

О НАБЛЮДАЕМЫХ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ЭФФЕКТАХ ВРАЩЕНИЯ ДЕЛЯЩЕГОСЯ ЯДРА (ROT-ЭФФЕКТАХ)

© 2023 г. Г. В. Данилян^{1)*}

Поступила в редакцию 16.02.2023 г.; после доработки 23.03.2023 г.; принята к публикации 01.04.2023 г.

В экспериментах на поляризованных пучках нейтронов обнаружены эффекты, свидетельствующие о вращении делящегося ядра. Основным фактором для такого заключения является асимметрия счета совпадений между детекторами частиц, сопровождающих деление, и детекторами осколков, при реверсе направления поляризации пучка нейтронов вызывающих деление исследуемых ядер. Измеряемая асимметрия объясняется авторами открытия смещением углового распределения частиц в направлении по или против направления вращения делящегося ядра. В большинстве публикаций это смещение также объясняется вращением углового распределения частиц в направлении вращения оси деления ядра. В настоящей работе излагается достаточно простое альтернативное объяснение.

DOI: 10.31857/S0044002723050112, EDN: IDJDNV

1. Большой коллаборацией институтов России и Германии на холодном поляризованном пучке высокопоточного реактора Института Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ) был предпринят эксперимент по поиску T -нечетной трех-векторной угловой корреляции в тройном делении ядер ^{233}U :

$$W(\mathbf{P}_f, \mathbf{P}_\alpha, \mathbf{S}) = \text{Const.} \{1 + DS[\mathbf{P}_f \times \mathbf{P}_\alpha]\}, \quad (1)$$

где D — коэффициент корреляции, $\mathbf{S}$ — единичный вектор в направлении поляризации пучка нейтронов, $\mathbf{P}_f$ и $\mathbf{P}_\alpha$ — единичные векторы в направлениях импульсов легкого осколка и длиннопробежной α -частицы тройного деления соответственно. Большим сюрпризом, даже для авторов, оказалось, что D не равно нулю, а порядка 10^{-3} [1].

Конечно, обнаруженный эффект не свидетельствует о нарушении временной инвариантности. Вероятнее всего его можно объяснить кориолисовым механизмом [2], поскольку делящееся поляризованное ядро вращается.

Обнаруженное явление детально изучалось, и интерес представляло измерение такой же корреляции при тройном делении ядер ^{235}U . Такой эксперимент был поставлен на пучке поляризованных холодных нейтронов реактора ИЛЛ в 2005 г. Природа преподнесла авторам работы очередной сюрприз: оказалось, что вместо трехвекторной корреляции, обнаруженной при тройном делении ядер ^{233}U , при тройном делении ядер ^{235}U обнаружен

совершенно иной эффект, а именно макроскопический эффект вращения поляризованного делящегося ядра [3, 4]. Он состоял в асимметрии счета совпадений сигналов с детекторов α -частиц с сигналами с детекторов осколков деления относительно направления поляризации пучка нейтронов. Авторы проанализировали все возможные аппаратные эффекты и пришли к объяснению, что угловые распределения (УР) α -частиц смещаются в направлении по или против направления вращения оси деформации делящегося ядра в момент разрыва шейки, соединяющей два будущих осколка. В трактовке авторов измеряемая в эксперименте асимметрия счета совпадений есть разность между смещенными УР, отнесенная к их сумме в позиции расположения детектора α -частиц. Эта гипотеза была “подтверждена” Монте-Карло-расчетами [5]. Авторы работы [3] назвали это явление ROT-эффектом (от rotation).

Это открытие нового явления в физике деления ядер стимулировало постановку экспериментов по поиску аналогичного эффекта в эмиссии γ -квантов и нейтронов возбужденными осколками. Искомые эффекты асимметрии счета совпадений указанных частиц с осколками действительно были обнаружены. Мы не будем объяснять, каким образом γ -кванты и нейтроны, эмитируемые не в момент разрыва шейки, могут проявить ROT-эффекты, порекомендуем читателю статьи [6–8]. Авторы большинства публикаций на эту тему, и в их числе автор настоящей статьи, в своих первоначальных публикациях, следуя работе [3], объясняли обнаруженные асимметрии смещением УР регистрируемых частиц в направлении вращения ядра. На самом

¹⁾НИЦ “Курчатовский институт” — Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия.

