

АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 539.17

МУЛЬТИНЕЙТРОННЫЕ ФОТОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
НА ИЗОТОПЕ ^{197}Au А. Н. Ермаков, Б. С. Ишханов, И. М. Капитонов, Чжо Чжо Тун, И. В. Макаренко
(НИИЯФ)

Проведен эксперимент по облучению изотопа золота ^{197}Au пучком тормозных γ -квантов с максимальной энергией $E_{\gamma}^m = 70$ МэВ разрезного микротрона РТМ-70 НИИЯФ МГУ. Измерены спектры остаточной активности облученного образца. В эксперименте наблюдаются многочастичные фотоядерные реакции на ядре ^{197}Au . Впервые наблюдаются фотоядерные реакции на ядре ^{197}Au с вылетом до 6 нейтронов.

Универсальной особенностью атомных ядер является интенсивный максимум в сечениях поглощения фотонов — гигантский дипольный резонанс.

В области максимума гигантский дипольный резонанс распадается с испусканием, как правило, одного нейтрона. Эта область сечений фотопоглощения достаточно хорошо изучена, имеется систематика обширных экспериментальных данных. При более высоких энергиях γ -квантов (выше 20–30 МэВ) с максимальной вероятностью идут фотоядерные реакции с испусканием нескольких нуклонов. Ожидается, что в области энергий γ -квантов 30–70 МэВ распад возбужденных состояний будет происходить преимущественно с вылетом нейтронов. Образующиеся при этом конечные ядра должны быть β^+ -радиоактивны. Такие реакции гораздо менее изучены, в частности, неизвестен механизм этих реакций. Задачей настоящих исследований является

получение экспериментальных данных о реакциях с испусканием нескольких нейтронов.

Эксперимент выполнен на пучке тормозных γ -квантов разрезного микротрона РТМ-70 НИИЯФ МГУ [1]. Микротрон РТМ-70 является уникальным компактным ускорителем электронов, созданным с использованием постоянных магнитов на основе редкоземельного магнитного материала. Ускоритель позволяет ускорять электроны до максимальной энергии 70 МэВ и может быть использован в качестве эффективного источника тормозного излучения с максимальной энергией γ -квантов 70 МэВ. Указанный диапазон энергий позволяет получить наибольшие выходы фотоядерных реакций, что открывает возможности исследования многочастичных фотоядерных реакций с вылетом до 7–8 нуклонов.

