

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

6-84-597

А.А.Абдуразаков¹, К.Я.Громов, Т.А.Исламов²
Г.А.Кононенко, А.Х.Холматов¹, В.М.Цупко-Ситников

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛИНИЙ
КОНВЕРСИОННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ
НА БЕТА-СПЕКТРОГРАФЕ

Направлено в сборник
"Прикладная ядерная спектроскопия"

¹ТашГУ

² НИИФ ТашГУ

1984

ВВЕДЕНИЕ

При обработке β -спектрограмм, полученных на β -спектрографе с постоянным однородным магнитным полем^{/1/}, относительные интенсивности линий конверсионных электронов /КЭ/ определяются по плотности почернения (D) фотоэмульсии, установленной в фокальной плоскости β -спектрографа. Методика определения относительных интенсивностей линий КЭ была предложена Эллисом и Вустером^{/2/} и разработана экспериментально для фотопластинок типа "Илфорд Шел-120" Слэтисом^{/3/}. Методика для фотопластинок типа Р-50 была создана в 60-е гг. Абдуразаковым и др.^{/1,4/}. Оценка достижимой точности разработанной методики^{/4/} была не хуже 20% для сильных линий КЭ в области энергии более 100 кэВ.

Одним из авторов настоящей работы были проанализированы результаты измерений относительных интенсивностей линий КЭ для нескольких нейтронодефицитных изотопов редкоземельных элементов /РЗЭ/, спектры КЭ которых измерялись как в нашей группе на β -спектрографах, так и другими авторами с помощью различных приборов ядерной спектроскопии. Результаты этого анализа показывают, что сделанные в^{/4/} оценки достижимой точности измерений в общем правильны: средний разброс величин относительных интенсивностей линий КЭ в наших работах и в работах других авторов составляет около 20%. Отметим, однако, что имеются случаи, когда интенсивности отдельных линий в нашей работе и работе других авторов отличаются в два и даже более раза. В связи с этим весьма важно дать более детальные критерии для оценки погрешностей измерений относительных интенсивностей линий КЭ и на этой основе проанализировать возможности уменьшения этих погрешностей.

Источники ошибок, связанных с качеством используемых фотоэмульсий, методами их проявления и микрофотометрирования, были рассмотрены нами ранее^{/5/}. Основной вывод состоял в том, что главными источниками погрешностей величин оптических плотностей почернения являются зернистость фотографического изображения /около 4%/ и непостоянная /до 10%/ толщина фотоэмульсий. Отмечено, что ошибки, обусловленные зернистостью изображения, могут быть уменьшены до 1% при многократном фотометрировании β -спектрограмм по разным дорожкам с помощью автоматизированного микрофотометра^{/6/}. Непостоянство толщины эмульсии вносит свой вклад в погрешность только при регистрации больших энергий электронов, когда эффективный пробег электронов в фотоэмульсии существенно больше толщины используемой эмульсии.

В настоящей работе будут рассмотрены источники ошибок, связанных с переходом от оптических плотностей почернения к отно-

сительным интенсивностям линий КЭ, а именно с нелинейной зависимостью плотности почернения от числа электронов, падающих на фотопластинку, и со спектральной чувствительностью фотоэмульсии.

1. ЗАВИСИМОСТЬ ПЛОТНОСТИ ПОЧЕРНЕНИЯ D ОТ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ

Зависимость величины оптической плотности почернения от числа квантов, электронов или других частиц, падающих на фотослой, обычно $\propto 1-4/$ представляется следующей формулой:

$$D = C \lg(1 + \epsilon N t), \quad /1a/$$

где $\epsilon N t = Q$ - величина, названная в $3/$ электронной плотностью, пропорциональная числу частиц, упавших на фотослой; N - число частиц, падающих на единицу поверхности слоя в секунду; t - время экспозиции в с; $\epsilon = \epsilon(E)$ - спектральная чувствительность эмульсии. Приведенная зависимость /1a/ может быть переписана в виде

$$Q = 10^{D/C} - 1. \quad /1б/$$

Таким образом, задача состоит в нахождении параметра C , определяющего нелинейность зависимости плотности почернения от экспозиции.

