

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

4596 8

29/III-83

P3-83-407

Ю.П.Попов, А.М.Суховой,
В.А.Хитров, Ю.С.Язвический

О КОРРЕЛЯЦИИ
МЕЖДУ ИНТЕНСИВНОСТЯМИ
ДВУХКВАНТОВЫХ КАСКАДОВ
В РЕАКЦИИ $^{164}\text{Dy}(n, 2\gamma)^{165}\text{Dy}$
И ЭФФЕКТИВНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ
РЕАКЦИИ $^{164}\text{Dy}(d, p)^{165}\text{Dy}$

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1983

ВВЕДЕНИЕ

Изучение жестких γ -лучей при радиационном захвате нейтронов в последние годы ведется очень широко /см., например, труды международных симпозиумов^{1,2/} /. При этом получают информацию о первичных γ -переходах между захватными состояниями и состояниями с малыми энергиями возбуждения, а также о механизме радиационного захвата. В частности, для ряда ядер были получены оценки вкладов различных механизмов захвата. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов, выполненных в рамках современных теоретических моделей, показывает, что к настоящему времени достигнуто достаточно хорошее понимание радиационных процессов с участием прямых переходов между захватными состояниями, имеющими сложную структуру, и низковозбужденными состояниями с простой структурой. Однако остаются почти неизученными процессы девозбуждения посредством каскадных γ -переходов, а их вклад, как правило, очень значителен. Предполагается, что γ -каскады подчиняются статистическим закономерностям, однако с помощью статистического подхода не всегда удается адекватно описать экспериментальные данные. Так, например, анализ интенсивностей γ -переходов с низколежащих уровней, возбужденных при резонансном захвате нейтронов преимущественно за счет каскадных γ -переходов, показал^{3/}, что у ядер, лежащих в области $4S$ -максимума нейтронной силовой функции, значения заселенностей низколежащих уровней флуктуируют от резонанса к резонансу сильнее, чем это можно ожидать на основе статистической модели. Указывалось^{3/}, что такое расхождение, возможно, обусловлено увеличением интенсивности каскадов между уровнями с повышенным вкладом одночастичных компонент, который можно ожидать в этой области атомных весов из-за близости $4S$ -нейтронной оболочки к энергии связи нейтронов.

Приведенное объяснение основывается только на косвенных данных о каскадных γ -переходах, представляется интересным прямое экспериментальное изучение каскадов в реакции (n, γ) . Такую возможность предоставляют измерения двухквантовых переходов в (n, γ) -процессе с использованием спектрометра на двух Ge(Li) - детекторах, который выделяет двухквантовые каскады с заданной суммарной энергией /спектрометр САСИ/^{4/}. С его помощью была исследована реакция $^{164}\text{Dy}(n, 2\gamma)^{165}\text{Dy}$ на тепловых нейтронах. Получены интенсивности большого числа двухквантовых каскадов. Часть из них размещена в схеме уровней ядра ^{165}Dy ^{5/}. Поскольку для ядра ^{165}Dy с нечетным числом нейтронов известен вклад од-

ночастичной компоненты в низколежащие уровни^{6/}, а также эффективные сечения реакции (d, p) ^{6/}, пропорциональные одночастичной компоненте волновых функций заселяемых уровней, появилась возможность проверить роль одночастичной компоненты состояний в формировании γ -каскадов путем поиска корреляций между интенсивностями двухквантовых каскадов и сечениями реакции (d, p) .

КОРРЕЛЯЦИЯ РЕАКЦИЙ (n, γ) И (d, p)

Обнаружение корреляций для одноквантовых γ -переходов в процессе (n, γ) и эффективных сечений (d, p) позволило продемонстрировать роль таких процессов, как потенциальный захват^{7/} и полупрямой захват^{8/} нейтрона. Исследовалась зависимость коэффициента корреляции

$$R(\alpha) = \text{corr}(S_{d,p}(2J+1); I_{\gamma}/E_{\gamma}^{\alpha}) \quad /1/$$

