



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-175

P6-96-175

Ю.В.Хольнов

ПРОСТЫЕ ПРАВИЛА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ВЕТВЛЕНИЙ ЯДЕРНЫХ ПЕРЕХОДОВ  
И ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАСЕЛЕНИЯ УРОВНЕЙ  
В РАСПАДЕ ЯДЕР И В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

Направлено в журнал «Известия РАН, серия физическая»

1996

Измерение коэффициентов ветвления ядерных переходов на возбуждаемых ими уровнях имеет большое значение в ядерной спектроскопии при построении схем уровней и переходов. Обычно эти коэффициенты определяются из отношения значений интенсивности полного набора переходов, разряжающих определенный уровень. Однако, в сложных схемах для большинства уровней, особенно высоких, определить полный набор переходов не только не удастся, но и доказать эту полноту очень трудно. Покажем, что при совместном анализе отношений интенсивности ядерных переходов и интенсивности двойных совпадений, эта задача решается просто, даже если с изучаемого уровня известен только один переход.

## 1. Способы определения коэффициентов ветвления, заселенности уровней и интенсивности вторичных переходов

### 1.1. Коэффициенты ветвления переходов

На рисунке показаны различные пути возбуждения уровня  $x$  ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -распад, ядерные реакции  $R$ ). Разрядка уровня в интересующей нас области энергии возбуждения (порядка нескольких МэВ) происходит с испусканием  $\gamma$ -квантов или электронов внутренней конверсии.

Коэффициент ветвления  $b_k^x$  (branching) на уровне  $x$  с испусканием квантов  $\gamma_k^x$  и конверсионных электронов  $e_k^x$  по определению напишем:

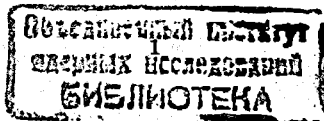
$$b_k^x = \frac{\dot{\gamma}_k^x}{\sum_k \dot{\gamma}_k^x + \sum_k \dot{e}_k^x} \quad (1)$$

где  $\dot{\gamma}$  - интенсивность  $\gamma$ -излучения,  $\dot{e}$  - интенсивность электронов внутренней конверсии.

$$\text{Сумма ветвлений } \sum_k b_{\gamma_k}^x + \sum_k b_{e_k}^x = 1.$$

### 1.2. Определение значений $b_k^x$ методом внутреннего эталона

Пусть для некоторого уровня "э" (эталон) известны все разряжающие его переходы  $\gamma_k^э$ . Тогда все коэффициенты ветвления  $b_k^э$  можно вычислить по (1). Для определенности выберем из переходов, питающих уровень,  $\gamma$ -переход  $\gamma_j^э$ .



относительная интенсивность которого также известна  $\dot{\gamma}_j^3$ . Тогда значение  $b_k^3$  можно выразить еще и следующим образом:

$$b_k^3 = q \cdot \frac{C_{jk}^3}{\dot{\gamma}_j^3} \quad (2)$$

где  $C_{jk}^3$  - интенсивность совпадений  $\gamma$ -квантов  $\dot{\gamma}_j^3 \dot{\gamma}_k^3$ . Калибровочный коэффициент  $q$  учитывает то обстоятельство, что значения интенсивности  $\gamma$ -квантов и их совпадений могут быть выражены в разных единицах:

Из (2) следует:

$$q = b_k^3 \cdot \frac{\dot{\gamma}_j^3}{C_{jk}^3} \quad (3)$$

Пусть для уровня  $x$  известен один каскад  $\gamma$ -квантов  $\dot{\gamma}_j^x \dot{\gamma}_k^x$ . Для него, аналогично (2),

$$b_k^x = q \cdot \frac{C_{jk}^x}{\dot{\gamma}_j^x} = b_k^3 \cdot \frac{\dot{\gamma}_j^3}{C_{jk}^3} \cdot \frac{C_{jk}^x}{\dot{\gamma}_j^x} \quad (4)$$

Коэффициент  $q$  одинаков для всех уровней. Если значения  $\dot{\gamma}_j$  и  $C_{jk}$  выражены в одинаковых единицах,  $q=1$ .

Эталонные уровни, как правило, легко выделить, особенно в нижней части схемы, когда все пути возможной разрядки уровня очевидны.

Погрешность измерения  $b_k^x$  определяется, в основном, точностью измерения интенсивности совпадений.

