

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Б 812

P6-88-117

С.Т.Бонева, Э.В.Васильева, Е.П.Григорьев*,
Ю.П.Попов, А.М.Суховой, В.А.Хитров

**ВОЗМОЖНОСТЬ ВЫЯВЛЕНИЯ МЯГКИХ
ПЕРВИЧНЫХ γ -ПЕРЕХОДОВ В РЕАКЦИИ ($n, 2\gamma$)**

Направлено на Совещание по ядерной
спектроскопии и структуре атомного ядра.
/Баку, 1988 г./

* Научно-исследовательский институт физики
Ленинградского государственного университета

1988

Основная информация о свойствах уровней сложных ядер с не очень большой энергией возбуждения ($E^* \lesssim 2$ МэВ в средних и тяжелых ядрах) получена в реакции (n, γ). Анализ более высоких возбуждений при этом очень затруднен из-за экспоненциального роста плотности уровней при повышении энергии возбуждения ядра. Значительное расширение интервала возбуждений, из которого извлечена спектроскопическая информация, достигнуто при применении метода суммирования амплитуд совпадающих импульсов (САСИ) с двух $Ge(Li)$ -детекторов [1] для выделения каскадов из двух γ -переходов между компаунд-состоянием и заданным низколежащим уровнем. Практически выявлен ряд состояний составных ядер, возбуждаемых наиболее интенсивными каскадами, до энергии возбуждения 3+5 МэВ.

Возможность установления более высоколежащих состояний, возбуждаемых первичными гамма-переходами с энергией 1+1,5 МэВ, в четно-четном составном ядре реализована при комбинировании результатов, полученных с помощью метода САСИ и совокупности всей имеющейся на настоящий момент времени спектроскопической информации о возбужденных состояниях ядра.

Метод САСИ, в принципе, выделяет все без исключения двухквантовые каскады между компаунд-состоянием и заданным низколежащим уровнем. Для наиболее сильных каскадов при этом удается определить их интенсивность и энергии каскадных переходов E_1 и E_2 . Вопрос о порядке следования квантов при этом обычно остается открытым. Возможны два варианта их расположения в схеме распада и, следовательно, остается двузначность в локализации промежуточного уровня. Его энергия может быть равной либо $E_3 + E_1$, либо $E_3 + E_2$, где E_3 - энергия конечного уровня, а E_1 и E_2 - энергии каскадных γ -переходов.

Часть двухквантовых каскадов была размещена в схемах γ -распада в рамках простого предположения [2]: если переход E_1 проявился в двух или большем числе каскадов $E_1 + E_2$, $E_1 + E_3$, ... с различной суммарной энергией, то такой переход является первичным, а с промежуточного уровня $E_M = B_n - E_1$ идут вторичные переходы E_2 , E_3 , ...

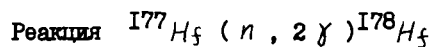
Если же переходы E_1 и E_2 наблюдаются только в одном каскаде, то двузначность их размещения в схеме γ -распада может быть устранена в тех случаях, когда подходящий промежуточный уровень известен из ядерно-спектроскопических исследований радиоактивного распада или ядерных реакций. Как правило, такие уровни установлены при энергии возбуждения $E_M \lesssim 2$ МэВ в четно-четных и 1+1,5 МэВ - в нечетных деформированных ядрах. При больших различиях энергий каскадных переходов и достаточно высокой их интенсивности обычно более вероятно, что жесткий переход - первичный, а мягкий - вторичный.

Мы обращаем внимание на ситуацию, в которой можно однозначно приписать факт "первичности" мягкому ($E_1 \sim 1$ МэВ) переходу двухквантового каскада. Предположим, что в результате выполненных ранее спектроскопических исследований система уровней четно-четного, например, деформированного составного ядра установлена полностью. Тогда, если возможное значение энергии промежуточного уровня двухквантового каскада $E_M = E_3 + E_1$ не совпадает ни с одним из известных уровней, то можно утверждать, что первичным переходом каскада является переход с энергией $E_1 \sim 1$ МэВ.

