

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



B-226

11/211-78  
P6 - 11683

5375/2-78

В.М.Вахтель, Ц.Вылов, Н.А.Головков,  
Б.С.Джелепов, Р.Драйер, М.Я.Кузнецова,  
Ю.В.Норсеев, Т.И.Попова, В.П.Приходцева,  
В.Г.Чумин

РАСПАД  $^{204}\text{Po}$

1978

P6 - 11683

В.М.Вахтель, Ц.Вылов, Н.А.Головков,  
Б.С.Джелепов, Р.Драйер, М.Я.Кузнецова,  
Ю.В.Норсеев, Т.И.Попова, В.П.Приходцева,  
В.Г.Чумин

РАСПАД <sup>204</sup>Po

*Направлено в "Известия АН СССР" /сер. физ./*

Вахтель В.М. и др.

P6 - 11683

Распад  $^{204}\text{Po}$

Изучены спектры  $\gamma$ -лучей, конверсионных электронов и  $\gamma\gamma$ -совпадений при распаде  $^{204}\text{Po} - ^{204}\text{Bi}$ .

Определены мультипольности 29 переходов (из 39 обнаруженных). Предложена схема распада  $^{204}\text{Po}$ ; суммарная интенсивность 8 неразмещенных переходов меньше 10% распадов. Для пяти из 17 предложенных уровней сделаны однозначные заключения о спинах и четностях.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Wachtel V.M. et al.

P6 - 11683

The Decay of  $^{204}\text{Po}$

Spectra of  $\gamma$ -rays, those of conversion electrons and  $\gamma\gamma$ -coincidences were studied at the  $^{204}\text{Po} - ^{204}\text{Bi}$  decay. Multiplicities of 29 transitions have been determined (among 39 discovered). A scheme for the  $^{204}\text{Po}$  decay is proposed, the sum intensity of 8 undistributed transitions is less than 10 percent of decays. For five levels among 17 proposed unambiguous conclusions as to spins and parities are drawn.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является исследование возбужденных состояний  $^{204}_{83}\text{Bi}_{121}$ , возникающих при электронном захвате в  $^{204}_{84}\text{Po}_{120}$ . К 1971 г. были получены следующие сведения о распаде  $^{204}\text{Po}$ .

1) Согласно данным обзора /1/, нуклид  $^{204}\text{Po}$  распадается ( $T_{1/2} = 3,52$  ч) в 99,34% случаев в нуклид  $^{204}\text{Bi}$  ( $T_{1/2} = 11,2$  ч), имеющий сложный спектр излучения (более 200  $\gamma$ -переходов в  $^{204}\text{Pb}$ ).

2) Энергии и интенсивности  $\gamma$ -лучей были определены с погрешностями:  $\Delta E_{\gamma} = 0,2 + 0,6$  кэВ, а  $\Delta I_{\gamma} = 10 + 40\%$ . Наблюдалось расхождение в величинах  $I_{\gamma}$  для ряда переходов с  $E_{\gamma} < 500$  кэВ /1,4/.

3) Были определены мультипольности 12 переходов /2/, причем не получено однозначного вывода о типе интенсивных переходов, важных для построения схемы распада  $^{204}\text{Po}$ : 136,6, 884 и 1040 кэВ. Не определена мультипольность перехода с энергией 63 кэВ, как показали наши измерения в дальнейшем - самого интенсивного из всех известных переходов в  $^{204}\text{Bi}$ .

4) Как следствие неполноты и недостаточной точности экспериментальных данных о распаде  $^{204}\text{Po}$ , было предложено два различных варианта схемы уровней  $^{204}\text{Bi}$  /3,4/. Куш и соавторы /3/, основываясь на энергетике, мультипольностях ряда переходов и сведениях о  $\gamma\gamma$ -совпадениях, разместили 11 наиболее интенсивных переходов между следующими уровнями  $^{204}\text{Bi}$ :  $0(6^+)$ ,  $5,137(4^+)$ ,  $258(3^+)$ ,  $817(3^+)$ ,  $1021(2^+)$ ,  $1177(1^-)$ ,  $1291(1^+)$ ,  $1327(1^+)$  и  $1556(1^+)$  кэВ.

Даирики<sup>/4/</sup>, основываясь на энергетике и результатах измерения спектров  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений, предложил следующие уровни  $^{204}\text{Bi}$ : 0 ( $6^+$ ), 63,2 ( $5^+$ ), 946,8; 1217,3; 1354,6; 2233,4 ( $1^+$ ) кэВ и предположительно 183,8; 743,2; 1103,2; 1671,1 и 1888,8 кэВ.

Затем в течение длительного времени в периодической печати не появлялось сообщений об исследовании распада  $^{204}\text{Po}$ . Ввиду этого нами заново были изучены спектры  $\gamma$ -лучей, конверсионных электронов и  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений, сопровождающих распад  $^{204}\text{Po}$ . В настоящей работе подводятся итоги этих исследований, начатых в 1974 г.

## 1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ранее<sup>/5-7/</sup> для изучения спектров  $\gamma$ -лучей, конверсионных электронов и  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений нами использовались источники, полученные гетерогенным накоплением  $^{204}\text{Po}$  из  $^{208}\text{Rn}$ . Естественно, что анализ спектров сильно осложнялся присутствием линий, связанных с распадом еще одного дочернего изотопа  $^{208}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{At}$  ( $T_{1/2}=1,8$  ч), к тому же в то время недостаточно полно изученного<sup>/8/</sup>. Наши последующие исследования<sup>/9/</sup> с моноизотопными источниками показали, что в интервале 170-3000 кэВ, кроме известных 33 переходов, имеется более 150 новых переходов, сопровождающих распад  $^{208}\text{At}$ . Некоторые из них ранее<sup>/5/</sup> были ошибочно приписаны нами распаду  $^{204}\text{Po}$ <sup>/9/</sup>.