В $4/$ параметр C был определен для фотопластинок типа Р-50. В диапазоне плотностей почернения $D = 0,1-1,5$ было рекомендовано использовать значение $C = 1,81 \pm 0,05$. Методические разработки $5/$ позволили нам повысить точность измерения оптической плотности почернения в области больших $D > 1,5$. В связи с этим было желательно расширить диапазон значений D , используемых в измерениях интенсивностей линий КЭ. Зависимость $D = D(Q)$ /формулы /1a/ и /1б// была исследована для фотопластинок Р-50 в диапазоне $0,05 < D < 2,7$. Как и в $4/$, участки фотопластинок облучались через щель от источника ^{169}Yb . Экспозиции подбирались так, чтобы обеспечить получение плотности почернения D в диапазоне от 0,05 до 2,7. Из полученной зависимости $D = D(t)$ определялся параметр C . Аналогичная зависимость строилась с использованием плотностей почернения в максимумах линий КЭ ^{169}Yb : К-109,8 / $E_0 = 50,4$ кэВ/, $L_1 - 109,8$ / $E_0 = 99,7$ кэВ/, К-177,2 кэВ /127,8 кэВ/ и К-198,0 кэВ /138,6 кэВ/ при разных экспозициях фотопластинок на β -спектрографе. Значения параметра C для моноэнергетических электронов указанных энергий согласуются со значением, полученным при экспозиции от источника через щель, без разделения электронов по энергии. Таким образом, подтверждается обычно принимаемое предположение о независимости параметра C от энергии электронов.

Значение параметра C , среднее взвешенное из всех полученных значений, оказалось равным $6,2 \pm 0,2$. Эта величина значительно

отличается от величины $C = 1,81 \pm 0,05$, полученной в $4/$. Причины этого отличия нам неясны. Как и в $4/$, условия обработки /проявления/ фотопластинок были постоянными. Особое внимание было обращено на контроль постоянства толщины фотоэмульсии: отбирались пластинки с толщиной фотослоев после проявления и сушки 30 ± 1 мкм. Коэффициент усадки - отношение толщин фотослоя до проявления и после проявления и сушки, рассчитанный нами для эмульсии Р-50 по методу, описанному в $7/$, оказался равным 2,34. Таким образом, толщина эмульсии пластинок Р-50 оказалась равной $30 \times 2,34 = 70$ мкм при максимальном разбросе от партии к партии 40-120 мкм, с преобладанием толщины 70 мкм. Учитывая, однако, что энергии КЭ от источника ^{169}Yb таковы, что пробеги электронов не превышают толщины эмульсии, а также установленную независимость параметра C от энергии электронов, можно полагать, что различие в величинах C в настоящей работе и в $4/$ не связано с изменениями толщины эмульсии.

Мы полагаем, что главная причина большого отличия полученного значения $C = 6,2$ от определенного ранее в $4/$, связана прежде всего с тем, что расширен диапазон используемых плотностей почернения. Измерения проводятся в интервале $D = 0,05-2,7$ вместо $R = 0,1-1,5$. Вместе с тем мы не можем исключить тот факт, что отношения интенсивностей линий КЭ с сильно различающимися интенсивностями были в наших предыдущих работах /до 1975 г./ несколько завышены /до 50%/.

Ошибка в значении параметра $C = 6,2 \pm 0,2$ не приводит к значительным ошибкам в величинах Q и S . Возникающая по этой причине погрешность в величинах Q менее 1%.

2. СПЕКТРАЛЬНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОЭМУЛЬСИИ

Спектральная чувствительность фотоэмульсий, используемых в β -спектрографах, строится обычно $1,4/$ с использованием известных данных об относительных интенсивностях линий КЭ. При этом электронные плотности, образованные линиями КЭ различных энергий, сравниваются с известными относительными интенсивностями этих линий КЭ. Используется выражение

$$J = \frac{S \cdot \rho}{\epsilon}, \quad /2/$$

где $\epsilon = \epsilon(E)$ - искомая спектральная чувствительность фотоэмульсии; ρ - радиус кривизны траектории КЭ в β -спектрографе. Множитель ρ в формуле /2/ учитывает вертикальную расходимость пучка электронов в спектрографе; S - экспериментально измеряемая величина, сопоставляемая с интенсивностью линии КЭ, например, площадь спектральной линии $S = \int_{\rho_1}^{\rho_2} Q(\rho) \cdot d\rho$. Спектральная чувствительность $\epsilon(E)$ зависит от способа определения величины S .

