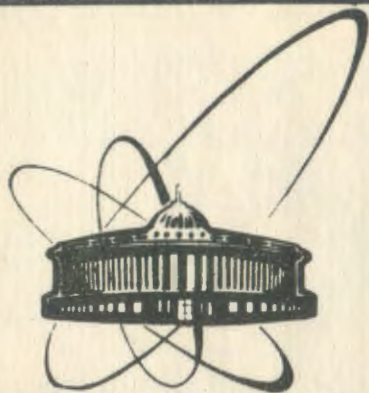


90-173



объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

Б 812

P6-90-173

С.Т.Бонева, Э.В.Васильева, В.Д.Кулик,  
Ле Хонг Кхьем, Ю.П.Попов, А.М.Суховой,  
В.А.Хитров, Ю.В.Хольнов

ИЗУЧЕНИЕ ДВУХКВАНТОВЫХ КАСКАДОВ  
И СХЕМЫ РАСПАДА

КОМПАУНД-СОСТОЯНИЯ  $^{180}\text{Hf}$ ,  
ВОЗБУЖДАЕМОГО В РЕАКЦИИ  $^{179}\text{Hf}(n,2\gamma)$

Направлено в Оргкомитет Международной конференции  
по ядерной спектроскопии и форме атомных ядер,  
Ленинград, апрель 1990 г.

1990

## 1. Введение

Основные исследования очень сложного спектра энергетических уровней и переходов деформированного ядра  $^{180}\text{Hf}$  выполнены в работах [1-9].

В работе [1] исследована схема  $\beta^-$ -распада  $^{180}\text{Lu}$  ( $T_{1/2}=5,3$  мин), определены уровни с энергией  $\leq 2196,9$  кэВ (энергия распада  $^{180}\text{Lu}$  составляет  $Q_{\beta^-}=3100$  кэВ). Схема распада  $^{180}\text{Lu}$  приведена в обзоре Брауна [2], в котором имеются также ссылки на частные сообщения.

Исследования К-запрещенного изомера 1141,57 кэВ,  $8^-$  [3], а также кулоновского возбуждения  $^{180}\text{Hf}$  с помощью тяжелых ионов [4] позволили четко установить первую вращательную полосу  $^{180}\text{Hf}$  вплоть до уровня 2272,6 кэВ,  $12^+$ . Порядка 30 уровней идентифицированы в реакциях  $^{179}\text{Hf}(d,p)$  [5] и  $^{178}\text{Hf}(t,p)$  [6].

Данные об уровнях  $^{180}\text{Hf}$  с  $E_{ур} < 2000$  кэВ содержатся в работах по реакции  $^{180}\text{Hf}(n,n'\gamma)$  [7,8].

Однако самая обширная информация получена в работах, связанных с реакцией  $^{179}\text{Hf}(n,\gamma)^{180}\text{Hf}$  [9,10].

В работе Башнелла и др. [9] исследовались полные  $\gamma$ -спектры как в случае тепловых нейтронов, так и для нейтронов с  $E_n > 50$  эВ -  $\gamma$ -спектр, усредненный по резонансам.

Для этой работы характерно точное измерение энергии  $\gamma$ -лучей, в частности, в мягкой области с помощью кристалл-дифракционного спектрометра.

Использование нейтронов разной энергии позволяет авторам

делать обоснованные суждения о квантовых характеристиках уровней  $^{180}\text{Hf}$ .

Характерными недостатками методов прямого исследования  $\gamma$ -спектров при захвате нейтронов являются :

а/ Трудности идентификации  $\gamma$ -переходов (особенно слабых) в случае немонизотопных мишеней. В работе [9] обогащенная мишень содержала 83,6 %  $^{179}\text{Hf}$ . Для исключения примесных линий Башнелл и др. проводили эксперимент еще с двумя мишенями, содержащими 13,78 и 1,1 %  $^{179}\text{Hf}$ .

б/ Трудности выделения в спектре первичных переходов из компаунд-состояния на неизвестные промежуточные уровни.

в/ Трудности разделения мультиплетов переходов и мультиплетов уровней.

Применение прямых методов количественных, а особенно качественных  $\gamma\gamma$ -совпадений в случае столь сложных спектров приносит малую пользу для решения этих задач.

В настоящей работе для исследования спектра уровней  $^{180}\text{Hf}$ , проявляющихся в реакции захвата тепловых нейтронов, применен метод суммирования амплитуд совпадающих импульсов (САСИ), развиваемый в последние годы в ОИЯИ.

Этот метод фиксирует спектры каскадов  $\gamma$ -квантов для определенных значений суммы энергии  $E_1 + E_2 = E_K$  первичных и вторичных переходов. При этом  $E_K = B_n - E_f$ , где  $B_n$  - энергия связи нейтрона, а  $E_f$  - энергия одного из низколежащих (обычно уже известных) состояний ядра.

Для каждого значения  $E_1 + E_2$  исследуется дифференциальный спектр составляющих двойные каскады  $\gamma$ -квантов. Каждый конкретный каскад определяет энергию промежуточного уровня  $E_M = B_n - E_1$ .

Экспериментально в конкретном каскаде порядок следования двух квантов нельзя определить, и, следовательно, для каждого каскада имеются 2 альтернативных значения  $E_M$ .