*E-mail: danilyan@itep.ru

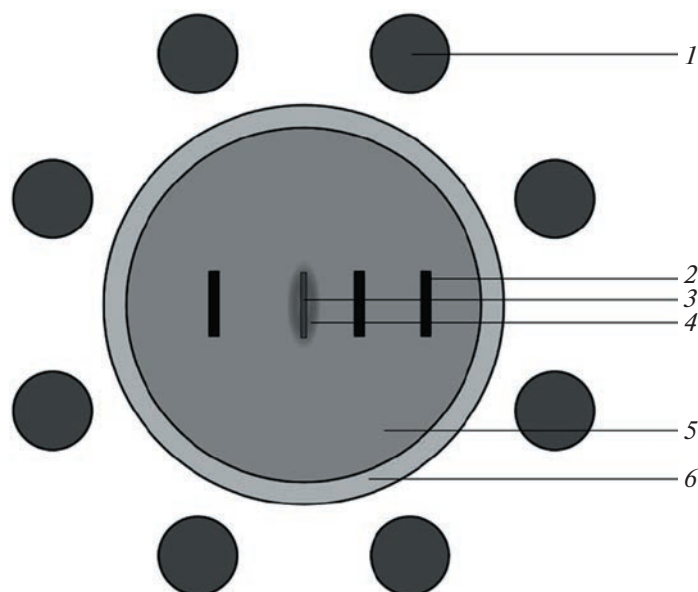


Рис. 1. Условная экспериментальная установка для обнаружения ROT-эффекта. 1 — Детекторы условных частиц, сопровождающих деление ядер, 2 — детекторы осколков деления ядер, 3 — мишень, содержащая делящиеся ядра, 4 — профиль пучка продольно поляризованных нейтронов, 5 — рабочий газ, используемый в детекторах осколков, 6 — корпус камеры деления.

деле можно привести очень простое и наглядное объяснение механизма возникновения асимметрии счета совпадений частицы с осколком при реверсе направления поляризации пучка нейтронов. Ниже описывается этот механизм.

2. Ядро с отличным от нуля спином вращается, и если оно поляризовано, то возникает ось вращения Z . Делящиеся ядра деформированы, и ось деформации должна вращаться относительно этой выделенной оси. При делении вращающегося ядра осколки деления в начальный момент разрыва шейки вследствие орбитального вращения асимметричной “гантели” приобретают тангенциальную составляющую скорости, и, следовательно, их траектории, вместо прямолинейных в направлении оси деформации, обусловленной кулоновским отталкиванием осколков, становятся гиперболическими, что приводит к смещению траектории осколков от направления оси деформации в момент разрыва шейки на малый угол. Этот угол может быть использован для определения скорости вращения делящегося ядра, но для этого необходимо знать направление оси деформации в момент разрыва шейки и конфигурацию асимметричной “гантели”.

Деление ядра, как правило, сопровождается эмиссией частицы, УР которой формируется относительно оси деформации в момент разрыва шейки или коррелирует с ней и, как правило, не зависит от траекторий осколков. Исключением является УР α -частицы тройного деления, поскольку в начальный момент низкоэнергичная α -частица

может вовлекаться кулоновским полем осколков во вращение оси деления. Это УР частицы и является меткой направления оси деформации в момент разрыва шейки. Именно относительно этого направления смещаются траектории осколков.

3. Установки, предназначенные для измерения ROT-эффектов, конечно, отличаются многообразием методик измерений. Но для простоты рассуждений мы приводим схематически условную установку на рис. 1. Мишень, содержащая делящиеся ядра, и детекторы осколков деления расположены в “плоскости”, ортогональной пучку продольно поляризованных нейтронов.

