

ТРОЙНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ В РЕАКЦИИ $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)^7\text{Li}$

**А.М.Гагарский, Г.В.Вальский, Г.А.Петров, Ю.Е.Логинов, В.Е.Бунаков,
И.С.Гусева¹⁾, В.И.Петрова, Т.А.Заварухина**

*Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН
188300 Ленинградская обл., Гатчина, Россия*

Поступила в редакцию 22 августа 2000 г.

Исследована формально T -нечетная тройная корреляция направлений векторов импульсов α -частицы, γ -кванта и псевдовектора поляризации теплового нейтрона в реакции $^{10}\text{B} + n = ^7\text{Li} + ^4\text{He} + \gamma$. Подобные T -нечетные корреляции в реакциях упругого рассеяния частиц могут непосредственно использоваться для проверки временной инвариантности. В более сложных реакциях такая корреляция может появиться как результат взаимодействия частиц в выходных и входных каналах реакции, и в качестве фонового эффекта нуждается в корректной теоретической или прямой экспериментальной оценке. В результате проведенных экспериментов получен верхний предел на возможную величину коэффициента T -нечетной асимметрии в исследованной реакции, равный $3.2 \cdot 10^{-4}$ (90%-ный уровень достоверности).

PACS: 11.30.-j

Недавно при исследовании корреляции направлений импульсов осколков деления, длиннопробежных α -частиц и продольной поляризации холодных нейтронов, вызывающих тройное деление ^{233}U [1], была обнаружена неожиданно большая величина среднего коэффициента асимметрии $\langle D \rangle$ в корреляции вида

$$W(\theta, \varphi) = 1 + \langle D \rangle \sigma_n [\mathbf{P}_\alpha \times \mathbf{P}_f], \quad \langle D \rangle = (2.35 \pm 0.05) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где \mathbf{P}_f , \mathbf{P}_α и σ_n – единичные векторы в соответствующих направлениях.

Первоначальная цель таких исследований [2,3] заключалась в попытке улучшить верхний предел на величину возможного нарушения временной инвариантности на том основании, что формально корреляция вида (1) изменяет знак при изменении знака времени. Однако более внимательный анализ [4] показывает, что T -нечетные корреляции могут быть непосредственно использованы для тестирования T -инвариантности только в случае реакций упругого рассеяния. Нулевая T -нечетная корреляция в неупругих процессах может быть связана с T -неинвариантностью только в случае, когда для расчета амплитуд этих процессов можно пользоваться первым борновским приближением. Но даже в этом случае учет следующих порядков теории возмущения (то есть учет взаимодействия в начальном и конечных состояниях) может приводить к эффектам, имитирующим T -неинвариантность. Поэтому наблюдаемый в работе [1] эффект асимметрии, по видимому, связан с механизмом тройного деления и не имеет прямого отношения к возможному нарушению T -неинвариантности. Тем не менее дальнейшее исследование наблюдаемого в работе [1] эффекта представляет значительный интерес по крайней мере с двух точек зрения: во-первых, установление механизма формирования корреляции вида (1) в тройном делении может дать ценную информацию о динамике этой реакции, во-вторых, изучение механизмов возникновения различных

¹⁾ e-mail: guseva@hep486.spb.ru

T -нечетных корреляций, маскирующих эффекты возможного нарушения временной инвариантности в ядерных реакциях, может быть полезным при необходимости введения поправок.

Возможность корректного вычисления таких поправок в случае деления из-за сложности этой реакции даже при полном понимании механизма формирования T -нечетной корреляции (1) представляется мало вероятной. Поэтому было бы целесообразно обнаружить и исследовать такие корреляции в более простых реакциях, где в принципе можно надеяться на их корректное теоретическое описание.

В настоящей работе сделана попытка обнаружения и исследования формально T -нечетной корреляции в одной из простейших ядерных реакций с нейтронами:



Исходя из того, что первое борновское приближение вряд ли применимо для описания и этой, более простой по сравнению с делением, ядерной реакции, с теоретической точки зрения в ней также можно было ожидать появления T -нечетной корреляции.

