

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



17/11-74

РЗ - 7800

A-406

2334/2-74

Г.Г.Акопян, В.П.Алфименков, Э.И.Шарапов

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУД РАССЕЯНИЯ
МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ЯДРАМИ ПРАЗЕОДИМА

1974

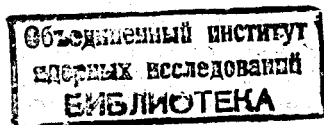
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

РЗ - 7800

Г.Г.Акопян, В.П.Алфименков, Э.И.Шарапов

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУД РАССЕЯНИЯ
МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ ЯДРАМИ ПРАЗЕОДИМА

Направлено в ЖЭТФ



Введение

Амплитуды упругого когерентного b_{coh} и упругого некогерентного b_{inc} рассеяния нейтронов являются физическими константами, характеризующими взаимодействие медленных нейтронов с ядрами. Они играют существенную роль в нейтронной оптике в явлениях дифракции и преломления нейтронов.

Особый интерес представляет спин-некогерентное сечение σ_{inc} празеодима в связи с возможностью ^{1/} использования дифракции нейтронов для прямого обнаружения ядерного магнетизма в интерметаллическом соединении $PtCu_2$. Измерения теплоемкости и магнитной восприимчивости этого соединения ^{2/} дали косвенное указание на антиферромагнитное упорядочение в нем ядер Pt при температуре около 50 мК.

В соответствующем дифракционном эксперименте наличие такого упорядочения ядер должно привести к появлению дополнительных когерентных пиков с интенсивностью, пропорциональной величине σ_{inc} . Необходимо точное знание этой величины. Однако существующие в литературе данные для празеодима: $\sigma_{coh} = 2,4 \pm 0,2$ барн и оценка $\sigma_{inc} \approx 1,6$ барн, вытекающая из табл. 2 книги ^{3/}, относятся к 1953 г., и других пока нет.

В предлагаемой работе были измерены амплитуда b_{coh} /методом дифракции тепловых нейтронов на двуокиси PtO_2 / и полное сечение рассеяния нейтронов на металлическом празеодиме в интервале энергий 0,5 - 100 эВ. Эти эксперименты позволили дать новую оценку некогерентного сечения празеодима.

Метод измерения

1. Атомная структура кристалла PrO_2 известна по работе /4/, где он отнесен к пространственной группе $\text{Fm}\bar{3}\text{m} - \text{O}_h^5$ /структура типа флюорита/. Кубическая гранецентрированная элементарная ячейка PrO_2 имеет постоянную $a = 5,39 \text{ \AA}$ и содержит четыре атома празеодима и восемь атомов кислорода, расположенных, как показано на рис. 1.

В соответствии с такой структурой линии нейтронограммы разделяются по интенсивности на три группы. В первой - отражения (111), (311), (331) и т.д. - интегральная интенсивность линий определяется вкладом только атомов празеодима, соответствующий структурный фактор равен $4b_{\text{Pr}}$. Структурный фактор отражений второй группы - линии (222), (200), ... - равен разности $4b_{\text{Pr}} - 8b_0$, и структурный фактор третьей группы - (220), (400), ... - определяется суммой вкладов празеодима и кислорода $4b_{\text{Pr}} + 8b_0$. Такая структура благоприятна для измерения $b_{\text{coh}}(\text{Pr})$ относительно хорошо известной амплитуды рассеяния кислорода / $b_0 = 0,580 \cdot 10^{-12} \text{ см}$ /. Наибольшую точность дает сравнение интенсивности линий второй и первой группы, для которых отношение квадратов структурных факторов равно $(1 - 2b_0/b_{\text{Pr}})^2$. В этом случае 16%-ное изменение отношения интенсивности линий приводит лишь к 5%-ной погрешности в величине b_{Pr} . Для дифракции нейтронов по времени пролета на поликристаллах, как известно /см., например /5/, справедливо следующее соотношение между интенсивностью линий $\sum N_{\text{hkl}}$ и структурным фактором F_{hkl} :

$$\sum N_{\text{hkl}} \sim \lambda^4 I(\lambda) \epsilon(\lambda) A(\lambda) e^{-2B(\frac{1}{2a})^2_{\text{hkl}}} (jF^2)_{\text{hkl}} \quad /1/$$

Здесь введены следующие обозначения:

$I(\lambda) \cdot \epsilon(\lambda)$ - зависимости потока нейтронов и эффективности детектора от длины волны нейтрона λ ,

$A(\lambda)$ - поправка на поглощение нейтронов в образце,

$e^{-2B(\frac{1}{2a})^2_{\text{hkl}}}$ - тепловой фактор Дебая-Валлера,

j - множитель повторяемости плоскостей,

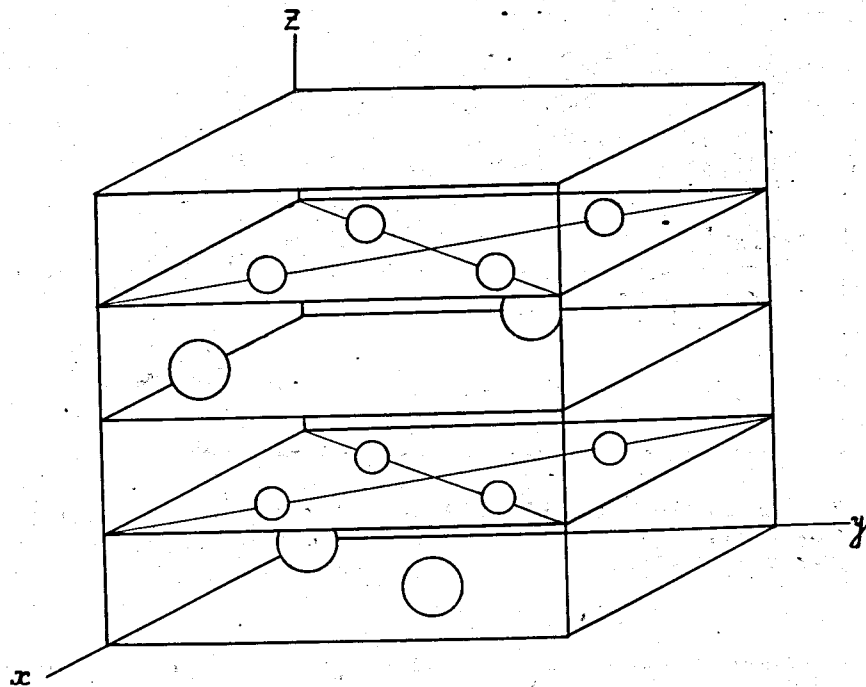


Рис. 1. Элементарная ячейка кристалла PrO_2 . Кружками большого диаметра изображены ионы празеодима, кружками малого - ионы кислорода.

участвующих в данном отражении от поликристалла. Таким образом, для получения b_{coh} из отношения интенсивностей линий необходимо знать зависимость величины $I \cdot \epsilon$ от длины волны и аккуратно учесть тепловое движение атомов и поглощение нейтронов в образце.

2. При энергии нейтронов 1 - 100 эВ празеодим не имеет сильных резонансов. Эффекты кристаллической структуры и связи атомов в решетке уже не сказываются на сечении рассеяния в этой области энергий. Если угол рассеяния достаточно велик, то парамагнитным рассеянием можно также пренебречь и измерения в указанном интервале энергий дадут сечение рассеяния на свободном ядре σ_{free} , а следовательно, и сечение упругого

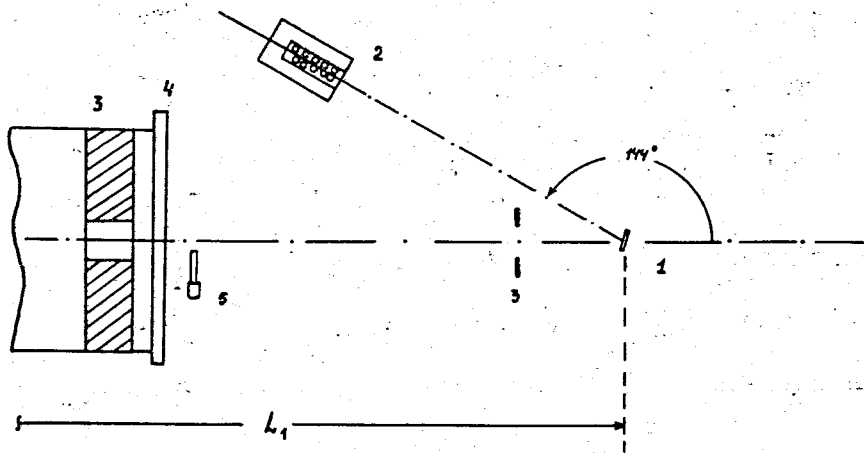


Рис. 2. Геометрия эксперимента: 1 - образец, 2 - детектор в защите, 3 - коллиматоры, 4 - вакуумный нейтронвод, 5 - монитор.

