

гали в центре бериллиевых шаров, причем толщина бериллия составляла 3, 5, 7, 5 и 12 см.

На рис. 6 представлена зависимость числа делений на поверхности бериллия в воде в зависимости от радиуса бериллиевого шара. Из рисунка следует, что применение бериллия толщиной 5—6 см позволяет увеличить чувствительность метода в несколько раз. Еще большие толщины бериллия дают возможность изменить чувствительность метода незначительно, однако при этом резко снижается доза γ -излучения, падающая на детектор.

Согласно оценкам, интенсивность γ -излучения Sb^{124} активностью 1 кюри на поверхности бериллиевого шара радиусом 2 см в воде составляет ~ 350 р/ч, а на поверхности бериллиевого шара радиусом 8 см — ~ 15 р/ч.

Снижение уровня γ -излучения является весьма существенным для увеличения чувстви-

тельности метода, так как при этом становится возможным применять детекторы быстрых нейтронов, например импульсные камеры, наполненные водородом, метаном или He^4 , эффективность которых в присутствии γ -фона резко ухудшается.

В случае применения детектора быстрых нейтронов можно улучшить чувствительность прибора в несколько раз.

Поступила в Редакцию 12/III 1969 г.
В окончательной редакции 16/VI 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Английский патент № 917776, 1963.
2. К. Бекурц, К. Виртц. Нейтронная физика. М., Атомиздат, 1968.
3. В. Векслер и др. Ионизационные методы исследования излучений. М., Гостехтеориздат, 1949.

Использование германиевого детектора для нейтронорадиационного анализа содержания элементов и изотопов