Основной принцип определения порядка следования квантов в каскаде высказан в работе [11]. Первичный переход определяется однозначно, если он обнаружен в каскадах с двумя или более значениями  $E_1 + E_2$ . В этом случае ясно, что этот переход питает уровень  $E_M$ , который разряжается с испусканием  $\gamma$ -квантов различной энергии. Указанный принцип позволяет обычно разместить в схеме распада более 50% интенсивности каскадов, наблюдаемых в реакции  $(n, 2\gamma)$ . Существуют и некоторые другие аргументы, связанные с конкретными каскадами.

Из указанных трех трудностей прямых методов первая в методе САСИ исключается полностью. Вторая - в большой части.

Легко понять, что и третья задача в большой степени тоже решается. Действительно, мультиплеты  $\gamma$ -переходов разделяются, поскольку они "расходятся" по разным каскадам. В методе прямого измерения  $\gamma$ -спектров разделение мультиплетов требует существенного увеличения разрешения  $\gamma$ -спектрометра. В методе САСИ разница значений энергии мультиплета переходов может быть сколь угодно мала.

Мультиплет уровней может быть разрешен, если входящие в него уровни обладают отличающимися квантовыми характеристиками и вторичные переходы с них идут на различные состояния.

## 2. Экспериментальные результаты

Спектр двухквантовых каскадов из реакции  $^{179}\text{Hf}(n, 2\gamma)^{180}\text{Hf}$  был изучен нами на импульсном реакторе ИБР-30 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. Тепловые нейтроны выделялись по времени пролета.

$\gamma\gamma$ -совпадения регистрировались двумя  $\text{Ge}(\text{Li})$  - детекторами. Абсолютная эффективность регистрации каскада  $\gamma 1173\gamma 1332$  кэВ  $^{60}\text{Ni}$  суммарном пике 2505 кэВ составляет  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Всего в спектре САСИ [12] имеется 6 выраженных пиков, соответствующих девяти конечным состояниям (имеются неразрешенные мультиплеты конечных уровней каскада).

Для всех этих пиков получены распределения интенсивностей двухквантовых каскадов. Для примера на рисунке приведен такой (дифференциальный) спектр для каскадов переходов на уровень  $E_f = 308,576$  кэВ,  $4^+$ . Спектр симметричен относительно центра. Каждые две линии одинаковой интенсивности, расположенные слева и справа от центра на одинаковых расстояниях, составляют каскад.

В табл.1 приведены значения энергии  $E_1$ ,  $E_2$ , относительной интенсивности каскадов (сумма значений интенсивности всех каскадов для каждого значения  $E_1+E_2$  принята за 100).

Абсолютная интенсивность каскадов может быть получена сопоставлением относительных значений  $i_{\gamma\gamma}$  из табл.1 с аналогичной величиной, вычисленной на основе литературных данных об абсолютных интенсивностях первичных переходов и схем ветвления вторичных переходов. Нами найдено, что относительные интенсивности первичных переходов из [9] могут быть приведены к абсолютным умножением интенсивностей первых на коэффициент  $2 \cdot 10^{-4}$ . Он рассчитан нами с использованием данных [13].

В таблице 2 приведены значения абсолютных интенсивностей всех выявленных нами каскадов. Неразмещенные в схеме распада включены здесь в предположении, что их первичный переход - квант с большей энергией.

Звездочкой здесь отмечены те каскады, которые могут быть включены в схему распада на основе литературных данных о схеме возбужденных состояний  $^{180}\text{Hf}$ .

### 3. Квантовые характеристики компаунд-состояния

Квантовые характеристики резонансов, определяющих спин компаунд-состояния,  $I^\pi = 5^+$  и  $4^+$  [14]. В работе [12] мы показали, что значение  $5^+$  предпочтительней.

В пользу этого заключения свидетельствует и то обстоятельство, что в спектре захвата тепловых нейтронов [9] не наблюдаются переходы на уровни  $2^+$ . В таблице 3 для сопоставления приведены интенсивности переходов различной мультипольности как в тепловой точке, так и в усредненных резонансах. Соотношение последних позволяет оценить вероятное значение интенсивности  $E_2$ -перехода в тепловой точке. Отсутствие последних для уровней  $2^+$  является дополнительным аргументом в пользу того обстоятельства, что спин резонанса  $E_n = -6,1$  эВ [14], определяющего сечения захвата тепловых нейтронов, равен  $5^+$ .

### 4. Новые уровни $^{180}\text{Hf}$

С полной определенностью по двум или более каскадам мы установили положение 38 новых уровней. Энергия самого высокого из них составляет 5057,6 кэВ, всего на 2330,5 кэВ ниже компаунд-состояния. Ряд каскадов не может быть однозначно размещен в схеме распада  $^{180}\text{Hf}$  из-за того, что их промежуточное состояние распадается только одним интенсивным переходом на уровни  $E_f < 1,62$  МэВ. Такие состояния включены в таблицу - в рамках общепринятого положения - жесткий квант = первичный переход.

Наличие каскадов с относительно мягкими первичными переходами показывает (табл. 2), что это справедливо не всегда. Но ряд каскадов такого типа может быть зафиксирован в схеме распада, если энергия одного из квантов совпадает с разностью энергии связи нейтрона и энергии возбуждения уровня, установленного независимо от наших данных.

В табл. 2 двумя звездочками помечены переходы с компаунд-состояния, вслед за которыми идут известные из работы [7] переходы на ранее установленные уровни.

Дадим краткую характеристику некоторых новых уровней. При этом следует сделать общее замечание, что для области энергии уровней меньше 2 МэВ, по-видимому, вероятность для жесткого перехода быть первым в каскаде очень велика.