Для анализа различных каналов распада воз-

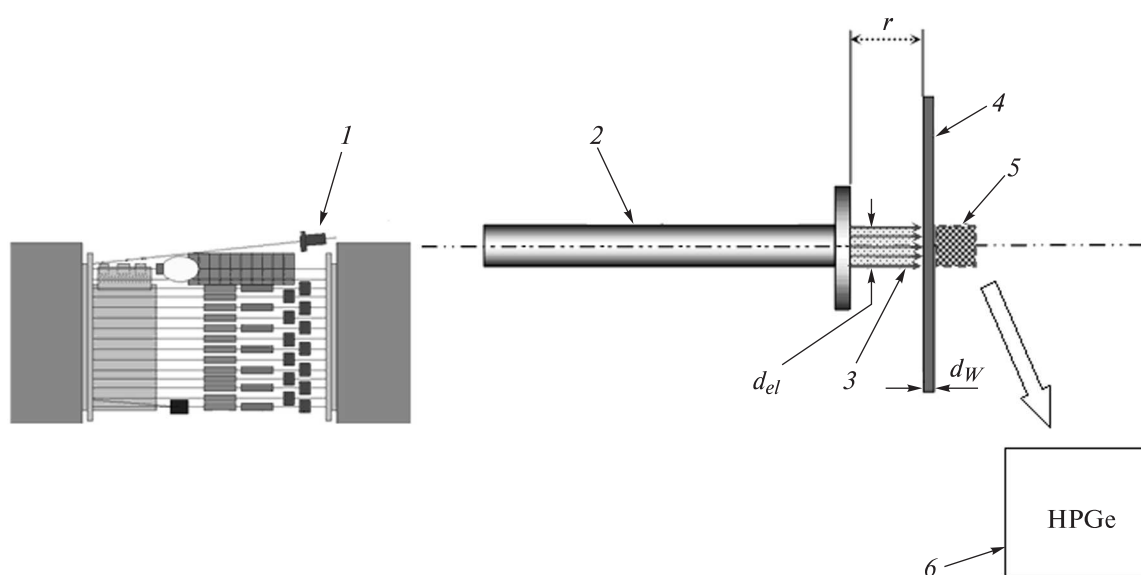


Рис. 1. Схема эксперимента (масштаб не соблюден): 1 — ускоритель, 2 — выходной канал ускорителя, 3 — пучок электронов, 4 — тормозная мишень, 5 — исследуемый образец ^{197}Au , 6 — HPGe детектор

бужденных состояний была использована методика регистрации распадов образующихся β^+ -радиоактивных изотопов.

Схема эксперимента приведена на рис. 1.

В качестве исследуемого образца был выбран изотоп золота ^{197}Au . Из-за большого атомного номера Z и массового числа A этот изотоп имеет большие выходы и низкие пороги фотонейтронных реакций.

Исследуемый образец был изготовлен из металлического золота. Содержание изотопа ^{197}Au в естественной смеси изотопов золота составляет 100%. Образец облучался тормозными γ -квантами с максимальной энергией $E_\gamma^m = 70$ МэВ. Облучение длилось 5 ч. Ток электронного пучка микротрона составлял 3–4 мА. Диаметр пучка электро-

нов $d_{el} = 10$ мм, толщина тормозной вольфрамовой мишени $d_W = 2.5$ мм. γ -Спектры остаточной активности облученного образца измерены с помощью HPGe-детектора, изготовленного из сверхчистого германия. Эффективность детектора составляла 30%. Разрешение детектора составляло 1.1 кэВ (для $E_\gamma = 122$ кэВ) и 2.0 кэВ (для $E_\gamma = 1332$ кэВ).

Для определения периодов полураспада $T_{1/2}$ и идентификации образующихся радиоактивных изотопов было проведено 208 серий измерений γ -спектров остаточной активности облученного образца. Измерены периоды полураспада $T_{1/2}$ образующихся изотопов в интервале от часов до десятков дней. Общее время измерений составило 8 дней.

Была создана методика проведения экспериментов в непрерывном режиме. Результаты измерений