А. М. ДЕМИДОВ, Л. И. ГОВОР, В. А. ИВАНОВ

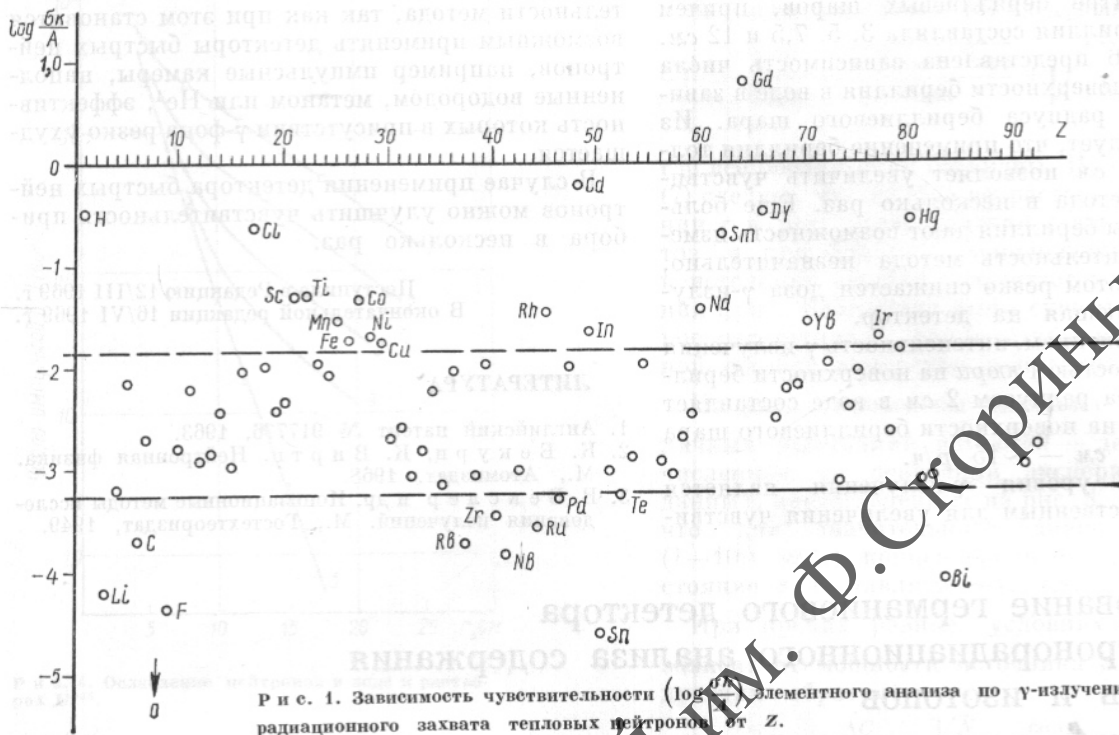
УДК 539.1.074.55:539.1.06

В настоящей статье обсуждаются особенности и преимущества нейтронорадиационного анализа с использованием Ge(Li)-детекторов и приводятся результаты работ, выполненных на пучке тепловых нейтронов реактора ИРТ-М Института атомной энергии им. П. В. Курчатова.

Как известно, при захвате тепловых нейтронов спектр γ -излучения, испускаемого ядрами, очень сложен, особенно в тяжелых ядрах, что вызывает необходимость использования спектрометра с высоким разрешением. Этот спектр простирается от нескольких килоэлектронвольт до энергии связи нейтрона $B_n = 6 \div 10$ Мэв [1]. При разрешении γ -спектрометра 8—15 кэв в случае легких (атомный вес $A < 70$) и околомагических ядер практически весь спектр разделяется на отдельные линии. Для тяжелых ядер такое разделение имеет место для интенсивных линий в мягкой части спектра ($E_\gamma < 1,5$ Мэв), а также практически для всех линий в жесткой части на участке от B_n примерно до $(B_n - 2)$ Мэв в ядрах с нечетным числом нейтронов и от B_n до $(B_n - \Delta - 2)$ Мэв в четно-четных излучающих ядрах (Δ — энергетическая щель, равная $\sim 1,5$ Мэв для ядер с $A \approx 150$). Наилучшие условия для радиа-

ционного анализа существуют в жесткой части спектра.

В случае тепловых нейтронов чувствительность метода будет определяться величиной $\frac{\sigma k}{A}$, где σ — сечение радиационного захвата; k — выход γ -квантов характерной γ -линии на один захват нейтрона; A — атомный вес ядра-мишени, который нужно учитывать при определении весового содержания элементов. Величина σ очень сильно меняется от элемента к элементу (от изотопа к изотопу), что приводит к существенной флюктуации чувствительности для различных элементов (изотопов). На рис. 1 даны величины $\log \frac{\sigma k}{A}$ для всех стабильных элементов. Значения k взяты для наиболее интенсивной линии с $E_\gamma \geq 4$ Мэв. Пунктирными горизонтальными линиями все элементы условно разбиты на три группы. К элементам первой группы (Gd, Cd, H, Dy, Cl, Hg, Sm, Sc, Ti, Co, Mn, Ni, Fe, Cu и др.) метод очень чувствителен и позволяет определять малые содержания этих элементов в образцах. Эта группа содержит два типа ядер — тяжелые с очень большим сечением захвата тепловых нейтронов и ядра с $A \approx 60$, имеющие аномаль-



но большие величины k ($\sim 0,5$). Элементы третьей группы (Sn, Bi, Li, F, C и др.) могут быть обнаружены только в случае, когда они составляют основу образца. Большинство элементов входит во вторую группу.

Из-за сложной формы линии оптического германиевого спектрометра на чувствительность к данному элементу влияет наличие в спектре сильных γ -линий от других элементов (изотопов) образца с энергией E_{γ} близкой к E_{γ} характер — 1 Мэв. В более благоприятном положении будут элементы (изотопы) с большей энергией характерных линий, т. е. элементы (изотопы) с большей энергией связи нейтрона (например, некоторые легкие ядра по сравнению с тяжелыми, а также элементы с четным Z по сравнению с элементами с нечетным Z).