Уровень 1412,2 кэВ. Определен каскадом  $\gamma_{15975,9} \rightarrow \gamma_2$  1105,8 на уровень 308,6 кэВ,  $4^+$ .

В спектре [9] имеется неразмещенная в схеме линия 1106,00(15) кэВ, которая, по-видимому, является дублетом, так как ее интенсивность очень велика (2,5 % распадов).

Уровень 1421,1 кэВ. Один каскад  $\gamma_1 5957,0 - \gamma_2 1248,7$  на уровень 308,6 кэВ,  $4^+$ . В [9] есть переход 1249,1 кэВ (2,32%), который, по-видимому, также является дублетом.

Уровень 1532,1 кэВ.

Каскад  $\gamma_1 5856,0 - \gamma_2 891,3$  на уровень 640,8 кэВ,  $6^+$ . В спектре Башнелла [9] имеется неразмещенный переход 890,5(5) кэВ.

Уровень 1659,0 кэВ.

Каскад  $\gamma_1 5729,1 - \gamma_2 1018,2$  на уровень 640,8 кэВ,  $6^+$ . В [9] имеются две неразмещенные линии, 1017,1(1) и 1019,3, в пределах погрешности соответствующие  $\gamma_2$ . Кроме того, переходы 367,4 ; 291,0 и 204,6 кэВ [9] соответствуют разнице энергии уровня 1659 кэВ и состояний соответственно 1291,2 ( $4^+$ ), 1369,7,  $4^+$  и 1374,4, ( $3^-, 4^-$ ).

Уровень 1666,5 кэВ.

Каскад  $\gamma_1 5721,6 - \gamma_2 1025,7$  на уровень 640,8 кэВ,  $6^+$ . Соответствующего вторичного перехода в [9] нет.

Уровень 1681,0 кэВ.

Каскад  $\gamma_1 5707,1 - \gamma_2 198,4$  на уровень 1482,7 ( $3^-, 5^-$ ). В [9] имеется переход 198,35 кэВ, имеющий другое размещение.

Уровень 1727,7 кэВ.

Каскад  $\gamma_1 5649,4 - \gamma_2 256,1$  на уровень 1482,7 кэВ, ( $3^-, 5^-$ ). В [9] имеется размещенный переход 255,34 кэВ. Переход 254 кэВ имеется в [7], не размещен. Уровень 1728,4 кэВ имеется в [15] с характеристикой  $3^-$ .

Уровень 1860,3 кэВ.

Имеется 2 каскада,  $\gamma_1 5527,8 - \gamma_2 1554,9$  на уровень 308,6,  $4^+$  и  $\gamma_1 5527,8 - \gamma_2 485,3$  на уровень 1374,3 кэВ, ( $3^-, 4^-$ ).

Уровень 1959,3 кэВ.

2 каскада:  $\gamma_1 5428,8 - \gamma_2 485,3$  на уровень 1374,3 кэВ, ( $3^-, 4^-$ ) и  $\gamma_1 5428,8 - \gamma_2 477,1$  на уровень 1482,7 кэВ, ( $3^-, 5^-$ ).

В работе Башнелла имеются неразмещенные переходы, соответственно 487,3(1) (0,6%), и 476,9(1) (0,6%) кэВ.

Нужно сказать, что второй из указанных каскадов - самый интенсивный в спектре двухквантовых каскадов. Его интенсивность составляет 0,2% распадов компаунд-состояния. Поэтому мы можем считать, что первичный переход имеет мультипольность  $E1$ , четность состояния отрицательная. Оба перехода с него - на уровни ( $3^- \pm 5^-$ ), поэтому для этого состояния, вероятно  $I^\pi = (4^-, 5^-)$ .

Следует отметить, что интенсивность перехода на уровень 1374 кэВ на порядок меньше интенсивности перехода на уровень 1482 кэВ.

Состояние 1959,7 кэВ,  $5^-$  предложено в [15] на основании размещенных авторами вторичных переходов в схеме распада этого состояния.

Уровень 2017,8 кэВ.

Имеется 3 каскада, связанных с этим уровнем:

$\gamma_1$  5370,3 -  $\gamma_2$  643,2 на уровень 1374,3 кэВ, ( $3^-, 4^-$ ),

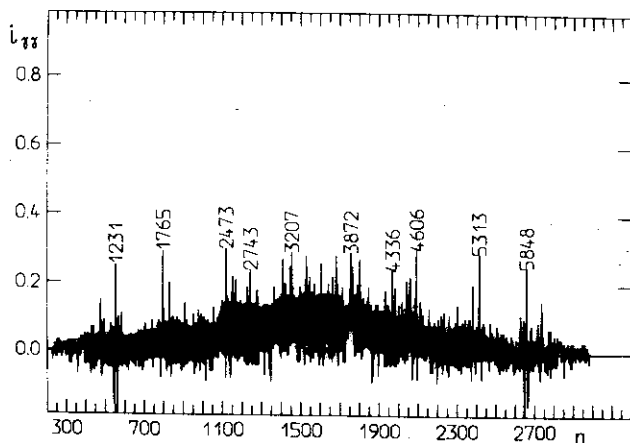
$\gamma_1$  5370,3 -  $\gamma_2$  535,2 на уровень 1482,7 кэВ, ( $3^-, 5^-$ ) и

$\gamma_1$  5370,3 -  $\gamma_2$  408,5 на триплет 1609,4 кэВ.

