

С 343Г

В-17

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P - 2158



ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Ван Най-янь, Э.Н. Каржавина, А.Б. Попов,
Ю.С. Язвницкий, Яо Чи-чуань

НЕЙТРОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ
ИЗОТОПОВ ИТТЕРБИЯ

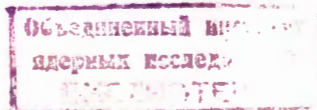
*Intern. Conf. on the Study
of Nucl. Structure with
neutrons. Antwerp, 1965
Rep. ... Dubna 1965, p. 11-16. (...? - 2214)
1965*

P-2158

3349/1, 2P
Ван Най-янь, Э.Н. Каржавина, А.Б. Похов,
Ю.С. Язвицкий, Яо Чя-чуань

НЕЙТРОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ
ИЗОТОПОВ ИТТЕРБИЯ

Направлено в журнал "Ядерная физика"



На нейтронном спектрометре Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований^{/1/}, действующем на базе реактора ИБР^{/2/}, были проведены измерения кривых пропускания и кривых выхода захватных гамма-лучей для нескольких образцов из естественного иттербия и из иттербия, обогащенного различными изотопами.

Кривые пропускания измерялись с помощью жидкостного детектора с метилборатом,^{/3/} имеющего полезную площадь 500 см^2 и эффективность к нейтронам энергии 100 эв около 50%. Кривые выхода захватного γ -излучения измерялись с помощью двух сцинтилляционных счетчиков с кристаллами NaI(Tl) размером 100×100 мм. Счетчики располагались в пучке нейтронов в защите из свинца и парафина с бором, от рассеянных образцом нейтронов кристаллы экранировались также парафином с бором. Отметим, что энергетическое разрешение счетчиков составляло примерно 10% на линии γ -лучей Zn^{65} . Импульсы со счетчиков суммировались, порог регистрации γ -лучей был установлен 600 кэв.

Измерения пропускания были выполнены в диапазоне от 6 до 150 эв с шестью образцами из естественного иттербия в форме Yb_2O_3 . Толщина образцов была $2,64 \cdot 10^{22}$; $8,81 \cdot 10^{21}$; $4,81 \cdot 10^{21}$; $2,12 \cdot 10^{21}$; $1,13 \cdot 10^{21}$ и $5,83 \cdot 10^{20}$ ядер иттербия на см^2 площади образца. Методика измерений и вычисления кривой пропускания (с ошибками) на электронно-вычислительной машине достаточно подробно описаны в работе^{/4/}. Статистические ошибки пропускания для разных образцов составляют 1,5–2,5%. Измерения кривых выхода захватного γ -излучения были проведены в области от 3 до 150 эв с образцом из естественного иттербия толщиной $2,38 \cdot 10^{21}$ ядер/ см^2 и с образцами из изотопов Yb^{171} , Yb^{172} , Yb^{173} , Yb^{174} , Yb^{176} в виде Yb_2O_3 . Формы для образцов были изготовлены в виде дисков диаметром 30 мм. Их характеристики приведены в таблице 1. Изотопов Yb^{168} и Yb^{170} не имелось в количестве, достаточном для изготовления образцов, поэтому измерений с ними не проводилось.

Измерения с изотопами позволили произвести изотопическую идентификацию 40 из 42 обнаруженных резонансов, и это, в свою очередь, дало возможность впервые определить параметры соответствующих уровней изотопов иттербия. Изотопическая принадлежность резонансов определялась в подавляющем большинстве случаев по наличию резонанса на кривой выхода захватных γ -лучей для данного изотопа при одновременном отсутствии этого резонанса на кривых для других изотопов. В качестве примера на рис. 1 приведен участок кривых выхода γ -лучей от захвата нейтронов для образцов из естественного Yb , из Yb^{171} и из Yb^{173} .

