

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P6-86-134

В.Н.Покровский, А.Х.Иноятов, И.А.Простаков,  
Ш.Бриансон\*, Ц.Вылов, Б.Легран\*,  
А.Минкова, А.А.Пасько

ИЗМЕРЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ШИРИН  
АТОМНЫХ УРОВНЕЙ ТУЛИЯ  
ИЗ РАСПАДА  $^{169}\text{Yb}$

Направлено в Оргкомитет 36 Совещания  
по ядерной спектроскопии и структуре  
атомного ядра, Харьков, апрель 1986 г.

\* Центр ядерной спектроскопии  
и масс-спектрометрии, Орсе, Франция

1986

## 1. Введение

В задаче определения массы антинейтрино из формы бета-спектра третья важная роль играет, как это неоднократно подчеркивалось, точное знание приборной формы линии (ПФЛ). Для определения ПФЛ обычно прибегают к измерению спектра калибровочных источников электронов внутренней конверсии (ЭВК), ПФЛ которых, вообще говоря, не совпадает с ПФЛ бета-источника. Не вдаваясь в рассмотрение всех эффектов, которые могут привести к различию в ПФЛ, упомянем лишь об учете естественной ширины линии  $\Gamma$ , неизбежной даже для идеального источника ЭВК. Роль подобного учета становится особенно важной, если производится не оценка верхней границы для  $m\bar{\nu}$ , а делается попытка проверки гипотезы об отличии  $m\bar{\nu}$  от нуля.

В эксперименте ИТЭФ-80 /1/ калибровочным источником служили  $M_1$  - линии перехода  $20,7$  кэВ при распаде  $^{169}\text{Tl}$  ( $E_0 \sim 18,4$  кэВ). К сожалению, до настоящего времени прямых экспериментальных данных по величинам  $\Gamma(M_1)$  при распаде  $^{169}\text{Tl}$  в литературе не опубликовано. Поэтому ниже мы приведем полученные нами данные о естественных ширинах ряда уровней  $T_m$ , но сначала остановимся на некоторых вопросах методики обработки данных.

## 2. Использование полуэмпирических соотношений

В идеальном случае (отсутствие взаимодействия электронов с веществом и т.п.) ПФЛ для источника ЭВК является сверткой лоренциана

$$L(E, E_0) = \frac{\Gamma}{2\pi(\Gamma/2)^2 + (E - E_0)^2} \quad (1)$$

с функцией отклика спектрометра на моноэнергетические электроны, принимаемой обычно в виде гауссиана

$$G(E, E_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(E - E_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

а именно:

$$P(E) = G * L = \int_{-\infty}^{\infty} G(E, E')L(E', E_0)dE'. \quad (3)$$

Здесь  $E_0$  - положение пика линии ЭВК,  $\Gamma$  - ширина лоренциана на полувысоте ( $\Gamma_{WHM}$ ); ширина исходного гауссиана  $R = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ .

Для ширины  $W$  свертки  $P$  часто пользуются полуэмпирическим соотношением (см. напр. [2])

$$W^n = R^n + \Gamma^n, \quad (4)$$

где  $n$  принимает значения от 1,2 до 1,3. При измеренной величине  $W$  и известной величине  $R$  (или  $\Gamma$ ) формула (4) может быть использована для определения  $\Gamma$  (или  $R$ ).

Для определения границ применимости (4) прежде всего интересен вопрос о диапазоне изменения  $n$  при разных соотношениях между  $W$ ,  $R$  и  $\Gamma$ .

Точное выражение для (3) имеет вид (см., например, [3]) реальной части комплексного интеграла ошибок

$$\omega(z) = e^{-z^2} \operatorname{erfc}(-iz), \quad (5)$$

а именно:

$$P(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \operatorname{Re} \omega(x+iy), \quad (6)$$

где  $x = E/\sqrt{2}$ ,  $y = \Gamma/\sqrt{2}$ . Для вычисления (6) можно использовать алгоритмы, основанные на вычислении  $\omega(z)$  или только реальной ее части (см., например, [4]). Как показала проверка, оба эти алгоритма дают одинаковые результаты с точностью не хуже  $10^{-10}$ .

