

Лево-правая асимметрия углового распределения мгновенных нейтронов деления ядер ^{235}U поляризованными тепловыми нейтронами

Г. В. Данилян, В. А. Крахотин, В. С. Павлов, А. В. Федоров

Институт теоретической и экспериментальной физики, 117218 Москва, Россия

Поступила в редакцию 14 октября 2002 г.

После переработки 4 ноября 2002 г.

Представлены результаты измерения лево-правой асимметрии эмиссии мгновенных нейтронов деления ядер ^{235}U поляризованными тепловыми нейтронами, обусловленной интерференцией s - и p -волн во входном канале реакции. Измеренное значение коэффициента асимметрии оказалось равным $b = (-5.8 \pm 1.4) \cdot 10^{-5}$.

PACS: 25.85.-w

В нашей предыдущей публикации [1] были приведены предварительные результаты поиска эффекта sp -интерференции в эмиссии мгновенных нейтронов деления ядер ^{235}U поляризованными тепловыми нейтронами, которые можно было рассматривать как указание на наличие искомого эффекта. Геометрия эксперимента показана на рисунке.

Мишень представляет собой алюминиевую пластину размерами 90×220 мм и толщиной 0.2 мм, на обе стороны которой нанесены слои окиси-заокси ^{235}U . Суммарное содержание ^{235}U на мишени составляло 1.3 г. Коллимированный пучок поляризованных тепловых нейтронов плотностью потока $10^5 \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ “скользил” вдоль мишени. Осколки деления регистрировались многопроволочными пропорциональными счетчиками низкого давления (камера наполнялась гексаном до давления 3 торр). Измерялись задержанные совпадения между импульсами от нейтронного детектора (пластический сцинтиллятор и ФЭУ-63) и осколочных детекторов. Совпадения осколков с мгновенными γ -лучами деления дискриминировались по времени пролета. Измерения проводились в режиме on-line в течение 15-минутных циклов, после которых на дисплей выводился результат обработки 4 временных спектров (по 2 для каждого нейтронного детектора), а именно, значения асимметрий:

$$b_i = (N_{1i} - N_{2i}) / (N_{1i} + N_{2i}), \quad (1)$$

где i – номер детектора, N_1 и N_2 значения интегралов по временным спектрам нейтронов при двух противоположных направлениях поляризации нейтронов.

Одновременно на дисплей выводились и усредненные данные с среднеквадратичными ошибками, накопленными после данного i -го цикла. В результате

примерно 1000-часовых измерений была обнаружена искомая асимметрия:

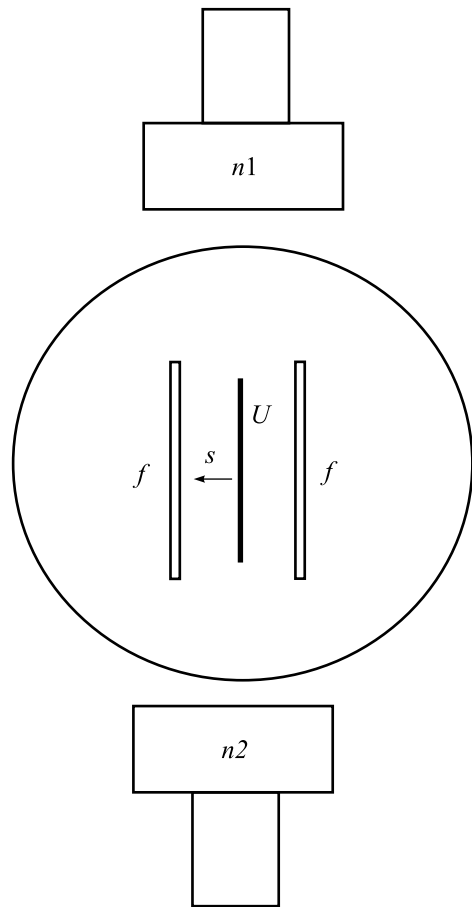
$$b = (-5.8 \pm 1.4) \cdot 10^{-5}.$$

Теория [2] предсказывает различные эффекты, обусловленные интерференцией s - и p -волн во входном канале реакции захвата медленных нейтронов ядрами. Например, при захвате поляризованных нейтронов ядрами A в реакции $n + A \rightarrow C + c$ угловое распределение частиц c будет описываться выражением

$$W(\theta) = \text{const}(1 + bs[\mathbf{n}_{in}, \mathbf{n}_c]), \quad (2)$$

где s – единичный вектор в направлении поляризации пучка падающих на ядро A нейтронов, \mathbf{n}_{in} и \mathbf{n}_c – единичные векторы в направлениях импульсов захватываемого нейтрона и частицы c .