В энергетической области от 3 до 150 эв Yb^{171} приписано 22 резонанса, Yb^{173} - 16 резонансов, Yb^{172} - один резонанс; резонансов, принадлежавших Yb^{174} и Yb^{176} не обнаружено. Три резонанса (при 22,6; 40,3 и 73,2 эв) не могут быть приписаны ни одному из изотопов Yb^{171} , Yb^{172} , Yb^{173} , Yb^{174} и Yb^{176} . Эти резонансы дали четкие пики на кривой выхода захватных γ -лучей для естественного иттербия. Два из них (40,3 и 73,2 эв) дали на кривых пропускания (естественный иттербий) провалы более глубокие, чем многие идентифицированные резонансы. Однако и эти два резонанса, и более слабый резонанс при 22,6 эв едва наметились на кривых захватных γ -лучей для Yb^{171} и Yb^{173} и совсем не заметны на кривых для других изотопов, с которыми велись измерения. В то же время эти резонансы не могут быть приписаны каким-либо примесям, так как у всех примесей, возможных в использованных образцах естественного иттербия и имеющих резонансы вблизи трех указанных энергий, есть гораздо более сильные резонансы при других энергиях и эти более сильные резонансы не проявились в наших измерениях. Три указанные резонанса следует, очевидно, приписать изотопам Yb^{168} и Yb^{170} . При этом резонанс 40,3 эв, скорее всего, принадлежит Yb^{170} . В пользу этого заключения говорит следующее. Резонанс 40,3 эв хорошо виден на γ -лучах от образца естественного иттербия, значительно слабее при измерениях с образцом Yb^{171} и почти не заметен при измерениях с образцом Yb^{173} . Это коррелирует с изменением содержания Yb^{170} в данных образцах (3%, 0,8% и 0,1% соответственно). Содержание Yb^{168} во всех трех образцах примерно одинаково (0,1%). В предположении, что резонанс 40,3 эв принадлежит Yb^{170} , получены его параметры методом площадей по кривым пропускания для 3 толщин образцов.

Определение параметров резонансов на основе изотопической идентификации резонансов производилось различными способами. В тех случаях, когда резонансы были достаточно сильны и могли быть хорошо отделены от соседних резонансов, обычным методом площадей определялись значения $g\Gamma_n$ и Γ резонанса. Как правило, по кривым пропускания вычислялась не полная площадь резонанса, а ее часть без учета "крыльев". Поправка на крылья вводилась по формуле $\Delta A = \frac{\pi \sigma_0 \Gamma^2}{4} \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} \right)$, где ϵ_1 и ϵ_2 - есть модули разностей резонансной энергии и граничных энергий, между которыми подсчитывалась площадь. При этом использовался метод последовательных приближений, благодаря чему достигалась необходимая точность. Нахождение параметров резонансов по данным о площадях резонансных провалов для образцов разных толщин велось на электронно-вычислительной машине методом наименьших квадратов с использованием теоретических выражений, не учитывающих интерференции между потенциальным и резонансным рассеянием и между соседними резонансами. Программа расчетов ^{1/5/} предусматривала выдачу значений Γ и $g\Gamma_n$, а также соответствующих среднеквадратичных погрешностей $\sigma(\Gamma)$ и $\sigma(g\Gamma_n)$ и значения χ^2 . Ошибки, приведенные в сводке параметров резонансов (таблица 2), увеличены согласно требованиям метода наименьших квадратов на фактор $\sqrt{\frac{\chi^2}{n-2}}$, где n - число образцов.

Описанным выше методом определены параметры резонансов 13,13; 28,2; 41,5; 60,4 эв Yb^{171} и резонансов 17,8; 31,8; 45,5; 59,0 и 66,7 эв Yb^{173} . Для всех этих резонансов $g\Gamma_n \ll \Gamma$, поэтому предположение $g = \frac{1}{2}$ обеспечивало достаточную точность определения Γ_γ на основе соотношения $\Gamma_\gamma = \Gamma - 2g\Gamma_n$. Усреднение радиационных шири по перечисленным выше резонансам привело к значениям $\bar{\Gamma}_\gamma = 84 \pm 11$ мэв и $\bar{\Gamma}_\gamma = 77 \pm 7$ мэв для Yb^{171} и Yb^{173} соответственно. Эти значения были использованы позже для нормировки отсчетов детектора захватных гамма-лучей.

