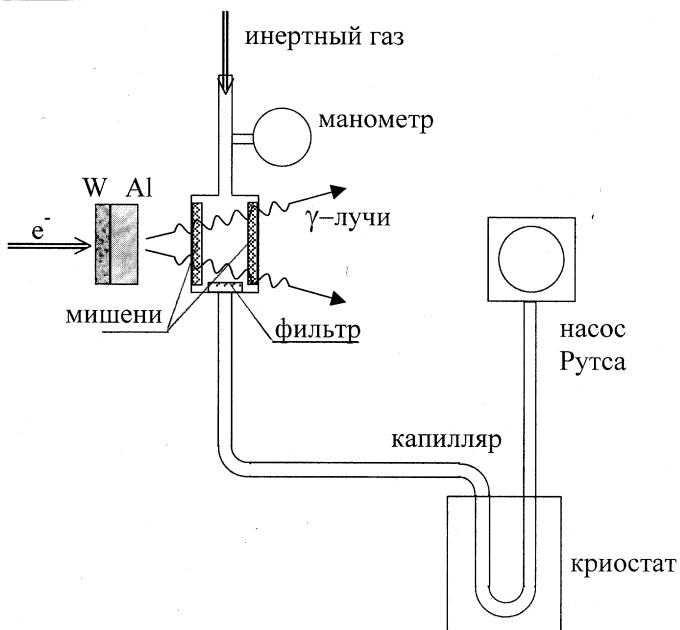


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

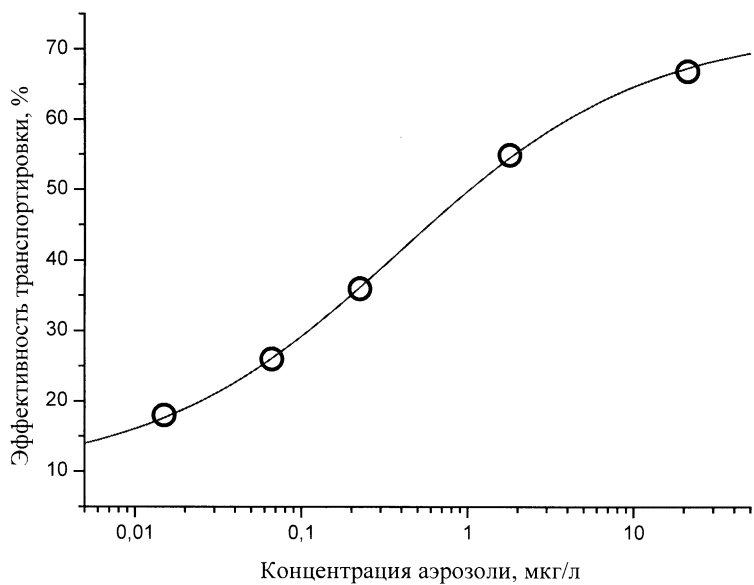


Рис. 2. Зависимость эффективности транспортировки осколков деления от концентрации аэрозоли NaCl

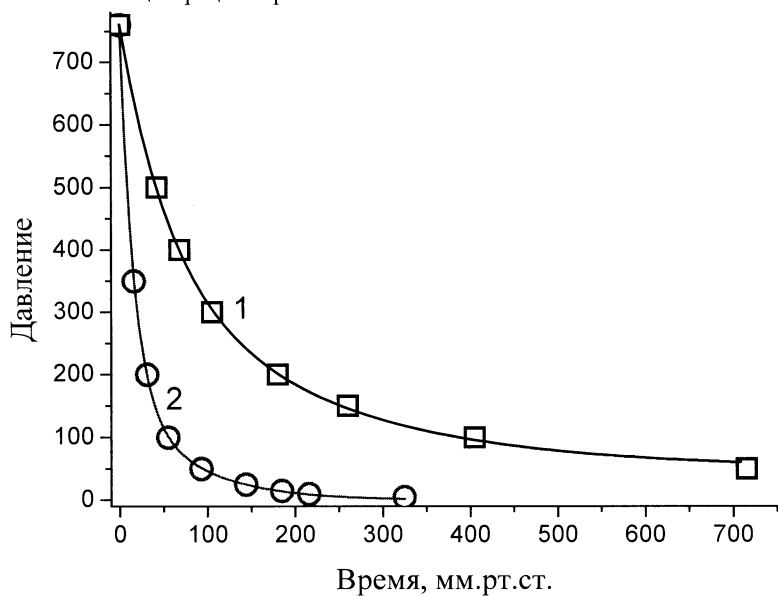


Рис. 3. Зависимость давления в камере объемом 3 л от времени откачки через капилляры длиной 15 м (1) и 1 м (2)

Литература

1. Crouch E.A. // ADNDT, 1977, v.19, p. 417
2. Звара И., Доманов В.П., Шалаевский М.Р., Петров Д.В. // Сообщение ОИЯИ, 12-80-48, Дубна, 1980.
3. Белов А.Г. // Рабочее совещание по использованию микротронов в ядерной физике. Пловдив 1992. Д15-93-80, стр. 12.
4. Blachot I., Fiche Ch. // ADNDT, 1977, v.20, p. 241
5. Розанов Л.Н. Вакуумная техника, М., Высшая школа, 1990.
6. Гангрский Ю. П., Далхсурен Б., Марков Б. Н. Осколки деления ядер, М., Энергоатомиздат, 1986.
7. Jacobs H., Thierens D., de Frenne D. et al // Phys. Rev. C, 1979, v.19, p. 422
8. Thierens D., Jacobs H., de Clerc A. et al // Phys. Rev. C, 1983, v.27, p. 1117

Рукопись поступила в издательский отдел
11 апреля 2001 года.

Гангрский Ю.П. и др.
Транспортировка осколков деления газовым потоком
с аэрозолями

P13-2001-66

Описывается экспериментальная установка для транспортировки осколков деления газовым потоком с аэрозолями. Приводятся результаты испытаний установки на осколках фотоделения ^{238}U тормозным излучением микрофона. Полученные параметры установки (эффективность транспортировки до 70 %, время транспортировки до 0,1 с на расстояние 1 м) позволяют успешно использовать ее в экспериментах по делению тяжелых ядер и исследованию свойств осколков деления.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

Gangrsky Yu.P. et al.
Transportation of the Fission Fragments by the Gas Flow
with Aerosol

P13-2001-66

The experimental set-up for the transportation of the fission fragments by the gaseous flow with aerosols is described. The results of the set-up testing using the ^{238}U photofission fragments are presented. The obtained parameters (transport efficiency up to 60 % and transport time down to 0.1 s at 1 m distance) allow one to use this set-up in the experiments on the heavy nuclei fission and fragment properties investigation.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор М.И.Зарубина. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 16.05.2001

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 1,22

Тираж 320. Заказ 52644. Цена 1 р. 47 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области