Коэффициент b , как по модулю, так и по знаку зависит от энергии захватываемых ядром нейтронов, положения s - и p -резонансов составного ядра и квантовых характеристик начального и конечного состояний. В области тепловых энергий нейтронов коэффициент b для средних и тяжелых ядер порядка 10^{-4} . Если в реакцию вносят вклад несколько начальных состояний или несколько конечных состояний, то коэффициент b при суммировании по этим состояниям будет меньше, чем для одного состояния, поскольку может иметь место суммирование коэффициентов с противоположными знаками. Это обстоятельство и используется нами для поиска так называемых “предделительных” или “scission” нейтронов. Мгновенные нейтроны деления в основном испускаются возбужденными, полностью ускоренными осколками. На это указывает их угловое распределе-



Геометрия эксперимента: U – мишень ^{235}U ; f – детекторы осколков деления; n_1, n_2 – детекторы мгновенных нейтронов деления; s – направление поляризации пучка тепловых нейтронов, падающих на мишень перпендикулярно плоскости рисунка. Направление поляризации ежесекундно реверсировалось

ние, вытянутое вдоль оси деления, то есть, вдоль импульсов осколков деления, что является следствием сложения скоростей. Однако некоторая доля мгновенных нейтронов имеет почти сферически симметричное угловое распределение, что свидетельствует о том, что они испускаются возбужденным ядром до его разрыва на два осколка. Экспериментальные данные о доле таких нейтронов крайне противоречивы: от 3 % до 35 % [3].

Существуют различные предположения относительно механизма эмиссии предделительных нейтронов. Возможна эмиссия нейтронов при “спуске” от седловой точки к конфигурации ядра непосредственно перед разрывом “шейки”, соединяющей два будущих осколка. В этой связи следует обратить внимание на процесс деления, условно принятый называть “тройным” делением, когда кроме двух оскол-

ков испускаются еще легкие заряженные частицы ($p, d, t, ^3\text{He}, \alpha, ^5\text{He}$ и т.д.). Угловые и энергетические распределения этих частиц являются следствием их фокусировки и ускорения в кулоновском поле двух осколков, и, следовательно, они появляются в области между осколками. Наиболее вероятно, что они испускаются “шейкой” в процессе ее “остывания”. Очевидно, что нет никаких запретов эмиссии по тому же механизму и нейтронов. Более того, в отличие от заряженных частиц, для нейтронов не существует кулоновского барьера, и, следовательно, вероятность эмиссии нейтронов должна быть много больше вероятности эмиссии протонов. Если это действительно так, то процесс деления, сопровождающийся эмиссией нейтронов из “шейки”, можно было бы считать “нейтральной компонентой” тройного деления ядер.

Не так давно Сотрудничеством ИТЭФ, Тюбингенский университет, Дармштадский технический университет, ПИЯФ, Курчатовский институт и Институт Лауэ-Ланжевена в поисковом эксперименте, поставленном на пучке поляризованных холодных нейтронов высокопоточного реактора ИЛЛ, была обнаружена лево-правая асимметрия эмиссии α -частиц тройного деления ядер ^{233}U и ^{235}U относительно плоскости, определяемой векторами поляризации нейтронов, индуцирующих деление, и импульса легкого осколка [4, 5]. Измеренное значение коэффициента асимметрии оказалось порядка 10^{-3} . Однако учет степени поляризации делящегося ядра может увеличить это значение до 10^{-2} . Обнаруженная асимметрия может быть описана выражением:

$$W = \text{const}(1 + Ds[\mathbf{n}_{lf}, \mathbf{n}_\alpha]), \quad (3)$$

где \mathbf{n}_{lf} и \mathbf{n}_α – единичные векторы в направлениях импульсов легкого осколка и длиннопробежной α -частицы, соответственно.

Как выражение (1), так и выражение (2) формально инвариантны относительно операции обращения времени. Что касается эффекта sp -интерференции, то из теории следует, что коэффициент b содержит в качестве множителя фазу, которая также изменяет свой знак при инверсии времени. Если корреляция (3) обусловлена взаимодействием в конечном состоянии, то и коэффициент D также должен содержать фазу. К сожалению, процесс тройного деления столь сложен, что едва ли появится строгое теоретическое объяснение обнаруженного явления. Остается только предпринять дальнейшее, более детальное, экспериментальное исследование этой корреляции.