В настоящей работе при исследовании распада  $^{204}\text{Po}$  использовался моноизотоп  $^{204}\text{Po}$ , полученный при разделении на масс-сепараторе смеси изотопов полония, выделенной химическим путем из ториевой мишени, облученной протонами с энергией 660 МэВ на синхротроне Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

1.1. Спектры  $\gamma$ -лучей исследовались с помощью  $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторов объемом  $200 \text{ мм}^2 \times 5 \text{ мм}$  и  $38 \text{ см}^3$  с энергетическим разрешением ( $\Delta E$ ) соответственно 570 эВ (для  $E_\gamma \approx 100$  кэВ) и 2,3 кэВ (для

$E_\gamma \sim 1,3$  МэВ). Методика обработки экспериментальных данных описана в работах<sup>/10,11/</sup>.

1.2. Измерения спектров  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений проведены двумя  $\text{Ge}(\text{Li})$ -детекторами:  $27 \text{ см}^3$  ( $\Delta E \approx 3,5$  кэВ для  $E_\gamma \sim 1,3$  МэВ) и  $41 \text{ см}^3$  ( $\Delta E = 3,0$  кэВ для  $E_\gamma \sim 1,3$  МэВ). Временное разрешение системы составляло 50 нс. Коды событий ( $4096 \times 4096$ ) передавались на ЭВМ HP-2116 С и записывались на магнитную ленту. Обработка матрицы  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений проводилась после эксперимента путем выбора "окон"<sup>/12/</sup>.

1.3. Спектры электронов внутренней конверсии были изучены при помощи  $\text{Si}(\text{Li})$ -детектора ( $\Delta E \approx 2,5$  кэВ для  $E_e \sim 300$  кэВ; чтобы исключить сопровождающие ЭВК излучения, применялось магнитное бездисперсионное устройство) и  $\text{Si}(\text{p})$ -детектора ( $\Delta E \approx 2,1$  кэВ для  $E_e \sim 950$  кэВ)<sup>/13/</sup>. Для электронов с энергией меньше 300 кэВ мы использовали также результаты, полученные ранее<sup>/6/</sup> при помощи тороидального спектрометра<sup>/14/</sup>.

Применение высокоактивных моноизотопных источников в сочетании с методами исследования излучений при помощи полупроводниковых детекторов высокого разрешения и применение ЭВМ позволили нам получить новые сведения о распаде  $^{204}\text{Po}$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В наших опытах обнаружено 39 переходов, сопровождающих распад  $^{204}\text{Po}$ , из них 17 - впервые. Не подтвердилось существование  $\gamma$ -лучей с энергиями 218, 438, 1128 и 1323,8 кэВ<sup>/1/</sup> и 126,7 и 163,4 кэВ<sup>/4/</sup>.

Результаты многократных измерений сведены в табл. 1 и 2.

2.1. В первом и втором столбцах табл. 1 приведены средневзвешенные значения  $E_\gamma$  и  $I_\gamma$  по 4-6 сериям измерений. Погрешности  $E_\gamma$  для большинства переходов составляют 10-30 эВ, а погрешности  $I_\gamma$  -3+10%.

2.2. Связь шкал интенсивностей  $\gamma$ -лучей и конверсионных электронов осуществлена при помощи перехода

Таблица 1

Сведения о распаде  $^{204}\text{Po} \rightarrow ^{204}\text{Bi}$   
 (наши данные,  $I_{\gamma 883} = 100 \pm 2,1$ ;  $I_{K270} = 48,2 \pm 1,4$ )

$E_{\gamma}, \text{кэВ}$	$I_{\gamma}, \text{отн. ед.}$	$I_e, \text{отн. ед.}$	Мультиплеты.	$I_{\text{полн.}}$
1	2	3	4	5
$63,185 \pm 0,007$	$36,0 \pm 1,1$	$M: 56 \pm 12$ $N: 11,4 \pm 2,4$	$MI (< 6\% E2)$ $MI (< 4\% E2)$	$314 \pm 10$
$108,055 \pm 0,008$	$1,18 \pm 0,04$	$L_{1,2}: 1,16 \pm 0,24$ $L_3: 0,1$	$MI$ $MI (< 5\% E2)$	$11,3 \pm 0,4$
$116,057 \pm 0,010$	$2,36 \pm 0,07$	$K: 2,8 \pm 0,6$	$E2 (< 19\% MI),$ $E1 (+3\% E2)$	$10,0 \pm 0,3 (E2)$
$122,532 \pm 0,008$	$3,80 \pm 0,10$	$K: 16,5 \pm 2,4$ $L_{1,2}: 2,89 \pm 0,29$ $L_3: 0,2$	$MI (< 32\% E2)$ $MI$ $MI (< 7\% E2)$	$26,8 \pm 0,8$
$131,224 \pm 0,014$	$3,00 \pm 0,07$	$K: 12,4 \pm 1,2$ $L_{1,2}: 1,98 \pm 0,29$	$MI (< 6\% E2)$ $MI + E2$	$17,8 \pm 0,5$
$137,023 \pm 0,003$	$32,5 \pm 0,7$	$L_{1,2}: 19,2 \pm 1,7$ $L_3: 0,2$ $M: 4,9 \pm 0,5$	$MI (< 21\% E2)$ $MI (< 0,0\% E2)$ $MI (< 10\% E2)$	$180 \pm 5$
$152,321 \pm 0,019$	$0,89 \pm 0,07$	-	-	-
$203,561 \pm 0,010$	$9,44 \pm 0,28$	$K: (1,4)$ $L_{1,2}: 0,120 \pm 0,039$ $L_3: 0,30 \pm 0,10$	$E1 + 2\% E2$ $E1 (< 0,4\% E2)$ $E1 + M2$	$10,2 \pm 0,3$
$209,841 \pm 0,020$	$2,10 \pm 0,25$	$L_{1,2}: 0,27 \pm 0,08$ $L_3: (0,1)$	$E2 (< 14\% MI)$ $E2 (< 9\% MI)$	$3,2 \pm 0,4$
$229,942 \pm 0,030$	$2,67 \pm 0,19$	$K: 2,12 \pm 0,24$	$MI (< 10\% E2)$	$5,3 \pm 0,4$
$244,724 \pm 0,014$	$6,07 \pm 0,24$	$L_{1,2}: 0,08$ $L_3: 0,08$	$E1 (< 1\% E2)$ $E1 + M2$	$6,4 \pm 0,3$