/где I_{γ} и E_{γ} - соответственно интенсивность и энергия первичного γ -перехода, $S_{d,p}$ - спектроскопический фактор в реакции (d, p) , $(2J+1)$ - спиновый множитель/ от показателя степени α в энергетической зависимости интенсивности прямого γ -перехода на то же состояние, которое заселяется в реакции (d, p) . Парциальное сечение потенциального захвата, по теории, должно иметь линейную зависимость от энергии γ -кванта мультипольности $E1$. Следовательно, если потенциальный захват имеет существенное значение в реакции (n, γ) на конкретном ядре, то величина R должна иметь максимальное значение при $\alpha = 1$, что и было впервые показано в работе^{9/}. В случае $M1$ -переходов на основе данных работы^{10/}, интерпретирующей корреляцию интенсивностей первичных $M1$ -переходов с силой (d, p) -реакции с помощью механизма полупрямого захвата, сделано предположение^{11/}, что энергетическая зависимость интенсивностей $M1$ -переходов должна быть более жесткая, чем E_{γ}^5 , то есть R должен иметь максимум при $\alpha > 5$.

Корреляция реакций (n, γ) и (d, p) находит свое объяснение и в рамках полумикроскопического подхода^{12/}. Для случая двухквантовых каскадов коэффициент корреляции интенсивностей каскадов и эффективных сечений процесса (d, p) следует, вероятно, представить в виде функции двух переменных $R = R(\alpha, \beta)$, где α и β - показатели степени в зависимости интенсивности от энергии первичного и вторичного γ -квантов соответственно.

У составного ядра ^{165}Dy спин исходного состояния $J^{\pi} = \frac{1}{2}^{+}$, а конечные состояния исследованных двухквантовых каскадов имеют $J^{\pi} = 1/2^{-}$, $3/2^{+}$ и $5/2^{-}$ /см. табл.1/, поэтому в каскадах наиболее вероятными должны быть мультипольности $E1-M1$ и $E1-E2$. Модели прямого и полупрямого механизмов захвата такие случаи не рассматривают, то есть нет модельных предсказаний относительно величин α и β .

Таблица 2

Экспериментальные коэффициенты корреляции и соответствующие статистические достоверности

Набор №	Число промежуточных уровней	Число каскадов	R	P _{см} (R < R _э)	P _э (R < R _э)
I	8	24	0,93	98,71 %	97,81 %
2	21	39	0,88	99,60 %	97,95 %
1a	8	16	0,98	99,90 %	99,96 %
2a	15	24	0,97	99,95 %	99,99 %
3	19	-	0,14	75,28 %	76,21 %
4	21	39	0,31	89,97 %	89,86 %

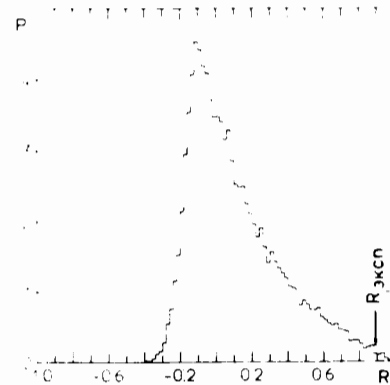
ному в ⁵, на первичные и вторичные. Абсолютные интенсивности как "разделенных", так и "неразделенных" каскадов использовались для корреляционного анализа, результаты которого представлены в табл. 2. В первой колонке таблицы даны порядковые номера наборов экспериментальных данных, использованных для расчета коэффициентов корреляции; во второй - число промежуточных уровней, через которые идут включенные в анализ каскады. Число этих каскадов дано в третьей колонке, в четвертой - коэффициенты корреляции R. В следующих двух колонках приведены значения величин P_{ст}(R < R_э) и P_э(R < R_э) - вероятности получения коэффициента R, который меньше экспериментального R_э, в рамках гипотезы нулевой корреляции.

Для определения величин P_{ст}(R < R_э) и P_э(R < R_э) в каждом конкретном случае строилось распределение вероятности величины R. Для этого методом Монте-Карло из соответствующих теоретических распределений разыгрывались выборки пар величин конкретного объема. Затем для каждой выборки рассчитывался коэффициент R, причем в случае определения величины P_э(R < R_э) использовались экспериментальные значения σ_{дп}. При определении величины P_{ст}(R < R_э) в качестве теоретического распределения для σ_{дп} использовалось χ²-распределение с одной степенью свободы, поскольку сечение реакции (d, p), идущей на данный уровень, пропорционально приведенной нейтронной ширине этого уровня. Вид распределения, которым можно описать интенсивность каскада, определялся из следующих предположений. Интенсивность двухквантового каскада, идущего через промежуточный уровень j на конечный i /см. рис.1/, задается соотношением

$$I_{\gamma ji} = (\Gamma_{\gamma qj} / \Gamma_{\gamma q}) (\Gamma_{\gamma ji} / \Gamma_{\gamma j}), \quad /3/$$

