Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 4, с. 220 – 222

Об относительных знаках “ROT-эффектов” в тройном и бинарном делении ядер ^{233}U и ^{235}U поляризованными холодными нейтронами

Г. В. Данилян[1)]

НИЦ “Курчатовский институт” – Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова, 117218 Москва, Россия

Поступила в редакцию 25 декабря 2017 г.

После переработки 29 декабря 2017 г.

Знаки “ROT-эффектов” в тройном делении ядер ^{233}U и ^{235}U, экспериментально определенные группой ПИЯФ, одинаковы, тогда как, определенные группой ИТЭФ в бинарном делении тех же ядер – противоположны. Данное противоречие невозможно объяснить ошибками первой, или второй группы, поскольку систематические погрешности должны быть столь велики, что их невозможно было бы не заметить. Следовательно, необходимо искать решение возникшей проблемы в различии механизмов тройного и бинарного деления.

DOI: 10.7868/S0370274X18040021

В 2005 г. сотрудничество ПИЯФ и Тюбингенский Университет (Германия) продолжало детальные исследования “TRI-эффекта” в тройном делении ядер, ранее обнаруженного большой коллаборацией российских и немецких институтов на высокопоточном реакторе Института Лауэ-Ланжевена в тройном делении ядер ^{233}U поляризованными холодными нейтронами [1]. Измеряемую в эксперименте корреляцию можно описать выражением:

$$W = \mathrm{Const}\{1 + D\mathbf{P}_\alpha[\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{P}_{\mathrm{lf}}]\}, \qquad (1)$$

где D – коэффициент корреляции, $\boldsymbol{\sigma}$ – вектор поляризации пучка нейтронов, индуцирующих деления ядра-мишени, $\mathbf{P}_{\mathrm{lf}}$ и $\mathbf{P}_\alpha$ – импульсы легкого осколка и длиннопробежной α-частицы соответственно.

К удивлению самих участников поискового эксперимента, искомая корреляция была обнаружена: α-частицы эмитировались мишенью асимметрично относительно плоскости, определяемой векторами $\boldsymbol{\sigma}$ и $\mathbf{P}_{\mathrm{lf}}$. Коэффициент асимметрии $\langle D\rangle$ оказался порядка 10^{-3}, что и послужило поводом назвать обнаруженное явление “TRI-effect”. Природа обнаруженной корреляции неизвестна, и поэтому ее теоретические и экспериментальные исследования продолжались. Авторы работы [2], измеряя TRI-эффект при тройном делении ядер ^{235}U, случайно обнаружили странный эффект: угловое распределение длиннопробежных α-частиц, регистрируемых в плоскости, ортогональной направлению продольно поляризованного пучка холодных нейтронов, смещалось на малый угол в направлении оси деления при реверсировании направления поляризации пучка нейтронов. Авторы пришли к выводу, что это смещение обусловлено вращением делящегося ядра в момент его развала, и оно было названо “ROT-effect” (от rotation). Аналогичный эффект был обнаружен и при делении ядер ^{233}U [3]. Оба ROT-эффекта оказались одного знака, тогда как знаки TRI-эффектов для этих же ядер противоположны.

Чтобы быть уверенными, что здесь нет ошибки, группа ИТЭФ предприняла одновременные измерения ROT-эффектов в эмиссии мгновенных γ-лучей и нейтронов для мишеней ^{235}U и ^{233}U [4]. Мишень представляла собой “сендвич”. В одной половине камеры деления детектировались совпадения импульсов с детекторов γ-квантов и нейтронов с импульсами с детекторов осколков деления (ОД), эмитируемых мишенью ^{233}U, тогда как в другой – детектировались совпадения с ОД, эмитируемых мишенью ^{235}U. Результаты измерений группы ИТЭФ, касающиеся относительных знаков ROT-эффектов в тройном и бинарном делении, оказались в противоречии с данными группы ПИЯФ. Все экспериментальные данные приведены в табл. 1. Что бы это могло означать? Мы попытаемся найти решение этой проблемы, предположив не очень очевидный сценарий.

При захвате неполяризованным ядром со спином основного состояния $\mathbf{I}$ поляризованного s-нейтрона когерентно возбуждаются состояния компаунд ядра со спинами $\mathbf{J} = \mathbf{I} + 1/2$ и $\mathbf{J} = \mathbf{I} - 1/2$. В первом состоянии направление поляризации составного ядра совпадает с направлением поляризации пучка нейтронов, тогда как во втором состоянии оно противоположно. В экспериментах нейтроны продольно поля-

[1)]e-mail: danilyan@itep.ru

Таблица 1. Экспериментальные данные по ROT- и TRI-эффектам ядер ^{233}U и ^{235}U