В тех случаях, когда на естественной смеси изотопов можно было достаточно надежно отделить резонанс от соседних резонансов, но резонанс был слабым, по кривым пропускания определялись лишь значения $g\Gamma_n$ (площадь резонансного провала на кривой пропускания для тонкого образца равна $2\pi^2 n \lambda_0^2 g \Gamma_n$, где n — число ядер на cm^2 образца, λ_0 — длина волны нейтронов резонансной энергии). К этой категории резонансов относятся резонансы 21,8; 34,7; 65,0; 69,1 эв.

Параметры резонансов, плохо разделяющихся на образцах из естественного иттербия, определялись по кривым выхода захватных γ -лучей, измеренных на изотопах. При этом проделывалась следующая процедура. Сначала по сумме отсчетов в резонансе на кривой радиационного захвата (эта сумма связана с нейтронным потоком $\Pi(E)$, параметрами резонанса Γ и Γ_γ , площадью резонанса на кривой пропускания образца той же толщины A и эффективностью регистрации акта радиационного захвата соотношением $(\sum N_i)_k = \Pi(E_{\alpha k}) \epsilon_\gamma \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma} A$, где k — номер резонанса) для резонансов, для которых по кривым пропускания были определены Γ_γ , Γ и $g\Gamma_n$, вычислялись значения произведений $\Pi(E_{\alpha k}) \epsilon_\gamma$. По этим произведениям с помощью экспериментальной кривой зависимости потока нейтронов Π от энергии x , в предположении, что ϵ_γ не изменяется от резонанса к резонансу, находились значения произведений $\Pi(E_{\alpha k}) \epsilon_\gamma$ для тех резонансов, параметры которых следовало определить. После этого находились частные $\frac{(\sum N_i)_k}{\Pi(E_{\alpha k}) \epsilon_\gamma} = \frac{\Gamma_\gamma}{\Gamma} A$ для этих резонансов и с помощью графиков Юза определялись $g\Gamma_n$. При данной операции использовались средние значения радиационных шири изотопов Γ_γ , определенные ранее. В тех случаях, когда значения $g\Gamma_n$ оказывались большими, в результате вводились поправки на резонансный захват после рассеяния по методу, предложенному в работе ^{17/}.

Полученные параметры уровней приведены в таблице 2. На рис. 2 и 3 изображены интегральные распределения приведенных нейтронных шири резонансов Yb^{171} и Yb^{173} . Экспериментальные распределения согласуются с теоретическими распределениями Портера-Томаса (χ^2 — распределение с $\nu = 1$), если считать, что при измерениях с каждым из изотопов Yb^{171} и Yb^{173} пропущено 3-4 резонанса.

^{x/} Такая кривая была измерена в группе Л.Б. Пикельнера с помощью пропорциональных борных счетчиков.

При разрешении 0,04 - 0,06 мксек/метр пропуск такого количества резонансов представляется естественным. Графики зависимости числа обнаруженных уровней от энергии (рис. 4 и 5) имеют линейный характер (до 130 эв у Yb^{173} и до 100 эв Yb^{171}) и подтверждают, что в экспериментах не было пропущено значительного количества уровней. Среднее расстояние между уровнями согласно графикам оказывается равным $5,8 \pm 1,3$ эв для Yb^{171} и $8,5 \pm 1,5$ эв для Yb^{173} без поправок на пропущенные уровни и $5,5 \pm 1,3$ и $7,3 \pm 1,5$ эв с учетом поправок. Поскольку массы ядер Yb^{171} и Yb^{173} близки и близки энергии связи нейтронов в Yb^{172} и Yb^{174} (8,0 Мэв и 7,5 Мэв соответственно), а спины Yb^{171} и Yb^{173} различны (1/2 и 5/2 соответственно), данные о средних расстояниях между уровнями позволяют получить оценку параметра σ в формуле Бете для плотности уровней

$$\rho = \frac{c(2J+1)}{U^2} \exp\left[-\frac{J(J+1)}{2\sigma^2}\right] \exp(2\sqrt{aU}),$$

где U - энергия возбуждения ядра, а σ , c , a - некоторые константы. Если считать, что c и a одинаковы для Yb^{171} и Yb^{173} , то для σ получаем значение 2,5, которое согласуется с данными, полученными другими методами (см. обзор /8/). При вычислении σ значение a было взято из работы /8/. Если допустить при этом различие в значениях a для Yb^{171} и Yb^{173} в пределах 10%, то можно получить соответствующие границы параметра σ ($\sigma = 2,5^{+1,8}_{-1,3}$).

