

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3-91-297

В.П. Алфименков, Ю.Д. Мареев, Л.Б. Пикельнер,  
В.Р. Ской, В.Н. Швецов

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ  
В НЕЙТРОННЫХ РЕЗОНАНСАХ Rb И  $^{113}\text{Cd}$

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1991

Проведена модернизация установки для исследования с поляризованными нейтронами и ядрами на пучке нейтронов ИБР-30. После модернизации выполнены эксперименты по несохранению четности в р-волновых резонансах Rb ( $E_0 = 9,6$  эВ) и  $^{113}\text{Cd}$  ( $E_0 = 7,0$  и  $21,9$  эВ). Значимый результат получен для резонанса  $^{113}\text{Cd}$   $7,0$  эВ  $\mathcal{P}_p = (-9,8 \pm 3,0) \cdot 10^{-3}$ , для него проведено сопоставление с другими экспериментальными данными и получено значение матричного элемента.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1991

The spectrometer POLYANA for measurements with polarized neutrons and nuclei has recently been modernized. A polarized proton target was installed at a distance of 9 m from the neutron source, the IBR-30 booster. The intensity of neutrons leaving the target with polarization  $f_n = 0.6$  now equals  $3 \times 10^5 E^{-0.9}$  n/sec.eV. The new high efficient  $^3\text{He}$  gas ionization detector was built. On this modernized spectrometer the dependence of neutron transmission on neutron helicity was measured for the earlier discovered by us resonances: Rb 9.6 eV,  $^{113}\text{Cd}$  7.0 eV and 21.9 eV. The parameters of all these resonances are given in the text of this paper. The statistically significant value of  $\mathcal{P}_p = (-9.8 \pm 3.0) \times 10^{-3}$  was obtained only for the resonance  $^{113}\text{Cd}$  7.0 eV. The comparison of this result with the results reported in refs.<sup>11, 14</sup> allowed us to determine matrix elements of different parity compound states mixing. They are shown in Table 2.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

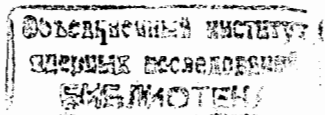
Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1991

В течение многих лет в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ на пучке нейтронов импульсного реактора ИБР-30 велись исследования с поляризованными нейтронами и ядрами <sup>1,2/</sup>. В последнее время установка была существенно модернизирована с целью увеличения потока поляризованных нейтронов, улучшения стабильности поляризации и удобства в эксплуатации. Была обновлена регистрирующая аппаратура, создан новый детектор нейтронов. В данной статье мы даем описание основных модернизированных узлов и приводим результаты экспериментов по несохранению четности, выполненных в последнее время.

### Установка

Установка ПОЛЯНА (ПОляризованные Ядра и Нейтроны) в основном сохранила узлы и оборудование, использовавшиеся в предыдущие годы. Нейтроны поляризуются пропусканием через поляризованную протонную мишень. Одним из существенных достоинств этого метода, основанного на большом различии синглетного и триплетного сечений рассеяния нейтронов на водороде, является практически постоянная поляризация нейтронов в области энергии от долей эВ до десятков кэВ. В качестве такой мишени используется монокристалл лантан-магниевого нитрата (ЛМН)  $\text{La}_2\text{Mg}_3(\text{NO}_3)_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ , в котором методом солид-эффекта <sup>3/</sup> поляризуются протоны кристаллизационной воды. Площадь монокристалла около  $30 \text{ см}^2$  и толщина по пучку 17 мм, что является оптимальным с точки зрения соотношения между интенсивностью прошедшего пучка и его поляризацией. При обычном режиме работы протонной мишени поляризация нейтронов  $f_n$  равна примерно 0,6.

В состав оборудования поляризованной протонной мишени входит криостат, обеспечивающий температуру 1 К, электромагнит с полем 2 Т при однородности и стабильности магнитного поля лучше  $10^{-4}$ ,



СВЧ-система с длиной волны 4,2 мм. Для улучшения стабильности магнитного поля вместо ранее применявшегося мотор-генератора сейчас используется для питания магнита <sup>4</sup> тристорный источник питания ИСТ2-1000-115 с током 1000 А.