	Частица	Корреляция	^{233}U	^{235}U
1	α-TRI	$W = \text{Const}\{1 + D_\alpha \mathbf{P}_\alpha \cdot [\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{P}_{\text{lf}}]\}$	$-3.90(10) \cdot 10^{-3}$	$+1.70(12) \cdot 10^{-3}$
2	α-ROT		$+0.021(4) \cdot 10^{-3}$	$+0.215(5) \cdot 10^{-3}$
3	γ-ROT		$-6.3(1.6) \cdot 10^{-5}$	$+16.6(1.6) \cdot 10^{-5}$
4	n-ROT		$-4.8(1.6) \cdot 10^{-5}$	$+21.2(2.5) \cdot 10^{-5}$

ризованы, и если вектор поляризации ядра совпадает с направлением пучка нейтронов, то такая поляризация составного ядра принимается за положительную. В противном случае она отрицательна. Ядро с отличным от 0 спином вращается, и если оно поляризовано, то ось деформации ядра вращается вокруг вектора его поляризации. Как правило, принимается правовинтовая система отсчета, и направление вращения оси деформации считается положительным, если оно поворачивается направо.

Вращение оси деформации в точке разрыва ядра приводит к смещению оси деления, определяемого траекторией ОД, которая вместо прямолинейной становится гиперболической благодаря дополнительной орбитальной составляющей скорости ОД в точке разрыва ядра. В экспериментах по исследованию тройного деления вектор поляризации делящегося ядра параллелен оси Z, определяемой направлением продольно поляризованного пучка нейтронов. Вдоль оси X летит легкий ОД, а α-частицы, эмитируемые делящимся ядром, детектируются вдоль оси Y. Смещение оси деления означает, что оси X и Y поворачиваются на угол (θ) вокруг оси Z. Угловое распределение α-частиц не смещается вследствие этого поворота, но в новой координатной системе X', Y' оно выглядит смещенным на угол ($-\theta$), когда ось деления поворачивается направо. При реверсе поляризации пучка нейтронов ось деления смещается на угол ($-\theta$), а угловое распределение α-частиц “смещается” на угол θ. Измеряя скорость счета совпадений детекторами α-частиц при двух направлениях поляризации пучка нейтронов, будет обнаружена разница в числе событий совпадения. Отношение разности счетов к суммарному счету определяет измеряемую асимметрию счета относительно направления поляризации пучка нейтронов:

$$A = (N^+ - N^-)/(N^+ + N^-). \qquad (2)$$

Здесь N^+ и N^- – число совпадений в секунду импульсов от детекторов частиц с импульсами от детекторов осколков при противоположных направлениях поляризации пучка нейтронов.

Величина измеряемой асимметрии определяется формулой:

$$A = \theta \cdot F'(\theta)/F(\theta), \qquad (3)$$

где $F(\theta)$ – функция углового распределения регистрируемых частиц, $F'(\theta)$ – ее производная в среднем положении детектора частиц. Результаты измерений группы ИТЭФ, приведенные в табл. 1, представляют асимметрии. Группа ПИЯФ также представляет измеренные асимметрии, но пересчитанные на углы смещения α-частиц. Однако между этими двумя данными по асимметриям есть существенная разница. Асимметрия в бинарном делении однозначно определяет угол смещения траектории осколка θ, тогда как асимметрия, измеренная в тройном делении, представляет разностный угол $\Delta = \theta - \delta$, где δ – угол смещения α-частицы, увлекаемой вращающимся кулоновским полем двух осколков. Измерить этот угол в эксперименте невозможно, и для того, чтобы определить θ, представляющий собой основную характеристику ROT-эффекта, необходимо определить δ в траекторных расчетах, которые, как известно, допускают большой произвол в выборе начальных условий. Следовательно, данные по ROT-эффектам в тройном делении – модельно зависимые.

Группа ПИЯФ измеряла TRI- и ROT-эффекты не только для ядер-мишеней ^{235}U и ^{233}U, но и для ^{239}Pu и ^{241}Pu [5]. Все экспериментальные данные по TRI- и ROT-эффектам приведены в табл. 2.

Обращает на себя внимание, что знаки ROT-асимметрий в тройном делении всех четырех исследованных ядер оказались положительными. В то же время знаки ROT-эффектов в бинарном делении ядер ^{233}U и ^{235}U противоположны. Что бы могло означать, что знаки ROT-эффектов при делении всех четырех ядер положительны? Если это случайное совпадение знаков, что маловероятно, то проблема различия в относительных знаках ROT-эффектов в тройном и бинарном делении ядер ^{233}U и ^{235}U остается не решенной. Однако, может быть, все же, есть объяснение?