### 1.3. Определение полной заселенности уровня $x$ ( $F^x$ )

Если для каскада  $\dot{\gamma}_j^x \dot{\gamma}_k^x$ , связанного уровнем  $x$ , известна относительная интенсивность "вторичного" перехода  $\dot{\gamma}_k^x$  и значение  $b_k^x$  (см. (4)), то полная интенсивность разряжающих переходов  $\sum \dot{\gamma}_k$ , равная полной интенсивности переходов, заселяющих уровень  $x$  ( $F^x$ ), равна

$$F^x = \sum_k \dot{\gamma}_k^x = \dot{\gamma}_k^x \cdot b_k^x \quad (5)$$

Так просто определяется очень важная характеристика - суммарная интенсивность переходов, заселяющих уровень  $x$  (и разряжающих его).

Если известна абсолютная интенсивность (число квантов на распад) квантов  $\dot{\gamma}_k^x$  то и заселенность уровней по (5) будет выражена в абсолютных единицах.

### 1.4. Определение интенсивности вторичных переходов

Если с уровня  $x$  идут несколько переходов, то  $b_k^x$  для них определяется по (4). Если же интенсивность вторичных переходов неизвестна, ее можно определить по формуле

$$\dot{\gamma}_k^x = F^x \cdot b_k^x = \dot{\gamma}_k^x \cdot \frac{b_k^x}{b_k^x} \quad (6)$$

как в относительных, так и в абсолютных единицах.

### 1.5. Определение коэффициентов ветвления для транскаскадов

При исследовании сложных схем распада методом двойных  $\gamma\gamma$ -совпадений "с воротами" большинство совпадающих пар можно отнести к семейству транскаскадов, когда фиксируется совпадение кванта  $\gamma_1$  - не с последующим переходом  $\gamma_2$ , а с квантом  $\gamma_n$  в цепочке последовательных переходов. В общем виде коэффициент ветвления будет

$$b^{x_1 \cdot x_n} = b^{x_1} \cdot b^{x_2} \dots b^{x_n} \quad (7)$$

## 2. Примеры вычислений дополнительных характеристик уровней по литературным данным

### 2.1. Схема уровней и переходов ядра $^{128}\text{I}$

В [1] проведены прецизионные исследования схемы уровней и переходов нечетно-нечетного ядра  $^{128}\text{I}$  в интервале энергии 0-1000 кэВ с помощью ядерных реакций  $(n\gamma)$ ,  $(dp)$  и  $(td)$ . В этом небольшом энергетическом интервале обнаружено 40 возбужденных состояний и 93  $\gamma$ -перехода. Имеются хорошие количественные данные по  $\gamma\gamma$ -совпадениям. Мы рассмотрим несколько уровней и применим к ним наши правила. В [1] все интенсивности приведены в одинаковых

единицах (% распадов). Следовательно  $q \equiv 1$ . Тем не менее, для проверки этого утверждения определим значение  $q$  по экспериментальным данным [1].

В табл. 1 приведен результат расчета  $q$  по (3), он совпадает с единицей в пределах погрешности.

В табл. 2 приведены подробные результаты расчета значений  $b$  и  $F$  для уровня 294,4 кэВ.

Аналогично определены значения  $b_k^x$  для ряда других уровней ( $x$ ).

Уровень 386,6 кэВ, 4<sup>-</sup>, 5<sup>-</sup>. Значения  $b=0,94(8)$  и  $0,087(20)$  для разряжающих переходов  $\gamma_{249}$  и  $\gamma_{160}$  соответственно.

Уровень 234,5 кэВ, 5<sup>-</sup>.  $b=0,269(9)$  для  $\gamma_{67}$ .

Уровень 232,6 кэВ, 4<sup>+</sup>.  $b=0,55(2)$  и  $0,066(20)$  для  $\gamma_{147}$  и  $\gamma_{81}$ .

Уровень 226,1 кэВ, 5<sup>-</sup>, 6<sup>-</sup>.  $b=0,230(17)$  для  $\gamma_{59}$ .

Уровень 220,9 кэВ, 1<sup>+</sup>.  $b=0,98(5)$  для  $\gamma_{194}$ .

Уровень 180,4 кэВ, 3<sup>+</sup>.  $b=0,64(3)$  и  $0,023(4)$  для  $\gamma_{153}$  и  $\gamma_{95}$ .

Уровень 160,8 кэВ, 2<sup>+</sup>.  $b=0,66(4)$  и  $0,155(18)$  для  $\gamma_{161}$  и  $\gamma_{133}$ .

