

# Обнаружение $P$ -нечетного эффекта вылета тритонов в реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$

В. А. Весна<sup>1)</sup>, Ю. М. Гледенов<sup>+</sup>, В. В. Несвижевский\*, А. К. Петухов\*, П. В. Седышев<sup>+</sup>, Т. Солднер\*<sup>2)</sup>,  
О. Циммер<sup>□2)</sup>, Е. В. Шульгина

Санкт-Петербургский институт ядерной физики РАН, 188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

<sup>+</sup>Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Московская обл., Россия

\*Institut Max von Laue–Paul Langevin, BP 156, F-38042 Grenoble Cedex 9, France

□Technische Universität München, D-85748 Garching, Germany

Поступила в редакцию 9 сентября 2005 г.

Приведены результаты измерений  $P$ -нечетной асимметрии ( $S_n, P_t$ ) вылета тритонов в реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ . Здесь  $S_n$  – спин нейтрона,  $P_t$  – импульс тритона. Были проведены три цикла измерений: в Петербургском институте ядерной физики (Гатчина, Россия), на вертикальном пучке нейтронов реактора ВВР-М, и два цикла на пучке PF1B реактора Института Лауэ–Ланжевена (Гренобль, Франция). По сумме трех экспериментов получен коэффициент  $P$ -нечетной асимметрии:  $\alpha_{PN} = -(8.6 \pm 2.0) \cdot 10^{-8}$ . Проведенные нулевые эксперименты и расчеты позволяют утверждать, что  $P$ -нечетная асимметрия связана с изучаемой реакцией.

PACS: 13.75.Cs, 23.20.En

Основное предсказание стандартной модели электрослабого взаимодействия состоит в наличии слабых нейтральных токов. Эти токи однозначно обнаружены при взаимодействии лептонов с нуклонами, и предсказания теории хорошо согласуются с экспериментом. Несохранение  $P$ -четности в нуклон-нуклонном ( $NN$ ) взаимодействии, наблюдаемое в различных процессах в малонуклонных системах и в ядрах, должно быть обусловлено как заряженным, так и нейтральным токами. Наличие заряженного слабого тока найдено в процессах протон-протонного рассеяния при различных энергиях протона, и имеется согласие эксперимента с теорией [1, 2]. Однако до сего времени слабый нейтральный ток в  $NN$ -взаимодействии не обнаружен.

Процессы, в которых была предпринята попытка оценить нейтральный ток, дали значение константы нейтрального тока  $f_\pi < 1.2 \cdot 10^{-7}$  на 90%-ном уровне достоверности [3].

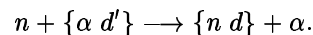
Из-за наличия механизмов усиления  $P$ -нечетные эффекты значительно больше в тяжелых ядрах, где эти эффекты и были открыты [4]. С другой стороны, принципиальные возможности извлечения параметров слабого  $NN$ -взаимодействия из измерений такого типа до сих пор являются предметом полемики.

Поэтому одной из задач является достоверное наблюдение значимого эффекта  $P$ -нечетной асимметрии в сверхлегком ядре, где возможен расчет в терминах констант слабого взаимодействия.

Наиболее оптимальным и перспективным является, с нашей точки зрения, исследование  $P$ -нечетной асимметрии ( $S_n, P_t$ ) в реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  с наблюдением  $P$ -нечетной асимметрии в  ${}^3\text{H}$ -канале. Здесь  $S_n$  – спин нейтрона,  $P_t$  – импульс тритона.

Ядра  ${}^{6,7}\text{Li}$  хорошо описываются в кластерной и мультикластерной моделях.

Теоретические модели предсказывают 70%-ную кластеризацию ядра  ${}^6\text{Li}$  в виде  $\alpha$ -частицы и дейтрона  $d'$ , деформированного в поле  $\alpha$ -частицы. Поэтому реакцию предлагается рассматривать, исходя из кластерной модели ядра, как трехчастичную реакцию подхвата  $\alpha$ -частицы и дейтрона  $d'$ :



Полное энерговыделение в реакции составляет величину 4.78 МэВ и распределяется между продуктами реакции следующим образом:  $E_\alpha = 2.05$  МэВ,  $E_t = 2.73$  МэВ. Большие удельные потери энергии  $\alpha$ -частицей по сравнению с потерей энергии тритоном (пробег тритона примерно в пять раз больше пробега  $\alpha$ -частицы) позволяют применять для детектирования тритонов газовые ионизационные камеры и выделять тритиевую компоненту без примеси  $\alpha$ -частиц.