Современное представление о тройном делении исходит из предположения, что в конфигурации ядра перед разрывом, или в момент разрыва, из шейки испускается легкая заряженная частица (в основном, это α-частица). Однако этот процесс достаточно редкий по сравнению с бинарным делением, т.е. когда шейка разрывается в одной точке, и образуются два

Таблица 2. Экспериментальные данные по TRI- и ROT-эффектам при тройном и бинарном делении ядер

	Частица	Корреляция	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu	^{241}Pu
1	α-TRI в ед. 10^{-3}	$W = \mathrm{Const}\{1 + D_\alpha \mathbf{P}_\alpha \cdot [\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{P}_{\mathrm{lf}}]\}$	$-3.9(1)$	$+1.7(2)$	$-0.23(9)$	$+1.30(15)$
2	α-ROT угол Δ в град.		$+0.021(4)$	$+0.215(3)$	$+0.020(3)$	$+0.047(4)$
3	γ-ROT в ед. 10^{-5}		$-6.3(1.6)$	$+16.6(1.6)$		
4	n-ROT в ед. 10^{-5}		$-4.8(1.6)$	$+21.2(2.5)$		

осколка. Как выше было описано, материнское ядро вращается в ту или другую сторону, в зависимости от значения его спина. Оказалось, что редкий процесс тройного деления происходит в основном при спине делящегося ядра $\mathbf{J} = \mathbf{I} + 1/2$, тогда как для бинарного деления значение спина материнского ядра не играет никакой роли. Крайне маловероятно, что такое предпочтение имеет место в очень быстром процессе спуска с седловой точки к конфигурации разрыва шейки (scission). Вероятнее всего, что формирование тройного деления происходит в предделительной конфигурации в седловой точке, благоприятной для эмиссии легких заряженных частиц, например, в конфигурации с формированными кластерами. Почему же такая конфигурация предпочитает значение спина $\mathbf{J} = \mathbf{I} + 1/2$ – это тема для специального исследования.

Какие аргументы можно привести против такого сценария? Во-первых, естественно задать вопрос: почему же знаки TRI-эффектов не оказались положительными? Ответ очень простой. Коэффициент корреляции D_α в формуле (1) имеет свой знак, зависящий от значений спинов начального и конечного состояний ядра, и поэтому, он может быть неодинаков для разных ядер. Второй, весьма важный аргумент – это утверждение авторов работы [6], что относительная вероятность тройного деления к бинарному (T/B) не зависит от спина. В статье анализируются экспериментальные данные по измерениям T/B для большого числа резонансов при делении ядер ^{235}U нейтронами. Однако только шесть резонансов можно считать достаточно изолированными. Из этих шести резонансов только в трех случаях величина спина достаточно надежно установлена в измерениях разных групп. Поэтому утверждение авторов статьи не подкреплено статистической достоверностью.

Если принять приведенные выше соображения, то объясняется и обнаруженное противоречие, когда ROT-эффект в тройном делении ядер ^{233}U имеет положительный знак, а в бинарном – отрицательный. Конечно, очень желательны одновременные измерения TRI- и ROT-эффектов в тройном и бинарном делении ядер ^{235}U и ^{233}U, объединив мишени в “сендвич” – подобно тому, как было сделано в эксперименте группы ИТЭФ. Такой эксперимент мог бы стать experimentum crucis, если ROT-эффекты измерялись бы не только в эмиссии α-частиц, но и в эмиссии мгновенных нейтронов и γ-квантов в совпадении с α-частицей, т.е. в тройном делении.

1. P. Jesinger, G. V. Danilyan, A. M. Gagarski, P. Geltenbort, F. Goennenwein, A. Koetzle, Ye. I. Korobkina, M. Mutterer, V. Nesvizhevsky, S. R. Neumaier, V. S. Pavlov, G. A. Petrov, V. I. Petrova, K. Schmidt, V. B. Shvachkm, and O. Zimmer, Phys. At. Nucl. **62**(9), 1608 (1999).
2. F. Goennenwein, M. Mutterer, A. Gagarski, I. Guseva, G. Petrov, V. Sokolov, T. Zavarukhina, Yu. Gusev, J. von Kalben, V. Nesvizhevski, and T. Soldner, Phys. Lett. B **652**(1), 13 (2007).
3. A. Gagarski, I. Guseva, F. Gonnenwein et al. (Collaboration), *Proc. XIV Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, Dubna*, Russia (2006), p. 93.
4. G. V. Danilyan, J. Klenke, Yu. N. Kopatch, V. A. Krakhotin, V. V. Novitsky, V. S. Pavlov, and P. B. Shatalov, Phys. At. Nucl. **77**(1), 677 (2014).
5. A. Gagarski, F. Goennenwein, I. Guseva, P. Jesinger, Yu. Kopatch, T. Kuzmina, E. Lelièvre-Berna, M. Mutterer, V. Nesvizhevsky, G. Petrov, T. Soldner, G. Tiourine, W. H. Trzaska, and T. Zavarukhina, Phys. Rev. C **93**, 054619 (2016).
6. C. Wagemans and A. J. Deruytter, Nucl. Phys. A **194**, 657 (1972).