В отличие от активационного анализа при нейтронорадиационном, как правило, в одном спектре наблюдаются характерные γ -линии большинства элементов (изотопов) образца, что позволяет проводить определение относительного содержания этих элементов (изотопов) с достаточно высокой точностью.

Существенным отличием при определении относительных содержаний является то обстоятельство, что в этом случае нет необходимости учитывать эффекты самопоглощения нейтронов

в образце (при равномерном распределении компонентов), что дает возможность использовать в качестве образцов большие массы вещества и соответственно снижать требуемые для анализа нейтронные потоки, т. е. становится возможным применение нейтронных источников и ускорительных трубок. В таком виде нейтронорадиационный анализ применим для каротажа геологических скважин.

Диапазон изменения относительных концентраций, который может быть перекрыт при использовании германиевых детекторов, определяется возможностями спектрометра выделять малоинтенсивные пики в спектре, что, в свою очередь, зависит от их положения относительно основного спектра образца. Для описываемых работ отношение концентраций могло изменяться в 100—300 раз.

Практические работы проводились на одном из горизонтальных каналов ИРТ-М Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. Выходящий из активной зоны реактора пучок нейтронов фильтровался монокристаллом искусственного кварца длиной 200 мм. В результате на мишени создавался поток тепловых нейтронов с плотностью $5 \cdot 10^6$ нейтр/см²·сек при кадмиевом отношении 150 (по золоту). Образцы помещались внутри вакуумного ней-