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
$253,836 \pm 0,022$	$1,98 \pm 0,11$	$K: (1)$ $L_{1,2}: (0,2)$	$MI, MI + E2$ $MI, MI + E2$	$(3,5)$
$270,068 \pm 0,011$	$92,7 \pm 2,6$	$K: 48,2 \pm 1,4$ $L: 8,5 \pm 0,6$ $M: 2,22 \pm 0,23$	$MI (\text{принято})$ $MI (< 30\% E2)$ $MI (< 12\% E2)$	$152 \pm 4$
$304,964 \pm 0,012$	$10,9 \pm 0,4$	$K: 4,1 \pm 0,4$ $L: 0,72 \pm 0,11$	$MI (< 17\% E2)$ $MI (< 32\% E2)$	$16,0 \pm 0,6$
$309,80 \pm 0,14$	$1,84 \pm 0,16$	$K: 0,72 \pm 0,11$	$MI (< 12\% E2)$	$2,64 \pm 0,23$
$317,016 \pm 0,009$	$14,3 \pm 1,3$	$K: 5,11 \pm 0,39$ $L: 0,93 \pm 0,09$ $M: 0,222 \pm 0,034$	$MI$ $MI$ $MI (< 24\% E2)$	$19,6 \pm 1,7$
$362,14 \pm 0,04$	$4,24 \pm 0,17$	$K: (1,1)$	$(MI)$	$(5,4)$
$419,13 \pm 0,11$	$1,74 \pm 0,17$	-	-	-
$426,819 \pm 0,028$	$6,3 \pm 0,4$	$K: 1,06 \pm 0,11$ $L: 0,193 \pm 0,029$	$MI (< 6\% E2)$ $MI (< 7\% E2)$	$7,5 \pm 0,5$
$451,846 \pm 0,022$	$6,40 \pm 0,24$	$K: 0,96 \pm 0,19$	$MI (< 11\% E2)$	$8,4 \pm 0,3$
$459,90 \pm 0,05$	$3,22 \pm 0,15$	$K: (0,5)$	$(MI)$	$(3,7)$
$534,92 \pm 0,06$	$44,3 \pm 2,2$	$K: 3,47 \pm 0,26$ $L: 0,60 \pm 0,06$ $M: 0,145 \pm 0,022$	$MI (< 20\% E2)$ $MI (< 30\% E2)$ $MI (< 28\% E2)$	$48,9 \pm 2,4$
$539,5 \pm 0,4$	$4,49 \pm 0,25$	$K: 0,44 \pm 0,09$ $L: 0,087 \pm 0,024$	$MI (< 7\% E2)$ $MI$	$4,9 \pm 0,3$
$582,70 \pm 0,06$	$2,16 \pm 0,11$	$K: 0,145 \pm 0,022$ $L: 0,019 \pm 0,005$	$MI (< 22\% E2)$ $MI + E2$	$2,34 \pm 0,12$
$680,39 \pm 0,04$	$25,5 \pm 0,7$	$K: 1,25 \pm 0,15$ $L: 0,202 \pm 0,030$	$MI (< 6\% E2)$ $MI (< 14\% E2)$	$26,9 \pm 0,8$
$752,59 \pm 0,06$	$3,54 \pm 0,23$	$K: 0,17 \pm 0,04$	$MI, (E1+M2)$	$3,7 \pm 0,3$

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
762,522±0,030	33,5±1,1	K:0,159±0,027 L:0,093±0,010	E1(<1,5% E2) E1 + E2	38,7±1,2
768,10±0,27	1,23±0,26	-	-	12±0,3
817,51±0,05	2,36±0,10	K:0,029±0,005	E1+E2, E3+E1	2,4±0,1
883,900±0,025	100,0±2,1	K:0,313±0,009 L:0,043±0,009	E1(<1,4% E2) E1(<1,5% E2)	100±2
905,15±0,07	4,14±0,25	K:0,125±0,031 L:0,010±0,010	E1+E2, E1 E1+E2, E1	4,1±0,3
1003,31±0,08	1,71±0,12	K:0,034±0,010	E1, E1+E2	1,7±0,1
1016,238±0,032	80,5±1,8	K:0,108±0,029 L:0,035±0,007	E1(<1,4% E2) E1+E2	80,7±1,8
1040,007±0,036	32,1±1,1	K:0,52±0,08 L:0,101±0,020 M:0,025±0,06	E1(<15% E2) E1(43% E2)	32,7±1,1
1046,45±0,22	1,05±0,13	-	-	1,0±0,1
1177,7±0,5	0,39±0,10	K:(0,003)	(E1)	0,4±0,2
1194,35±0,14	0,44±0,06	-	-	0,4±0,1
1419,00±0,37	~0,3	-	-	~0,3
1461,13±0,20	~0,2	-	-	~0,2