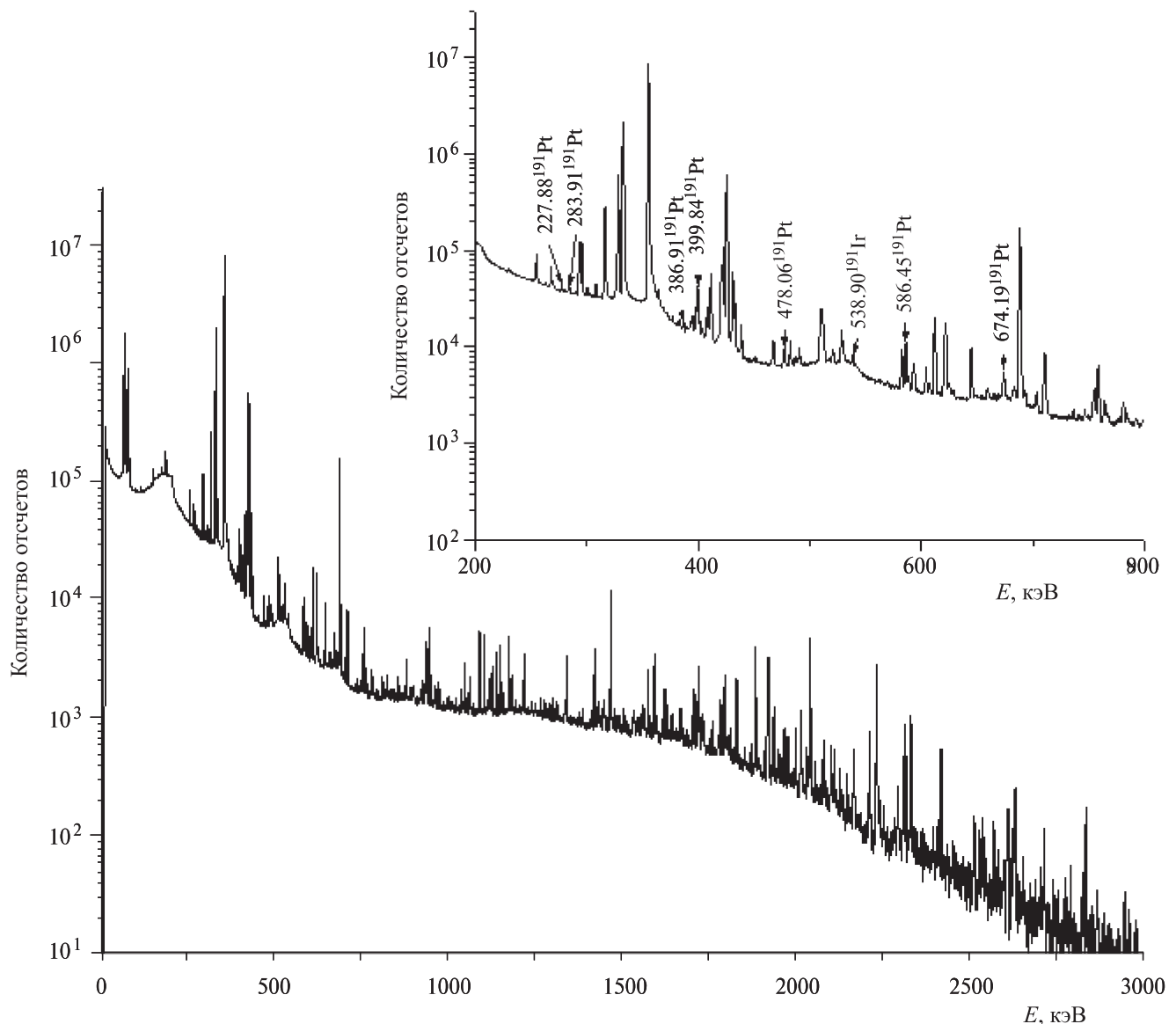


Рис. 2. γ -Спектр остаточной активности облученного образца ^{197}Au . Подписями показаны γ -линии, соответствующие реакции $^{197}\text{Au}(\gamma, n)^{191}\text{Au}$

γ -спектров в автоматическом режиме записывались в память компьютера. При этом в оперативном режиме анализировался текущий γ -спектр. Создан и поддерживается банк данных экспериментальных γ -спектров.

На рис. 2 приведен γ -спектр остаточной активности облученного образца ^{197}Au , измеренный в течение 6 ч сразу после окончания облучения.

В выполненном эксперименте максимальная энергия тормозных γ -квантов от ускорителя ($E_{\gamma}^m = 70$ МэВ) позволяет наблюдать фотоядерные реакции с испусканием до 8 нейтронов на исследуемом ядре ^{197}Au (табл. 1). В измеренном спектре наблюдаются γ -пики, соответствующие реакциям с вылетом до 6 нейтронов (указанные γ -пики показаны подписями на врезке к рис. 2). Фотонейтронные реакции такой множественности наблюдаются впервые [2]. Детектирование вылета 7 и 8 нейтронов в данном эксперименте не предполагалось, так как образующиеся изотопы $^{189}\text{Au}^{m,gs}$ и ^{188}Au имеют минутные периоды полураспада (табл. 1). Для наблюдения таких реакций необходимо проводить более короткое по времени облучение.