В последние годы основным направлением исследований было измерение эффектов несохранения четности в низкоэнергетических нейтронных резонансах. При этом существенным требованием было получение высокой интенсивности пучка нейтронов, тогда как разрешение играло меньшую роль. В связи с этим установка ПОЛЯНА была перенесена на более интенсивный пучок № 4 в экспериментальном зале и размещена ближе к источнику нейтронов. В настоящее время ИБР-30 работает в качестве бустера-размножителя с линейным электронным ускорителем ЛУЭ-40. Основные параметры: интегральный выход нейтронов  $5 \cdot 10^{14}$  н/сек, частота 100 гц, полуширина нейтронного импульса 4 мкс. Схема установки ПОЛЯНА приведена на рис. 1. Расстояние протонной мишени 2 от замедлителя составляет 9 метров, число поляризованных резонансных нейтронов, выходящих из мишени, равно  $3 \cdot 10^5 E^{-0,9}$  н/сек эВ. Здесь E - энергия нейтронов в эВ. Детектор нейтронов может размещаться на пролетных расстояниях 17 м, 30 м и 60 м.

Направление поляризации нейтронов горизонтальное и перпендикулярно импульсу нейтронов. Реверс поляризации можно производить несколькими способами. Небольшое, примерно на  $4 \cdot 10^{-3}$  Т, изменение магнитного поля на протонной мишени при неизменной СВЧ приводит к накачке другого перехода, а следовательно меняется знак поляризации протонов и нейтронов. Неудобство этого метода в том, что перестройка режима занимает около часа и не позволяет производить частую смену поляризации, требуемую в ряде экспериментов с малыми эффектами. Быстрый реверс реализуется при изменении направления

тока в одном из магнитов ведущего поля 3. В этом случае изменение знака поляризации происходит за долю секунды. Ограниченность этого варианта в том, что он действует при энергии нейтронов до нескольких десятков эВ, пока выполняется условие адиабатичности поворота спина в меняющемся в пространстве магнитном поле. Продольная или поперечная поляризация нейтронов получаются при использовании одного из двух элементов (соленоид или электромагнит) в сменяемой части 5 магнитного канала.

Третий способ изменения знака поляризации, в значительной степени свободный от отмеченных недостатков, заключается в конструкции установки, позволяющей за 10 секунд поворачивать на  $180^\circ$  вокруг вертикальной оси протонную мишень вместе с криостатом и магнитом. При этом убирается зависимость реверса от энергии нейтронов, а время реверса достаточно мало, чтобы позволить частую смену поляризации.

В большинстве экспериментов с поляризованными нейтронами и ядрами измеряется пропускание нейтронов через ядерные мишени. Так, в исследованиях по несохранению четности в резонансах /2/ неполяризованная мишень устанавливалась в соленоиде 5. При изучении спиновой зависимости нейтронных сечений /1/ нейтроны пропускались через поляризованную ядерную мишень 6, в которой ядра поляризовались при охлаждении до 30 МК в рефрижераторе  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  в магнитном поле 1,5 Т.

Существенную роль в подобных экспериментах играет качество детектора нейтронов. В последнее время в рамках установки ПОЛЯНА был сконструирован и изготовлен новый детектор. Он представляет собой газовый ионизационный детектор на основе  $^3\text{He}$ , работающий в пропорциональном режиме. <sup>5</sup> Детектор имеет цилиндрическую форму, ось цилиндра параллельна оси пучка нейтронов. Внутренний рабочий

диаметр детектора 245 мм, длина 525 мм. Объем детектора разбит на 35 независимых секций алюминиевыми фольгами, перпендикулярными оси детектора. Эти фольги являются катодами, а анодами служат плоскости из нитей диаметром 40 мкм, натянутых с шагом 10 мм. Расстояние между катодами 15 мм. Все секции находятся в единой газовой смеси. В настоящее время ее состав - 1 атм.  $^3\text{He}$ , 2 атм.

$\text{Ar}$  и 30 Торр  $\text{CO}_2$ . Конструкция детектора позволяет увеличивать давление  $^3\text{He}$  до 8 атмосфер, что является существенным при измерениях с нейтронами в области энергии несколько десятков эВ и выше. Толщина входного алюминиевого окна детектора около 15 мм. Эффективность детектора определяется сечением реакции  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ , равным при 1 эВ 850 барн и имеющим энергетическую зависимость близкую к закону  $1/v$  <sup>[4]</sup>.

Возможность независимой регистрации нейтронов в каждой из 35 секций имеет ряд преимуществ: спектр по времени пролета можно получать как со всего детектора в целом, так и с отдельных секций или их групп. При этом уменьшается суммарное мертвое время детектора, что весьма важно при больших загрузках, характерных для описанных экспериментов.

Регистрирующая аппаратура также была обновлена в последнее время. Сейчас для экспериментов используется измерительный модуль на базе персонального компьютера РС/АТ-286, позволяющий регистрировать до 4 независимых временных спектров одновременно при небольшом мертвом времени 0,3-0,4 мкс.