Таблица 1

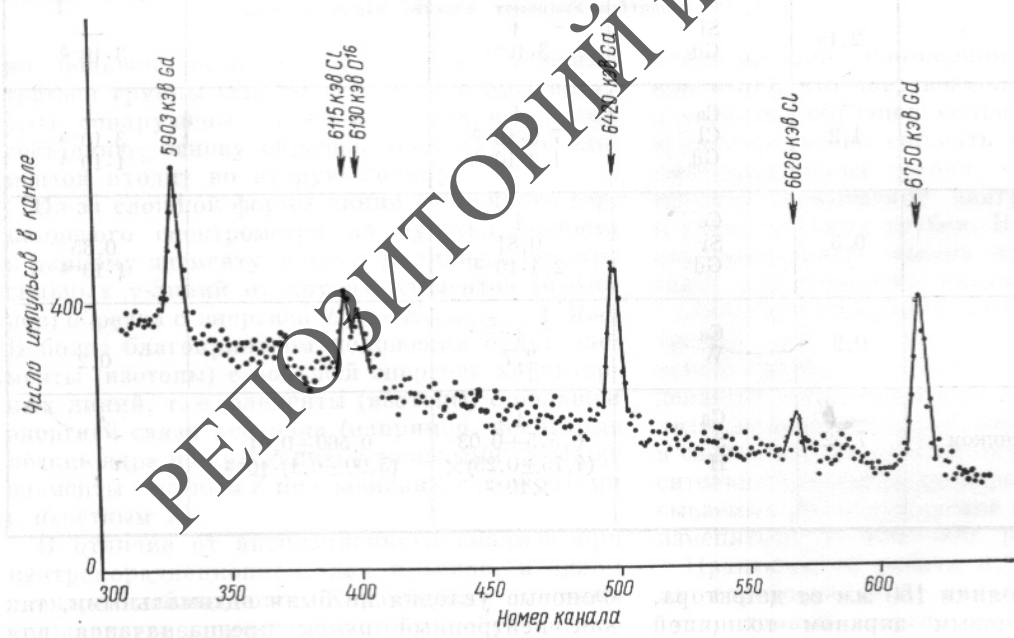
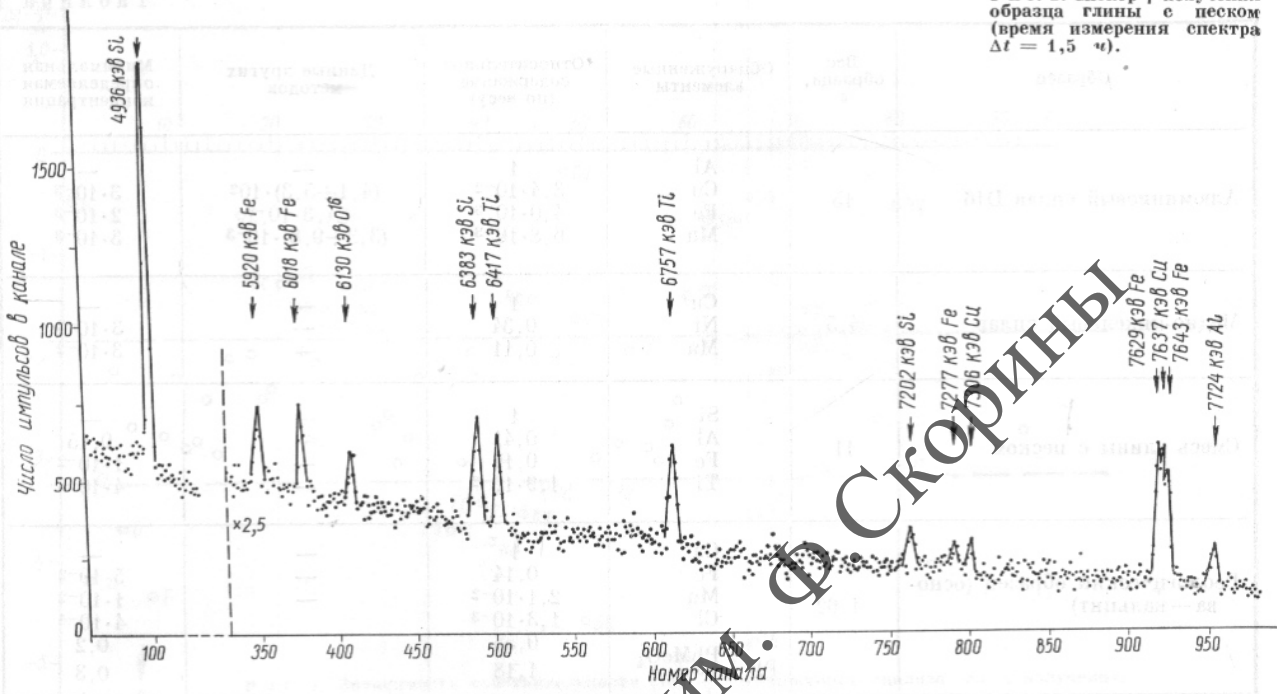
Образец	Вес образца, г	Обнаруженные элементы	Относительное содержание (по весу)	Данные других методов	Минимальная определяемая концентрация
Алюминиевый сплав D16	15	Al Cu Fe Mn	1 $3,4 \cdot 10^{-2}$ $4,0 \cdot 10^{-3}$ $6,8 \cdot 10^{-3}$	— $(4,1 \div 5,3) \cdot 10^2$ $\leq 4,3 \cdot 10^{-3}$ $(3,3 \div 9,8) \cdot 10^{-3}$	— $3 \cdot 10^{-3}$ $2 \cdot 10^{-3}$ $3 \cdot 10^{-3}$
Медно-никелевый сплав	4,5	Cu Ni Mn	1 0,34 0,11	— — —	— $3 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-2}$
Смесь глины с песком	11	Si Al Fe Ti	1 0,41 0,11 $1,9 \cdot 10^{-2}$	— — — —	— 0,15 $1 \cdot 10^{-2}$ $4 \cdot 10^{-3}$
Геологический образец (основа — кальцит)	1,62	Ca Fe Mn Cl Mo } Pb } $PbMoO_4$	1 0,14 $2,1 \cdot 10^{-2}$ $1,3 \cdot 10^{-3}$ 0,55 1,18	— — — — — —	— $5 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-2}$ $4 \cdot 10^{-4}$ 0,2 0,3
Циркон	2,15	Si Gd	1 $3 \cdot 10^{-4}$	— —	— $3 \cdot 10^{-5}$
Апатит	1,2	Ca Cl Gd	1 $7,0 \cdot 10^{-3}$ $1,2 \cdot 10^{-3}$	— — —	— $3 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-4}$
Монацит	0,3	Ce Si Gd	1 0,81 $2,4 \cdot 10^{-3}$	— — —	— 0,35 $1 \cdot 10^{-4}$
Шеелит	0,9	Ca W	1 2,7	— —	— 0,2
Смесь гипса с известняком	7,52	Ca S H	1 $0,575 \pm 0,03$ $(4,75 \pm 0,25) \times 10^{-2}$	$0,560 \pm 0,01$ $(5,00 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$	—