Значения  $W$  и величина  $n$ , при которой выполняется соотношение (4), определялись путем численного решения уравнений

$$P\left(\frac{W}{2}\right) = 0,5xP(0), \quad (7)$$

$$W^x = R^x + \Gamma^x \quad (8)$$

при известных  $R$  и  $\Gamma$ . Заметим, что значения  $R$  составляли 5, 10, 20, 40 и 80 эВ, а значения  $\Gamma$  - 1, 2, 4, 8, 16, 32 и 64 эВ.

Зависимости величины  $n$  от значений  $\Gamma/R$ ,  $W/R$  или  $W/\Gamma$  приведены на рис. 1. На рис. 2 приведена зависимость относительной погрешности в определении  $\Gamma$  по известным  $W$  и  $R$

$$\Delta\Gamma/\Gamma = \frac{(W^n - R^n)^{1/n} - \Gamma}{\Gamma} \quad (9)$$

при  $n = 1,25$  и  $n = 1,3$ . Как видно из рис. 1 и 2, использование фиксированного значения  $n$  может привести к заметным погрешностям в определении  $\Gamma$  (или  $R$ ).

Следующим приближением является, по-видимому, представление в виде свертки (6) лишь правой части ПФЛ, не искажаемой процессами взаимодействия электронов с веществом. Именно этим методом мы воспользовались в наших экспериментах.

## 3. Измерение естественных ширины атомных уровней тулия из распада $^{169}\text{Tl}$

В эксперименте использовались источники  $^{169}\text{Tl}$  активностью около 140 мКи. Они изготавливались из препарата  $^{169}\text{Tl}$  высокой удельной

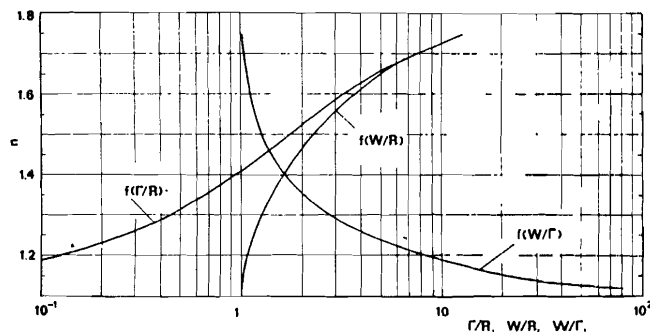


Рис. 1. Зависимость величины  $n$  в уравнении  $W^n = \Gamma^n + R^n$  от отношений  $W/R$ ,  $R/\Gamma$  и  $\Gamma/R$ .

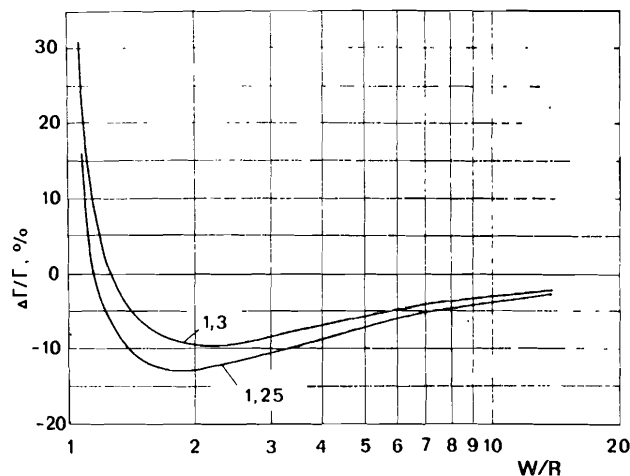


Рис. 2. Погрешность в определении  $\Gamma$  из уравнения  $\Gamma^n = W^n - R^n$  при известных  $W$  и  $R$ ,  $\Delta\Gamma/\Gamma$  (%).

активности двумя методами:

- внедрением ионов  $^{169}\text{Tl}$  в бериллиевую подложку с энергией  $\sim 500$  эВ при помощи электромагнитного сепаратора (диаметр источника - 3,5 мм);
- испарением  $^{169}\text{Tl}$  на алюминиевую подложку в вакууме (диаметр источника - 5 мм).