В этой связи представляет интерес выяснить возможную природу взаимодействия в конечном состоянии трех заряженных частиц. Оно может иметь

электромагнитную природу, либо быть обусловленным сильным взаимодействием. Если имеет место кулоновское взаимодействие, то, очевидно, не может быть аналогичного эффекта в нейтральной компоненте тройного деления ядер. Но прежде чем ставить такой эксперимент, требующий высокоинтенсивного пучка поляризованных нейтронов, следовало бы убедиться, что нейтральная компонента тройного деления действительно существует. Обнаруженный нами эффект sr -интерференции как раз убеждает нас в этом, поскольку нейтроны, испускаемые осколками, в силу громадного числа конечных состояний не могут проявить эффект интерференции s - и p -волн во входном канале реакции. Как в эмиссии α -частиц тройного деления, так и в эмиссии предделительных нейтронов бинарного деления ядер число конечных состояний может быть не столь велико, чтобы эффекты угловых корреляций при суммировании по ним стремились к нулю.

Эффект sr -интерференции при захвате поляризованных тепловых нейтронов ядрами ^{235}U , проявляющийся в лево-правой асимметрии углового распределения осколков деления¹⁾, был измерен [6] и составляет величину порядка 10^{-4} . Такого же порядка величину коэффициента лево-правой асимметрии в эмиссии предделительных нейтронов можно было бы ожидать в случае очень малого числа конечных состояний в этом процессе. Для осколочных нейтронов величина аналогичного эффекта может быть порядка $10^{-4}/\sqrt{10^8} = 10^{-8}$. Однако осколочные нейтроны, тем не менее, играют важную роль в наших измерениях, поскольку невозможно отличить их от предделительных нейтронов и дискриминироваться от них. Неизбежный фон, который они создают, уменьшает величину измеренной асимметрии в $(1 + \delta)$ раз, где δ есть отношение числа осколочных нейтронов к числу предделительных нейтронов. Можно, следовательно, ожидать подавления истинного коэффициента асимметрии от 3 до 30 раз, что не противоречит измеренному значению коэффициента $|b| = 5.8 \cdot 10^{-5}$. Кроме того, результат должен быть приведен к 100% поляризации ядра, и в него должна быть внесена

поправка на геометрию эксперимента, что может в сумме составить фактор еще одного порядка. Конечно, учитывая отличие α -частицы от нейтрона по спину, необходимо получить более определенное значение коэффициента асимметрии для нейтронов. Возможность уточнения значения коэффициента δ действительно имеется. Поскольку угловые распределения осколочных и предделительных нейтронов существенно различаются, то δ оказывается зависящим от угла между осью разлета осколков и направлением на детектор нейтронов. Минимальный фон осколочных нейтронов, а следовательно, максимальное значение коэффициента лево-правой асимметрии углового распределения регистрируемых нейтронов, должен наблюдаться под углом 90° . Как показывает Монте-Карло моделирование эксперимента для реальной геометрии, измерив значения коэффициентов $b(90^\circ)$ и $b(45^\circ)$ с точностью 10^{-6} , можно будет не только определить истинное значение коэффициента корреляции, но и с 10%-ной точностью определить долю предделительных нейтронов в суммарном числе мгновенных нейтронов деления. Такой эксперимент нами в настоящее время готовится.

Авторы признательны Ю. А. Белову за техническую помощь в проведении эксперимента и сотрудникам реактора МИФИ, на пучке поляризованных нейтронов которого проводились измерения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант # 00-02-16011).

1. Г. В. Данилян, В. А. Крахотин, В. С. Павлов, А. В. Федоров, Письма в ЖЭТФ **74**, 448 (2001).
2. О. П. Сушков, В. В. Фламбаум, УФН **25**, 1 (1982).
3. N. V. Kornilov, A. V. Kagalenko, and F.-J. Hamsch, ISINN-9, Dubna, 1999, p. 241.
4. P. Jesinger, G. V. Danilyan, A. M. Gagarski et al., ЯФ **62**, 1723 (1999).
5. G. V. Danilyan, A. V. Fedorov, A. M. Gagarski et al., ЯФ **63**, 1759 (2000).
6. V. P. Alfimenkov, A. N. Chernikov, A. M. Gagarski et al., ISINN-4, Dubna, 1996, p. 120.

¹⁾ Число конечных состояний в процессе деления порядка $10^8 \div 10^{10}$, однако подавления корреляции не происходит благодаря тому, что корреляция формируется на стадии холодного сильно деформированного ядра грушевидной формы в седловой точке, где число состояний, по которым производится суммирование, невелико.