Предположим, что радиационные силовые функции $K \sim \Gamma_M / E_\gamma^5$ E_1 -переходов, например, существенно не меняются в диапазоне энергий γ -квантов от 1 МэВ до $\sim 6+7$ МэВ. Тогда следует ожидать,

что каскады с мягкими первичными переходами должны иметь в среднем интенсивность на ≥ 4 порядка меньше, чем каскады с жесткими первичными квантами, и они создают сплошное распределение в спектрах, полученных с помощью метода САСИ.

Но среди наблюдаемых каскадов имеются и такие, которые усилены относительно этой оценки в $\sim 100+1000$ раз. Как показано ниже, часть этих каскадов должна иметь мягкие первичные и жесткие вторичные γ -переходы.



Вопрос о возможности выявления мягких первичных переходов среди выделенных экспериментально двухквантовых каскадов с захватного состояния рассмотрен на примере реакции $^{177}\text{Hf} (n, 2\gamma) ^{178}\text{Hf}$. Эти каскады изучены ^{/3/} в ДНФ ОИЯИ. Каждый из них начинается захватным состоянием 7626 кэВ, $3^-, 4^-$ и заканчивается одним из низколежащих состояний с $E_f, J^\pi = 0, 0^+; 93, 2^+, \dots$ 1276 кэВ, 2^+ .

О возбужденных состояниях ^{178}Hf имеются подробные данные. Наиболее полная и достоверная информация о возбужденных уровнях до $E_M \sim 2$ МэВ получена в реакциях (n, γ) ^{/4/} и $(n, n'\gamma)$ ^{/5/}. Общим свойством для двух этих реакций считается независимость заселяемости от природы возбужденного состояния. В результате можно ожидать, что в реакциях (n, γ) и $(n, n'\gamma)$ при энергии возбуждения $E_M \lesssim 1,5+1,7$ МэВ выявлены все уровни со спинами 0+6. В реакции $^{177}\text{Hf} (n, 2\gamma)$ на тепловых нейтронах могут возбуждаться промежуточные состояния с наиболее вероятными значениями спинов 2+5, поэтому систему низколежащих уровней, которые могут возбуждать такие каскады, следует считать известной.

Наиболее сильные двухквантовые каскады, чья интенсивность наряду с энергиями переходов измерена в эксперименте ^{/3/}, можно разделить на три группы:

1. Размещенные в схеме распада по принципу, описанному выше (см. ^{/2/}). Именно таким образом часть двухквантовых каскадов размещена в схеме распада до энергии возбуждения 5,3 МэВ. Эту ситуацию иллюстрирует рис.1а.

2. Каскаду, не размещенному в схеме распада по алгоритму ^{/2/}, можно сопоставить известный из эксперимента промежуточный уровень при энергии возбуждения $E_M \lesssim 1,5+2$ МэВ и, как правило, известные первичные и вторичные переходы - рис.1б.

3. Определенности в положении промежуточного уровня каскада нет в силу следующих обстоятельств - рис.1б и 1в:

- а) при энергии возбуждения $E_M \gtrsim 1,5+2$ МэВ не известны все возбужденные состояния составного ядра;
- б) возможное размещение каскада в схеме распада в предположении, что первичным переходом является жесткий, требует введения в известную схему распада при малых энергиях возбуждения нового, неизвестного ранее уровня и, соответственно, ротационной полосы в деформированном ядре.

Особый интерес представляет последний случай, когда размещение каскада с низколежащим промежуточным уровнем представляется невозможным. Разумеется, точность определения параметров таких каскадов, как и достоверность определения их присутствия при распаде компаунд-состояния, зависит от условий эксперимента и здесь не анализируется.

В таблице приведены сведения о нескольких каскадах и о размещении входящих в них γ -переходов в схеме уровней ^{178}Hf . Первый