#### Эксперимент

$^{139}\text{La}$ . Первым экспериментом, выполненным после ввода в эксплуатацию установки ПОЛЯНА, было измерение эффекта нарушения четности в р-волновом резонансе  $^{139}\text{La}$  при энергии 0,74 эВ. Впервые такое исследование было выполнено нами в 1981 г. <sup>[5]</sup>, и был заре-

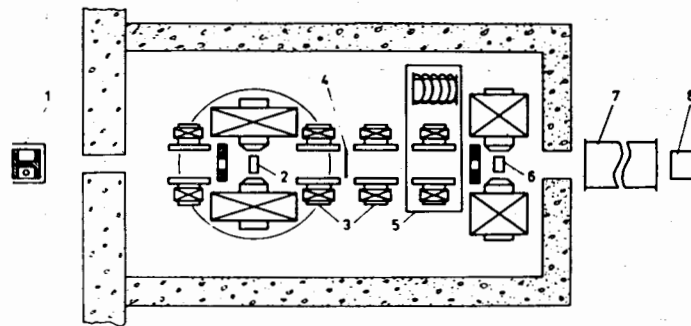


Рис. 1. Схема установки ПОЛЯНА: 1 - бустер ИБР-30, 2 - поляризованная протонная мишень, 3 - магниты ведущего поля, 4 - токовая фольга, 5 - сменные магниты ведущего поля, 6 - поляризованная ядерная мишень, 7 - вакуумный нейтроновод, 8 - детектор нейтронов.

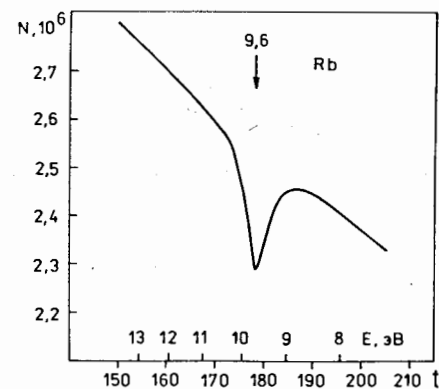


Рис. 2. Участок аппаратного спектра, полученного при измерении с  $Rb$ .  $t$  - номер канала временного анализатора, ширина канала 4 мксек.

гистрирован очень большой эффект

$$P_p = \frac{\sigma_p^+ - \sigma_p^-}{\sigma_p^+ + \sigma_p^-} = (7,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$$

Здесь  $\sigma_p^\pm$  - р-резонансные сечения в области резонанса для нейтронов с положительной и отрицательной спиральностью. В первом эксперименте по несохранению четности основное внимание нами обращалось на статистическую обеспеченность и отсутствие ложных эффектов, а не на абсолютную величину эффекта. В появившихся в последние годы работах <sup>16,7/</sup> были получены значения  $P_p$  соответственно  $(9,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$  и  $(9,2 \pm 1,7) \cdot 10^{-2}$ , поэтому мы повторили эксперимент с лантаном, уделяя большее внимание величине эффекта. В результате было получено  $P_p = (9,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$  в полном согласии с данными <sup>16,7/</sup>.

Rb. Следующим исследованным ядром был рубидий; в котором ранее нами был обнаружен р-волновый резонанс при энергии 9,6 эВ. Для измерения был использован образец из  $Rb_2CO_3$  толщиной по естественному рубидию  $n = 1,40 \cdot 10^{23}$  ядер/см<sup>2</sup>. Изотопная принадлежность резонанса неизвестна, т.к. мы не имели разделенных изотопов для его идентификации. Детектор нейтронов располагался на пролетном расстоянии 30 м. На рис. 2 приведен участок аппаратурного спектра, содержащий исследуемый резонанс. Из пропускания нейтронов через образец были получены параметры резонанса  $E_0 = (9,6 \pm 0,1)$  эВ;  $ag\Gamma_n = (2,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$  эВ;  $\Gamma_\gamma = (0,260 \pm 0,025)$  эВ. Величина  $a$  определяет долю изотопа, которому принадлежит резонанс, в естественной смеси. Измерение эффекта несохранения четности проводилось в традиционных условиях <sup>12/</sup>, измерялись по времени пролета спектры прошедших через образец нейтронов с положительной и отрицательной спиральностью при чередовании примерно через 2 минуты. Полное время измерения составило около 140 часов

на 2 спектра, один из которых приведен на рис. 2. Эффект пропускания определяется как

$$\epsilon = \frac{N_+ - N_-}{f_n(N_+ + N_-)}$$

где  $N_\pm$  - число отсчетов в спектре для соответствующей спиральности после вычитания фона. Как показала проведенная обработка, величина  $\epsilon$  не выходит за пределы статистических ошибок. Для параметра  $P_p$ , который извлекается из  $\epsilon$ , была получена оценка

$$P_p = (-0,9 \pm 4,4) \cdot 10^{-3}$$

Отсутствие информации об изотопной принадлежности резонанса и его спине делает бессмысленным какой-либо анализ причин отсутствия эффекта на данном уровне точности.