В табл. 2 приведены γ -пики, соответствующие

Таблица 1

Пороги фотонейтронных реакций на ядре ^{197}Au

Реакция	(γ, n)	$(\gamma, 2n)$	$(\gamma, 3n)$	$(\gamma, 4n)$	$(\gamma, 5n)$	$(\gamma, 6n)$	$(\gamma, 7n)$	$(\gamma, 8n)$	$(\gamma, 9n)$
Порог, МэВ	8.07	14.71	23.09	30.03	38.72	45.76	54.77	62.14	71.50
Конечное ядро	$^{196}\text{Au}^m$ $^{196}\text{Au}^{gs}$	^{195}Au	^{194}Au	^{193}Au	^{192}Au	^{191}Au	^{190}Au	$^{189}\text{Au}^m$ $^{189}\text{Au}^{gs}$	^{188}Au
$T_{1/2}$ конечного ядра	9.6 ч 6.18 дн.	186.09 дн.	38.02 ч	17.65 ч	4.94 ч	3.18 ч	42.8 мин	4.59 мин 28.7 мин	8.84 мин

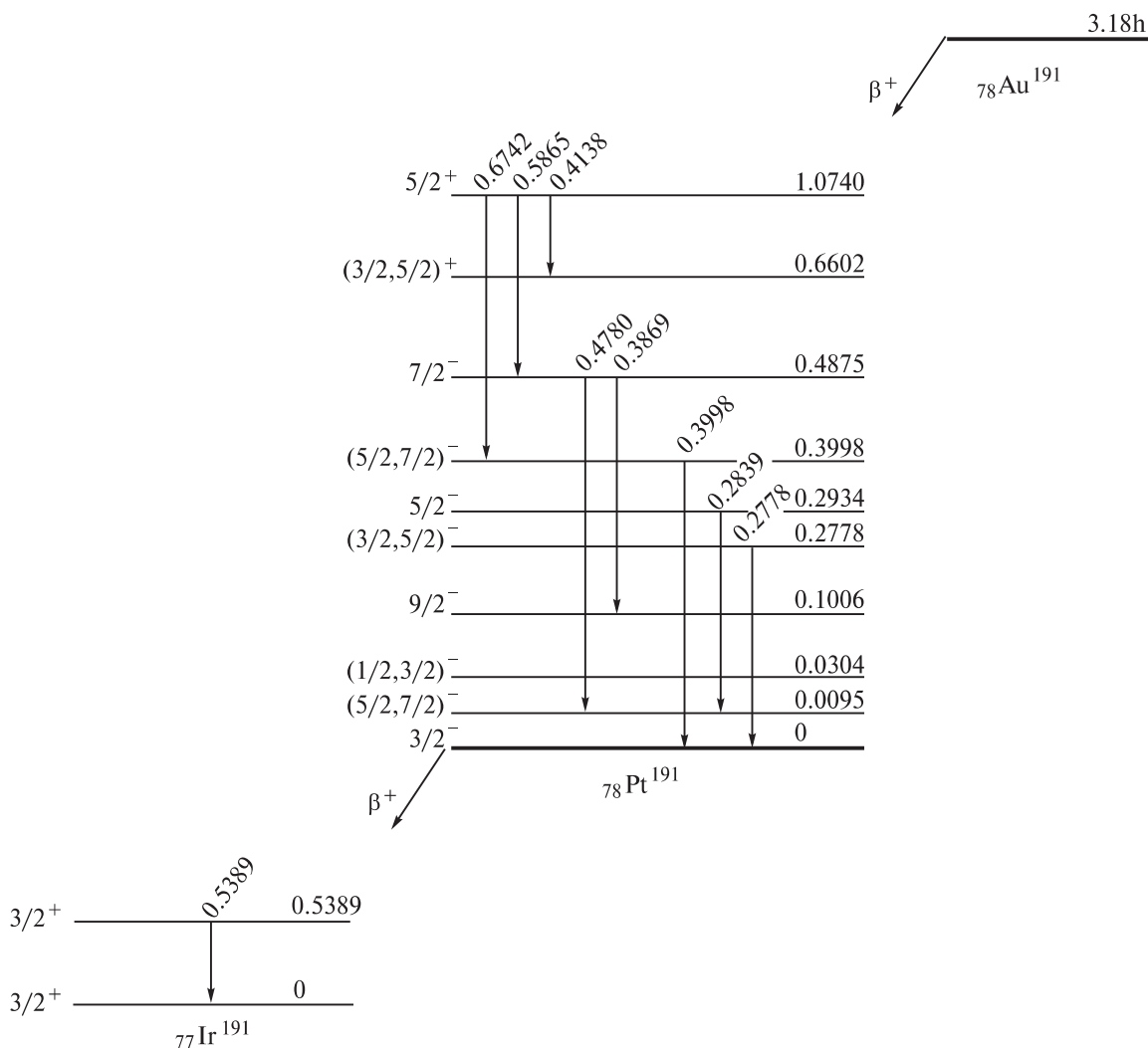


Рис. 3. Схема распадов ядра ^{191}Au

Таблица 2

 γ -Линии экспериментального спектра остаточной активности исследуемого образца ^{197}Au , соответствующие реакции $^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$

Реакция	Порог реакции, МэВ	Конечное ядро реакции, продукт и период β -распада	E_γ , кэВ	Природа перехода
$(\gamma, 6n)$	45.765	$^{79}\text{Au}^{191} \rightarrow ^{78}\text{Pt}^{191}$ $T_{1/2} = 3.18$ ч	586.45	1074.03 ($5/2^+$) \rightarrow 487.59 ($7/2^-$)
			277.88	277.88 ($3/2^-$, $5/2^-$) \rightarrow 0.0 ($3/2^-$)
			674.19	1074.03 ($5/2^+$) \rightarrow 399.84 ($5/2^-$, $7/2^-$)
			283.91	293.47 ($5/2^-$) \rightarrow 9.56 ($5/2^-$, $7/2^-$)
			399.84	399.84 ($5/2^-$, $7/2^-$) \rightarrow 0.0 ($3/2^-$)
			478.03	487.59 ($7/2^-$) \rightarrow 9.56 ($5/2^-$, $7/2^-$)
			386.91	487.59 ($7/2^-$) \rightarrow 100.678 ($9/2^-$)
		$^{78}\text{Pt}^{191} \rightarrow ^{77}\text{Ir}^{191}$ $T_{1/2} = 2.802$ дн.	538.87	538.87 ($3/2^+$) \rightarrow 0.0 ($3/2^+$)