270,068 кэВ. Для этого перехода экспериментальные отношения  $I_K : I_L : I_M = 100 : (17,6 \pm 1,4) : (4,6 \pm 0,6)$  близки к теоретическим лишь для мультипольностей E1 (100:16,6:4,1) и M1 (100:17,3:4,5) /15/. Если приписать переходу 270,068 кэВ мультипольность E1, то для ряда интенсивных переходов с энергиями выше 500 кэВ получаются значения  $\alpha_K$ , гораздо меньшие (в 1,5 - 15 раз) минимально возможных теоретических значений

Таблица 2

Интенсивности  $\gamma$ - $\gamma$  -совпадений при распаде  $^{204}\text{Po}$

1	2	3	4	5
63,18	137,02	3,7±0,4	3,70±0,20	
	203,56	~0,93	1,08±0,16	
	270,07	8,6±1,1	9,8±1,0	
	304,96	0,96±0,22	1,16±0,17	
	534,92	5,4±0,8	4,7±0,7	+
	680,39	4,0±0,8	3,00±0,56	
	883,96	14,0±1,4	11,5±1,4	
	1016,29	10,5±1,1	9,2±1,1	
	1040,01	~5,4	3,7±0,4	
116,06	270,07	0,85±0,17	0,98±0,06	
	534,92	0,56±0,12	0,47±0,03	
122,58	131,22	0,33±0,07	0,42±0,04	
	270,07	0,92±0,18	0,85±0,13	
	534,92	0,6±0,2	0,41±0,07	
	762,52	2,17±0,32	2,37±0,32	сл.
131,22	270,07	~0,8	1,01±0,13	
	534,92	0,62±0,12	0,48±0,07	
	762,52	1,9±0,5	2,82±0,29	
137,02	203,56	1,33±0,20	1,70±0,09	+
	270,07	7,3±0,8	8,4±0,6	сл. +
	304,96	0,93±0,14	0,99±0,08	
	534,92	4,1±0,6	4,0±0,3	
	680,39	4,3±0,5	4,61±0,22	
	883,96	17,4±1,7	18,0±0,8	с. +
	1040,01	6,1±0,7	5,80±0,30	с.
203,56	270,07	3,2±0,5	3,91±0,23	с. +
	304,96	~0,6	0,46±0,04	
	534,92	1,78±0,24	1,87±0,13	сл.
	680,39	7,2±0,9	9,0±0,5	с.

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
229,94	304,96	~I,4	1,56±0,17	
	1016,29	~I,1	0,97±0,10	
270,07	317,02	3,1±0,8	4,8±0,7	+
	680,39	3,1±0,6	3,71±0,5	
	762,52	10,2±1,3	13,7±1,1	сл. +
	883,96	39±4	41,4±2,2	с. +
	1016,29	26,9±2,7	28,7±2,3	с. +
304,96	680,39	~0,7	0,47±0,06	
	762,52	~I,2	1,62±0,14	сл.
	883,96	4,8±0,6	4,87±0,27	с.
	1016,29	3,3±0,7	3,38±0,28	с.
317,02	534,92	1,6±0,4	2,3±0,4	сл.
	762,52	9,4±1,3	13,5±1,8	с.
462,82	883,96	~2,3	2,83±0,22	
	1016,29	~I,9	1,96±0,23	
451,85	762,52	1,7±0,6	2,06±0,13	
	1016,29	4,3±0,6	4,31±0,26	
534,92	680,39	~I,6	1,92±0,24	
	762,52	6,1±0,7	6,6±0,7	сл.
	883,96	19,2±1,9	19,8±1,3	сл. +
	1016,29	14,0±1,4	13,7±1,4	с.
539,5	762,52	~I,1	1,45±0,11	
	1016,29	4,7±1,4	3,05±0,30	

а) Интенсивности экспериментальных и рассчитанных по схеме распада  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений нормированы по  $I(\gamma_{63,18})(\gamma_{137,02}) = I(\gamma_{63,18}) \times I(\gamma_{137,02}) / I(\text{полн.63,18}) = 3,70 \pm 0,20 \gamma / \text{-ед. таблицы 1.}$

б) В расчетах, соответствующих  $I_{\gamma\gamma}$ , принималось, что полная интенсивность перехода 4,7 кэВ составляет  $103 \pm 5 \gamma$ -ед. таблицы 1.

в) "с" и "сл." - соответственно сильные и слабые совпадения; "+" - совпадения "есть".

(для E1 - мультипольности). Нами принято, что переход 270,068 - типа M1, тогда  $a_K = 0,52^{1/15}$ , а  $I_{K270} = 48,2 \pm 1,4 \gamma$ -ед. (указанная ошибка включена во все значения  $I_e$ ).

2.3. Выводы о мультипольности 29 переходов сделаны путем сравнения экспериментальных КВК с теоретическими  $^{1/15}$  и приведены в 4 столбце табл. 1. Наши выводы о M1-мультипольности 5 переходов с энергиями 122,582; 304,964; 317,016; 534,92 и 680,39 кэВ согласуются с результатом работы  $^{2/2}$ , в то время как выводы о E1-мультипольности перехода 203,561 и важных для построения схемы распада  $^{204}\text{Po}$  интенсивных переходов 883,960 и 1016,288 кэВ, а также вывод о M1-мультипольности перехода 426,819 кэВ противоречат результатам  $^{2/2}$ : 205,5(M1), 884(E3(E2)), 1016(E2), 426,7(E3(E2)). Куш и соавторы  $^{2/2}$  неоднозначно определили мультипольность переходов 136,6(M1,E2) и 1140(M1(E3)), в нашей работе мультипольность переходов 137,023 и 1040,007 кэВ определена как M1. Сведения о мультипольности остальных переходов получены впервые.