Первым двум в [9] соответствуют неразмещенные переходы 664,3 кэВ (0,3%) и 534,5 кэВ (0,6%). Третьему каскаду соответствует размещенный также в другом месте интенсивный переход 407,9 кэВ (1,6%).

Последний, по-видимому, является дублетом.

Интенсивность суммы наших каскадов соответствует вероятной мультипольности  $E1$  первичного перехода.



Дифференциальный спектр  $\gamma$ -лучей каскадов переходов с компаунд-состояния на уровень 308,576 кэВ,  $4^+$ .

Уровень 2077,1 кэВ. Имеются 4 каскада:

$r_1 5311,0 - r_2 1986,7$  на уровень 93,3 кэВ,  $2^+$ ;

$r_1 5311,0 - r_2 1765,7$  на уровень 308,6 кэВ,  $4^+$ ;

$r_1 5311,0 - r_2 704,0$  на уровень 1374,3 кэВ,  $(3^-, 4^-)$ ;

$r_1 5311,0 - r_2 466,6$  на уровень 1609,4 кэВ (триплет).

Уровень 2742,0 кэВ. Имеются 4 каскада:

$r_1 4646,1 - r_2 2430,1$  на уровень 308,8 кэВ,  $4^+$ ;

$r_1 4646,1 - r_2 1367,7$  на уровень 1374,3 кэВ,  $(3^-, 4^-)$ ;

$r_1 4646,1 - r_2 1262,0$  на уровень 1482,7 кэВ,  $(3^-, 5^-)$ ;

$r_1 4646,1 - r_2 1131,0$  на уровень 1609,4 кэВ, (триплет).

Сумма интенсивностей каскадов приводит к выводу, что первичный переход - типа E1.

Уровень 3317,3 кэВ. Имеются 4 каскада:

$r_1 4070,8 - r_2 3009,6$  на уровень 308,6 кэВ,  $4^+$ ;

$r_1 4070,8 - r_2 2672,9$  на уровень 640,8 кэВ,  $6^+$ ;

$r_1 4070,8 - r_2 1947,1$  на уровень 1374,3 кэВ,  $(3^-, 4^-)$ ;

$r_1 4070,8 - r_2 1836,6$  на уровень 1482,7 кэВ,  $(3^-, 5^-)$ .

Мы привели характеристики лишь некоторых уровней, следующих из изученной реакции ( $n, 2\gamma$ ).

#### 5. О некоторых уровнях из других работ

В наших экспериментах могут возбуждаться первичными E1- и M1-переходами только состояния  $^{180}\text{Hf}$  с  $1^\pi = 4^\pm, 5^\pm, 6^\pm$ .

Действительно, как и следовало ожидать, в нашем спектре не проявлялись все первичные переходы на известные уровни с  $1^\pi = 2^+, 3^\pm$ .

С другой стороны, мы нашли переходы практически на все уровни с достоверно установленными  $1^\pi = 4^\pm, 5^\pm$ . Поэтому отсутствие каскадов с промежуточными уровнями ( $4^\pm, 5^\pm$ ), введенными в других работах, является основанием для более детального анализа вопроса об их действительном существовании или спиновой идентификации. Особенно это касается уровней с отрицательной четностью.

С этой точки зрения интересно сравнить наши результаты со схемой уровней в книге Беленького В.М. и Григорьева Е.П. [15].

Мы подтверждаем следующие уровни (со спинами  $4^\pm, 5^\pm, 6^\pm$ ): 1291, 1369; 1409; 1539; 1607,6; 1609; 1701; 1738,4; 1787; 1814; 1862; 1935,7; 1959; 2017; 2154; 2185,9; 2263,1; 2291; 2294,9.

Оставшиеся уровни, представленные в [15], в реакции ( $n, 2\gamma$ ) на тепловых нейтронах (при условии их существования) могут возбуждаться каскадами, интенсивность которых не превышает  $\approx 3 \cdot 10^{-4}$  на распад.



## 6. Заключение

Картина ядерных состояний  $^{180}\text{Hf}$  резко отличается от других ядер. Прежде всего бросается в глаза очень малая интенсивность каскадов, идущих на нижние уровни ядра (до 1613 кэВ).

Сумма наблюдаемых каскадов составляет 9,5(9)% распадов-наименьшая для изученных ядер из области  $144 \leq A \leq 187$ .

В табл. 4 представлены некоторые сравнительные данные для близких по  $A$  ядер одинакового типа-  $^{180}\text{Hf}$  и  $^{168}\text{Er}$  [16].

Видно, что расхождение наблюдаемых в эксперименте параметров для этих ядер лежит за пределами возможных погрешностей эксперимента и нуждается в теоретическом обосновании.

Пользуясь коэффициентом перевода относительных единиц интенсивности первичных переходов в [9] в абсолютные, проведенные в [2], мы получили для полной их интенсивности значение 2,1% распадов компаунд-состояний, создаваемых при захвате тепловых нейтронов.

Значительно большая суммарная интенсивность в нашей работе связана прежде всего с интервалом возбуждаемых состояний- от 93 до 5058 кэВ в нашей работе, и от 308 до 2680 кэВ в [9].

Методика прямого исследования  $\gamma$ -спектра в  $(n, \gamma)$ -реакции не позволяет измерять спектр [9] в интервале энергий  $2300 < E < 4700$  кэВ.

Наши измерения покрывают этот участок. И, несмотря на то, что как и любая методика совпадений, наш метод обладает малой светосилой (и требует длительной кропотливой работы), наши результаты во многих случаях отвечают на вопросы, трудно разрешимые другими методами.