Как и в /4/, мы определяли величину S , называя ее площадью спектральной линии, как произведение значения электронной плотности в максимуме с вычетом фона Q_{\max} на ширину линии на ее полувысоте:

$$S = Q_{\max} \cdot \omega.$$

/3/

В качестве фона под линией принимается значение электронной плотности в точке, отстоящей от максимума линии в сторону больших энергий на двойную полуширину. Этот способ определения S привлекателен своей простотой. Подчеркнем здесь, что до тех пор, пока мы не рассматриваем физику процессов, определяющих форму спектральной линии, выбор способа определения площади S /выбор пределов "интегрирования" по ρ / может быть достаточно произволен и должен быть установлен так, чтобы обеспечить достаточную точность.

Зависимость спектральной чувствительности от энергии линий КЭ построена с использованием одиночных, хорошо разрешенных линий КЭ следующих изотопов: ^{169}Yb , ^{135}Ce , ^{163}Tm , ^{172}Lu . Сведения, относящиеся к построению этой зависимости, представлены в таблице. В первой колонке указаны: изотоп, линии КЭ которого использованы, обозначение использованного спектрографа /см. /8/ и величина напряженности магнитного поля, при котором производились измерения. В третьей, четвертой и пятой колонках указаны энергия γ -перехода E_{γ} , идентификация линии КЭ, и энергия линии КЭ. В шестой колонке приводятся измеренные /вычисленные/ величины $S = Q_{\max} \cdot \omega$ с ошибкой. В седьмой колонке - величина радиуса ρ для электрона энергии E_e . В 8 и 9 колонках представлены литературные /9-14/ данные об относительных интенсивностях линий КЭ с соответствующими ошибками $J_e \pm \Delta J_e$. В последней колонке приведены полученные величины спектральной чувствительности с ошибками $\epsilon \pm \Delta \epsilon$. На рисунке представлена полученная таким образом кривая спектральной чувствительности для фотоэмюльсии типа P-50. Кривая существенно не отличается от полученной в /4/.

Ошибки в $\epsilon(E)$ определялись обычным образом, методом переноса ошибок по выражению /2/. Видно /см. табл./, что главный вклад в $\Delta \epsilon$ вносят погрешности в определении площадей конверсионных линий и погрешности использованных значений относительных интенсивностей линий КЭ. Ошибки определения радиуса кривизны электрона малы и их можно не учитывать. Результирующая ошибка определения спектральной чувствительности - 5-10% в интервале 100-1000 кэВ; в области малых энергий ошибки возрастают, достигая 30% при 10 кэВ. Для электронов с энергией меньше 35 кэВ спектральная чувствительность получена впервые.

Таблица
Перечень линий КЭ, использованных при построении спектральной чувствительности для фотоэмульсии типа P-50