троновда на расстоянии 150 мм от детектора, защищенного свинцовым экраном толщиной 50 мм. В экране имелось коллиматорное отверстие для γ -излучения образца. Разрешение германиевого детектора составляло 12—18 кэв при $E_\gamma \approx 6,5$ Мэв и в значительной степени определялось параметрами электронной аппаратуры. Импульсы от детектора регистрировались 512- и 1024-канальными анализаторами.

Фоновые условия не были оптимальными, так как нейтронный пучок предназначался для других целей.

В табл. 1 приведены результаты анализов для нескольких образцов. В последнем столбце указаны предельные относительные концентрации обнаруженных элементов, которые могут быть определены при том же времени измерений и тех же условиях. Предельная абсо-

Р и с. 2. Спектр γ -излучения образца глины с песком (время измерения спектра $\Delta t = 1,5$ ч).



Р и с. 3. Спектр γ -излучения образца апатита ($\Delta t = 3$ ч).

лютная чувствительность (в граммах) данного метода к различным элементам характеризует тот или иной вид элементного анализа. В описываемых измерениях, например в образце циркона, минимальное количество гадолиния, которое могло быть обнаружено, составляло ~ 10 мкг. При улучшении фоновых условий,

увеличении плотности нейтронного пучка и эффективности регистрации γ -излучения в разумных пределах чувствительность нейтронорадиационного анализа может быть улучшена приблизительно в 100 раз. В качестве примеров γ -спектров, которые были измерены и затем использованы для расчетов, на рис. 2—4

приведены участки спектров γ -излучения образцов смеси глины с песком, дюрала и апатита.

Результаты проведенных анализов подтверждают высказанные выше соображения об особенностях нейтронорадиационного анализа с германиевым детектором. С наилучшей чувствительностью были обнаружены такие элементы, как Gd, H, Ti, Fe, Mn, Ni, Cu, Cl и др., входящие в первую группу. В геологических породах основу составляют такие элементы, как Si, Ca и S, что дает возможность определять относительно этих компонентов малые содержания вышеуказанных элементов первой группы. Благоприятным обстоятельством является то, что Si, Ca и S имеют очень интенсивные линии γ -излучения при энергиях 4,9—6,5 Мэв, т. е. при меньших энергиях по сравнению с характеристическими линиями элементов первой группы. Так, Fe, Mn, Ni, Cu, V, Cr, Al имеют аномально интенсивные переходы с энергией в области 7—9,5 Мэв. Наиболее характерным примером, подтверждающим это положение, является анализ смеси глины с песком (см. рис. 2), где четко выделены линии γ -излучения Ti, Al и Fe в присутствии очень интенсивной линии кремния с энергией 4,936 Мэв.

В задачах связанных с записыванием карбонатных коллекторов, возникает проблема определения содержания гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в известняке (CaCO_3). Эта задача может быть решена, если известно относительное содержание Ca, S и H (см. табл. 1). Получаемая сравнительно высокая точность для относительных содержаний этих элементов позволит надежно устанавливать записываемые пласты и в условиях геологической скважины.