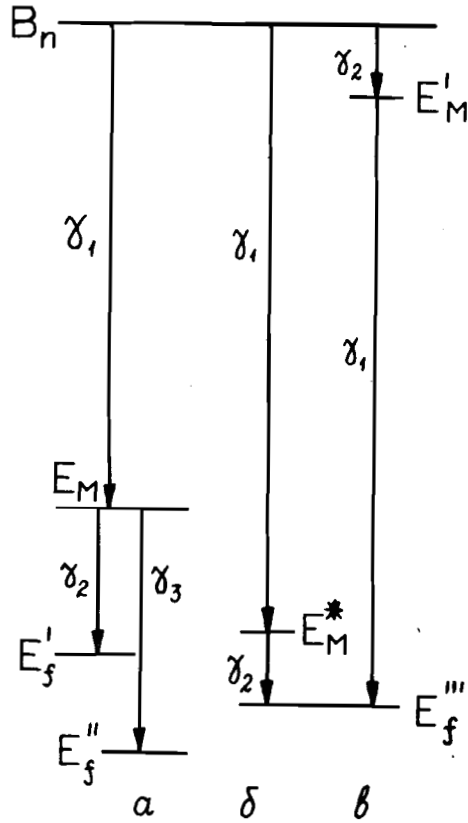


Рис.1. Возможные варианты размещения в схеме распада наблюдаемых в эксперименте каскадов из двух γ -переходов.

Таблица

Некоторые двухквантовые каскады в ^{178}Hf . E_f - энергия конечного состояния каскада, E_M - возможного промежуточного уровня, E_1 - вероятного первого переходного, $I_{\gamma\gamma}$ - интенсивность каскада, а I_{γ} - интенсивность соответствующей γ -линии I_{γ} по данным [4]

Каскад	E_f (кэВ)	E_M (кэВ)	E_1 (кэВ)	$I_{\gamma\gamma}$	I_{γ} кэВ	I_{γ}	Мультипольность	
I	2	3	4	5	6	7	8	9
γ 913	0	6713	913	913,2	1,2(5)	912,46	4,9	$E_0 + M1$ или E_2
γ 1286	0	6340	1286	1286,3	1,5(7)	1287,7	11,7	-
γ 809	93	6817	902	809,2	1,5(8)	809,35	7,5	$M1 + E_2$
γ 966	306	6660	1272	966,0	4,5(7)	966,40	4,1	$E_2 + M1$
γ 893	632	6733	1525	892,8	2,0(7)	891,46	3,7	$M1$
γ 1547	0	6080	1547	1546,8	1,8(8)	-	-	-
γ 1579	0	6048	1579	1578,7	1,6(8)	-	-	-

Примечание: интенсивности нормированы на 10^4 распадов компаунд-ядра.

столбец фиксирует каскад, второй – его конечный уровень. Третий столбец показывает промежуточный уровень, энергия которого на 0,8–1,6 МэВ ниже энергии отрыва нейтрона $B_n = 7626$ кэВ. Четвертый столбец указывает значение энергии промежуточного уровня, если жесткий переход каскада является первичным, т.е. идет с захватного состояния. Ни одно из указанных здесь значений энергий уровней не совпадает с приведенными в работах /4,5/. Разрядка возможных уровней 913, 1286, 1547 и 1579 кэВ происходила бы на основное состояние, значит, спины были бы 1^+ , 1^- или 2^+ . Такие уровни интенсивно заселяются в реакции $(n, n'\gamma)$, но в /5/ не наблюдались переходы нужных энергий, хотя другие уровни 1^+ , 1^- и 2^+ проявились благодаря сильным γ -переходам. В реакции (n, γ) /4/ наблюдались переходы 912,46 и 1287,7 кэВ с малыми интенсивностями, на 1–2 порядка величины меньше, чем идущие с близких уровней. Переходы 1547 и 1579 кэВ в /4/ не наблюдались. Эти данные приведены в столбцах 7 и 8. Все это делает маловероятным существование указанных четырех низких уровней и приводит к выводу о существовании состояний 6713, 6340, 6080 и 6048 кэВ, которые заселяются первичными γ -переходами.

Три других каскада из таблицы кончатся ротационными уровнями 2^+ , 4^+ и 6^+ полосы основного состояния. Возможные спины промежуточных уровней каскадов – 1–5. Если первичный переход имеет большую энергию, то должны существовать промежуточные состояния 902, 1272 и 1525 кэВ. Они не наблюдались, как и уже рассмотренные 4 уровня. Их существование очень маловероятно. Отсюда следует заключение о наличии уровней 6817, 6660 и 6733 кэВ.