Графики зависимости $\Sigma 2g_n^0$ от энергии (рис. 6 и 7) позволяют определить силовые функции (в предположении, что числа резонансов со спином $1 + 1/2$ и $1 - 1/2$ одинаковы) $S_0^{171} = (1,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$ и $S_0^{173} = (2,4 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$. Погрешности этих значений вычислены в предположении справедливости распределения Портера-Томаса для нейтронных ширин и распределения Вигнера для расстояний между уровнями.

В заключение авторы выражают свою признательность Н.Ю. Шриковой и И.И. Шелонцеву за помощь в обработке экспериментальных данных.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И. Забиякин, Л.Б. Пикельнер и др. Характеристики ИБРа как нейтронного спектрометра. Материалы рабочего совещания по физике медленных нейтронов, 7-12 декабря 1961 г. Препринт ОИЯИ, 858, Дубна, 1962.
2. Г.Е. Блохин, Д.И. Блохинцев и др. Атомная энергия, 10, 437 (1961).
3. И. Визн, Г.П. Жуков и др. Nuclear Electronics, 1, 27, IAEA, Vienna, 1962.
4. Ван Най-янь, И. Визи и др. ЖЭТФ, 45, 1743 (1963).
5. Э.Н. Каржавина, А.Б. Попов и др. Препринт ОИЯИ, Р-2198, Дубна, 1965.

6. В.Н. Ефимов, И.И. Шелонцев. Препринт ОИЯИ, Р-641, 1981.

7. J.E.Draper. Nucl.Sci. and Eng., N 6, 552 (1956).

8. J.A.Harvey, Neutron time-of-flight Methods, 23, EAEC, Brussels, 1961.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 мая 1985 г.