Кроме того, в целях калибровки и контроля изготавливались также испа-

рением в вакууме источники  $^{57}\text{Co}$  и  $^{201}\text{Tl}$ . Всего было использовано по 3 источника  $^{169}\text{Tl}$  и  $^{57}\text{Co}$ , а также источник  $^{201}\text{Tl}$ .

Измерения спектра ЭВК проводились на двух электростатических бета-спектрометрах со сферическим замедлителем и двойным цилиндрическим зеркалом /6/. Сканирование спектра осуществлялось изменением замедляющего напряжения  $U$  при постоянном напряжении анализа  $u$  (использовались значения  $u = -30$  и  $-50$  В). Характерной особенностью спектрометра в этом режиме работы является независимость величины  $R$  от энергии анализируемых электронов.

Характерные фрагменты аппаратурных спектров при различных соотношениях  $R$  и  $\Gamma$  приведены на рис. 3+7. Как видно, линии ЭВК имеют достаточно резкую границу со стороны высоких энергий и длинный низкоэнергетический "хвост", который включает в себя как непрерывные потери энергии, так и некоторые дискретные процессы типа "плазменных колебаний" или "встряски".

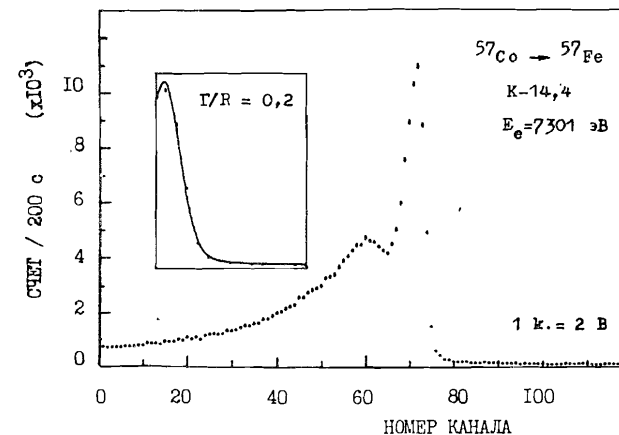


Рис. 3. Реперная линия К-14,4 ( $^{57}\text{Co}$ ), измеренная при  $u = -50$  В на электростатическом спектрометре. Сплошная кривая - свертка лоренциана ( $\Gamma = 1,25$  эВ) с функцией отклика спектрометра (гауссиан).

Для обработки спектров на ЭВМ СМ-4 была создана программа диалоговой графической оптимизации. После ввода данных с машинных носителей спектр изображается на экране графического дисплея (ГД) и производится выбор участков для обработки. Как упоминалось выше, для этого использовался правый склон линии, как правило, с захватом небольшого (2-3 канала) участка левее максимума и фонового участка. Общее число точек на одном участке обработки составляло обычно 20 - 50.

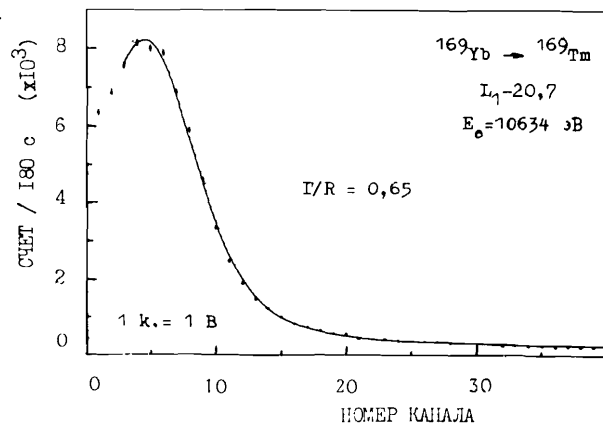


Рис. 4. Высокоэнергетическая часть линии  $L_1-20,7$  кэВ ( $^{169}\text{Tm}$ ), измеренная при  $R = 6,8$  эВ. Сплошная кривая – свертка функции отклика с лоренцианом;  $\chi^2 = 2,5$ .