<sup>1)</sup>e-mail: vvesna@npfi.spb.ru

<sup>2)</sup>T. Soldner, O. Zimmer.

Выделение определенной компоненты реакции с помощью камеры позволяет использовать для регистрации интегральный метод и получать однозначные результаты, причем легко сделать систему из двух камер, где  $P$ -нечетные эффекты отличаются знаками, для компенсации флуктуаций мощности реактора.

В первых измерениях  $P$ -нечетной асимметрии в реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$  обнаружен достаточно большой ложный эффект, который в дальнейших специальных экспериментах, где спин нейтрона  $\mathbf{S}_n$  был перпендикулярен импульсу тритона  $\mathbf{P}_t$  и импульсу нейтрона  $\mathbf{P}_n$ , был определен как эффект лево-правой асимметрии вида  $\alpha_{LR} \sim \mathbf{S}_n[\mathbf{P}_n, \mathbf{P}_t]$ . В рассматриваемой реакции этот коэффициент равен  $\alpha_{LR} = (1.06 \pm 0.04) \cdot 10^{-4}$  [5].

Для устранения влияния лево-правой асимметрии на результат измерений  $P$ -нечетной асимметрии была применена геометрия эксперимента, при которой наблюдаемые векторы  $\mathbf{S}_n$ ,  $\mathbf{P}_n$ ,  $\mathbf{P}_t$  параллельны:  $\mathbf{S}_n \parallel \mathbf{P}_n \parallel \mathbf{P}_t$ . Установка трех указанных выше векторов параллельно друг другу с относительной точностью  $\varepsilon \sim 10^{-2}$  легко достижима в эксперименте. При этом вклад лево-правой асимметрии в  $P$ -нечетную уменьшается как  $\varepsilon^2$  и в этой геометрии не превосходит величины  $\sim 1 \cdot 10^{-8}$ .

Были проведены 3 цикла измерений: в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ, Гатчина, Россия), на вертикальном пучке нейтронов реактора ВВР-М, и два цикла на пучке RF1В реактора Института Лауэ–Ланжевена (ИЛЛ, Гренобль, Франция).

В ионизационной газовой камере вдоль оси пучка располагаются 24 мишени и детектирующие камеры, по одной с каждой стороны, около каждой мишени. Одна половина двойной камеры регистрировала тритоны, вылетающие по направлению распространения пучка, то есть по импульсу нейтрона (“вперед”), другая против этого направления (“назад”). Поскольку наблюдается  $P$ -нечетная асимметрия вида  $W(\Theta) \sim 1 + \alpha_{PN}(\mathbf{S}_n, \mathbf{P}_t)$ , эффекты при регистрации тритонов, вылетающих “вперед” и “назад”, имеют разные знаки. Здесь  $\alpha_{PN}$  – коэффициент  $P$ -нечетной асимметрии. Все половинки двойных камер “вперед” (“назад”) были соединены электрически для работы на один предусилитель сигнала. Мишени представляли собой слой  ${}^6\text{LiF}$  толщиной 400 мкг/см<sup>2</sup>, напыленные на алюминиевую фольгу толщиной 14 мкм. Рассчитанное значение степени поглощения пучка нейтронов составляло примерно 60%.

Для поглощения  $\alpha$ -частиц и создания необходимого телесного угла вылета тритонов на каждую мишень наклеивалась дополнительно алюминиевая

фольга толщиной 14 мкм. Поэтому тритоны, вылетающие по импульсу и против импульса нейтрона, проходили слой алюминия 14 мкм, что создавало определенный телесный угол от мишени на детектор. Средний косинус вылета тритонов рассчитывался по методу Монте-Карло и составлял величину  $\langle \cos(\mathbf{S}_n, \mathbf{P}_t) \rangle = 0.75$ .

Для регистрации заряженных продуктов реакции применялся газ Ag при избыточном давлении  $P = 1.4$  атм в первом эксперименте в ИЛЛ, и  $P = 0.9$  атм в втором эксперименте в ИЛЛ. При таком давлении и толщине чувствительного промежутка 21 мм пробег тритонов, испускаемых мишенью, полностью укладывался в объеме чувствительного газового промежутка, примыкающего к мишени. Давление менялось для разных экспериментов, чтобы изменить условия наблюдения.