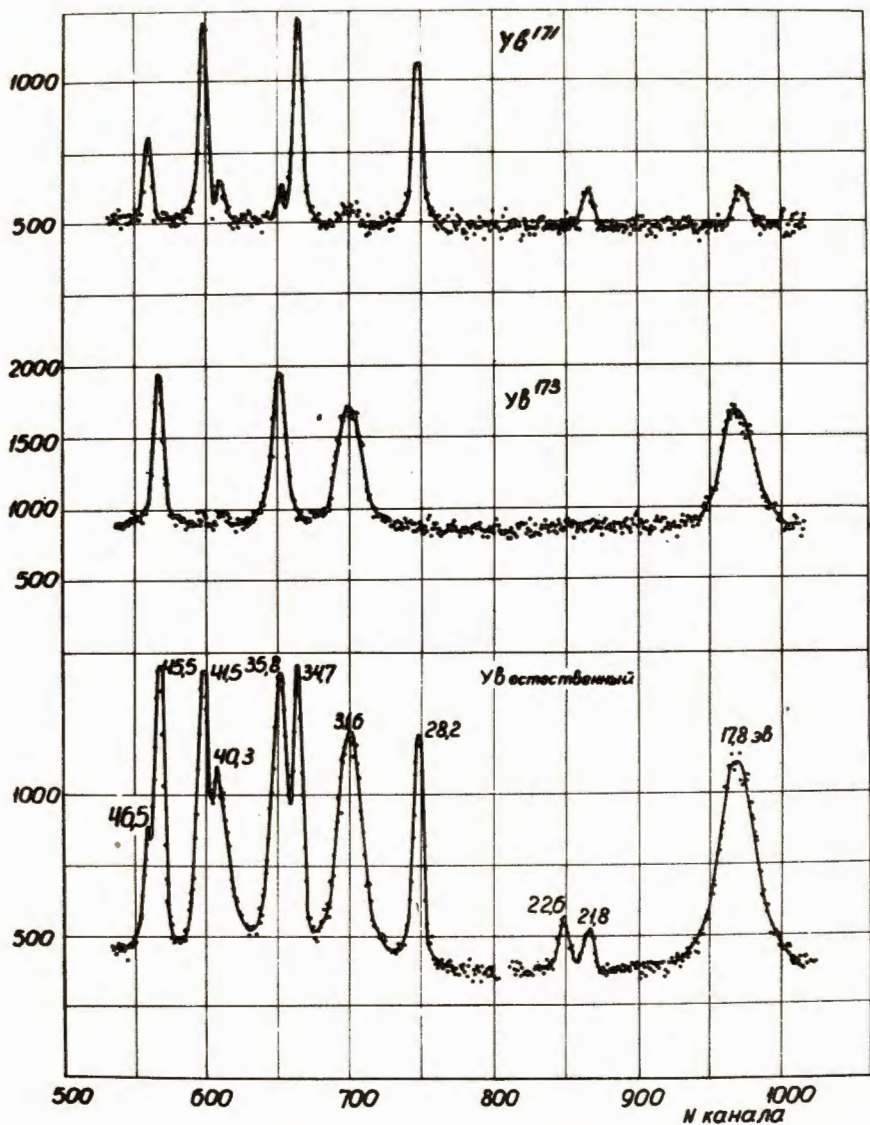
Таблица 1

ОСНОВНОЙ ИЗОТОП	Толщина образца ядер изотопа/см ²	% обогащения
Yb ¹⁷¹	$1,21 \cdot 10^{21}$	95%
Yb ¹⁷¹	$2,55 \cdot 10^{21}$	90%
Yb ¹⁷³	$3,18 \cdot 10^{21}$	90%
Yb ¹⁷³	$1,97 \cdot 10^{21}$	77,6%
Yb ¹⁷⁴	$3,15 \cdot 10^{21}$	96%
Yb ¹⁷⁶	$1,76 \cdot 10^{21}$	90%