Таблица 1. Энергии  $E_1$  и  $E_2$  каскадных  $\gamma$ -квантов, их относительная интенсивность  $I_{\gamma\gamma} \pm \delta I_{\gamma\gamma}$  (проценты от общей интенсивности двухквантовых каскадов с заданной суммарной энергией) и энергия промежуточных уровней  $E_M \pm \delta E_M$

N	$E_1, \text{кэВ}$	$E_2, \text{кэВ}$	$I_{\gamma\gamma} (\delta I_{\gamma\gamma})$	$E_M (\delta E_M), \text{кэВ}$
1	2	3	4	5

$$E_1 + E_2 = 7294,8 \text{ кэВ}$$

1	5782,1	1512,7	1,0( 6)	1608,8(17)
2	5308,1	1986,7	3,0( 10)	2077,1(23)
3	4363,7	2931,1	2,9( 13)	3021,6(21)
4	3715,8	3579,0	4,7( 14)	3672,1( 9)
5	3636,5	3658,3	4,0( 14)	3751,3(10)
6	3541,2	3753,6	2,7( 13)	3848,4(10)
7	3430,2	3864,6	2,8( 13)	3957,4(12)
8	2965,2	4329,6	4,8( 13)	4423,0( 9)
9	2535,5	4759,3	2,8( 13)	4853,6(13)
10	2341,0	4953,8	3,0( 10)	5047,9(11)
11	7077,5	217,4	5,3( 15)	
12	5980,4	1314,4	1,2( 7)	
13	4213,4	3081,0	2,9( 13)	
14	4134,8	3159,7	3,6( 14)	
15	3734,4	3560,4	3,6( 13)	

$$E_1 + E_2 = 7079,5 \text{ кэВ}$$

1	5848,2	1231,5	1,4( 3)	1540,6( 8)
2	5779,4	1300,3	0,7( 3)	1608,8(17)
3	5687,3	1392,4	0,2( 2)	1701,3(12)
4	5524,8	1554,9	0,2( 2)	1860,3(21)
5	5314,0	1765,7	1,8( 3)	2077,1(23)
6	5233,4	1846,4	0,2( 3)	2152,1(19)
7	5217,0	1862,7	0,3( 3)	2173,9(20)
8	5203,2	1876,5	0,7( 3)	2185,9(24)
9	5126,1	1953,6	0,4( 3)	2261,5(13)
10	5067,6	2012,1	0,7( 2)	2320,7( 8)
11	4916,3	2163,4	0,7( 2)	2473,3(14)

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
12	4649,6	2430,1	0,8( 3)	2742,0(24)
13	4590,3	2489,4	0,8( 4)	2797,7(25)
14	4536,5	2543,2	1,2( 5)	2849,1(16)
15	4529,5	2550,2	0,7( 5)	2858,6(12)
16	4368,2	2711,5	1,1( 3)	3021,6(21)
17	4337,6	2742,1	1,7( 4)	3049,0(17)
18	4298,5	2781,2	0,8( 4)	3089,6(11)
19	4255,9	2823,8	1,1( 3)	3131,6(10)
20	4070,1	3009,6	0,9( 4)	3317,3(30)
21	4058,8	3021,0	0,5( 4)	3330,6(13)
22	3972,5	3107,2	1,5( 4)	3416,1(20)
23	3779,6	3300,1	0,8( 3)	3608,1(11)
24	3716,3	3363,4	1,1( 4)	3672,1( 9)
25	3637,3	3442,4	0,9( 4)	3751,3(10)
26	3539,7	3539,7	1,2( 5)	3848,4(10)
27	3462,5	3617,2	1,2( 5)	3926,4(10)
28	3431,1	3648,6	0,9( 4)	3957,4(12)
29	3411,8	3667,9	1,0( 4)	3974,5(21)
30	3384,3	3695,4	0,8( 4)	4003,0(12)
31	2580,2	4499,5	1,0( 4)	4809,3(13)
32	2473,2	4606,5	1,7( 5)	4915,9(24)
33	2420,7	4659,0	0,7( 3)	4964,0(23)
34	2331,0	4748,7	0,6( 3)	5057,6(13)
35	6748,5	332,3	1,0( 3)	
36	6096,3	983,3	0,3( 2)	
37	6017,4	1062,0	0,9( 2)	
38	5967,0	1099,6	0,3( 2)	
39	5975,9	1105,8	0,6( 3)	
40	5559,9	1519,8	0,3( 2)	
41	5365,6	1714,0	0,5( 2)	
42	5241,2	1838,5	1,3( 3)	
43	5142,2	1937,5	0,5( 3)	
44	5095,3	1984,4	0,4( 2)	
45	5046,9	2032,8	0,5( 2)	
46	4974,8	2104,9	0,5( 2)	
47	4883,8	2196,2	0,4( 2)	
48	4681,7	2397,6	0,6( 3)	
49	4514,9	2564,8	0,9( 4)	
50	4388,3	2691,5	0,6( 3)	
51	4330,1	2750,0	0,7( 3)	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
52	4287,4	2792,2	0,9( 3)	
53	4264,0	2815,5	1,1( 3)	
54	4224,6	2854,6	0,6( 3)	
55	4187,6	2891,8	0,5( 3)	
56	4172,4	2906,7	0,4( 3)	
57	3945,3	3134,3	1,0( 4)	
58	3899,0	3180,6	0,6( 4)	
59	3888,4	3191,3	1,2( 4)	
60	3872,5	3207,1	1,4( 4)	
61	3861,5	3218,1	0,7( 3)	
62	3762,9	3316,8	0,7( 3)	
63	3747,6	3332,1	0,7( 4)	
64	3707,1	3372,6	1,8( 4)	