Отметим, что анализ спектров конверсионных электронов, сопровождающих распад  $^{204}\text{Po}$ , сильно затрудняется сложностью спектра дочернего  $^{204}\text{Bi}$ . В частности, в области энергий выше 150 кэВ находятся конверсионные линии, соответствующие более 70 переходам в  $^{204}\text{Pb}$ . Вклад от примесных линий для переходов с энергиями 253,836; 751,59; 817,61; 905,15 и 1003,31 кэВ привел к неоднозначности выводов о типе перехода, а в случае переходов с энергиями 152,321; 419,13; 768,10 и 1046,45 кэВ совсем не удалось выделить соответствующих линий на фоне более интенсивных примесных.

2.4. Полные интенсивности переходов (последний столбец табл 1), определены по  $I_\gamma$  и теоретическим КВК для чистых мультипольностей.

Приведенные в табл. 1 интенсивности  $I_\gamma$ ;  $I_e$  и  $I_{\text{полн.}}$  можно выразить в % на распад, если предположить, что уровень с энергией 17 кэВ заселяется в 99,34% случаев распада (доля альфа-распада  $^{204}\text{Po}$  равна 0,66% /17/). Тогда  $1\gamma$ -ед. табл. 1 =  $(0,296 \pm 0,130)\%$  на распад. Кроме того, была проведена оценка этой величины на основе экспериментального значения интенсивностей рентгеновских К-лучей:  $K_{\alpha 1} = 253 \pm 12$  и  $K_{\beta 2} = 28,5 \pm 1,4$   $\gamma$ -ед. табл. 1. Отсюда, вводя поправки на рентгеновские  $K_{\alpha 2}$  и  $K_{\beta 1}$ -лучи, рентгеновские лучи, обусловленные конверсионными электронами с К-оболочки, выход флюоресценции/16/ и захват электронов с L-, M- и N-оболочек в предположении разрешенных переходов /17/, находим, что  $1\gamma$ -ед. табл. 1 =  $0,268 \pm 0,037\%$  на распад. При этом разность масс  $^{204}\text{Po} - ^{204}\text{Bi}$  принята равной 2570 кэВ /18/.

2.5. Результаты количественного анализа спектров  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений приведены в табл. 2. Экспериментальные величины интенсивностей  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений являются средними из 3-4 определений, а их погрешность - среднеквадратичной ошибкой.

Для сравнения с экспериментальными значениями  $I_{\gamma\gamma}$  в 4-м столбце табл. 2 приведены рассчитанные по нашей схеме распада  $^{204}\text{Po}$  (см. рисунок) интенсивности  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений. Экспериментальные и рассчитанные  $I_{\gamma\gamma}$  нормированы таким образом, чтобы выполнялось соотношение:  $I_{\text{эксп.}}(\gamma 63,18)(\gamma 137,02) = I_{\text{расч.}}(\gamma 63,18)(\gamma 137,02) = I_{\gamma 63,18} \times I_{\gamma 137,02} / (I_{\text{полн.}} 63,18) = 3,70 \pm 0,20$   $\gamma$ -ед. табл. 1. Ошибка нормировочного множителя - 12% - не вошла в погрешности экспериментальных  $I_{\gamma\gamma}$ . В тех случаях, когда совпадения осуществлялись через переход 4,7 кэВ, при вычислении соответствующих  $I_{\gamma\gamma}$  его полная интенсивность принималась равной  $103 \pm 5$   $\gamma$ -ед. Как видно из табл. 2, лишь в двух случаях -  $(\gamma 762,52)(\gamma 270,07; 317,02)$  - экспериментальные интенсивности  $\gamma\gamma$  -

совпадений в пределах указанных погрешностей не согласуются с расчетными. Хорошее согласие в остальных 50 случаях является убедительным количественным обоснованием предлагаемой схемы распада  $^{204}\text{Po}$ .

### 3. СХЕМА РАСПАДА $^{204}\text{Po}$

Располагая достаточно полными и точными сведениями о распаде  $^{204}\text{Po}$ , мы поставили перед собой цель выявить наиболее вероятную последовательность уровней, которая была бы совместима со всеми имеющимися сведениями об известных переходах  $^{204}\text{Bi}$ . Перебор вариантов размещения переходов и опорных уровней осуществлялся с помощью ЭВМ БЭСМ-6. Энергии и квантовые характеристики вводимых уровней определялись на базе энергий и квантовых характеристик опорных уровней, энергий и мультипольностей переходов. Эта процедура выполнялась несколько раз, с постепенным увеличением числа опорных уровней. Получаемые системы уровней проверялись на размещение остальных переходов. При введении нового уровня учитывался баланс интенсивностей, т.е. из расчета исключались случаи, приводящие к избыточному заселению уровня. Кроме того, не учитывались уровни, имеющие только одну связь с остальными.

Наиболее критичным при решении такой задачи является выбор нижних опорных уровней. Руководствуясь всей известной совокупностью экспериментальных данных, мы остановились на следующих предположениях:

- 1)  $I^\pi$  первого опорного уровня равны  $4^+$ . Его энергию, в дальнейшем принятую нами равной 17 кэВ, мы условно приняли равной нулю.
- 2) На этот уровень идет самый интенсивный переход с энергией 63,185 кэВ - типа M1 и интенсивностью 93% на распад  $^{204}\text{Po}$ , т.е. в качестве второго опорного принят уровень:  $63,185 \pm 0,007$  кэВ,  $I^\pi = 3^+ - 5^+$ .
- 3) Следующий интенсивный переход с энергией 137,023 кэВ (типа M1, с интенсивностью 53% на распад) находится в прямом каскаде с предыдущим, и мы