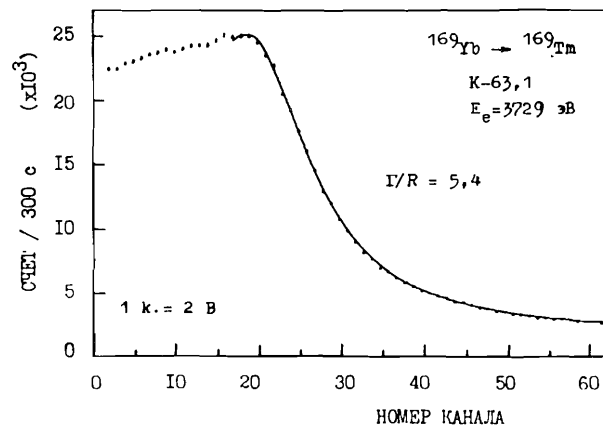


Рис. 5. Высокоэнергетическая часть линии  $K-63,1$  кэВ ( $^{169}\text{Tm}$ ), измеренная при  $R = 6,6$  эВ;  $\chi^2 = 1,08$ .

На таком участке спектр аппроксимировался суммой функции вида (6) с соответствующим множителем и постоянного фона. Таким образом, в общем случае имелось 5 свободных параметров: положение и амплитуда пика, величины  $R$  и  $\Gamma$ , уровень фона. Выбор начального приближения осуществлялся в диалоговом режиме путем задания параметров с одновре-

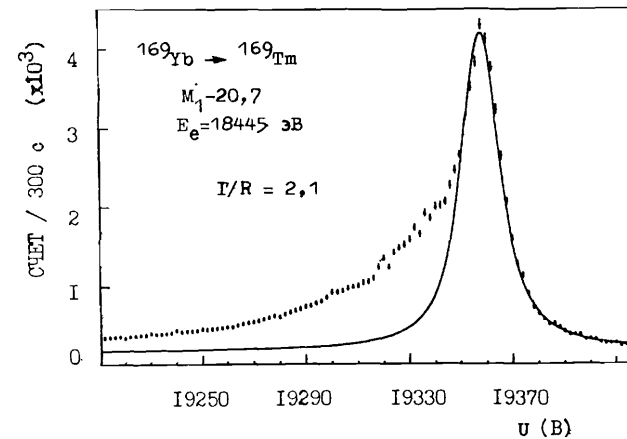


Рис. 6. Линия  $M_1-20,7$  кэВ ( $^{169}\text{Tm}$ ), измеренная при  $R = 6,6$  эВ;  $\chi^2 = 0,87$ .

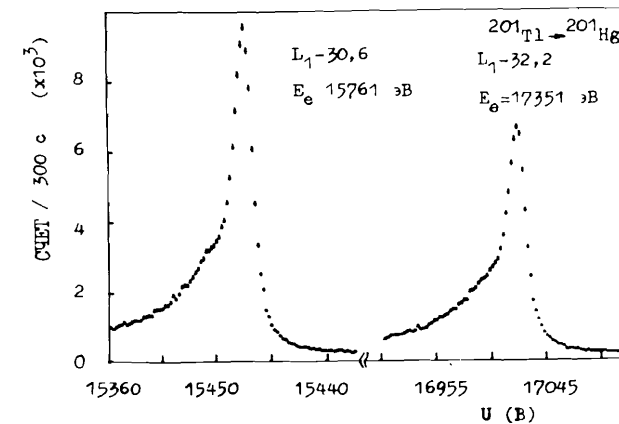


Рис. 7. Линии  $L_1-30,6$  и  $L_1-32,2$  кэВ ( $^{201}\text{Hg}$ ), измеренные при  $R = 6,8$  эВ.

менным отображением подгоняемой кривой и экспериментальных данных на экране ГД. Подобный выбор позволял существенно сократить число последующих итераций (и тем самым время обработки), когда для розыска окончательных оценок параметров и их дисперсий использовалась программа FTMILL (см., например, [7]). Заметим, что фиксирование параметров, изменение управляющих переменных и т.д. также возможно в диалоговом режиме.