Эксперименты, нацеленные на получение экстремально высоких точностей порядка  $10^{-8}$ , как правило, нуждаются в проведении контрольных измерений для выяснения асимметрий, возникающих за счет несовершенства применяемой аппаратуры. Для устранения ложных асимметрий в процессе измерений на камере периодически изменяется на противоположное направление ведущего спин нейтрона магнитного поля. В первом эксперименте направление магнитного поля менялось на камере каждый час, а в последнем – каждые 4 мин в автоматическом режиме.

Поскольку  $P$ -нечетные эффекты пропорциональны скалярному произведению  $(\mathbf{S}_n, \mathbf{P}_t)$ , изменение направления магнитного поля приводит к изменению знака эффекта. Набирая одинаковое количество серий для двух направлений ведущего спин нейтрона магнитного поля и вычитая друг из друга значения эффектов, вычисленных по группам серий, соответствующих противоположным направлениям ведущего спин нейтрона магнитного поля, получаем в результате удвоенный истинный эффект. Все ложные эффекты, не связанные с поляризацией нейтронов, сокращаются.

В таких экспериментах ставится контрольный опыт с поляризованным пучком без изучаемой мишени. Описанная процедура измерений полностью учитывает все возможные ложные эффекты.

В эксперименте присутствует не компенсированное магнитное поле Земли и стационарные поля других работающих физических установок. Эти магнитные поля могут увеличивать вклад лево-правой асимметрии в  $P$ -нечетную. Эффект лево-правой асимметрии, создаваемый за счет этих полей, не меняет свой знак при переключении основного ведущего магнитного поля на противоположное направление. При на-

боре одинакового числа серий для разных направлений ведущего поля и вычитании результатов измерений при разных направлениях ведущего поля друг из друга вклад этого эффекта в результат измерений сокращается.

Компенсация флуктуаций мощности реактора проводилась при вычитании значений напряжений интегратора “назад”, умноженных на “коэффициент компенсации”, из значений напряжений интегратора “вперед”, и нахождении такого “коэффициента компенсации”, при котором дисперсия  $D(\alpha)$  указанной разности  $\alpha$  по одной серии измерений была бы минимальна. При этом определялся абсолютный эффект:  $\alpha \pm \delta\alpha(\min)$ ,  $\delta\alpha = \sqrt{D(\alpha)}$ .

Вычисление относительного эффекта проводилось по формулам [6]:

$$\delta = \frac{\alpha}{L(U_f + U_b)}, \quad D_\delta = \frac{D(\alpha)}{(L(U_f + U_b))^2},$$

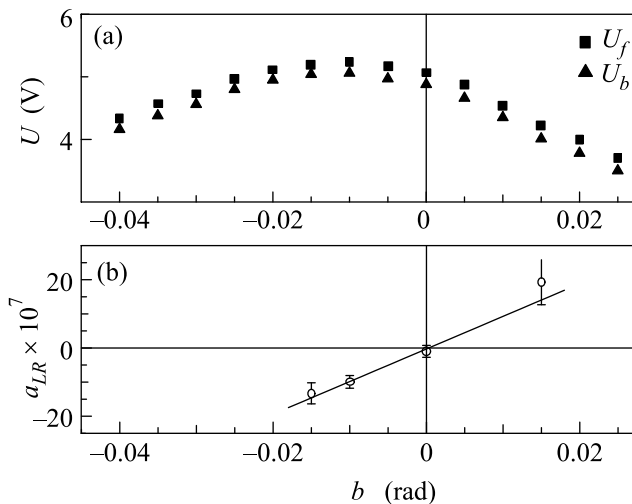
$$\sigma_\delta = \sqrt{D_\delta}, \quad L = \frac{L_f + L_b}{2}.$$

Здесь  $\delta$  – относительный эффект,  $\sigma_\delta$  – статистическая погрешность измерений относительного эффекта,  $L_f$  и  $L_b$  – коэффициенты усиления тракта каналов “вперед” и “назад”,  $U_f$  и  $U_b$  – постоянные составляющие сигналов “вперед” и “назад”.

Для проверки вклада лево-правой асимметрии в  $P$ -нечетный эффект изменялась конфигурация магнитных полей, ведущих спин нейтрона, магнитное поле направлялось перпендикулярно плоскости земли и оси нейтронного пучка. Имелась возможность поворачивать камеру на небольшие углы относительно направления распространения пучка нейтронов в плоскости земли. На рисунке показана зависимость лево-правой асимметрии от угла между импульсом нейтрона и осью камеры. За нулевое значение угла на рисунке принято положение камеры при минимальном значении абсолютной величины коэффициента лево-правой асимметрии. Видно, что ноль лево-правой асимметрии и максимальное значение интенсивности не совпадают.