$$E_1 + E_2 = 6747,2 \text{ кэВ}$$

1	5846,9	900,5	1,9( 4)	1540,6( 8)
2	5686,6	1060,7	0,9( 4)	1701,3(12)
3	5126,8	1620,5	1,2( 5)	2261,5(13)
4	4340,4	2406,9	1,5( 7)	3049,0(17)
5	4204,5	2542,9	2,2( 7)	3183,9( 9)
6	4074,4	2672,9	2,2( 8)	3317,3(30)
7	3971,4	2775,9	2,6( 8)	3416,1(20)
8	3538,7	3208,6	2,0( 9)	3848,4(10)
9	3520,4	3226,9	1,9( 9)	3869,6(15)
10	2474,6	4272,8	1,8( 7)	4915,9(24)
11	5856,0	891,3	0,9( 3)	
12	5729,1	1018,2	1,8( 5)	
13	5721,6	1025,7	1,4( 5)	
14	5172,4	1575,0	1,5( 5)	
15	4474,6	2272,7	1,2( 6)	
16	4304,8	2442,7	3,6( 8)	
17	4129,0	2616,8	1,6( 8)	
18	3919,3	2827,7	1,6( 8)	
19	3507,7	3239,4	1,9( 9)	
20	3479,7	3267,6	2,2( 8)	

$$E_1 + E_2 = 6013,8 \text{ кэВ}$$

1	5778,5	235,2	8,9( 15)	1608,8(17)
---	--------	-------	----------	------------

## Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
2	5528,4	485,3	1,5( 7)	1860,3(21)
3	5477,6	536,2	4,5( 8)	1909,2(14)
4	5430,3	583,5	0,9( 6)	1959,3(11)
5	5370,6	643,2	1,7( 6)	2017,8( 6)
6	5309,7	704,0	2,2( 7)	2077,1(23)
7	5236,4	777,3	1,2( 9)	2152,1(19)
8	5213,6	800,2	1,7( 13)	2173,9(20)
9	5067,2	946,6	3,1( 10)	2320,7( 8)
10	4827,8	1185,9	2,4( 11)	2561,1(12)
11	4646,1	1367,7	2,5( 10)	2742,0(24)
12	4594,4	1419,4	2,1( 9)	2797,7(25)
13	4547,5	1466,3	1,8( 9)	2840,2(10)
14	4298,4	1715,4	1,9( 9)	3089,6(11)
15	4203,9	1809,9	2,8( 12)	3183,9( 9)
16	4066,6	1947,1	2,3( 11)	3317,3(30)
17	4057,2	1956,6	2,9( 12)	3330,6(13)
18	3385,8	2627,9	3,7( 16)	4003,0(12)
19	2471,9	3541,9	3,0( 13)	4915,9(24)
20	2423,3	3590,4	3,2( 13)	4964,0(23)
21	5187,2	826,6	1,9( 9)	
22	5145,6	868,2	2,2( 9)	
23	4838,8	1175,0	2,2( 11)	
24	4616,2	1397,5	2,4( 9)	
25	4582,1	1431,6	2,1( 9)	
26	3904,8	2109,0	3,8( 16)	
27	3791,6	2222,1	4,2( 16)	
28	3250,4	2763,3	4,3( 16)	

$$E_1 + E_2 = 5905,4 \text{ квз}$$

1	5574,3	331,1	2,8( 12)	1814,6(14)
2	5428,3	477,1	16,4( 22)	1959,3(11)
3	5370,2	535,2	5,2( 11)	2017,8( 6)
4	5199,0	706,4	1,2( 10)	2185,9(24)
5	4826,0	1079,4	3,2( 19)	2561,1(12)
6	4706,1	1199,4	8,6( 24)	2682,3( 8)
7	4643,4	1262,0	5,7( 15)	2742,0(24)
8	4588,5	1316,9	5,3( 14)	2797,7(25)
9	4549,0	1356,4	2,7( 12)	2840,2(10)
10	4540,0	1365,4	5,9( 16)	2849,1(16)

## Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
11	4364,9	1540,5	2,3( 11)	3021,6(21)
12	4068,8	1836,6	2,9( 13)	3317,3(30)
13	3969,1	1936,3	2,9( 13)	3416,1(20)
14	3517,4	2388,0	4,3( 18)	3869,6(15)
15	3416,0	2489,5	3,7( 18)	3974,5(21)
16	2468,1	3437,3	4,2( 20)	4915,9(24)
17	2426,1	3479,3	5,0( 18)	4964,0(23)
18	2338,8	3566,6	3,7( 17)	5047,9(11)
19	2329,4	3576,0	2,6( 16)	5057,6(13)
20	5707,1	198,4	2,7( 11)	
21	5660,4	245,0	2,4( 11)	
22	5649,4	256,1	2,6( 12)	
23	5602,1	303,2	2,7( 11)	
24	5329,7	576,3	2,5( 10)	
25	4604,1	1301,3	4,7( 14)	
26	4235,0	1670,4	3,2( 13)	
27	3959,4	1946,0	3,0( 13)	
28	3400,5	2504,9	3,6( 19)	