При поглощении теплового поляризованного нейтрона ядро ^{11}B оказывается поляризованным по или против направления спина нейтрона для двух возможных значений суммарного углового момента: $J = (I + 1/2) = 7/2$, или $J = (I - 1/2) = 5/2$, соответственно. При 100%-ной поляризации тепловых нейтронов поляризация ядра ^{11}B оказывается около 50%. Наиболее вероятная энергия α -частицы составляет примерно 1.4 МэВ, а энергия γ -кванта с мультипольностью $M1$ и временем жизни $7.7 \cdot 10^{-14}$ с равна 480 кэВ. Хорошо известны и ближайшие к тепловой точке нейтронные резонансы B^{11} со следующими характеристиками: - 947 кэВ ($J = 7/2^+$, $l = 0$); 170.3 кэВ ($J = 5/2^+$, $l = 0$); 370 кэВ ($J = 7/2^+$, $l = 0$) и 530 кэВ ($J = 5/2^-$, $l = 1$). В работе [5] делалась попытка обнаружить эффект нарушения четности в этой реакции. Полученная величина коэффициента P -нечетной асимметрии испускания α -частицы оказалась очень малой:

$$\alpha_{n\alpha} = -(1.5 \pm 1.0) \cdot 10^{-6}.$$

В то же время величина коэффициента лево-правой асимметрии вида

$$W(\theta, \varphi) = 1 + \alpha_{lr} \cdot \sigma_n \cdot [\mathbf{P}_n \times \mathbf{P}_\alpha], \quad (3)$$

возникновение которой связано с примесью p -волны при нейтроном захвате в B^{10} , оказалась равной $\alpha_{lr} = (0.77 \pm 0.06) \cdot 10^{-4}$ [6]. В заключение краткой информации о характеристиках реакции (2) следует подчеркнуть наличие ярко выраженной кластерной структуры ядер на входе и выходе.

В настоящей работе изучалась T -нечетная корреляция следующего вида:

$$W(\theta, \varphi) = 1 + D_{\alpha\gamma} \cdot \sigma_n \cdot [\mathbf{P}_\alpha \times \mathbf{P}_\gamma]. \quad (4)$$

В эксперименте для регистрации γ -квантов были использованы два сцинтилляционных спектрометра с кристаллами $\text{NaI}(\text{Tl})$, а для регистрации α -частиц - два поверхностно-барьерных кремниевых детектора. Направления продольно-поляризованного пучка ($\sim 90\%$) тепловых нейтронов и осей симметрии детекторов α -частиц и γ -квантов были взаимно ортогональны. Использование четырех спектрометрических детекторов излучений в ортогональной геометрии обеспечивало оптимальные условия для измерений коэффициента $D_{\alpha\gamma}$ и корректного учета возмож-

ных эффектов приборной асимметрии. Экспериментальные величины коэффициентов асимметрии вычислялись с помощью простого соотношения,

$$D_{exp}(i, k) = [N^\uparrow(i, k) - N^\downarrow(i, k)]/[N^\uparrow(i, k) + N^\downarrow(i, k)], \quad (5)$$

где $N^{\uparrow\downarrow}(i, k)$ – скорости счета (α - γ)-совпадений импульсов с детектором (i, k) для двух взаимно противоположных направлений продольной поляризации тепловых нейтронов, вызывающих реакцию (2). Полученные таким образом экспериментальные величины коэффициентов усреднялись с учетом знаковой корреляции так, что из одних и тех же экспериментальных величин $D_{exp}(i, k)$ могли быть получены средние значения коэффициента T -нечетной асимметрии и оценка эффекта возможной приборной асимметрии. В большинстве серий измерений приборная асимметрия не наблюдалась в пределах статистической точности.

Первые результаты экспериментов, выполненных на поляризованном пучке реактора ВВР-М ПИЯФ РАН ($\langle \lambda_n \rangle \sim 2 \text{ \AA}$, $\Phi_n \sim 5 \cdot 10^6 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$), были представлены на Международном семинаре ISINN-8 в Дубне [7]. После завершения измерений и введения всех необходимых поправок статистически значимой величины коэффициента T -нечетной асимметрии вида (4) не было обнаружено:

$$D_{\alpha\gamma} = -(0.09 \pm 1.9) \cdot 10^{-4}.$$

При 90%-ном уровне достоверности возможная величина коэффициента $D_{\alpha\gamma}$ составляет не более $3.2 \cdot 10^{-4}$. Эта величина примерно в 10 раз меньше эффекта, наблюдаемого в тройном делении ^{233}U [1], и с экспериментальной точки зрения на сегодняшний день является самым низким пределом на возможную величину T -нечетной асимметрии в ядерных реакциях с нейтронами.