рассеяния на связанном атоме σ_{bound} , которое связано с b_{coh} и σ_{inc} соотношением

$$\sigma_{\text{bound}} = \left(\frac{A+1}{A}\right)^2 \sigma_{\text{free}} = 4\pi b_{\text{coh}}^2 + \sigma_{\text{inc}} \quad /2/$$

Последнее соотношение позволяет получить упругое некогерентное сечение из известных полного и когерентного сечений рассеяния нейтронов.

Эксперимент и результаты

1. Порошкообразный образец PtO_2 весом 95 г был приготовлен из окисла Pt_6O_{11} методом медленного выщелачивания под действием разбавленной уксусной кислоты [6]. Измерения дифракции нейтронов методом времени пролета были проведены на импульсном реакторе ИБР, работавшем на мощности 14 кВт. Геометрия эксперимента показана на рис. 2. Пролетная база составляла расстояние 34,5 м от реактора до образца и 1,5 м от образца до детектора. Детектором служила батарея из

14 штук борных счетчиков и 5 штук малогабаритных гелиевых счетчиков. Образец имел поперечные размеры $90 \times 45 \text{ мм}^2$ и располагался в геометрии "на отражение". Угол рассеяния 2θ составлял 144° . Нейтронограмма, полученная за 37 часов, показана на рис. 3.

Величина $I \cdot \epsilon$ была найдена при пониженной мощности реактора с названной батареей счетчиков в прямом пучке нейтронов. Кроме того, были измерены нейтронограммы вольфрама и свинца и получены величины $I \cdot \epsilon$, оказавшиеся в хорошем согласии с прямыми измерениями.

Для точного учета поглощения было измерено пропускание /полное сечение/ всех использованных образцов.

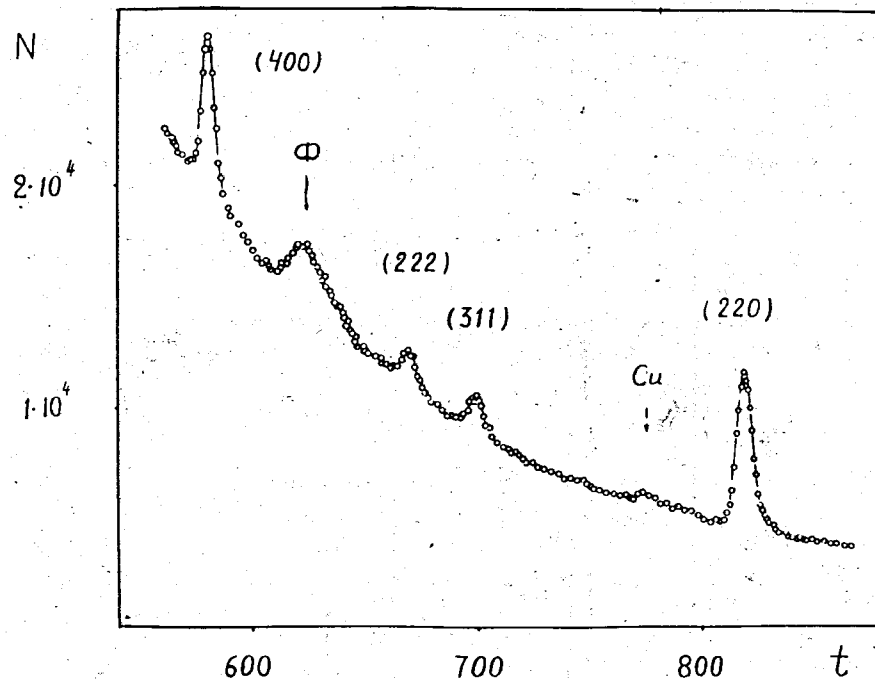


Рис. 3. Участок экспериментальной нейтронограммы. Горизонтальная ось - каналы временного анализатора шириной 40 мксек, вертикальная ось - отсчеты детектора. Пик Ф - фоновый, обусловленный спецификой работы импульсного реактора /"сателлит"/.