где Γ_{γq} и Γ_{γj} - полные радиационные ширины исходного q и промежуточного j состояний; Γ_{γqj} и Γ_{γji} - парциальные радиационные ширины, определяющие вероятности γ-переходов с уровня q на уровень j и с уровня j на i соответственно. Поскольку Γ_{γq} - величина, общая для всех каскадов, ее можно считать константой. Тогда распределение первого сомножителя в /3/ имеет вид χ²-распределения с одной степенью свободы. Второй сомножитель в /3/ подчиняется распределению Фишера, и его параметры нам неизвестны. Однако с учетом того факта, что Γ_{γji} является одним из слагаемых величины Γ_{γj}, при понижении энергии возбуждения промежуточного уровня j мы должны получить в предельном случае Γ_{γj} = Γ_{γji}. И в этом предельном случае распределение Фишера переходит в причинное распределение с нулевой дисперсией. Следовательно, интенсивность каскада можно описать сверткой двух χ²-распределений с одной степенью свободы каждое. Следует отметить, что в этом случае мы получаем нижние оценки величин P_{ст}(R < R_э) и P_э(R < R_э). Пример распределения вероятности величин R, рассчитанных методом Монте-Карло для набора №2 /случай P_{ст}/, дан на рис.2. Там же для сравнения приведен экспериментальный коэффициент корреляции R_э.

Из всей совокупности "разделенных" каскадов ⁵ 24 каскада идут через 8 промежуточных уровней, для которых измерены сечения (d, p) -реакции ⁶. Коэффициент корреляции, рассчитанный для этого ансамбля данных /набор №1/ по формуле /2/, и соответствующие статистические достоверности приведены в первой строке табл.2. Для увеличения объема выборки, а также для косвенной проверки правильности метода разделения γ-переходов каскадов на первичные и вторичные ⁵ в набор №1 добавлены интенсивности таких каскадов, переходы которых не разделены методом ⁵, но которые могут быть размещены в схеме уровней ¹⁶⁵Dy, измеренной в реакции (d, p). Коэффициент корреляции для этого набора данных /№2/ имеет величину несколько меньшую, чем для набора №1. При



этом статистическая достоверность этой величины, определенная по экспериментальным сечениям, остается относительно невысокой ~98%, что можно объяснить, по-видимому, тем, что не все компоненты волновых функций уровней ¹⁶⁵Dy, заселяемых двухквантовыми каскадами /см. табл.1/, играют одинаково

Рис.2. Распределение вероятности коэффициентов R, рассчитанных методом Монте-Карло для набора №2.

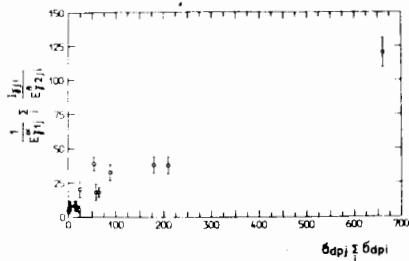


Рис.3. Зависимость приведенных интенсивностей каскадов от эффективных сечений реакции (d, p) /набор №2а, $\alpha = 0$, $\beta = 0$ /.

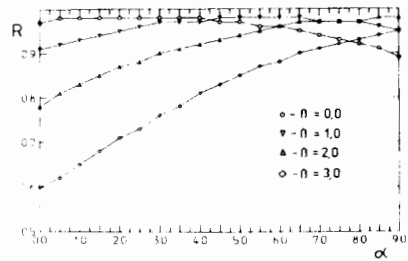


Рис.4. Зависимость коэффициента корреляции R от показателей степени энергий первичных и вторичных γ -переходов каскадов α и β .