$$E_1 + E_2 = 5778,7 \text{ кЭВ}$$

1	5571,8	207,0	2,1( 8)	1814,6(14)
2	5480,3	298,5	2,2( 7)	1909,2(14)
3	5370,3	408,5	3,7( 10)	2017,8( 6)
4	5312,1	466,6	2,9( 9)	2077,1(23)
5	4913,5	865,2	3,2( 6)	2473,3(14)
6	4705,5	1073,3	3,2( 9)	2682,3( 8)
7	4647,7	1131,0	2,0( 9)	2742,0(24)
8	4547,1	1231,6	1,7( 9)	2840,2(10)
9	4539,1	1239,7	1,9( 9)	2849,1(16)
10	4529,5	1249,3	2,0( 9)	2858,6(12)
11	4341,4	1437,4	1,5( 8)	3049,0(17)
12	4257,1	1521,7	1,9( 8)	3131,6(10)
13	3974,6	1804,2	2,2( 9)	3416,1(20)
14	3780,4	1998,4	2,4( 10)	3608,1(11)
15	3461,0	2317,7	2,8( 9)	3926,4(10)
16	2964,9	2813,9	2,3( 10)	4423,0( 9)
17	2577,6	3201,2	2,4( 10)	4809,3(13)
18	2533,5	3245,2	1,9( 10)	4853,6(13)
19	5454,9	322,5	1,6( 7)	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
20	5450,9	329,5	1,0( 6)	
21	5135,6	643,5	1,2( 4)	
22	5111,8	667,0	0,8( 4)	
23	5053,8	725,0	1,2( 5)	
24	5019,1	759,6	1,1( 5)	
25	4922,6	856,3	1,4( 5)	
26	4084,4	1694,3	2,2( 8)	
27	4049,5	1729,3	1,8( 9)	
28	3532,6	2246,2	2,3( 10)	
29	3395,7	2382,9	2,1( 9)	
30	3056,0	2722,5	2,6( 10)	
31	3032,1	2746,6	2,0( 10)	

Таблица 2. Среднее значение энергии первичного перехода  $\langle E_1 \rangle$ , энергия промежуточного уровня  $E_M$  и интенсивность  $I_{\gamma\gamma}$  каскадов с заданной суммарной энергией  $E_1+E_2$  (на  $10^6$  распадов компаунд-состояния)

$E_1+E_2=$							
7295 7079 6747 6014 5905 5779 кэВ							
$E_1$ кэВ	$E_M$ кэВ	$I_{\gamma\gamma}$ (на $10^6$ распадов)					
1	2	3	4	5	6	7	8
7077,5*	310,6	320					
6748,5*	639,6		233				
6096,3*	1291,8		84				
6017,4	1370,7		223				
5980,4**	1407,7	73					
5975,9**	1412,2		146				
5967,0**	1421,1		84				
5856,0	1532,1			103			
5847,5	1540,6		346	232			
5779,3	1608,8	62	168		885		
5729,1	1659,0			221			
5721,6	1666,5			169			
5707,1*	1681,0					319	
5686,8	1701,3		60	113			
5660,4	1727,7					289	
5649,4*	1738,7					313	
5602,1*	1786,0					326	
5573,5	1814,6					337	518
5559,9	1828,2		74				
5527,8	1860,3		55		154		
5478,9	1909,2				452		
5454,9	1933,2						550
5450,9	1937,2						393
5428,8	1959,3						263
5370,3*	2017,8				95	1969	
5365,6	2022,5		122		168	622	913
5329,7	2058,4					304	
5311,0	2077,1	181	432		219		715
5241,2	2146,9		312				
5236,0	2152,1		58		123		
5214,2	2173,9		67		169		
5202,2	2185,9		166			148	
5187,2	2200,9				188		
5172,4	2215,7			175			
5145,6	2242,5				220		
5142,2	2245,9		125				
5135,6	2252,5						
5126,6	2261,5		91	143			300
5111,8	2276,3						205
5095,3	2292,8		103				
5067,4	2320,7		180		306		
5053,8	2334,3						
5046,9	2341,2		118				293
5019,1	2369,0						278
4974,8	2413,3		125				
4922,6	2465,5						350
4914,8	2473,3		170				803



## Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8
4883,8	2504,3		98				
4838,8	2549,3				218		
4827,0	2561,1				243	379	
4705,8	2682,3					1036	808
4681,7	2706,4		139				
4646,1	2742,0		187		245	680	488
4616,2	2771,9				244		
4604,1	2784,0					565	
4590,4	2797,7		197		209	641	
4582,1	2806,0				206		
4547,9	2840,2				177	322	418
4539,0	2849,1		288			709	478
4529,5	2858,6		163				510
4514,9	2873,2		218				
4474,6	2913,5			148			
4388,3	2999,8		132				
4366,5	3021,6	176	264			271	
4339,1	3049,0		408	184			368
4330,1	3058,0		166				
4304,8	3083,3			433			
4298,5	3089,6		197		188		
4287,4	3100,7		209				
4264,0	3124,1		254				
4256,5	3131,6		264				465
4235,0	3153,1					389	
4224,6	3163,5		134				
4213,4	3174,7	173					
4204,2	3183,9			269	277		
4187,6	3200,5		115				
4172,4	3215,7		86				
4134,8	3253,3	218					
4129,0	3259,1			194			
4084,4	3303,7						538
4070,8	3317,3		218	264	232	353	
4057,5	3330,6		127		291		
4049,5	3338,6						437
3972,0	3416,1		370	310		349	538
3959,4	3428,7					360	
3945,3	3442,8		247				
3919,3	3468,8			191			
3904,8	3483,3				379		
3899,0	3489,1		134				
3888,4	3499,7		300				
3872,5	3515,6		324				
3861,5	3526,6		158				
3791,6	3596,5				424		
3780,0	3608,1		199				610
3762,9	3625,2		173				
3747,6	3640,5		175				
3734,4	3653,7	215					
3716,0	3672,1	280	269				
3707,1	3681,0		420				
3636,8	3751,3	240	228				
3539,7	3848,4	160	278	242			
3532,6	3855,5						573
3518,5	3869,6			226		515	
3507,7	3880,4			232			
3479,7	3908,4			264			
3461,7	3926,4		281				703
3430,7	3957,4	169	226				
3413,6	3974,5		242				