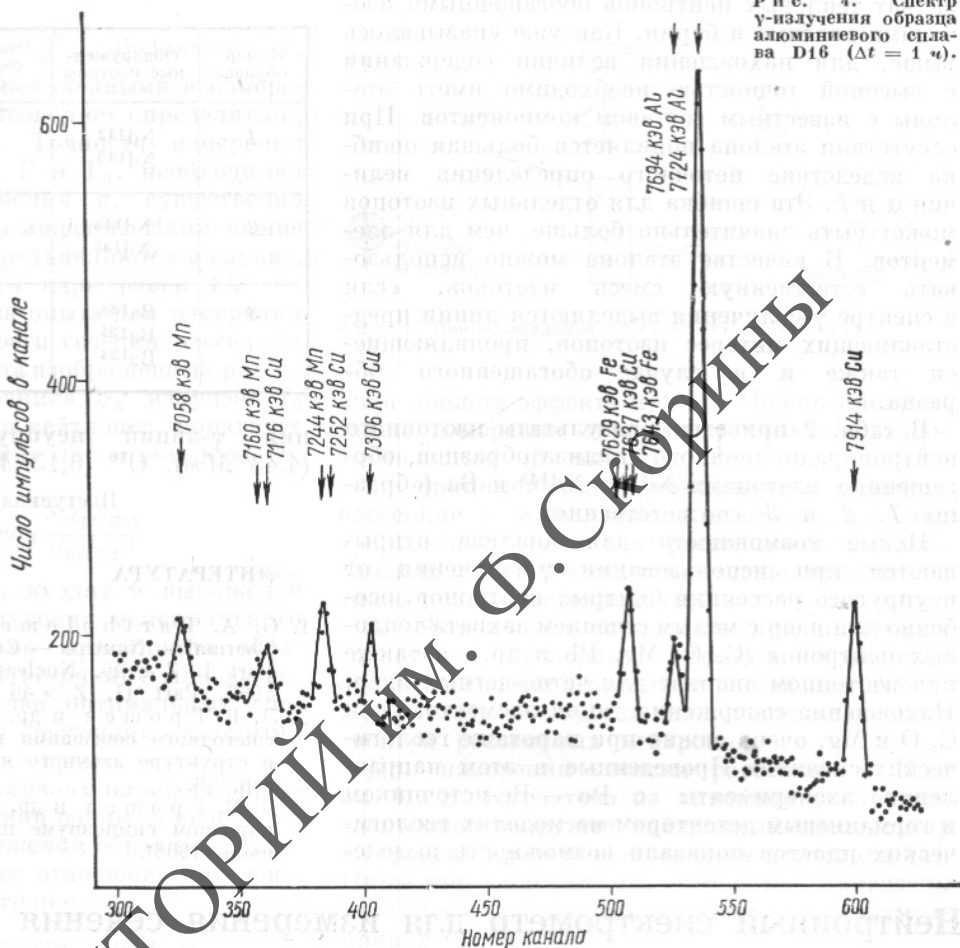


Рис. 4. Спектр γ -излучения образца алюминиевого сплава D16 ($\Delta t = 1$ ч).

Следует отметить, что нейтронорадиационный метод анализа, хотя и не обладает для большинства элементов очень высокой чувствительностью, характерной, например, для активационного анализа, имеет ряд существенных преимуществ: одновременный анализ на несколько элементов, большая точность относительных измерений, отсутствие необходимости разрушения образца и незначительная его активация, простота интерпретации результатов по интенсивностям пиков (возможность автоматизации процесса измерений), и кроме того, в случае работы с нейтронным источником и ускорителем возможность проведения анализа без изъятия проб с источниками малой активности.