Если из этих данных вычислить максимальное значение коэффициента лево-правой асимметрии, когда все векторы  $\mathbf{S}_n$ ,  $\mathbf{P}_n$ ,  $\mathbf{P}_t$  взаимно перпендикулярны, то это значение с точностью до погрешности измерений совпадает с измеренным ранее [5]. Это означает нормальную чувствительность и работоспособность применяемой ионизационной камеры.

Кроме того, было проведено измерение лево-правой асимметрии в другой плоскости: ведущее



(a) Постоянные составляющие  $U_f$ ,  $U_b$  и (b) значения коэффициента лево-правой асимметрии  $\alpha_{LR}$  в зависимости от угла  $b$  между импульсом нейтрона и импульсом тритона

спин нейтрона магнитное поле параллельно плоскости земли и перпендикулярно импульсу нейтрона. В рабочей геометрии расположения камеры проверялся вклад лево-правой асимметрии из-за возможного вертикального отклонения камеры. Измеренное значение коэффициента лево-правой асимметрии в этой геометрии составило  $\alpha_{LR} = (4.9 \pm 1.9) \cdot 10^{-7}$ .

При включении поля параллельно распространению пучка вклад лево-правой асимметрии в  $P$ -нечетный эффект должен уменьшиться на два порядка и не должен быть больше, чем  $1 \cdot 10^{-8}$ , поскольку направление ведущего магнитного поля задается соленоидом, намотанным на корпус камеры, с точностью не хуже, чем  $10^{-2}$ . Для экспериментальной проверки этого утверждения в последнем по времени эксперименте коэффициент  $P$ -нечетной асимметрии измерялся при трех значениях угла между импульсом нейтрона и осью камеры при спине нейтрона, практически параллельном среднему импульсу тритона. По расчетам вклад лево-правой асимметрии в эффект при любом используемом малом угле отклонения не должен превосходить значения  $(1 - 1.5) \cdot 10^{-8}$ . Это означает, что при  $\alpha_{PN} \gg \alpha_{LR}$  измеряемый  $P$ -нечетный эффект должен быть практически одинаков при малых углах отклонения импульса нейтрона от оси камеры, если это  $P$ -нечетный эффект. Если результат измерений при нулевом угле связан только с лево-правой асимметрией, то при других углах он должен меняться согласно рисунку.

В таблице 1 представлены значения коэффициента  $P$ -нечетной асимметрии  $\alpha_{PN}$  при разных значени-

ях угла  $\beta$  между импульсом нейтрона и импульсом тритона.

Таблица 1

$\beta$ [рад]	$\alpha_{PN}$
$\sim 0$	$-(10.8 \pm 4.4) \cdot 10^{-8}$
-0.01	$-(9.9 \pm 4.1) \cdot 10^{-8}$
-0.015	$-(7.4 \pm 4.2) \cdot 10^{-8}$
Среднее	$\alpha_{PN} = -(9.3 \pm 2.5) \cdot 10^{-8}$

Небольшое уменьшение эффекта при увеличении угла, возможно, свидетельствует об увеличении вклада лево-правой асимметрии со знаком плюс, но статистически достоверным такое утверждение не является. Поэтому можно утверждать, что вклад лево-правой асимметрии в  $P$ -нечетную, если он есть, много меньше погрешности измерений эффекта.

В таблице 2 представлены результаты измерений коэффициента  $P$ -нечетной асимметрии в реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ , выполненные авторами в разное время, результаты экспериментов поправлены на поляризацию нейтронов  $P$  и телесные углы на детектор  $\Omega$ .

Таблица 2

	$P\Omega$	$\alpha_{PN}$
ПИЯФ, верг. канал	0.66	$-(5.4 \pm 6.0) \cdot 10^{-8}$ [6]
ИЛЛ, канал PF1B	0.66	$-(8.1 \pm 3.9) \cdot 10^{-8}$ [7]
ИЛЛ, канал PF1B	0.70	$-(9.3 \pm 2.5) \cdot 10^{-8}$
Среднее		$\alpha_{PN} = -(8.6 \pm 2.0) \cdot 10^{-8}$

Для проведения нулевого эксперимента с полным поглощением тритиевой компоненты мишени дополнительно закрывались алюминиевой фольгой толщиной 20 мкм. Результат нулевого теста, нормированный на постоянные составляющие в рабочем режиме и поправленный на телесные углы и поляризацию нейтронов  $\alpha_{backgr.} = (2.0 \pm 1.7) \cdot 10^{-8}$  [6].