В последних трех столбцах собраны сведения о переходах, наблюдаемых в (n, γ) -реакции. Энергии их в пределах погрешности совпадают с энергиями мягких переходов в каскадах. Отношения интенсивностей заметно различаются для разных переходов (столбцы 6 и 8). Следует отметить, что все 5 переходов, указанных в столбце 7, не размещены между уровнями ^{178}Hf . Для четырех из них

определена мультипольность. Это была $M1$, $E2$ или их смесь. Жесткие переходы для отмеченных в таблице каскадов могут наблюдаться в спектрах реакции $^{177}\text{Hf}(n, \gamma)$ на тепловых и квазимоноэнергетических (например, $E_n \sim 2$ кэВ) нейтронах только при достаточно хорошем уровне чувствительности эксперимента.

Из измеренных в эксперименте и приведенных в таблице интенсивностей каскадов и значения $\Gamma_\gamma = 65$ мэВ полной радиационной ширины компаунд-состояния ^{178}Hf можно оценить максимально возможное значение парциальных радиационных шири первичных γ -переходов с энергией $E_\gamma \sim 1$ МэВ в рассматриваемом ядре. Оно варьируется в интервале $10 < \Gamma_{\lambda M} < 30$ мкэВ. Исходя из наиболее вероятной мультипольности $M1$ мягких переходов рассматриваемых каскадов и среднего /6/ для данной области ядер значения

$K(M1) = \Gamma_{\lambda M} / D_\lambda E_\gamma^3 \approx 10^{-8} \text{ МэВ}^{-3}$ для жестких первичных переходов, можно видеть, что они усилены в $10^3 + 5 \cdot 10^3$ раз по сравнению с жесткими переходами с энергией $E_\gamma \sim 6$ МэВ, но при этом необходимо отметить существование заторможенности на ~ 3 порядка относительно значения одночастичной оценки радиационной ширины.

Наличие каскадов, значения парциальных шири которых превышают максимальный разброс случайных флуктуаций при энергии возбуждения $E_M \leq 4$ МэВ, достоверно установлено в компаунд-ядрах ^{165}Dy /7/, ^{168}Er и ^{175}Yb /8/. А наличие каскадов типа приведенных в таблице показывает, что состояния особой природы могут наблюдаться в четно-четном деформированном ядре и при более высоких энергиях возбуждения. Их существование при этом невозможно объяснить, не предполагая, что некоторое количество уровней при достаточно низких энергиях возбуждения имеет структуру, отличающуюся от структуры основной массы уровней составного ядра.

Литература

1. Богдзель А.А. и др. ОИЯИ, Р15-82-706, Дубна, 1982.
2. Попов Ю.П. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1984, т.48, с.891.
3. Богдзель А.А. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1987, т.51, с.1882.
4. Hague A.M.I. et al. Nucl. Phys., 1986, A455, p.231.
5. Бондаренко В.А. и др. Изв. АН СССР, сер. физ., 1979, т.43, с.1063.
6. Korcsy J. In: Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy and Related Topics. Ed.T. von Egidy, Bristol-London, 1981, p.423.
7. Попов Ю.П. и др. Ядерная физика, 1984, т.40, с.573.
8. Васильева Э.В. и др. Ядерная физика, 1986, т.44, №4, с.857.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 февраля 1988 года.

Бонева С.Т. и др.

P6-88-117

Возможность выявления мягких первичных
 γ -переходов в реакции $(n, 2\gamma)$

Анализируется возможность определения порядка следования γ -переходов в некоторых двухквантовых каскадах в случаях, когда схема распада составного ядра полностью установлена до энергии возбуждения $E^* \sim 1,5-2$ МэВ. Для компаунд-ядра ^{178}Hf выявлено семь каскадов, вероятно, начинающихся первичным переходом с энергией $E_\gamma \sim 1 \div 1,5$ МэВ. Оценено максимально возможное значение радиационной силовой функции таких переходов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С.Виноградовой

Boneva S.T. et al.

P6-88-117

The Possibility of Revealing Soft Primary
Transition in $(n, 2\gamma)$ Reaction

The possibility of definition of order following gamma-transitions in some two-quanta cascades is analysed in the events when decay scheme for complex nucleus completely established for excitation energy $E^* \sim 1.5 \div 2$ MeV. Seven cascades are revealed for ^{178}Hf compound-nucleus that probably begin primary transition with $E_\gamma \approx 1-1.5$ MeV energy. The maximal possible value of radiative strength function for such transitions is estimated.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988