1	2	3	4	5	6	7	8
3400,5	3987,6					433	
3395,7	3992,4						530
3385,1	4003,0		194		375		
3250,4	4137,7				425		
3056,0	4332,1						650
3032,1	4356,0						503
2965,1	4423,0	289					573
2578,8	4809,3		233				610
2534,5	4853,6	165					483
2472,2	4915,9		410	211	300	509	
2424,1	4964,0		158		318	604	
2340,2	5047,9	178				439	
2330,5	5057,6		154			307	

Примечание: \* - переходы на известные уровни.

\*\* - уровни известны из ядерных реакций или энергия вторичных переходов соответствует энергии переходов из (п. γ)-реакции.

Таблица 3

Сравнение интенсивности заселения некоторых уровней  $^{180}\text{Hf}$  в реакции (n, γ) на тепловых и резонансных нейтронах [9]

$E_{ур.}, \text{кэВ}$	$I^{\pi}_{ур.}$	$I_{\gamma}, \text{отн. ед.}$ тепл. n	$I_{\gamma}, \text{отн. ед.}$ резон. n	Мультип. перех. резон. n
93,3	$2^{+}$	---	42	E2
1199,8	$2^{+}$	---	17	E2
1260,8	$2^{+}$	---	20	E2
1291,2	$4^{+}(3^{+})$	46	83	M1
1369,7	$4^{+}$	100	100	M1
1374,4	$(3^{-}, 4^{-})$	78	521	E1
1482,7	$(3^{-}, 5^{-})$	57	496	E1
1539,3	$(4^{-}, 5^{-})$	714	369	E1

Таблица 4  
Сопоставление параметров каскадного распада в ядрах  
 $^{168}\text{Er}$  и  $^{180}\text{Hf}$

	$^{168}\text{Er}$	$^{180}\text{Hf}$
1. Спин компаунд-состояния	33% $3^+$ +67% $4^+$	$(5^+)$
2. Энергия связи, кэВ	7771,14(39)	7388,11(39)
3. Среднее расстояние между резонансами, эВ	4,0(2)	4,4(2)
4. Сумма интенсивностей всех каскадов на уровни $2^+$ , $4^+$ и $6^+$ ротационной полосы основ. состояния, распадов	15,4(10)%	4,6(5)%
5. Число выделенных наиболее интенсивн. каскадов на уровни полосы основного состояния $2^+$ , $4^+$ и $6^+$	71	99
6. Их средняя интенсивность, распадов	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
7. Структура основного состояния ядра- мишени	$n [633]^+$	$n [624]^+$
8. Значение $2\sigma_n^0$ резонансов, определяющих захват тепловых нейтронов	0,3 и 0,46мэВ	10,45 мэВ
9. Нейтронная силовая функция	1,8(2)	1,7(2)

Примечание: погрешность определения интенсивности каждого из наблюдаемых интенсивных каскадов не превышает 50%.

#### Литература

1. Gujrathi S.G., D'Auria J.M., Nucl.Phys., A161, 410 (1971).
2. Nucl.Data Sheets, 52, № 1, (1987).
3. Geinoz D.G., Manron G., Schaller L.A. Helv. Phys. Acta, 43,412(1970).
4. Ronningen R.M. e.a. Phys. Rev., C15, 1671(1977).
5. Zeitz J.I., Sheline R.K., Phys.Rev.,C6, 506(1972).
6. Бондаренко В.А., Григорьев Е.П., Крамер Н.Д. Изв. АН СССР, сер. физ., т. 43, 1052,(1979).
7. Григорьев Е.П., Бондаренко В.А. Изв. АН СССР, сер. физ., т. 47, 2261(1983).

8. Bushnell D.L., Buss D.Y., Smither R.K. Phys. Rev., C10 2483(1974).
9. Григорьев Е.П. и др. Тезисы докладов 35-го совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л., Наука, 1985, с.132.
10. Мурзин А.В. и др. Тезисы докладов 34-го совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Л., Наука, 1984, с.144
11. Попов Ю.П. и др. Изв. АН СССР, сер. физ. I 48, 891(1984)
12. Бонева С.Т. и др. ОИЯИ, Р6-90-96, Дубна, 1990
13. Nuclear Data Tables, v.5, № 3,4 (1969)
14. Mughabghab S.F. Neutron Cross Sections, v.1, Neutron resonance parameters and thermal cross sections, part B, Z=61-100, Academic Press, N.Y., 1984
15. Беленький В.М., Григорьев Е.П., Структура четных ядер, М., Энергоатомиздат, 1987
16. Васильева Э.В. и др. ОИЯИ, Р6-85-22, Дубна, 1985

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 марта 1990 года.