Камера деления окружена детекторами частиц, сопровождающих акт деления ядра. Регистрируются совпадения между сигналами с детекторов осколков с сигналами от всех детекторов частиц. Для простоты рассмотрим ситуацию с совпадением сигнала от осколка с сигналом от одного из детекторов частиц в верхней полусфере. Частица, сопровождающая деления ядра, должна эмитироваться из шейки в момент ее разрыва (scission point) и, очевидно, из “точки”, характеризующей центр масс асимметричной “гантели”. Поскольку последняя вращалась в момент разрыва шейки, то это вращение в меньшей мере скажется на траектории частицы, чем на траектории осколка. Допустим, что рассматриваемый детектор частиц расположен относительно условного УР частицы слева от максимума УР (рис. 2). Будем считать, что делящееся ядро вращается по часовой стрелке, если смотреть на схему установки. Частица попадает

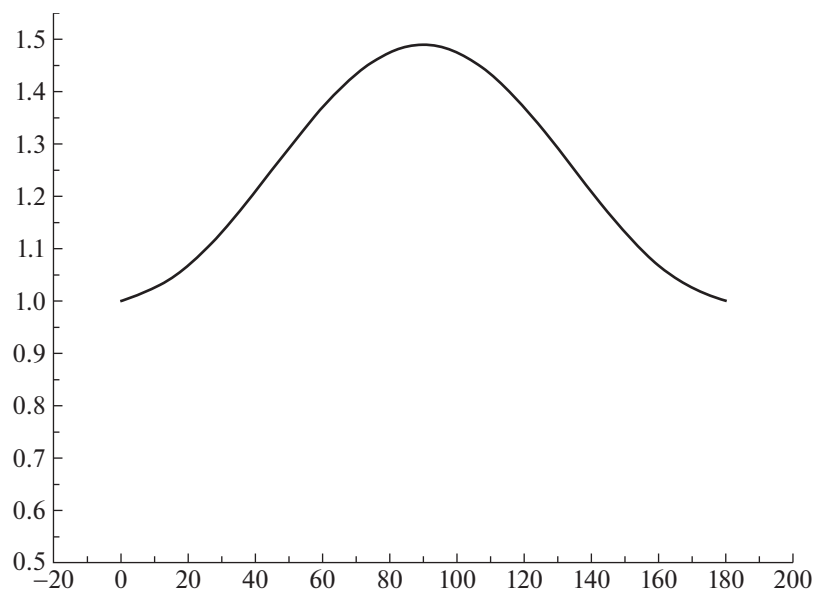


Рис. 2. Условное представление УР регистрируемых частиц в совпадении с осколком.