Разрешение спектрометра в Дубне было определено из обработки спектров ЭВК линии  $K\text{I}4,4$  кэВ ( $E_e = 7,3$  кэВ) всех трех источников  $^{57}\text{Co}$  при фиксированном значении ширины  $\Gamma(K) = 1,25$  эВ <sup>/8/</sup>. Были получены следующие результаты:

$$u = -30 \text{ В}; \quad u = 4,9 \pm 0,3 \text{ эВ} \quad (\text{I0})$$

$$u = -50 \text{ В}; \quad u = 6,8 \pm 0,2 \text{ эВ} \quad (\text{II})$$

Здесь погрешности включают также оценку (систематической при данном напряжении анализа) ошибки, возникающей из-за возможной неточности в значении  $\Gamma$ , которая согласно <sup>/8/</sup> составляет 5%. Для нахождения этой оценки мы воспользовались тем, что из (4) легко получить

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_\Gamma} = \left(\frac{\Gamma}{R}\right)^{n-1} \quad (\text{I2})$$

где  $n$  определяется из численного решения уравнений (7) и (8).

Для проверки предположения о независимости  $R$  от энергии электронов значения  $R$  были определены также по линиям  $L_1$ -30,6 кэВ ( $E_e = 15,8$  кэВ) и  $L_1$ -32,3 кэВ ( $E_e = 17,4$  кэВ) из распада  $^{201}\text{Tl}$  при фиксированном  $\Gamma(L_1) = 11,3$  эВ <sup>/8/</sup>. Результаты подтвердили наши ожидания, но не были использованы для уточнения  $R$  ввиду заметно больших погрешностей  $\Gamma$ . Таким образом, для дальнейшей обработки спектров были выбраны значения  $R$  (I0) и (II).

Отметим, что при этом для  $L_1$ -уровней  $^{201}\text{Hg}$  мы получаем оценку

$$\Gamma(L_1 \text{ Hg}) = 11,5 \pm 0,2 \text{ эВ} \quad (\text{I3})$$

тогда как в таблицах <sup>/8,9/</sup> дается значение  $11,3 \pm 1,7$  эВ, а теоретические расчеты <sup>/10/</sup> дали величину  $12,1$  эВ.

Приведенные выше оценки и погрешности были получены в рамках следующей процедуры. Сначала обычным путем производилось объединение оценок, полученных в одной серии (при заданном напряжении анализа). Число измерений в серии составляло 2-4. К дисперсии, вычислявшейся с учетом разброса данных, добавлялась дисперсия, обусловленная неточностью в  $R$ , согласно (I2). Затем производилось объединение оценок по разным сериям (без учета слабой корреляции между ними, возникающей из-за использования одного и того же реперного источника  $^{57}\text{Co}$ ). Заметим, что в погрешность не входит ошибка принятого метода обработки, которую трудно оценить с уверенностью и которая зависит от деталей спектра.

Для определения разрешения спектрометра в Орсе ( $u = -50$  В), на котором измерения источников  $^{57}\text{Co}$  не производились при этом напряжении анализа, мы поступили следующим образом. Определив  $\Gamma$  для линии  $L_1$ -20,7 кэВ  $^{169}\text{Tm}$  (см. далее) по данным дубненского прибора, мы приняли это значение за реперное и нашли:

$$u = -50 \text{ В, Орсе}; \quad R = 6,6 \pm 0,3 \text{ эВ} \quad (\text{I4})$$

Таким образом, для определения естественных ширин уровней тулия можно было использовать три серии данных, включающих более 30 обработанных спектров.

#### 4. Результаты и обсуждение

Основные результаты измерений естественных ширин уровней  $Tm$  ( $Z = 69$ ) из распада  $^{169}\text{Tm}$  сведены в таблице I. Для сравнения там же приведены и данные других авторов. Как видно, наши данные о  $\Gamma(M_1)$  удовлетворительно согласуются с результатами работы <sup>/II/</sup>, в которой  $\Gamma(M_1)$  определялись из рентгеновских переходов типа  $L_1 M_{2,3}$  и  $M_1 N_3$ . Данные же о  $\Gamma(K)$  и  $\Gamma(L)$  удовлетворительно согласуются с полуэмпирическими расчетами <sup>/8/</sup>. В целом наши данные неплохо согласуются с компиляциями <sup>/12/</sup> и <sup>/2/</sup>, результаты которых приведены в графической форме.