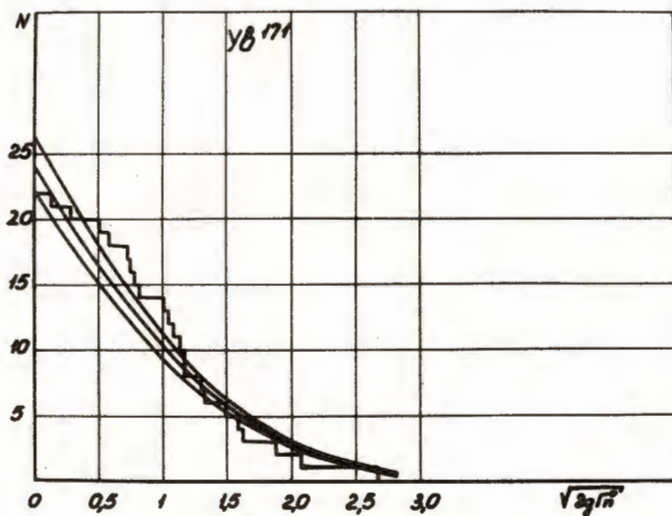
Таблица 2

Параметры резонансов изотопов иттербия

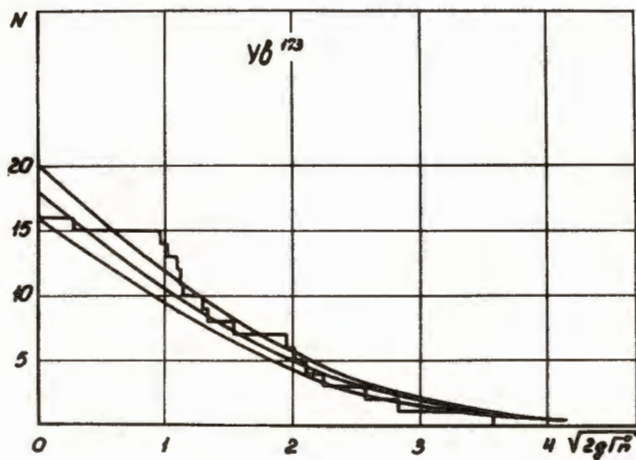
№ п/п	$E_0, \text{эВ}$	Изотоп	$\Gamma, \text{мэВ}$	$\Gamma_n, \text{мэВ}$	$2\sigma, \text{°}$
1	$7,93 \pm 0,02$	171		$1,44 \pm 0,17$	$1,03 \pm 0,12$
2	$8,13 \pm 0,02$	171			$0,34 \pm 0,04$
3	$8,85 \pm 0,04$	171		$0,49 \pm 0,06$	$0,017 \pm 0,007$
4	$13,13 \pm 0,07$	171	93 ± 10	$0,025 \pm 0,010$	
5	$21,8 \pm 0,1$	171		$2,5 \pm 0,1$	$1,38 \pm 0,06$
6	$28,2 \pm 0,1$	171	70 ± 10	$0,19 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,013$
7	$34,7 \pm 0,2$	171		$1,8 \pm 0,1$	$0,68 \pm 0,04$
8	$41,5 \pm 0,2$	171	168 ± 70	$3,8 \pm 0,8$	$1,3 \pm 0,3$
9	$46,5 \pm 0,3$	171		$7,2 \pm 0,7$	$2,2 \pm 0,2$
10	$53,2 \pm 0,3$	171		$0,90 \pm 0,15$	$0,26 \pm 0,04$
11	$54,4 \pm 0,3$	171		5 ± 1	$1,4 \pm 0,3$
12	$60,4 \pm 0,4$	171	143 ± 36	16 ± 3	$4,3 \pm 0,8$
13	$65,0 \pm 0,4$	171		$4,3 \pm 0,3$	$1,10 \pm 0,08$
14	$77,3 \pm 0,6$	171		7 ± 1	$1,74 \pm 0,25$
15	$82,6 \pm 0,6$	171		11 ± 2	$2,5 \pm 0,5$
16	$84,7 \pm 0,7$	171		$2,4 \pm 0,3$	$0,53 \pm 0,07$
17	$96,1 \pm 0,8$	171		$2,5 \pm 0,4$	$0,54 \pm 0,09$
18	108 ± 1	171		$3,0 \pm 0,4$	$0,61 \pm 0,08$
19	113 ± 1	171		37 ± 7	$7,1 \pm 1,4$
20	$128 \pm 1,2$	171		14 ± 3	$2,6 \pm 0,5$
21	$141 \pm 1,4$	171		20 ± 5	$3,5 \pm 0,9$
22	$147 \pm 1,5$	171		10 ± 2	$1,7 \pm 0,3$
23	$4,53 \pm 0,01$	173		7 ± 2	$1,2 \pm 0,3$
24	$17,80 \pm 0,07$	173	100 ± 10	$0,082 \pm 0,009$	$0,077 \pm 0,006$
25	$31,6 \pm 0,15$	173	165 ± 14	14 ± 1	$6,6 \pm 0,5$
26	$35,8 \pm 0,2$	173		36 ± 3	$12,8 \pm 1,1$
27	$45,5 \pm 0,2$	173	104 ± 16	24 ± 4	$8,0 \pm 1,3$
28	$53,8 \pm 0,3$	173		$15 \pm 1,4$	$4,4 \pm 0,4$
29	$59,0 \pm 0,4$	173	141 ± 65	$6,6 \pm 1,2$	$1,8 \pm 0,3$
30	$66,7 \pm 0,5$	173	143 ± 24	$4,0 \pm 0,7$	$1,0 \pm 0,2$
31	$69,1 \pm 0,5$	173		$15,6 \pm 1,2$	$3,8 \pm 0,3$
32	$74,8 \pm 0,6$	173		$5,3 \pm 0,7$	$1,3 \pm 0,2$
33	$76,7 \pm 0,6$	173		$4,1 \pm 0,7$	$0,95 \pm 0,12$
34	$97,5 \pm 0,8$	173		18 ± 3	$4,1 \pm 0,7$
35	106 ± 1	173		$6,4 \pm 0,8$	$1,3 \pm 0,2$
36	112 ± 1	173		26 ± 5	5 ± 1
37	$125 \pm 1,2$	173		$5,4 \pm 0,8$	$1 \pm 0,2$
38	$130 \pm 1,2$	173		$9,4 \pm 1,4$	$1,7 \pm 0,2$
39	$40,3 \pm 0,2$	170	306 ± 46	$13,6 \pm 1,8$	$2,4 \pm 0,3$
40	$73,2 \pm 0,5$	170?		197 ± 14	31 ± 2
41	$22,6 \pm 0,1$			77 ± 12	$9,0 \pm 1,4$
42	$141 \pm 1,5$	172			