В принципе полученный в этой работе результат не является неожиданным ввиду радикальных различий механизмов рассматриваемых реакций. Приведем только некоторые из них, наиболее существенные для обсуждения.

Во-первых, в настоящей работе изучалась корреляция направлений разлета заряженной частицы и γ -кванта в отличие от тройного деления, где подобная корреляция изучалась для двух заряженных частиц.

Во-вторых, в тройном делении массивные возбужденные осколки и длиннопробежные α -частицы по современным представлениям появляются вблизи точки разрыва делящегося ядра (за времена $10^{-23} - 10^{-20} \text{ с}$), в то время как в реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha\gamma)^7\text{Li}$ γ -кванты испускаются за времена $\sim 8 \cdot 10^{-14} \text{ с}$.

В-третьих, в тройном делении из-за фокусировки в кулоновском поле (взаимодействие в конечном состоянии) двух разлетающихся осколков α -частица в основном вылетает вблизи экваториальной плоскости, в то время как в реакции (2) угловая (α - γ)-корреляция гораздо менее ярко выражена.

В-четвертых, деление в отличие от реакции (2) характеризуется огромным числом конечных состояний с самыми разными характеристиками (до 10^{10} !).

В случае, если T -нечетная асимметрия в тройном делении возникает из-за кулоновского взаимодействия, первое и второе замечания относительно различий в видах исследуемых корреляций окажутся очень существенными. Поэтому весьма интересными представляются поиски T -нечетных корреляций в делении при использовании в качестве третьей частицы нейтронов и γ -квантов деления. Предложения постановки таких экспериментов были рассмотрены в наших работах [7], а их реализация уже начата в настоящее время.

В целом из анализа всей имеющейся к настоящему времени информации можно высказать общее предположение, что появление большой T -нечетной асимметрии, обнаруженной в работе [1], обусловлено именно сложным характером реакции деления и ее ярко выраженной коллективной природой [8]. Для подтверждения этого вывода необходимы дальнейшие детальные исследования эффекта T -нечетной асимметрии вылета легких частиц в тройном делении [7, 8] и исследования T -нечетных корреляций в простейших нейтронных реакциях с более высокой точностью.

В заключение авторы выражают свою глубокую благодарность В.П.Плахтию и его сотрудникам за предоставление возможности работы на пучке поляризованных нейтронов реактора ВВР-М, Б.Г.Пескову за изготовление тонких мишеней из ^{10}B и Н.П.Афанасьевой за изготовление полупроводниковых детекторов заряженных частиц.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 99-02-17275) и INTAS (грант # 99-00229).

-
1. P.Jesinger, A.Kotzle, A.M.Gagarski et al., Proc. of Intern. Workshop "Nuclear Fission and Fission Product Spectroscopy", Seyssins, France, 1998, AIP Conference Proc. 447, Woodbury, New York, p.395.
 2. Schreckenbach et al., *Time Reversal Invariance and Parity Violation in Neutron Reactions*, Proc. of the Second Intern. Workshop, Dubna, Russia, 4-7 May 1993. World Scientific, Singapore, 1994, p.187.
 3. G.V.Danilyan, ILL Proposal 3-07-76, 1996, Grenoble, France.
 4. Р.М.Рындин, *Материалы III Зимней школы ФТИ по теории ядра и физике высоких энергий*, часть II, Ленинград, 1968, стр.39; E.M.Henley and B.A.Jacobsohn, Phys. Rev. Lett. **16**, 716 (1966); V.Bunakov and L.Pikelner, Prog. Part. Nucl. Phys. **39**, 337 (1997).
 5. V.A.Vesan, Yu.M.Gledenov, I.S.Okunev et al., Phys. Atomic. Nucl. **59**, 19 (1996).
 6. Н.В.Боровикова, В.А.Весна, А.И.Егоров и др., Письма в ЖЭТФ **30**, 527 (1979).
 7. G.A.Petrov, V.E.Bunakov, A.M.Gagarski et al., ISINN-8, Dubna, Russia, 17-20 May 2000, p.51; F.Goennenwein, V.E.Bunakov, G.A.Petrov et al. Project INTAS 99-00229 (2000-2002).
 8. V.E.Bunakov and G.A.Petrov, ISINN-8, Dubna, Russia, 17-20 May 2000, p.53.