существенную роль в реакциях $(n, 2\gamma)$ и (d, p) . Для проверки этого предположения в наборах №1 и №2 оставлены только те каскады, которые заселяют уровни полосы 1/2 [521], то есть уровни с энергиями возбуждения 109, 158, 181+184 кэВ /в последнем случае имеется примесь состояния 5/2 [512] /. Таким образом, из наборов №1 и №2 были получены наборы №1а и №2а соответственно. Для обоих наборов статистическая достоверность значений R резко возросла. Это говорит в пользу того, что компонента 1/2 [521] играет существенную роль и в (d, p) - и в $(n, 2\gamma)$ -реакции. На рис. 3

проиллюстрирована зависимость величины $\frac{1}{E_{\gamma 1j}^{\alpha}} \sum \frac{I_{\gamma ji}}{E_{\gamma 2ji}^{\beta}}$ от

$\sigma_{dpj} \sum \sigma_{dpi}$ для набора №2а / $\alpha = 0$, $\beta = 0$ / . На рис.4 показана зависимость коэффициента корреляции R от показателей степени энергий первичных и вторичных γ -переходов для набора №1а. Как видно из рисунка, величина R относительно слабо чувствительна к изменениям α и β , здесь нет максимумов, характерных для какого-либо простого типа захвата нейтрона ядром /см.^{1/} /.

Для 19 уровней из 21, представленного в наборе №2, имеются экспериментальные значения интенсивностей первичных переходов, полученные с помощью однокристалльного спектрометра ⁶. Коэффициент корреляции для этих данных /набор №3/, подсчитанный по выражению /1/ /вместо неизвестных величин $(2J+1)S_{dp}$ использовались сечения σ_{dp} /, равен 0,14 при статистической достоверности ~76%, что согласуется с гипотезой нулевой корреляции, то есть со значением $R = 0$. Этот факт говорит о том, что поиск корреляции между интенсивностями двухквантовых каскадов в реакции $(n, 2\gamma)$ и эффективными сечениями реакции (d, p) позволяет обнаружить проявление новых механизмов, влияющих именно на вероятность испускания каскадов γ -квантов и не связанных прямо с механизмом захвата нейтрона.

В наборе №4 использованы интенсивности двухквантовых каскадов. Однако коэффициент корреляции рассчитан не по /2/, а по следующему выражению:

$$R = \text{corr} \left(\frac{1}{E_{\gamma 1j}^{\alpha}} \sum_i \frac{I_{\gamma ji}}{E_{\gamma 2ji}^{\beta}} ; \sigma_{dpj} \right), \quad /4/$$

то есть без учета характеристик конечных уровней, заселяемых в реакции (d, p) . Малая величина $R = 0,31$ при низкой статистической вероятности ~90% подтверждает предварительное предположение о необходимости учета вклада одночастичной нейтронной компоненты в волновую функцию конечных уровней при поиске корреляций между интенсивностями двухквантовых каскадов и эффективными сечениями (d, p) -реакции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко резюмируем основные результаты работы. Со статистической достоверностью ~99,9% показано существование корреляции между процессами $^{164}\text{Dy}(n, 2\gamma)^{165}\text{Dy}$ и $^{164}\text{Dy}(d, p)^{165}\text{Dy}$.

Корреляцию между процессами $(n, 2\gamma)$ и (d, p) в настоящее время можно качественно описать в рамках общего полумикроскопического подхода к описанию возбужденных состояний ¹², предположив, что компоненты волновых функций промежуточного и конечного уровней, связываемых каскадом, являются общими как для процесса $(n, 2\gamma)$, так и для (d, p) -реакций, возбуждающих эти уровни. Из этого качественного предположения следуют два вывода, подтверждаемых экспериментальными результатами: 1/ при поиске корреляций такого типа следует учитывать сечения реакции (d, p) , возбуждающей как промежуточный, так и конечный уровни, связываемые каскадом, то есть рассчитывать корреляцию в соответствии с выражением /2/; 2/ отдельные компоненты волновых функций конечных состояний, заселяемых двухквантовыми каскадами, могут играть существенную роль в обеих реакциях: $(n, 2\gamma)$ и (d, p) .

Получено первое экспериментальное указание на то, что одночастичная нейтронная компонента волновой функции высоковозбужденных состояний ядра ^{165}Dy играет существенную роль в формировании γ -каскадов при распаде тяжелых деформированных компаунд-ядер, приводящих в отклонению от статистических закономерностей вероятности двухквантового распада компаунд-ядер.