Для выяснения особенностей нейтронорадиационного метода в изотопном анализе были проанализированы результаты измерений [2, 3] спектров γ -излучения, сопровождающего

Таблица 2

захват тепловых нейтронов обогащенными изотопами неодима и бария. Как уже указывалось выше, для нахождения величин содержаний с высокой точностью необходимо иметь эталоны с известным составом компонентов. При отсутствии эталона появляется большая ошибка вследствие неточного определения величин σ и k . Эта ошибка для отдельных изотопов может быть значительно больше, чем для элементов. В качестве эталона можно использовать естественную смесь изотопов, если в спектре γ -излучения выделяются линии представляющих интерес изотопов, проявляющиеся также и в случае обогащенного образца.

В табл. 2 приведены результаты изотопного нейтронорадиационного анализа образцов, обогащенных изотопами Nd^{142} , Nd^{145} и Ba (образцы 1, 2 и 3 соответственно).

Новые возможности для анализа открываются при использовании γ -излучения от неупругого рассеяния быстрых нейтронов, особенно для ядер с малым сечением захвата тепловых нейтронов (C, O, Mg, Pb и др.), а также при изотопном анализе для четно-четных ядер. Нахождение содержания таких элементов, как C, O и Mg, очень важно при каротаже геологических скважин. Проведенные в этом направлении эксперименты с Po — Be-источником и германиевым детектором на моделях геологических пластов показали возможность выделе-

Номер образца	Обнаруженные изотопы	Относительное содержание (по весу)	Данные масс-спектрометрического анализа
1	Nd^{142} Nd^{143}	29,8 1	22,2 1
2	Nd^{143} Nd^{145}	0,30 1	0,512 1
3	Ba^{138} Ba^{135} Ba^{134}	1 1,30 3,83	1 1,12 5,04

ния γ -линий неупругого рассеяния Si^{28} (4,43 Мэв), O^{16} (6,43 Мэв) и Si^{28} (1,78 Мэв).

Поступила в Редакцию 20/XII 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. A. Bartholomew et al. Compendium of Thermal — Neutron — Capture γ -Ray Measurements. Part I. $Z < 46$. Nuclear Data. Vol. 3, No. 4—6, 1967. Part II. $Z > 46$ in press.
2. Л. В. Грошев и др. Программа и тезисы 18-го ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Рига, «Наука», 1968, стр. 68.
3. Л. В. Грошев и др. Доклад № 3893 на Международном симпозиуме по структуре ядра (Дубна, июль 1968).

Нейтронный спектрометр для измерения сечения рассеяния по методу времени пролета

В. Ф. ГЕРАСИМОВ, В. С. ЗЕНКЕВИЧ, С. С. МОСКАЛЕВ

При столкновении нейтрона с ядром осуществляется несколько типов реакций. В области резонансных энергий нейтронов наиболее вероятными процессами являются упругое рассеяние, радиационный захват и для некоторых тяжелых ядер деление, характеризующиеся соответствующими ширинами Γ_n , Γ_γ и Γ_f . Помимо ширины взаимодействия нейтронов с ядрами характеризуется моментом количества движения I составного ядра. Знание I дает возможность искать наиболее тонкие эффекты в механизме взаимодействия нейтронов с ядрами: корреляцию между полным моментом составного ядра и средними расстояниями между уровнями, средними парциальными ширинами и их распределениями и т. п. Единственным способом прямого определения величины I является измерение про-

пускания поляризованных нейтронов поляризованной мишенью. Однако пока этот метод применим к ограниченному числу ядер, которые удается поляризовать [1]. В отдельных случаях можно определить величину статистического фактора g из исследования спектров γ -квантов, испускаемых ядром при захвате нейтронов отдельными резонансами, или из измерений полных сечений [2]. Но наиболее доступный в настоящее время способ определения g , который можно применить практически к любому ядру, — комбинация измерений сечений резонансного рассеяния и полного сечения.

При рассеянии нейтронов тонким образом интенсивность резонансного рассеяния пропорциональна ширине уровня и пиковому сечению рассеяния, поэтому площадь под кривой

УДК 539.125.5.164.078