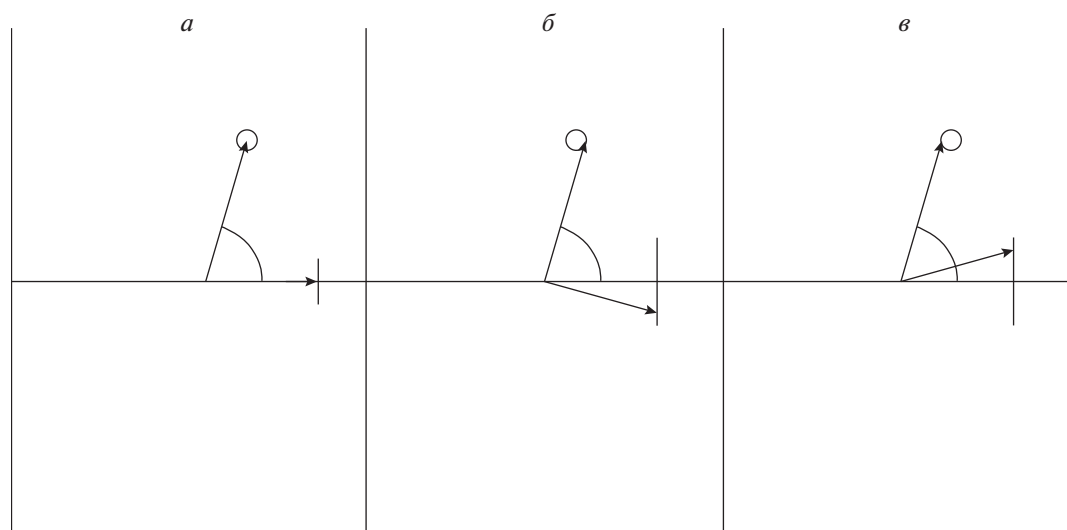


Рис. 3. Схематическое изображение смещений частицы и осколка. *а* — Пучок нейтронов не поляризован. Делящееся ядро не вращается. *б* — Ядро вращается по часовой стрелке. Частица отклоняется на небольшой угол, тогда как осколок смещается на угол θ . Угол между частицей и осколком увеличивается по сравнению с левым рисунком. *в* — Ядро вращается против часовой стрелки. Угол между частицей и осколком уменьшается по сравнению с левым рисунком.

в детектор по “вращающейся” траектории также по часовой стрелке, но ненамного отличающейся от прямолинейной, тогда как осколок смещается в направлении по часовой стрелке на небольшой угол θ . Легко видеть на рис. 3, что вследствие различия в эффектах смещения траекторий частицы и осколка угол между “точками” регистрации частицы и осколка в соответствующих детекторах увеличился. Имея в виду, что УР частицы есть ни что иное, как вероятность зарегистрировать частицу под данным углом, приходим к выводу, что при вращении асимметричной “гантели” по часовой

стрелке вероятность зарегистрировать частицу в позиции рассматриваемого детектора увеличилась. Очевидно, что при вращении делящегося ядра против часовой стрелки угол уменьшится (рис. 3), и, следовательно, вероятность регистрации уменьшится. Такое имеет место для всех детекторов частиц в верхней полусфере экспериментальной установки. В нижней полусфере картина будет обратной. Очевидно, счет совпадений счетчиком, соответствующим вращению “гантели” по часовой стрелке, должен возрасти, поскольку вероятность регистрации частицы увеличилась. И, соот-

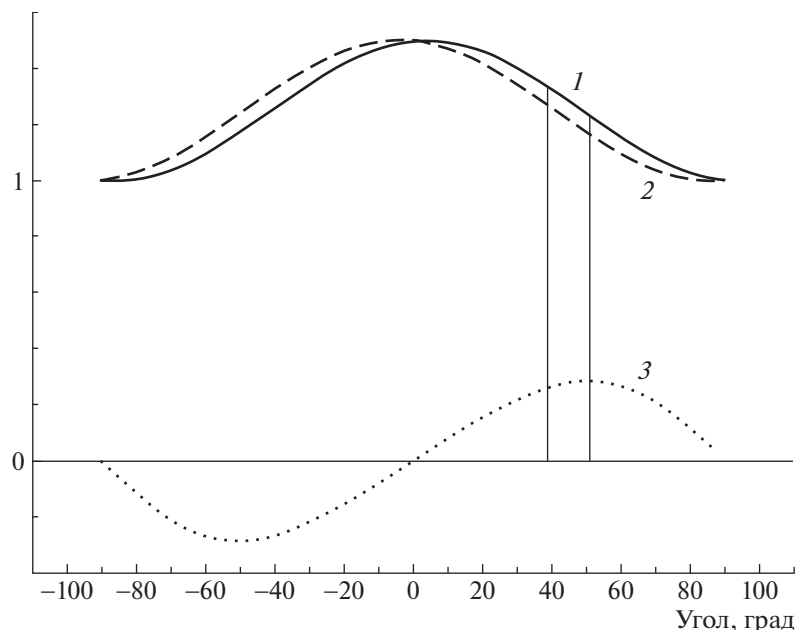


Рис. 4. Угловое распределение условных частиц, сопровождающих деление. 1 и 2 — угловые распределения при вращении ядра по часовой стрелке и против соответственно, 3 — их разность в увеличенном масштабе.

ответственно, счет совпадений счетчиком, соответствующим вращению “гантели” против часовой стрелки — уменьшится. Разность показаний двух указанных счетчиков событий совпадения частицы с осколком, отнесенная к их сумме, и есть измеряемая в эксперименте асимметрия счета для детектора частицы под данным углом к детектору осколков относительно направления поляризации пучка нейтронов.