Изотоп, спектральный граф, напряженность магн. поля	Линия КЭ	E_{γ} (кэВ)	Линия КЭ	E_e (кэВ)	S (ас)	ρ (см)	I_e	ΔI_e	E_0 (кэВ)	ϵ (ас)		
											8	9
^{169}Yb	I	63,118	K	3,728	10300 (1400)	5,57	268	52	0,0084 (19)	0,0013 (3)		
	2	8,401	M ₁	6,094	36000 (7560)	7,14	289,6	81,9	0,0350 (123)	0,0054 (19)		
	3	8,401	M ₂	6,311	12550 (2880)	7,26	95,6	27,1	0,0375 (129)	0,0058 (20)		
	4	8,401	M ₃	6,516	17500 (4030)	7,38	115,8	32,8	0,044 (16)	0,0068 (25)		
	5	20,750	L ₁	10,634	12500 (2870)	9,43	47,3	5,1	0,098 (25)	0,0151 (38)		
	6	93,613	K	34,223	29750 (1785)	17,14	54,9	2,5	0,366 (27)	0,0562 (42)		
	7	63,118	L ₁	53,002	23040 (1380)	21,52	28,9	1,0	0,675 (47)	0,1038 (72)		
	8	63,118	L ₂	54,500	10750 (650)	21,84	13,2	0,4	0,700 (48)	0,1076 (73)		
^{163}Tm	9	69,229	K	11,743	78150 (5460)	6,12	405,7	9,2	0,026 (2)	0,0120 (9)		
	10	69,229	L ₁	59,477	36225 (2530)	14,10	40,0	0,90	0,280 (21)	0,1293 (97)		
	11	69,229	L ₂	59,964	15540 (1080)	14,16	13,12	0,30	0,368 (27)	0,1693 (125)		
	12	145,213	K	87,727	3500 (280)	17,34	2,52	0,10	0,529 (41)	0,2443 (191)		

Продолжение таблицы

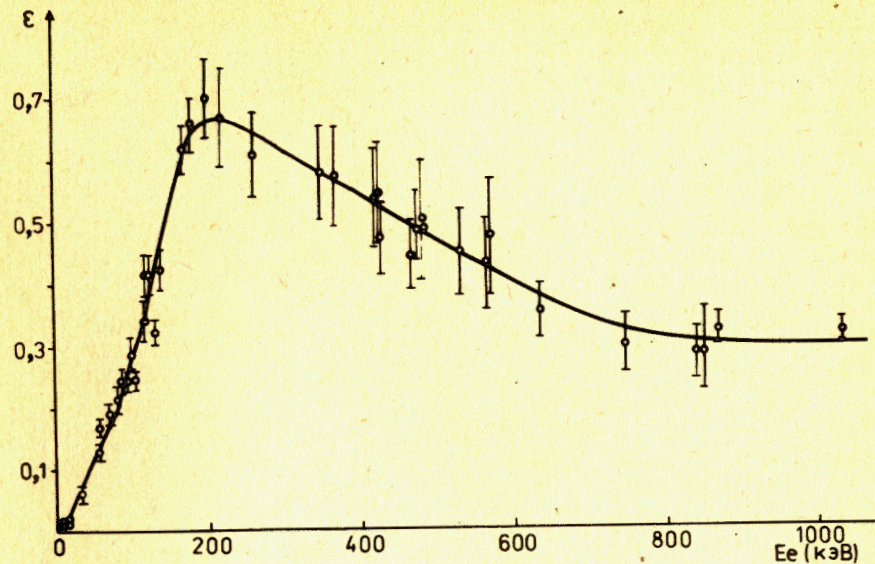
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
	I3	I04,320	L ₂	95,055	31430 (1880)	18,12	23,57	0,50	0,530 (35)	0,2478 (162)
	I4	I64,419	K	I06,933	33500 (2010)	19,31	26,70	0,90	0,532 (37)	0,2457 (171)
	I5	I90,006	K	I32,520	41200 (2470)	21,75	28,10	0,60	0,700 (46)	0,3233 (212)
								/9/		
¹⁶⁹ Yb										
Cl-2	I6	93,613	K	34,223	15600 (1010)	5,77	54,8	2,5	0,065 (5)	0,0613 (47)
H-110F _c	I7	I09,784	K	50,394	108450(7050)	7,05	263	II	0,114 (9)	0,1076 (85)
	I8	63,118	L ₁ [*]	53,002	11150 (670)	7,24	28,9	1,0	0,110 (8)	0,1038 (75)
	I9	63,118	L ₂	53,502	4130 (360)	7,27	11,0	0,4	0,107 (10)	0,1010 (94)
	20	63,118	L ₃	54,500	4510 (380)	7,35	13,2	0,4	0,099 (9)	0,0934 (85)
	21	118,191	K [*]	58,801	4210 (350)	7,64	9,2	0,5	0,137 (14)	0,1293 (132)
	22	130,525	K	71,135	26320 (2100)	8,46	43,4	2,0	0,202 (19)	0,1906 (179)
	23	93,613	L ₁	83,497	5500 (480)	9,21	8,9	0,6	0,224 (25)	0,2113 (236)
	24	I09,784	L ₁	99,668	28980 (2300)	10,14	37,9	2,3	0,305 (30)	0,2878 (283)
	25	I77,208	K	117,818	70350 (5600)	11,11	85	5	0,361 (36)	0,3406 (339)
	26	130,525	L ₂	120,907	18800 (1300)	11,27	18,8	0,7	0,443 (35)	0,4180 (330)
	28	I97,948	K	138,558	93800 (7300)	12,16	100	-	0,448 (37)	0,4227 (349)