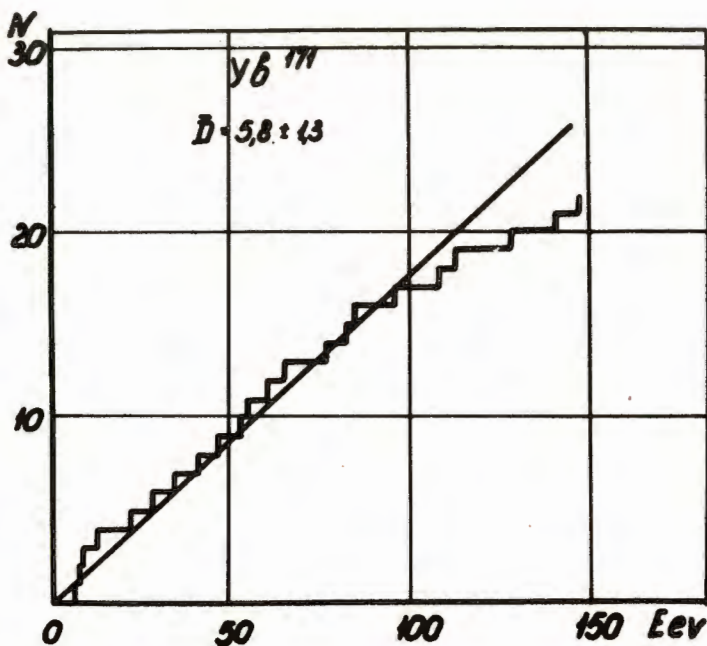
Р и с. 1. Участок временного спектра выхода захватных гамма-лучей, полученный для образцов из естественного иттербия и обогащенных изотопами Yb^{171} и Yb^{173} .



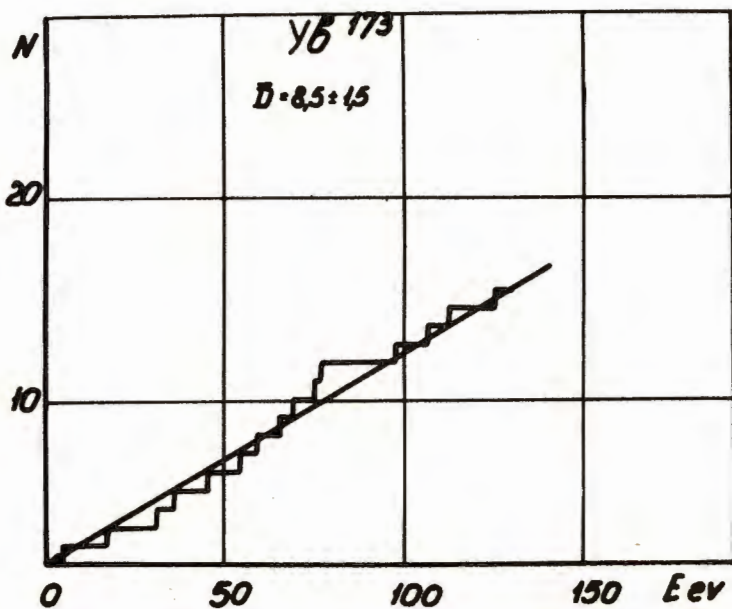
Р и с. 2. Интегральное распределение приведенных нейтронных шири для резонансов Yb^{171} .