Таблица

hкe	A	j	$e^{-2B(\frac{L}{2d})^2}$	$I \epsilon \lambda^4$	A(λ)	$\sum N_{h,k \ell}$	$c \cdot F^2$	b_{coh} 10^{-12} см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	5,0	6	0,940	0,40	0,335	3180 ± 200	4210	$0,485 \pm 0,012$
220	3,58	12	0,885	0,69	0,370	61000 ± 400	22600	$0,512 \pm 0,010$
311	3,05	24	0,840	0,85	0,405	15000 ± 450	2160	-
222	2,9	8	0,819	0,90	0,420	11200 ± 450	4500	$0,476 \pm 0,014$
400	2,53	6	0,782	0,97	0,450	46600 ± 600	22800	$0,515 \pm 0,011$

При этом применялся жидкостный сцинтилляционный детектор нейтронов /7/, установленный за образцами на расстоянии 58,5 м от реактора. С целью оценки теплового фактора Дебая-Валлера были выполнены измерения с образцом при гелиевой температуре.

Результаты для b_{coh} представлены в табл. 1. Величины теплового фактора, приведенные в четвертой колонке, рассчитаны при значении $B = 0,9$. Эффективный поток в пятой колонке дан в относительных единицах. Поправка на поглощение рассчитана по известной формуле для симметричного отражения /см., например, /5/ / с использованием измеренного значения полного сечения. Большая величина поглощения вызвана наличием воды и ацетата празеодима, адсорбированных на поверхности кристаллитов при изготовлении образца. В седьмой колонке приведены экспериментальные значения площадей пиков с их статистическими ошибками. В восьмой колонке даны полученные по формуле /1/ значения квадратов структурных факторов /с точностью до неизвестной нормировочной константы с /. Совпадение величин F^2 для отражений (220) и (400) свидетельствует о правильном учете зависящих от длины волны факторов формулы /1/. В последней колонке приведены значения когерентных амплитуд и их статистических ошибок, рассчитанные из отношений структурных факторов соответствующих отражений к значению F_{311} . Усредненное значение амплитуды равно:

$$b_{coh} = /0,490 \pm 0,015/ \cdot 10^{-12} \text{ см}.$$

Ошибка в этом значении амплитуды определяется в основном точностью измерения отношения величины $I \cdot \epsilon \cdot A$ для разных длин волн, оцениваемой в 10% /систематическая ошибка/. Измеренное значение амплитуды соответствует величине когерентного сечения, равной:

$$\sigma_{coh} = 3,02 \pm 0,19 \text{ барн}.$$

2. Полное сечение рассеяния празеодима в интервале энергий 0,5 - 100 эВ было измерено в той же геометрии

в режиме работы реактора ИБР с линейным ускорителем электронов. Был использован образец металлического празеодима в виде полого цилиндра с внешним диаметром 100 мм, внутренним диаметром 80 мм и высотой 200 мм. Образец был помещен вертикально в пучок нейтронов шириной 40 мм. Эффективная толщина образца в такой геометрии составляла $5,8 \cdot 10^{22}$ ядер/см².

Сечение рассеяния празеодима измерялось относительно известного сечения рассеяния свинца $\sigma_{Pb} = 10,90$ барн/. Был взят полый цилиндрический образец свинца $\phi 100$ мм, рассеяние от которого эквивалентно рассеянию от образца празеодима. В таком эксперименте должна быть учтена поправка, обусловленная радиационным захватом нейтронов ядрами празеодима $\sigma_{\gamma} = 2$ барн при 1 эВ/. Значение поправки составляло 11% при 1 эВ и 4% - при 10 эВ. Измеренное сечение рассеяния празеодима показано на рис. 4. В интервале энергий до 10 эВ, где не сказываются эффекты резонансов, величина сечения рассеяния составляет:

$$\sigma_{sc} = 3,1 \pm 0,2 \text{ барн.}$$

По формуле /2/ с использованием результата для когерентного сечения это дает

$$\sigma_{inc} = 0,08 \pm 0,28 \text{ барн,}$$

что равнозначно верхней оценке некогерентного сечения, равной 0,4 барна.

Обсуждение результатов

Полученное значение когерентной амплитуды b_{coh} на 10% выше результата 1953 года /3/. Различие выходит за ошибку измерения. Аргументом в пользу предпочтительности нового значения может служить высокая надежность принятого здесь метода нормировки на когерентную амплитуду рассеяния нейтронов кислородом, входящим в состав исследуемого образца.