Продолжение таблицы

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	II
	29	I77,208	L ₁ [*]	167,092	14300 (960)	13,52	11,6	0,4	0,655 (42)	0,6180 (396)
	30	I97,948	L ₁	187,832	17490 (1050)	14,46	14,2	0,4	0,700 (46)	0,6605 (434)
								/12-13/		
¹³⁵ Ce	31	206,500	K [*]	167,575	51700 (2600)	6,77	36,7	3,6	0,618 (68)	0,618 (68)
Cl-3	32	206,500	L ₁	200,233	6320 (380)	7,50	4,39	0,65	0,700 (112)	0,700 (112)
H-220 F _c	33	265,560	K	226,635	127600(7656)	8,07	100	10,1	0,668 (79)	0,668 (79)
	34	265,560	L ₁	259,293	13050 (780)	8,74	11,2	1,0	0,660 (71)	0,660 (71)
	35	300,070	K	261,145	39620 (2380)	8,78	34,75	3,5	0,649 (76)	0,649 (76)
	36	387,810	K	348,885	515 (46)	10,49	0,6	0,15	0,584 (153)	0,584 (153)
	37	518,050	K	479,125	3580 (310)	12,86	6,05	0,5	0,493 (59)	0,493 (59)
	38	572,260	K [*]	533,335	1800 (160)	13,81	3,55	0,4	0,454 (65)	0,454 (65)
	39	606,760	K	567,835	2560 (230)	14,41	5,50	0,8	0,435 (74)	0,434 (74)
								/14/		
¹⁷² Lu	40	432,544	K	371,212	3900 (230)	10,90	10,01	3,04	0,700 (217)	0,5757(1785)
Cl-3	41	482,180	K	420,848	4430 (255)	11,82	13,05	1,80	0,661 (99)	0,5436 (814)
H-220 F _c	42	486,162	K	424,830	5000 (310)	11,89	14,74	2,14	0,665 (104)	0,5469 (855)
	43	490,451	K	429,119	12800 (830)	11,96	43,86	4,50	0,575 (69)	0,4729 (567)
	44	528,266	K	466,934	22430 (1450)	12,64	85,49	9,00	0,547 (67)	0,4499 (551)

	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
45	536,194	K	474,862	3600 (210)	12,78	12,71	1,57	0,597 (81)	0,4910 (666)		
46	540,171	K	478,839	6800 (410)	12,85	23,62	4,50	0,610 (121)	0,5017 (995)		
47	594,520	K*	533,188	1500 (110)	13,81	6,19	0,90	0,552 (90)	0,4540 (740)		
48	630,688	K	569,356	1700 (136)	14,43	6,97	1,24	0,580 (112)	0,4770 (921)		
49	697,298	K	635,966	8950 (620)	15,57	52,87	5,62	0,434 (56)	0,3569 (461)		
50	810,084	K	749,752	13000 (1900)	17,46	102,36	5,62	0,366 (57)	0,3010 (470)		
51	900,730	K	839,398	16200 (2500)	18,95	143,98	6,75	0,351 (57)	0,2887 (470)		
52	912,085	K	850,753	4500 (900)	19,14	40,49	2,25	0,351 (90)	0,2887 (740)		
53	929,070	K	867,738	1620 (120)	19,41	13,16	0,56	0,3935 (344)	0,3237 (283)		
54	1093,609	K	1032,277	10700 (640)	22,08	100	-	0,3890(229)	0,3197 (188)		

Примечание: линии со звездочкой (*) использованы как нормировочные.