<sup>113</sup>Cd. Интерес к измерению с <sup>113</sup>Cd связан в первую очередь с тем, что на нем группой ИТЭФ <sup>18/</sup> был впервые обнаружен эффект нарушения четности в ядерных реакциях с нейтронами. Ими была наблюден асимметрия вылета  $\gamma$ -квантов при захвате тепловых поляризованных нейтронов на <sup>113</sup>Cd, и представляет интерес возможность связать этот эффект с нарушением четности в р-резонансе, лежащем вблизи тепловой точки. Такой резонанс с энергией 7,0 эВ был обнаружен нами ранее, для него определены резонансные параметры <sup>19/</sup> и были проведены измерения эффекта несохранения четности в эксперименте по пропусканию продольно поляризованных нейтронов <sup>10/</sup>. Однако в пределах достигнутой статистической точности для  $P_p$  ( $\pm 5 \cdot 10^{-3}$ ) не был получен значимый эффект, поэтому мы повторили этот эксперимент, используя существенно повышенную интенсивность пучка поляризованных нейтронов.

В качестве образца использовался металлический <sup>113</sup>Cd с обогащением 93%, толщиной  $1,06 \cdot 10^{23}$  ядер изотопа/см<sup>2</sup> и площадью 13 см<sup>2</sup>. Описанный выше <sup>3</sup>He-детектор находился на пролетной базе 30 м.

Полное время измерения составило около 300 часов. В результате для резонанса с энергией  $E_0 = 7,0$  эВ было получено значение

$$P_p = (-9,8 \pm 3,0) \cdot 10^{-3}$$

Одновременно были обработаны данные еще для одного неизвестного ранее резонанса  $^{113}\text{Cd}$ , с большой вероятностью являющегося р-волновым:

$$E_0 = (22 \pm 0,3) \text{ эВ}, \quad g\Gamma_n = (4,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-6} \text{ эВ},$$

$$P_p = (1,0 \pm 4,4) \cdot 10^{-3}$$

Видно, что для этого резонанса эффект несохранения четности не обнаружен. Что касается резонанса 7,0 эВ, то эффект на нем измерен достаточно надежно, что позволяет провести анализ результатов.

Основной физической величиной, извлекаемой из экспериментов по несохранению четности в реакциях с медленными нейтронами, является матричный элемент  $\langle 3|H_w|p \rangle$ , характеризующий смешивание слабым взаимодействием состояний с разной четностью в компаунд-ядре. Мы приведем соотношения, характеризующие эффекты нарушения четности в интересующих нас реакциях, отсылая за подробностями к обзорам /11,12,13/. Для  $^{113}\text{Cd}$  экспериментально исследована в данной работе зависимость нейтронного сечения в резонансе от спиральности нейтронов, измерена асимметрия  $\alpha_\gamma$  вылета  $\gamma$ -квантов при захвате поляризованных тепловых нейтронов /11/ и измерена циркулярная поляризация  $\gamma$ -излучения  $P_\gamma$  при захвате ядрами  $^{113}\text{Cd}$  тепловых нейтронов /14/. Соотношения, описывающие эти эффекты, можно приближенно представить в виде

$$P_p = \frac{2\langle 3|H_w|p \rangle}{E_p - E_3} (\Gamma_3^n / \Gamma_p^n)^{1/2} \alpha \quad (1)$$

$$\alpha_\gamma = \frac{2\langle 3|H_w|p \rangle}{E_p} (\Gamma_p^{\gamma_i} / \Gamma_3^{\gamma_i})^{1/2} A(I, J, L) \quad (2)$$

$$P_\gamma = \frac{2\langle 3|H_w|p \rangle}{E_p} (\Gamma_p^{\gamma_i} / \Gamma_3^{\gamma_i})^{1/2} \quad (3)$$

Здесь  $E_p$  и  $E_3$  - энергии р- и 3-резонансов,  $\Gamma_p^n$  и  $\Gamma_3^n$  - их нейтронные ширины,  $\alpha = (\Gamma_p^{n/2} / \Gamma_p^n)^{1/2}$  характеризует долю нейтронной ширины р-резонанса, приходящуюся на полный момент нейтрона  $j = 1/2$ ,  $\Gamma_p^{\gamma_i}$  и  $\Gamma_3^{\gamma_i}$  - парциальные ширины  $\gamma$ -переходов из компаунд-состояний, возбуждаемых при захвате р- и 3-нейтронов, на уровень  $i$ ,  $A(I, J, L)$  - фактор, зависящий от спина ядра-мишени  $I$ , спина компаунд-состояния  $J$  и мультипольности излучения  $L$ . Для конкретного случая  $^{113}\text{Cd}$  фактор  $A$  равен единице.