Уровень 151,6 кэВ, 3<sup>+</sup>.  $b=0,674(37)$  для  $\gamma_{124,3}$ .

В табл. 3 приводятся рассчитанные нами значения заселенности уровней  $F^x$ . Видно, что практически все переходы  $\gamma_{\text{уход}}^x$  с двенадцати уровней на нижележащие в [1] учтены. В последнем столбце представлены суммарные интенсивности переходов  $\gamma_{\text{прих}}^x$ , не учтенных в [1], на каждый из этих уровней (всего 91% распадов).

При поиске этих переходов нужно знать, что их число ограничено суммарной интенсивностью, приведенной в столбце 4 табл. 3.

В п.3.4. есть формула (10) для определения полного коэффициента внутренней конверсии ( $\alpha_n$ ). Для  $^{128}\text{I}$  оказалось возможным определить  $\alpha_n$  для переходов с трех уровней (все они - единственные разряжающие переходы).

Уровень 226,1 кэВ. Переход 58,7 кэВ (5<sup>-</sup>, 6<sup>-</sup>→6<sup>-</sup>).

$F=4,04(33)$  (табл.3).  $\gamma_{59}=0,93(3)$ .

$$\alpha_n = \frac{4,04(33) - 0,93(3)}{0,93(3)} = 3,34(18).$$

Уровень 234,5 кэВ. Переход 67,1 кэВ (5<sup>-</sup>→6<sup>-</sup>).

$F=12,6(5)$  (табл.3).  $\gamma_{67}=3,38(6)$ .

$$\alpha_n = \frac{12,6(5) - 3,38(6)}{3,38(6)} = 2,73(16).$$

Уровень 151,6 кэВ. Переход 124,3 кэВ (3<sup>+</sup>→2<sup>+</sup>).

$F=8,8(6)$  (табл.3).  $\gamma_{124}=5,92(20)$ .

$$\alpha_n = \frac{8,8(6) - 5,92(20)}{5,92(20)} = 0,49(10).$$

## 2.2. Распад компаунд-состояния 6905,6 кэВ ядра $^{137}\text{Ba}$ , возбуждаемого в реакции (n, $\gamma$ ) на тепловых нейтронах

В [2] исследовались двухквантовые каскады распада этого компаунд-состояния.  $\gamma\gamma$ -совпадения измерялись методом суммирования амплитуд совпадающих импульсов [3].

В левой части табл. 4 приведены характеристики каскадов из [2], в правой - наши расчеты дополнительных величин. Все значения интенсивности даны в абсолютных единицах (число квантов и совпадений на 1000 захватов нейтрона). Поэтому  $f \equiv 1$ . Нужно отметить, что при исследовании высоких уровней получать значения ветвления и связанных с ними величин по единственному каскаду особенно важно потому, что получить полный набор переходов в этой области энергии особенно трудно.

В результате расчетов по формулам раздела 1 приведен баланс приходящих на уровни и уходящих с них переходов. Значения  $\gamma_k^x$  получены согласно (6).

## 3. Замечания об использовании результатов определения значений $b_k^x$ , $F^x$ и $\gamma_k^x$ при построении схем ядерных уровней и переходов

Изложенное в п.1 позволяет дополнительно сформулировать некоторые правила, которые могут помочь при построении схем уровней и переходов.

### 3.1 Баланс интенсивности переходов для уровня $x$

Схемы переходов проверяют обычно по балансу интенсивности приходящих и уходящих переходов. Знание  $F^x$  для уровня  $x$  существенно облегчает процедуру балансирования. Известно понятие "заселяемость уровня"  $P^x$

(по-видимому, оно возникло при анализе (nn')-реакций), определяющее интенсивность возбуждения уровня непосредственно в процессе распада материнского ядра или в ядерной реакции ( $\alpha, \beta, R$ ).

$$P^x = \sum_k \dot{\gamma}_k^x - \sum_j \dot{\gamma}_j^x \quad (8)$$

$\sum \dot{\gamma}_k^x = F^x$  - см. (5). И для получения  $P^x$  необходимо измерить только интенсивность заселяющих уровень  $x$   $\gamma$ -переходов.

### 3.2. Размещение новых переходов

- Сумма значений интенсивности приходящих переходов должна быть равна  $F^x$ .
- Значения  $F^x$  (5) могут быть получены по интенсивности любого из переходов с уровня  $x$ . Если переходы расположены правильно, все значения  $F_k^x$  должны в пределах погрешности совпадать.
- Если  $\sum \dot{\gamma}_k^x < F^x$ , нужно искать дополнительные переходы.
- При  $\sum \dot{\gamma}_k^x > F^x$  некоторые переходы с суммарной интенсивностью  $\sum \dot{\gamma}_k^x - F^x$  размещены неправильно.
- То же касается и приходящих на уровень  $x$  переходов.