Спектральная чувствительность фотоэмульсии типа Р с толщиной 70 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог анализу источников ошибок при определении относительных интенсивностей линий КЭ на β -спектрографах с использованием фотоэмульсии Р-50, выполненном нами в настоящей работе и ^{1/5}, можно сказать следующее:

- погрешности определения плотности почернения фотоэмульсии не превышают 4% и при многократном фотометрировании спектрограмм по разным дорожкам могут быть уменьшены до 1% ^{1/5};

- погрешность в значении параметра $C = 6,2 \pm 0,2$, определяющего нелинейность зависимости оптической плотности почернения от экспозиции, не вносит существенной $> 1\%$ ошибки в определяемые относительные интенсивности линий КЭ;

- построенная для широкого диапазона энергий $E_e = 3 \div 1100$ кэВ зависимость чувствительности фотоэмульсии от энергии КЭ позволяет вносить поправки на спектральную чувствительность фотоэмульсии, обеспечивая при этом точность в пределах 5-10% в области $50 \div 1100$ кэВ, и до 30% в области меньше 50 кэВ;

- величина ошибки в определении отношений интенсивностей близко лежащих L_1 -, L_2 - и L_3 -линий, не превышает 4-5%, так как в этом случае ошибки за счет флуктуации толщины фотослоя, радиуса кривизны траектории электронов и поправки на спектральную чувствительность незначительны, и, естественно, их можно не учитывать;

- следует особо подчеркнуть необходимость поддержания постоянства параметров фотоэмульсии, неизменность условий обработки фотопластинок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуразаков А.А., Громов К.Я., Умаров Г.Я. Бета-спектрографы с постоянными магнитами". "Фан", Ташкент, 1970.
2. Ellis C.D., Wooster W.A. Proc.Roy. Soc., 1927, A114, p. 266, 729.
3. Slatik H. Arkiv för Fysik, 1954, 8, p. 4441.
4. Абдумаликов А.А. и др. Изв. АН УзССР, сер.физ.-мат.наук, 1962, т. 1, с. 37.
5. Абдуразаков А.А. и др. ОИЯИ, Р6-81-699, Дубна, 1981.
6. Исламов Т.А. и др. ОИЯИ, Р10-12794, Дубна, 1979.
7. Ротблат Дж., Таи С. В сб.: Фотографическая регистрация ионизирующих излучений. "Иностран.лит-ра", М., 1953.
8. Абдуразаков А.А. и др. ОИЯИ, 6-4363, Дубна, 1969.
9. Балалаев В.А. и др. Изобарные ядра с массовым числом $A=169$, "Наука", Л., 1976, с. 87.
10. Хольнов Ю.В. и др. В кн.: Прикладная ядерная спектроскопия, вып.8, Атомиздат, М., 1977, с. 20.
11. Вылов Ц. и др. Спектры излучений радиоактивных нуклидов, "Фан", Ташкент, 1980.
12. Nagai Y. et al. Jour.Soc.Japan, 1974, 36, No 6, p. 1501.
13. Henry E.A. et al. Phys.Rev., 1975, 12 No 4, p. 1321.
14. Балалаев В.А. и др. Изв. АН СССР, сер.физ., 1972, 36, с. 71.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 августа 1984 года.

Абдуразаков А.А. и др. 6-84-597
Погрешности определения относительных интенсивностей линий
конверсионных электронов на бета-спектрографе

Рассмотрены источники ошибок при определении относительных интенсивностей конверсионных электронов, связанных с нелинейной зависимостью плотности почернения от числа электронов, падающих на фотопластинку, и со спектральной чувствительностью фотоэмульсии.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Abdurazakov A.A. et al. 6-84-597
Errors at Determining Relative Intensities of Conversion
Electron Lines on the Beta-Spectrograph

Origins of errors at determining relative intensities of conversion electrons connected with nonlinear dependence of blackening density upon the number of electrons falling on a photoplate, and on the spectral sensitivity of photoemulsion are considered.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984