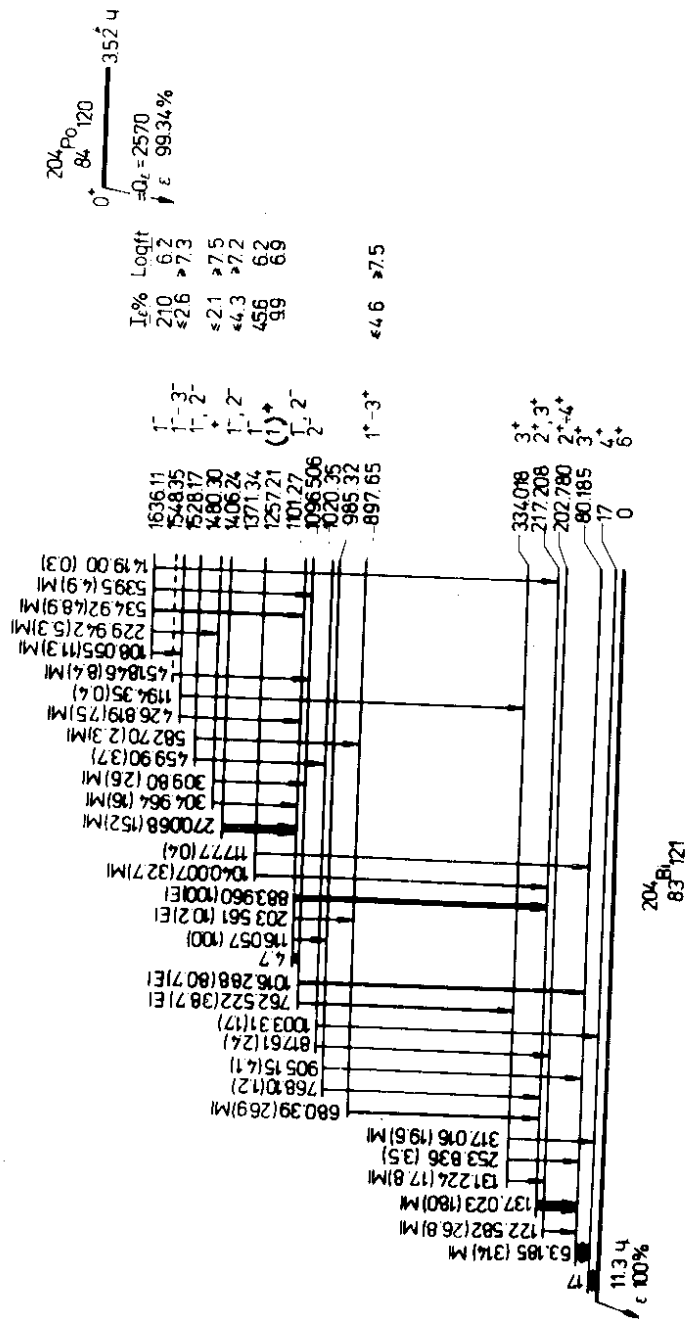


Схема распада  $^{204}\text{Po}$ . Принято, что  $I^\pi = 4^+$  для уровня 17 кэВ.

вводим уровень:  $200,208 \pm 0,008$  кэВ  $I^\pi = 2^+ - 6^+$ . Полученные сведения об уровнях  $^{204}\text{Bi}$  приведены в табл. 3.

Энергии уровней  $^{204}\text{Bi}$ . В расчетах энергия первого опорного уровня принята нами равной нулю. Им не могло быть основное состояние  $^{204}\text{Bi}$  с  $I=6^-/19^-$ , так как это приводит к неувязкам в схеме, о которых будет сказано в разделе о квантовых характеристиках уровней  $^{204}\text{Bi}$ . Мы предположили, что этот уровень имеет энергию не "0", а 17 кэВ. Перехода с энергией 17 кэВ мы не могли наблюдать в наших опытах, и основанием для введения уровня 17 кэВ являлось его возбуждение при альфа-распаде  $^{208}\text{At}/^{207}\text{Po}$ . Полученные при этом предположении значения энергий уровней  $^{204}\text{Bi}$  приведены во втором столбце табл. 3 и на схеме распада  $^{204}\text{Po}$ . Между этими уровнями не размещаются интенсивные переходы с энергиями 270,068 и 1040,01 кэВ. Обратимся к результатам измерения спектров  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений (табл. 2). Существование ряда  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений: ( $\gamma$  762,52) ( $\gamma$  304,96; 426,82; 534,92), ( $\gamma$  1016,29) ( $\gamma$  304,96; 426,82; 534,92), ( $\gamma$  131,22) ( $\gamma$  534,92) и ( $\gamma$  317,02) ( $\gamma$  534,92) приводит к необходимости предположить, что между уровнями 1101,27 и 1096,506 кэВ существует переход с энергией 4,7 кэВ. Если теперь  $\gamma$ -переход 270,068 кэВ направить на уровень 1101,27 кэВ, т.е. ввести уровень 1371,34 кэВ и принять интенсивность перехода 4,7 кэВ равной  $103 \pm 6$   $\gamma$ -ед. (при этом интенсивности  $\gamma$ -переходов, связанных с уровнями 1101,27 и 1096,506 кэВ, полностью сбалансированы), то удастся объяснить не только перечисленные выше случаи  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений, но и существование интенсивных совпадений ( $\gamma$  270,068) ( $\gamma$  762,52; 883,96; 1016,29).