### 3.3. Коэффициенты ветвления

- Все переходы с уровня  $x$  известны, если  $\sum b_k^x = 1$ .
- Если вторичный переход  $\gamma_{k'}$  размещен (например, по принципу Ритца), но интенсивность совпадений с каким-либо первичным переходом для него неизвестна, то для него  $b_{k'}^x$  определяется:

$$b_{k'}^x = \frac{\dot{\gamma}_{k'}}{\dot{\gamma}_k} \cdot b_k^x \quad (9)$$

- Коэффициенты ветвления для "промежуточных" переходов в случае транскаскадов ( $b^{xi}$ ) могут быть определены по (7), если известны все остальные факторы произведения.
- Значение  $b^{xi}$  чувствительно к положению перехода в схеме.

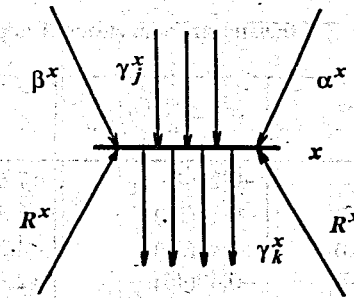


Рис.1. Схема возбуждения и разрядки уровня  $x$  (иллюстрация обозначений)

Таблица 1. Определение калибровочного фактора  $q$

$E_{\gamma_j}^x$	$E_{\gamma_k}^x$	$E^x, J^x$	$b_k^x$	$\dot{\gamma}_j^x$	$C_{jk}^x$	$q$
301,9	133,6	133,6, 2'	0,91(3)	5,55(9)	4,7(3)	1,07(8)

Таблица 2. Расчеты значений  $b_k^x$  и  $F^x$  для уровня 294,357 кэВ, 5'

$E_{\gamma_j}^{294}$	$E_{\gamma_k}^{294}$	$C_{jk}^{294}$	$\dot{\gamma}_j$	$\dot{\gamma}_k$	$b_k^{294}$	$F^{294}$
392,7	156,5	0,41(4)	0,90(7)	2,94(9)	0,46(6)	6,4(8)
314,3	156,5	0,61(4)	1,31(11)		0,47(5)	6,3(7)
226,7	156,5	0,090(3)	0,20(3)		0,43(6)	6,8(7)
224,1	156,5	0,92(3)	2,07(6)		0,440(19)	6,68(35)
средневзвешенное значение $b_1$					0,444(16)	
392,7	127,0	0,141(20)	0,90(7)	0,99(9)	0,157(25)	6,3(12)
314,3	127,0	0,184(17)	1,31(11)		0,140(17)	7,1(7)
224,1	127,0	0,297(12)	2,07(6)		0,143(8)	6,9(7)
средневзвешенное значение $b_2$					0,151(7)	
392,7	68,3	0,120(15)	0,90(7)	0,78(4)	0,133(20)	5,9(9)
314,3	68,3	0,149(13)	1,31(11)		0,114(13)	6,8(8)
224,1	68,3	0,240(13)	2,07(6)		0,116(7)	6,7(5)
средневзвешенное значение $b_3$					0,1150(27)	
средневзвешенное значение $F^{294}$					6,82(10)	

Таблица 3. Значения  $F$  и баланс интенсивностей переходов

$E^x$	$F^x$	$F^x - \sum \dot{\gamma}_{\text{уход}}^x$	$F^x - \sum \dot{\gamma}_{\text{прих}}^x$
435,5	8,8(14)	-0,2(14)	+7,6(16)
386,6	3,71(33)	-0,14(31)	+2,85(32)
376,6	6,37(48)	+0,48(50)	+4,2(5)
294,4	6,82(10)	-0,40(43)	+2,33(15)
234,5	12,6(5)	0	+6,1(5)
232,6	5,70(36)	+0,79(42)	+4,32(37)
226,1	4,04(33)	0	+0,9(6)
220,9	3,24(10)	-0,10(14)	+2,12(11)
180,4	9,2(5)	+0,8(6)	+6,6(12)
160,8	7,7(7)	-0,54(70)	+5,3(7)
151,6	8,8(6)	0	+2,9(6)
133,6	55(4)	0	+46(5)