Насколько существенную роль это явление играет в процессе де возбуждения компаунд-состояний тяжелых ядер вообще, видимо, покажут дальнейшие измерения. Однако уже сейчас можно сказать, что применение метода спектрометрии совпадающих импульсов с заданной суммой амплитуд ⁴ является перспективным при изучении влияния простых структур в низколежащих состояниях на вероят-

ности каскадов γ -квантов при распаде высоковозбужденных состояний.

Отметим также, что, поскольку коэффициенты корреляции и соответствующие значения статистической достоверности близки как в случае использования каскадов с разделением γ -переходов на первичные и вторичные по методу ^{5/}, так и в случае разделения на основе установленной в других реакциях схемы уровней, это косвенным образом подтверждает правильность метода ^{5/}.

В заключение авторы выражают благодарность профессору В.Г.Соловьеву за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy (Ed. by R.Crien and W.Kane). Plenum Press, N.Y., 1978.
2. Neutron Capture Gamma-Ray Spectroscopy (Ed. by T. von Egedy). Conf. Series, N62, Bristol, London, 1982.
3. Khitrov V.A. et al. In ^{1/}, p. 655.
4. Богдзель А.А. и др. ОИЯИ, Р15-82-706, Дубна, 1982.
5. Попов Ю.П. и др. ОИЯИ, Р6-83-316, Дубна, 1983.
6. Nuclear Data Sheets, 1974, v. 11, N. 2, p. 189.
7. Lane A.M., Lynn J.E. Nucl.Phys., 1960, 17, p. 563.
8. Brown G.E. Nucl.Phys., 1964, 57, p. 339.
9. Spits A.M.J., Akkermans J.A. Nucl.Phys., 1973, A215, p. 260.
10. Clement C.F. et al. Phys.Letters, 1977, 71B, p. 10.
11. Graue A. et al. Nucl.Phys., 1967, A103, p. 209.
12. Соловьев В.Г. ЭЧАЯ, 1972, т. 3, вып.4, с. 770.

Попов Ю.П. и др.

Р3-83-407

О корреляции между интенсивностями двухквантовых каскадов в реакции $^{164}\text{Dy}(n, 2\gamma)^{165}\text{Dy}$ и эффективными сечениями реакции $^{164}\text{Dy}(d, p)^{165}\text{Dy}$

С помощью нового метода поиска корреляций между интенсивностями двухквантовых каскадов в реакции $(n, 2\gamma)$ и эффективными сечениями реакции (d, p) , учитывающего сечения реакции (d, p) , возбуждающей как промежуточный, так и конечный уровни, связываемые каскадом, найдена статистически достоверная корреляция между процессами $^{164}\text{Dy}(n, 2\gamma)^{165}\text{Dy}$ и $^{164}\text{Dy}(d, p)^{165}\text{Dy}$. Получено экспериментальное указание на то, что одночастичная нейтронная компонента волновой функции высоковозбужденных состояний ядра ^{165}Dy играет существенную роль в формировании γ -каскадов при распаде этого ядра, приводящих к отклонению от статистических закономерностей вероятности двухквантового распада компаунд-ядер.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Popov Yu.P. et al.

Р3-83-407

On Correlation between Two-Quanta Cascade Intensities in the $^{164}\text{Dy}(n, 2\gamma)^{165}\text{Dy}$ Reaction and Cross Sections for $^{164}\text{Dy}(d, p)^{165}\text{Dy}$ Reaction

Statistically significant correlation between $^{164}\text{Dy}(n, 2\gamma)^{165}\text{Dy}$ and $^{164}\text{Dy}(d, p)^{165}\text{Dy}$ processes has been observed by means of a new method for search of correlations between two-quanta cascade intensities in the $(n, 2\gamma)$ reaction and cross sections for the (d, p) reaction that takes into account cross sections for (d, p) reaction both to intermediate and final levels connected by a cascade. An experimental indication is obtained for a significant role of single-particle neutron component of the wave function for highly excited states of the ^{165}Dy nucleus in forming γ -cascades by decay of this compound-nucleus that results in the deviation from statistical regularity for probabilities of the two-quanta decay of compound-nuclei.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983