реакции $^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$. Указаны периоды полураспада конечных β -активных ядер, природа соответствующих γ -переходов в ядрах ^{191}Pt и ^{191}Ir (энергии (в кэВ), спин-четность начальных и конечных состояний изотопов платины ^{191}Pt и иридия ^{191}Ir). Приведенные в таблице γ -переходы указаны на схеме распадов изотопа ^{191}Au (рис. 3). Отметим, что экспериментальные данные позволяют надежно идентифицировать распады ядер, образующихся в многочастичных фотоядерных реакциях: для реакции $^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$ в спектре (рис. 2) наблюдается 8 пиков, соответствующих распадам ядра ^{191}Au .

Как показывает наблюдение фотонейтронной реакции $^{197}\text{Au}(\gamma, 6n)^{191}\text{Au}$, фотоядерные реакции с испусканием большого числа нейтронов ($N \geq 4$) в области энергий фотонов 30–70 МэВ происходят преимущественно в результате статистических распадов возбужденных состояний атомных ядер.

Результаты настоящей работы представляют интерес для дальнейших исследований механизма

многочастичных фотоядерных реакций, изучения ядер, удаленных от полосы β -стабильности. Полученные результаты также могут быть использованы для решения прикладных задач, таких, как γ -активационный анализ, определение изотопного состава веществ, создание препаратов радиотерапии в медицине и др.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-5365.2006.2.

Литература

1. Гришин В.К., Ермаков А.Н., Ишханов Б.С. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2002. № 5. С. 74 (Moscow University Phys. Bull. 2002. N 5. P. 90).
2. Бобошин И.Н., Варламов В.В., Иванов Е.М. и др. // Тр. Всерос. научн. конф. «Научный сервис в сети Интернет». Новороссийск, 24–29 сент. 2001 г. М., 2001. С. 19; (<http://cdfc.sinp.msu.ru/services/ensdir.html>).

Поступила в редакцию
01.11.06