8

Таблица 4. Анализ данных [2] по распаду компаунд-состояния 6905,59 кэВ ядра  $^{137}\text{Ba}$

$E_{\gamma_j}$	$E^x$	$E_{\gamma_k}$	$E^f$	$\dot{\gamma}_j^x$ а)	$\dot{\gamma}_k^x$	$C_{jk}$	$b_k^x$	$F^x$	$\dot{\gamma}_k^x$	$F^x - \sum_k \dot{\gamma}_k^x$	$F^x - \sum_j \dot{\gamma}_j^x$
5006,7	1899,0	1899,0	0	4,7(7)		3,8(8)	0,81(20)		18(7)	-4(10)	+17(7)
5006,7	1899,0	1614,1	283,4	4,7(7)	7,8(8)	1,3(5)	0,36(11)	22(7)			
4996,8	1908,0	1908,0	0	3,2(4)	6,6(18)	2,5(8)	0,78(27)	8,5(37)		-2(5)	+4,3(40)
4996,8	1908,0	1623,5 <sup>б)</sup>	283,4	3,2(4)	7,4(8) <sup>б)</sup>	1,6(5)	0,50(17)		4,2(27)		
4723,3	2182,2	2182,2	0	483,0(25)	13,8(10)	11,4(10)	0,024(2)	575(60)	14,6(14)	+36(50)	+126(30)
4723,3	2182,2	1898,7	283,4	483,0(25)	558,5(48)	423(30) <sup>в)</sup>	0,88(6)	609(29)			
4243,1	2662,6	2662,6	0	159,0(36)	73,6(20)	63,6(28)	0,40(2)	184(10)		+76(9)	+32(11)
4243,1	2662,6	2379,1	283,4	159,0(36)	51,3(20)	42,0(20)	0,260(13)	197(13)			
3778,5	3127,4	3127,4	0	15,5(3)	12,9(9)	6,4(4)	0,41(3)	31,5(32)		+11,7(36)	+16,0(33)
3778,5	3127,4	2843,8	283,4	15,5(3)	7,2(9)	3,4(6)	0,22(4)	33(7)			
3589,6	3316,2	3316,2	0	27,9(14)		1,0(6)	0,036(22)		1,9(12)*	+31(9)	+24(6)
3589,6	3316,2	3033,1	283,4	27,9(14)	18,6(9)	10,0(10)	0,36(4)	52,6			
3502,7	3402,6	3402,6	0	22,9(10)		1,3(10)	0,06(6)		2,5(27)	+18(7)	+21(6)
3502,7	3402,6	3118,9	283,4	22,9(10)	23,6(14)	12,2(12)	0,53(6)	44(6)			
3184,9	3720,7	3720,7	0	3,8(7)		1,8(6)	0,47(18)			1,13 $\dot{\gamma}_2$	

а)  $\dot{\gamma}$  - интенсивность  $\gamma$ -излучения

б) Кратное размещение

в) В [2] погрешность 3 ед, что, видимо, ошибочно.

9

3.4. В отдельных случаях можно определить полный коэффициент конверсии перехода по формуле

$$\alpha_{\Pi} = \frac{F^x(1 - \sum b_k^x)}{\dot{\gamma}_k^x} \quad (10)$$

#### 4. Заключение

Совместный анализ таблиц интенсивности “одиночных” спектров и “количественных спектров совпадений” позволяет определять коэффициенты ветвления, заселенности уровней и интенсивности вторичных переходов в отсутствие полного набора переходов, связанных с изучаемым уровнем.

В подавляющем большинстве работ по исследованию временных совпадений авторы публикуют лишь качественные результаты — факты совпадения или несовпадения тех или иных переходов.

Причину этого трудно объяснить. Может быть, для стандартного построения сложных схем распада значения интенсивности совпадений не имеют существенного значения.

Можно надеяться, что простые рекомендации настоящей статьи, увеличат ценность количественных данных по совпадениям.

Автор благодарен К.Я.Громову за полезное обсуждение работы.

#### Литература

- [1] Sakharov S.L., Alexeev V.L., Kondurov I.A., et al. Nucl. Phys. A. 1991. V.528. P.317.
- [2] Bondarenko V.A., Kuvaga L.L., Prokofjev P.T., et al. Nucl. Phys. A. 1995. V.582. P.1.
- [3] Бонева С.Т., Васильева Э.В., Попов Ю.П. и др. ЭЧАЯ. 1991. Т.22. С.479; 1991. Т.22. С.1431.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 мая 1996 года.