Из приведенных выражений (1)-(3) видно, что каждое из них позволяет определить матричный элемент, если известны остальные величины. В таблице 1 приведены основные параметры рассматриваемого резонанса и характеристики  $\gamma$ -переходов, полученные в работе /9/. Экспериментальное значение  $\alpha_\gamma = (-4,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-4}$  получено в ИТЭФ /11/ для прямого  $\gamma$ -перехода с энергией  $E_\gamma = 9,04$  МэВ на основное состояние  $^{114}\text{Cd}$ . Для циркулярной поляризации значение  $P_\gamma = (6,0 \pm 1,5) \cdot 10^{-4}$  получено в работе /14/ для суммы  $\gamma$ -квантов с энергией 9,04 и 8,48 МэВ, поэтому в (3) нужно учесть вес каждого перехода при усреднении. Подобные оценки были сделаны в работах /9,15/. Матричные элементы, извлеченные из трех названных экспериментов, приведены в таблице 2 с указанием исходной экспериментальной величины. Для матричного элемента, извлекаемого из  $P_p$ , остается неопределенность <sup>связанная</sup> с неизвестной величиной  $\alpha$ , лежащей между 0 и 1. Вместе с тем можно заметить, что между всеми тремя значениями нет серьезных противоречий, что является доводом в поддержку правильности выражений (1)-(3) и концепции смешивания по четности компаунд-состояний в целом.

Таблица 1

$E_0$ , эВ	$\gamma$	$g\Gamma_n^p$ , $10^{-7}$ эВ	$\Gamma_\gamma^p$ , мэВ	$E_{\gamma i}$ , МэВ	$\Gamma_p^{\gamma i}$ , мэВ	$\Gamma_s^{\gamma i}$ , мэВ
7,0	1	$3,1 \pm 0,3$	$160 \pm 20$	9,04	$4,5 \pm 0,9$	$0,28 \pm 0,02$
				8,48	$1,6 \pm 0,5$	$0,54 \pm 0,04$

Таблица 2

Исходная величина	$a_\gamma$	$P_\gamma$	$P_p$
$ \langle s   H_w   p \rangle $ , $10^{-4}$ эВ	$3,6 \pm 0,8$	$8,4 \pm 2,3$	$(3,1 \pm 1,0) / x$

В заключение считаем своим долгом поблагодарить А.В.Стрелкова за полезные обсуждения и помощь в создании детектора и Б.А.Родионова, П.К.Утробина и А.К.Самойлова за помощь в проведении эксперимента.

## Литература

1. Alfimenkov V.P. et al., Nucl. Phys. A, 1982, v. 376, p. 229.
2. Alfimenkov V.P. et al., Nucl. Phys. A, 1983, v. 398, p. 93.
3. Джеффрис К. Динамическая ориентация ядер. "Мир", М., 1965.
4. Борзаков С.В. и др. - ЯФ, 1982, т. 35, с. 532.
5. Алфименков В.П. и др. - Письма в ЖЭТФ, 1982, т. 35, с. 42.
6. Masuda Y. et al., Nucl. Phys. A, 1989, v. 504, p. 269.
7. Bowman C.D., Bowman J.D., Yuan V.W. Phys. Rev.C, 1989, v. 39, p. 1721.
8. Abov Yu.G. et al., - Phys. Lett., 1964, v. 12, p. 25.
9. Алфименков В.П. и др. Сообщение ОИЯИ РЗ-87-117, Дубна, 1987.
10. Алфименков В.П. и др. Сообщение ОИЯИ РЗ-87-43, Дубна, 1987.
11. Абов Ю.Г., Крупчицкий П.А. - УФН, 1976, т. 118, с. 141.
12. Сушков О.П., Фламбаум В.В. - УФН, 1982, т. 136, с. 3.
13. Bunakov V.E., Gudkov V.P. Z. Phys., 1981, Bd. 303, s.285.
14. Alberi J.L. et. al. - Phys. Rev. Lett., 1972, v. 29, p. 518.
15. Весна В.А. и др. - ЯФ, 1990, т. 52, с. 620.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 июня 1991 года.