В последней графе приведены значения  $\Gamma$  для экспериментов ИТЭФ, цитированные по работе <sup>/II/</sup>, погрешность результатов составляет от 0,5 до 1,0 эВ. Заметим, что в первых публикациях наблюдавшееся уширение  $M_1$ -линии по сравнению с  $M_2$ - и  $M_3$ -линиями авторы объяснили возможным вкладом  $K$ -линий некоего неизвестного гамма-перехода <sup>/1/</sup>. Позже было сделано утверждение, что при определении ПФЛ вклад  $\Gamma(M_1)$  учитывался <sup>/13/</sup>, но о методике измерений и обработки данных не сообщалось.

Таблица I. Естественные ширины уровней для  $Z = 69$  ( $Tm$ ), эВ.

В скобках даны полные ошибки

Атомный уровень	Наст. работа	Bennett et al./11/ (эксп.)	Krause et al./8/ (полуэмп.)	Keski Rahkonen/12/ (расч.)	Sevier /2/ (полуэмп.)	ИТЭФ*
K	35,5(3)	-	30,1(I0)	32	30	-
$L_1$	4,4(3)	-	5,47(80)	7	5	5,0
$L_2$	4,0(4)	-	4,49(50)	5	3	-
$L_3$	4,0(5)	-	4,48(40)	4	3	3,0
$M_1$	13,9(3)	14(3)	-	20	14	14,7
$M_2$	9,2(8)	7,1(20)	-	II	9	6,3
$M_3$	9,5(I2)	7,7(I4)	-	II	7	6,5

\* - см. текст.

Несмотря на то, что в первых экспериментах ИТЭФ  $\Gamma(M_1)$  не учитывались, оценки для величин  $m\ddot{\xi}$  во всех экспериментах менялись мало. В то же время можно отметить, что при истинной ПФЛ в виде гауссиана с  $R = 45$  эВ неучет вклада  $\Gamma(M_1)$  привел бы к значению  $R = 55$  эВ. Согласно результатам вычислительного эксперимента <sup>/14/</sup>, это привело бы к генерации массы антинейтрино порядка 20 эВ при нулевом истинном значении.

Для полноты обсуждения данных об естественных ширинах уровней тулия полезно провести сравнение с данными для соседнего элемента  $Z = 70$ . Согласно экспериментам  $^{157}/$ :  $\Gamma(K) = 32$  эВ,  $\Gamma(L_1) = 5,0(10)$  эВ,  $\Gamma(L_2) = 4,0(8)$  эВ и  $\Gamma(L_3) = 5,0(10)$  эВ. Для этих же уровней близкие результаты содержатся в полуэмпирических таблицах  $^{9}/$ . Однако данные  $^{9}/$ :  $\Gamma(M_1) = 6,5(15)$  эВ,  $\Gamma(M_2) = 5,6(14)$  эВ и  $\Gamma(M_3) = 6,9(10)$  эВ заметно ниже наших результатов, в особенности для  $M_1$ -уровня.

Таким образом, апробированный нами метод приближенной обработки изолированных линий, измеренных на спектрометре высокого разрешения, показал удовлетворительные результаты. С его помощью мы обработали и более сложные участки  $N_i$ -линий перехода 8,4 кэВ при распаде  $^{169}\text{Yb}$  и получили следующие оценки:

$$\Gamma(N_1) = 8 \pm 1 \text{ эВ}, \quad \Gamma(N_2) = 6 \pm 1 \text{ эВ}.$$

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить проф. К.Я.Громова и Р.Валена за полезные обсуждения, А.Ф.Новгородова и Н.А.Лебедева за помощь в изготовлении радиоактивных источников.