Для размещения  $\gamma$ -перехода 1040,01 кэВ нами введен уровень 1257,21 кэВ, этим самым удастся объяснить наличие совпадений ( $\gamma$  1040,01) ( $\gamma$  63,18; 137,02) и сглизить дефицит интенсивности для уровня 217,21 кэВ с 15 до 5% на распад. Для уровня 217,21 кэВ получены  $I^\pi = 2^+$  или  $3^+$  и, следовательно, нельзя было ожидать, что дефицит интенсивности в 15% распадков можно объяснить существованием  $\beta$ -распада на

Таблицы 3  
Энергии и квантовые характеристики уровней  $^{204}\text{Bi}$

$E^x$ , кэВ	$E^x + I7$ , кэВ	$I^{\pi}(\sigma)$	$I^{\pi}(\nu)$
0	I7	$4^+$	$5^+$
$63,185 \pm 0,007$	80,185	$3^+$	$4^+$
$185,780 \pm 0,011$	202,780	$2^+ \div 4^+$	$3^+, 4^+$
$200,208 \pm 0,008$	217,208	$2^+, 3^+$	$3^+$
$317,018 \pm 0,012$	334,018	$3^+$	$4^+$
$880,65 \pm 0,04$	897,65	$1^+ \div 3^+$	$2^+, 3^+$
$968,32 \pm 0,14$	985,32	.	.
$1003,35 \pm 0,05$	1020,35	.	.
$1079,506 \pm 0,023$	1096,506	$2^-$	$3^-$
$1084,27 \pm 0,07$	1101,27	$1^-, 2^-$	$2^-$
	1257,21 а)	$1^+ \div 4^+$	$2^+ \div 4^+$
	1371,34 а)	$1^-$	$1^-$
$1389,24 \pm 0,11$	1406,24	$1^-, 2^-$	$2^-, 3^-$
$1463,30 \pm 0,05$	1480,30	$1^+ \div 4^+$	$1^+ \div 4^+$
$1511,17 \pm 0,11$	1528,17	$1^-, 2^-$	$1^- \div 3^-$
	1548,35 а)	$1^- \div 3^-$	$2^- \div 4^-$
$1619,11 \pm 0,28$	1636,11	$1^-$	$2^-$

а) Уровни введены на основании количественных результатов  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений.

б) Для уровня 17 кэВ приняты  $I^{\pi} = 4^+$ .

в) Для уровня 17 кэВ приняты  $I^{\pi} = 5^+$ .

этот уровень. Уровень 1548,35 введен на основании совпадений ( $\gamma$  451,35) ( $\gamma$  762,52; 1016,29).

В предложенной нами схеме распада размещен 31 наблюдаемый переход, суммарная интенсивность 8 неразмещенных переходов составляет менее 10% на распад.

Квантовые характеристики уровней  $^{204}\text{Bi}$ . Спин основного состояния  $^{204}\text{Bi}$  измерен и равен  $6/19^-$ , четность по модели оболочек ожидается положительной. Четно-четное ядро  $^{204}\text{Po}$  имеет  $I^{\pi} = 0^+$  и, естественно, при его распаде должны заселяться уровни  $^{204}\text{Bi}$  с малым значением спина. Как видно из схемы,  $\epsilon$ -захватом интенсивно заселяются два уровня: 1371,34 (45%) и 1636,11 (21%) кэВ. Значение  $\lg ft = 6,2$  для  $\beta$ -переходов на эти уровни укладывается в пределы для разрешенных и однократно запрещенных переходов. Отрицательная четность обоих уровней однозначно определяется мультипольностями связанных с ними переходов. Тогда для уровней 1371,34 и 1636,11 кэВ следует принять значения  $I^{\pi} = 1^-$ . Отсюда становится понятной необходимость введения в схему уровня 17 кэВ. Действительно, если переход 63,185 кэВ направить на основное состояние  $^{204}\text{Bi}$  с  $I = 6$ , то уровням 1371,34 и 1636,11 кэВ пришлось бы приписать спин 3, что противоречит предлагаемой схеме. Мы не располагали необходимыми аргументами для однозначного выбора квантовых характеристик уровня 17 кэВ:  $4^+$  или  $5^+$ . Были рассмотрены оба эти значения.

Полученные выводы о  $I^{\pi}$  уровней  $^{204}\text{Bi}$  на основании  $I^{\pi}$  основных состояний  $^{204}\text{Po}$  и  $^{204}\text{Bi}$ , мультипольностей переходов и предположения, что  $I = 4^+$  для уровня 17 кэВ, приведены в третьем столбце табл. 3 и на схеме распада  $^{204}\text{Po}$ . Нижний предел значений  $\lg ft = 7,2 - 7,5$  не позволяет сделать выбор  $I^{\pi}$  для соответствующих уровней  $^{204}\text{Bi}$ , которые, возможно, слабо заселяются  $\epsilon$ -захватом. Значение  $\lg ft = 6,9$  для  $\beta$ -перехода на уровень 1257,21 кэВ мало для второго и более запретов, поэтому вероятнее всего  $I^{\pi} = 1^+$  для этого уровня.

Квантовые характеристики уровней  $^{204}\text{Bi}$ , полученные в предположении, что  $I^\pi = 5^+$  для уровня 17 кэВ, даны в последнем столбце табл. 3. Следует отметить, что в этом варианте получается неувязка с уровнем 1636,11 кэВ, для которого получается  $I^\pi = 2^-$ . Этот вывод нам кажется маловероятным, т.к. значение  $\lg f_T = 6,2$  для  $\beta$ -перехода на него слишком мало для уникальных переходов первого запрета  $^{21/}$ . Спин больше 1 для уровня 1636,11 кэВ определяется  $M1$ -переходом с энергией 539,5 кэВ, который введен в схему на основании слабых совпадений ( $\gamma$  539,5) ( $\gamma$  762,52; 1016,29). Возможно, в дальнейшем, когда в схему будут включены неразмещенные в настоящее время 8 переходов, удастся переход 539,5 кэВ расположить иным способом. Тогда уровню 1636,11 кэВ можно приписать  $I^\pi = 1^-$ , что приведет к небольшим изменениям в значениях  $I^\pi$ , приведенным в 4 столбце табл. 3. Для уровня 1406 кэВ останется одно значение:  $I^\pi = 2^-$ , а для уровня 1528,17 кэВ -  $I^\pi = 1^-, 2^-$ .