Поскольку камера, по сравнению с [6], конструктивно не изменилась, результат нулевого теста является справедливым и для более поздних экспериментов на пучке ИЛЛ, хотя необходимость в проведении еще одного нулевого эксперимента с большей статистической точностью отчетливо видна.

Для оценки влияния электромагнитной наводки было проведено измерение  $P$ -нечетной асимметрии при выключенном пучке нейтронов. Результат измерения в последнем цикле, при нормировке эффекта на постоянные составляющие основного эксперимента:

$$\alpha_{noise} = -(0.6 \pm 0.5) \cdot 10^{-8}.$$

Таким образом, влияние наводки, по крайней мере, в 10 раз меньше величины эффекта.

Был проведен ряд оценочных расчетов по определению возможного вклада конкурирующих процессов:

- $\beta^-$ -излучения из примесного распада  ${}^8\text{Li}$ , имеющего асимметрию порядка 8% [8];
- примесных  $\gamma$ -излучений от изотопов, где были найдены  $P$ -нечетные эффекты на  $\gamma$ -квантах порядка  $10^{-5}$ ;
- возможной примеси от  $P$ -нечетного эффекта в реакции  ${}^{35}\text{Cl}(n, p){}^{35}\text{S}$  с коэффициентом  $P$ -нечетной асимметрии протонов  $\sim 1.5 \cdot 10^{-5}$ .

Результаты расчетов показывают, что возможный вклад за счет примесных реакций  $\alpha_{PN}$  (примесь) в  $P$ -нечетный эффект в реакции  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ , в худшем случае, не превышает  $(2 - 5) \cdot 10^{-9}$ , что намного меньше, чем обнаруженный эффект  $P$ -нечетной асимметрии. Можно утверждать, что найденный эффект связан с реакцией  ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ .

В настоящее время имеется лишь одна теоретическая работа [9] расчета  $P$ -нечетного эффекта в реакции в представлении констант слабого взаимодействия:

$$\alpha_{PN} \approx (0.06h_\rho - 0.45f_\pi) \approx -1.6 \cdot 10^{-7};$$

здесь  $h_\rho = -11.4 \cdot 10^{-7}$ ,  $f_\pi = 2 \cdot 10^{-7}$  – наиболее употребительные на сегодня константы слабого взаимодействия, соответствующие обмену  $\rho$ -мезоном и  $\pi$ -мезоном. За нейтральный ток отвечает константа  $f_\pi$ .

Считая, что константа заряженного тока известна точно и  $h_\rho = -11.4 \cdot 10^{-7}$ , можно оценить саму нейтральную константу и пределы ее изменения, исходя из рассматриваемой модели и полученного результата эксперимента:

$$f_\pi \approx (0.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-7}.$$

На 90%-ном уровне достоверности

$$-0.3 \cdot 10^{-7} \leq f_\pi \leq 1.1 \cdot 10^{-7}.$$

На сегодняшний день это, видимо, одна из наиболее точных оценок константы нейтрального тока в нуклон-нуклонном взаимодействии. Существует понимание, что эта оценка опирается на теоретическую работу, точность расчета в которой не определена.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 03-02-17338.

1. R. Balzer, R. Hennek, Ch. Jachquemart et al., Phys. Rev. C **30**, 1409 (1984).
2. V. Yuan, H. Fraunfelder, R. W. Harper et al., Phys. Rev. Lett. **57**, 1680 (1986).
3. S. A. Page, Phys. Rev. C **35**, 1119 (1987).
4. Yu. G. Abov, P. A. Krupchitsky, and Yu. A. Oratovsky, Phys. Lett. **12**, 25 (1964).
5. Н. В. Боровикова, В. А. Весна, А. И. Егоров и др., Письма в ЖЭТФ **30**, 527 (1979).
6. В. А. Весна, Ю. М. Гледенов, И. С. Окунев и др., ЯФ **59**, 23 (1996).
7. В. А. Весна, Ю. М. Гледенов, В. В. Несвижевский и др., препринт ПИЯФ–2479, Гатчина 2002.
8. Y. G. Abov, O. N. Yermakov, A. D. Gulko et al., Nucl. Phys. **34**, 505 (1962).
9. Н. Н. Нестеров, И. С. Окунев, Письма ЖЭТФ, **48**, 573 (1988).