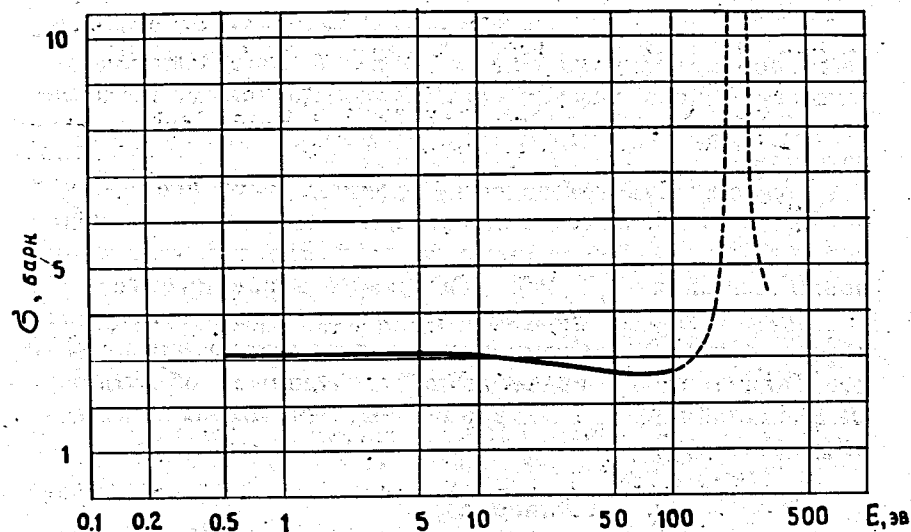


Рис. 4. Эффективное сечение рассеяния нейтронов празеодимом. Пунктиром показан ход сечения в области резонансов 216 и 234 эВ без поправки на радиационный захват нейтронов.

Особенностью энергетического хода измеренного сечения рассеяния празеодима является уменьшение сечения в области 30 - 100 эВ. Это является результатом совместного действия интерференции между резонансным и потенциальным рассеянием и интерференции между резонансами 216 и 234 эВ, обладающими одинаковыми спинами.

Снижение оценки σ_{inc} с 1,6 барн до величины, меньшей 0,4 барн, имеет существенное значение для предлагаемого эксперимента /1/ по обнаружению ядерного магнетизма в $PrCu_2$. В связи с меньшим значением j -фактора интенсивность когерентных ядерных максимумов с наибольшим вкладом от атомов Pr в поликристалле $PrCu_2$ будет в 5 - 10 раз слабее интенсивности пиков типа (311) в соединении PrO_2 /рис. 3/. При величине сечения σ_{inc} , в 10 раз меньшей σ_{coh} , до-

полнительные пики при упорядочении ядер Pr должны быть соответственно еще в 10 раз слабее. Наличие заметного фона в дифракционных экспериментах на поликристаллах не позволяет работать со столь слабыми отражениями.

Возможность наблюдения эффекта /при условии $\sigma_{inc} \sim 0,1$ барн/ остается в случае использования монокристалла PrCu_2 . Необходимо поэтому более точное измерение значения $\sigma_{inc}(\text{Pr})$ в прямом эксперименте.

Авторы благодарны И.М.Столетовой за изготовление образца PrO_2 , Г.Г.Самосвату за предоставление образца металлического празеодима и ценные обсуждения, Л.Б.Пикельнеру и К.Хеннигу за постоянный интерес к работе.

Литература

1. К.Хенниг, Э.И.Шарапов. Сообщение ОИЯИ, P14-7026, Дубна, 1973.
2. K.Andres et al. *Phys.Rev.Lett.*, 28, 1652 (1972).
3. G.Vaçon. *Neutron Diffraction*, Oxford Press, 1962, p. 32.
4. M.H.Mueller, L.Heaton, K.T.Miller. *Acta Cryst.*, 13, 828 (1960).
5. В.Вурас. *Nucleonika*, 8, 259 (1963);
А.С.Даревский, Т.А.Мачехина и др. Препринт ОИЯИ, 2411, Дубна, 1965.
6. G.Braver, В. Pfeiffer. *J.Less Common Metals*, 5, 171 (1963).
7. Х.Малецки, Л.Б.Пикельнер, К.Г.Родионов, И.М.Саламатин, Э.И.Шарапов. Сообщение ОИЯИ, 13-6609, Дубна, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 марта 1974 года.