#### Некоторые замечания к схеме распада $^{204}\text{Po}$

1. Главное требование, которое должно предъявляться при введении опорного уровня - это его достоверность; имеется в виду полная уверенность в существовании такого уровня, в правильности значения его энергии и характеристик  $I^\pi$ . Особенно трудным является введение самых нижних опорных уровней: при введении более высоких можно использовать большое количество идущих вниз переходов. В настоящее время мы не располагаем достоверными сведениями о нижних возбужденных состояниях  $^{204}\text{Bi}$ . Это одна из причин, по которой наш вариант схемы распада  $^{204}\text{Po}$  совершенно не согласуется с вариантами, предложенными как в работе  $^{3/}$ , так и в работе  $^{4/}$ .

2. В предложенной схеме интенсивности конкурирующих переходов с энергиями 883,960; 203,561 и 4,7 кэВ относятся как 1:0,1:1, а по одночастичным оценкам (для  $M1$ -мультипольности перехода 4,7 кэВ) получается соотношение  $1:1,5 \times 10^{-2} : 4 \times 10^{-6}$ . Отсюда следует, что  $E1$ -переходы 203,561 и 883,960 кэВ заторможены соответственно в  $4 \times 10^4$  и  $2 \times 10^5$  раз.

3. Не наблюдается аналогии в схеме уровней соседних ядер  $^{204}\text{Bi}$  и  $^{206}\text{Bi}$ . При распаде  $^{206}\text{Po}$  интенсивно заселяются уровни  $^{206}\text{Bi}$  с  $I^\pi = I^+; 931,70$  (19,4%) и 1389,45 (74,8%) и не обнаружено ни одного уровня с отрицательной четностью  $^{22/}$ . В нашем варианте схемы уровней  $^{204}\text{Bi}$  интенсивно заселяются состояния с  $I^\pi = 1^-$ . Такие состояния могли бы возникать при однократно запрещенных переходах типа  $p(s_{1/2}) \rightarrow n(p_{1/2})$ ,  $p(d_{3/2}) \rightarrow n(f_{5/2})$  и  $p(d_{3/2}) \rightarrow n(p_{1/2})$ .

Однако интерпретация состояний нечетно-нечетного ядра  $^{204}\text{Bi}$  (один протон сверх замкнутой оболочки  $Z = 82$  и нехватка 5 нейтронов до заполнения оболочки  $N = 126$ ) в рамках оболочечной модели - задача чрезвычайно сложная и выходит за рамки настоящей статьи.

В заключение авторы выражают благодарность И.И.Громовой и Ю.В.Юшкевичу за приготовление моноизотопов  $^{204}\text{Po}$ , Г.В.Винель - за участие в измерениях спектров  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений при распаде  $^{204}\text{Po}$ , и Ю.Ю.Лобанову - за участие в расчетах с помощью ЭВМ последовательности уровней  $^{204}\text{Bi}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Martin M.J. Data Sheets, 1971, 5, No. 6, p. 601.
2. Куш В. и др. ОИЯИ, Р6-4585, Дубна, 1969. ЯФ, 1970. 12,3.
3. Куш В. и др. ОИЯИ, Р6-4701, Дубна, 1969.
4. Dairiki J.M., UCRL-20412, 1970.
5. Вылов Ц. и др. Прогр. и тез. докл. XXIУ совещ. по яд. спектр. и стр. ат. ядра, "Наука", М.-Л., 1974, стр. 156.
6. Вахтель В.М. и др. Прогр. и тез. докл. XXУ совещ. по ядерн. спектр. и стр. ат. ядра, "Наука", М.-Л., 1975, стр. 151.
7. Вахтель В.М. и др. ОИЯИ, Д6-8846, Дубна, 1975, стр. 147.
8. Treytl W.J., Hyde E.K., Yamazaki T. Nucl. Phys., A117, 481, 1968.

9. Вахтель.В.М. и др. Прогр. и тез. докл. XXУ совеш. по ядерн. спектр. и структ. ат. ядра, "Наука", М.-Л., 1975, стр. 155.
10. Вылов Ц. ОИЯИ, Р6-10417, Дубна, 1977.
11. Вылов Ц. и др. ОИЯИ, Р6-11085, Дубна, 1977.
12. Андерг К. и др. ОИЯИ, Р6-8564, Дубна, 1975.
13. Вылов Ц. и др. ОИЯИ, Р6-9071, Дубна, 1975.
14. Гасиор М. и др. ОИЯИ, Д6-7094, Дубна, 1973, стр.167.
15. Hager R.S., Seltzer E.C. Nucl.Data, 1968, A4, No. 1,2.
16. Vambunek W. et al. Rev.Mod.Phys., 1972,44,p.716.
17. Джелепов Б.С. и др. В кн.: "Бета-процессы", "Наука", М.-Л., 1972.
18. Wapstra A.H., Gove N.B. Nucl.Data Tables, 1971, 9, No. 4,5, p. 265.
19. Lindgren I., Johansson C.M. Arkiy Fysik, 1959, 15, p. 445.
20. Головков Н.А. и др. ОИЯИ, Р6-4615, Дубна, 1969.
21. Зырянова Л.Н. В кн.: "Уникальные бета-переходы", "Наука", М.-Л., 1960.
22. Kanbe M., Fujioka M., Hisatake K. J.Phys.Soc. Japan, 1975, 38, p. 928.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 июня 1978 года.