#### Литература

1. Любимов В.А. и др. ЖЭТФ, 1981, 81, с.1158.
2. Sevier K.D. "Low Energy Electron Spectrometry", Wiley Interscience, New York, 1971, p. 220-240.
3. Wilkinson D.H. Nucl.Instr.Meth., 1971, 95, p.259.
4. Gautschi W. Comm.AEM, 1969, 12, p.635.
5. Справочник по специальным функциям. Под ред. Абрамовица М. и Стиган И. "Наука", М., 1979, с.122, формула 7.1.29.
6. Briancon C. et al., Nucl.Instr.Meth. in Phys.Res., 1984, 221, p.547.
7. Силин И.Н. В кн.: Статистические методы в экспериментальной физике, Атомиздат, М., 1976, с.319.
8. Krause M.O., Oliver J.H. J.Phys.Chem.Ref.Data, 1979, 8, p.329.
9. Бабенков М.И. и др. ИЯФ АН КазССР, Препринт 6-85, Алма-Ата, 1985.
10. Craseman B. Phys.Rev A. 1974, 4, p.2161.
11. Bennett C.L. et al. Phys. Rev. C, 1985, 31, p.197.
12. Keski-Rahkonen O., Krause N.C. At. Data Nucl.Data Tables, 1974, 14, p.139.
13. Boris S. et al. Proc.Int. Europhysics Conf. on NEP (Brighton, 1983), p.386; Boris S. et al. Proc Int Conf. on NEP (Leipzig, 1984), p.259; Boris S. et al. Phys Lett., 1985, 159B, p.217; Борис С.Д. и др. Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, с.107.
14. Покровский В.Н. и др. ОИЯИ, Р6-85-405, Дубна, 1985.
15. Kaye G. Nucl. Phys., 1965, 68, p.529.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 марта 1986 года.

Покровский В.Н. и др.

P6-86-134

Измерение естественных ширин атомных уровней тулия из распада  $^{169}\text{Yb}$

На комбинированном электростатическом спектрометре были измерены низкоэнергетические конверсионные линии при распаде  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{169}\text{Yb}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ . Для получения естественной ширины высокоэнергетическая часть изолированных линий аппроксимировалась сверткой лоренциана /с шириной  $\Gamma$ / и гауссиана /шириной  $R$ / представляющего функцию отклика прибора. Величина  $R$  определялась из обработки конверсионной линии  $K_{14,4}$  кэВ при распаде  $^{57}\text{Co}$  с известным  $\Gamma(K)$ , и составляла 4,9(3) эВ и 6,8(2) эВ при разных режимах работы спектрометра. Измеренные нами естественные ширины уровней тулия  $\Gamma(K)=35,5(3)$  эВ,  $\Gamma(L_1)=4,4(3)$  эВ,  $\Gamma(L_2)=4,0(4)$  эВ,  $\Gamma(L_3)=4,0(5)$  эВ,  $\Gamma(M_1)=13,9(3)$  эВ,  $\Gamma(M_2)=9,2(8)$  и  $\Gamma(M_3)=9,5(12)$  находятся в хорошем согласии с результатами измерений рентгеновских переходов и полуэмпирическими данными.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перепод О.С.Виноградовой

Pokrovsky V.N. et al

P6-86-134

Measurement of Natural Widths of Tl Atomic Levels at  $^{169}\text{Yb}$  Decay

Spectra of low energy conversion electrons emitted in the decay of  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{169}\text{Yb}$  and  $^{201}\text{Tl}$  were analysed on a combined electrostatic spectrometer. High energy part of the conversion lines measured was approximated by folding a Lorentz distribution ( $\text{FWHM} = \Gamma$ ) with a Gaussian one ( $\text{FWHM} = R$ ) describing an instrumental line shape. The value of  $R$  was determined from the evaluation of the  $K_{14,4}$  keV conversion line of  $^{57}\text{Fe}$  where the value of  $\Gamma$  is well-known.  $R=4.9$  eV and  $R=6.8$  eV have been obtained at different operational conditions of the spectrometer. The values of natural widths of Tm atomic levels obtained from the measurements  $\Gamma(K)=35.5(3)$  eV,  $\Gamma(L_1)=4.4(3)$  eV,  $\Gamma(L_2)=4.0(4)$  eV,  $\Gamma(L_3)=4.0(5)$  eV,  $\Gamma(M_1)=13.9(3)$  eV,  $\Gamma(M_2)=9.2(8)$  eV,  $\Gamma(M_3)=9.5(12)$  eV are in good agreement with both the results of x-ray measurements and the semiempirical data.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986