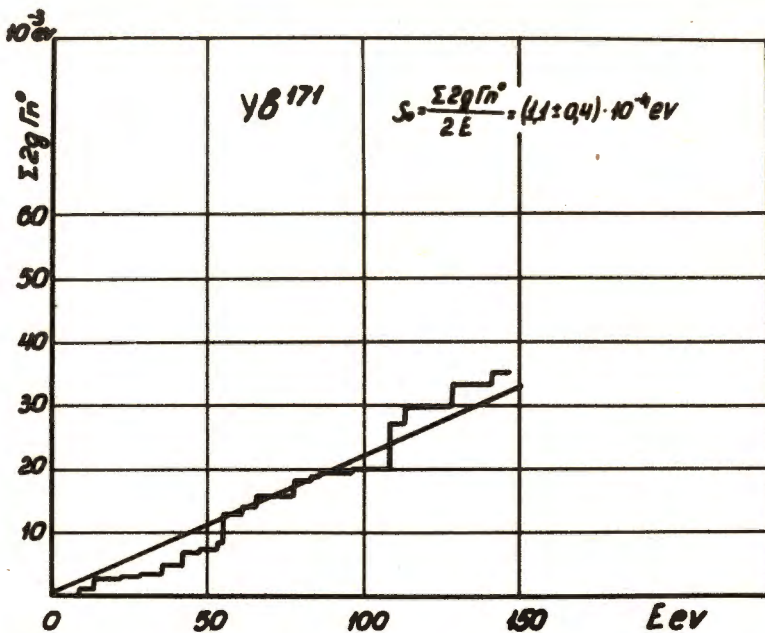
Р и с. 3. Интегральное распределение приведенных нейтронных шири для резонансов Yb^{173} .



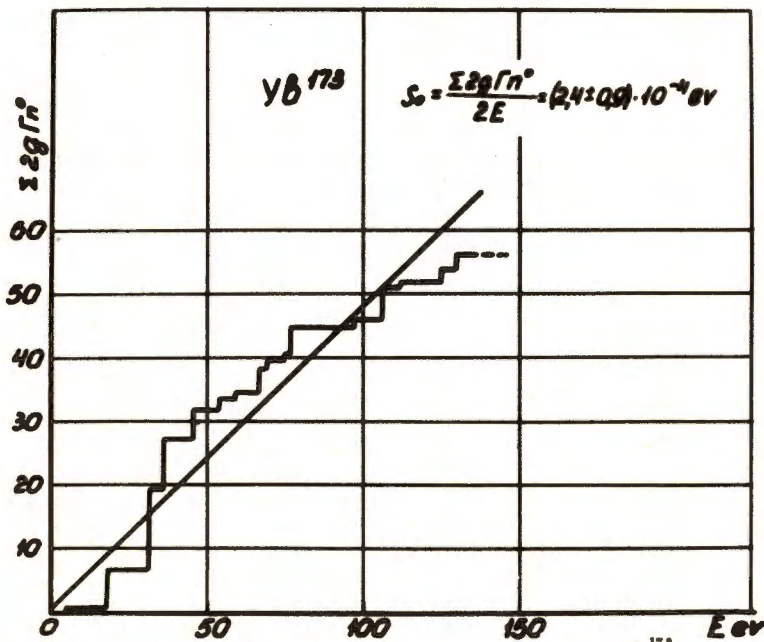
Р и с. 4. График зависимости числа зарегистрированных резонансов Yb^{171} от энергии нейтронов.



Р и с. 5. График зависимости числа зарегистрированных резонансов Yb^{173} от энергии нейтронов.



Р и с. 6. Зависимость суммы приведенных нейтронных ширин Yb^{171} от энергии нейтронов.



Р и с. 7. Зависимость суммы приведенных нейтронных ширин Yb^{173} от энергии нейтронов.