4. Выше рассмотрен частный случай УР частиц. В общем случае знак и величина асимметрии счета совпадений для каждого детектора частицы зависят от знака и величины производной УР частиц в месте расположения данного детектора частицы. Коэффициент асимметрии как функцию угла между детекторами частицы и осколка можно записать как

$$A = \frac{N^+(\varphi) - N^-(\varphi)}{N^+(\varphi) + N^-(\varphi)} = 2\theta \left\{ \frac{\partial F(\varphi)}{\partial \varphi} \right\} / F(\varphi). \quad (2)$$

Здесь $N^+(\varphi)$ — число совпадений сигналов с детектора частиц, расположенного под углом φ к оси абсцисс, при положительном смещении траектории осколка, $N^-(\varphi)$ — при отрицательном, $F(\varphi)$ — функция, описывающая УР частицы.

Зная $F(\varphi)$, можно вычислить θ . Очевидно, что величины производных УР при разных углах зависят от коэффициента анизотропии УР. В отличие от тройного деления ядер, где анизотропия УР достаточно велика, для γ -квантов и нейтронов анизотропия не столь велика, поэтому как измеряемая

в эксперименте асимметрия, так и угол θ , очень малы.

Следует подчеркнуть, что во всех экспериментах по обнаружению ROT-эффекта единственной измеряемой величиной является асимметрия счета совпадений сигналов с детекторов частиц с сигналами с детекторов осколков деления ядра. Как ясно из изложенного, для объяснения наблюдаемой в эксперименте асимметрии, нам не пришлось прибегать к смещениям УР. Однако если по данным счетчиков событий совпадений частицы с осколком при двух противоположных направлениях поляризации пучка нейтронов построить УР, соответствующих каждому из направлений поляризации пучка нейтронов, то можно обнаружить, что построенные УР частицы смещены друг относительно друга на угол 2θ , как это показано на рис. 4. Это смещение УР возникло вследствие сдвига траектории осколка, но в публикациях оно приводится как следствие “вращения” УР.

В качестве примера применения предлагаемой модели ROT-эффекта рассмотрим корреляцию знаков коэффициентов асимметрий при тройном делении ядер ^{235}U , опубликованную в работе [3]. Рисунок 5 мы взяли из этой статьи. На нем схематически показана экспериментальная установка, на которой и был обнаружен ROT-эффект при тройном делении ядер ^{235}U . Знаки коэффициентов асимметрий, показанные в верхней части установки, получены при направлении пучка продольно поляризованных нейтронов, обозначенного как σ_{+z} , что означает вращение делящегося

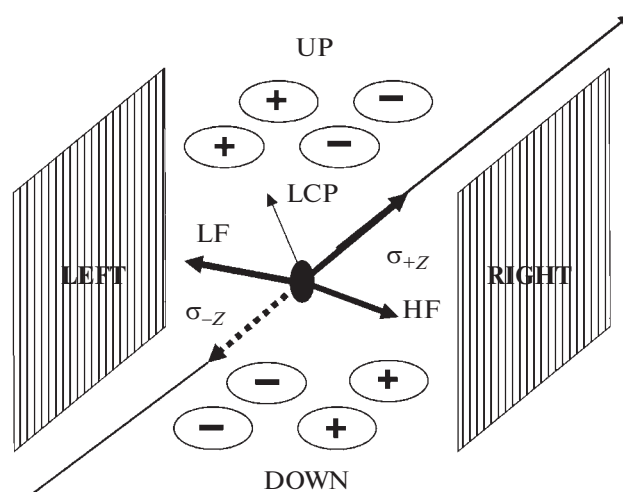


Рис. 5. Изображение корреляций знаков коэффициентов асимметрий при измерениях ROT-эффекта в тройном делении ядер ^{235}U с регистрацией совпадений сигналов с α -детекторов с сигналами от детекторов осколков. Картина воспроизводит знаковую корреляцию в измерениях при направлении поляризации пучка нейтронов σ_{+z} , когда ядро вращается по часовой стрелке, и реверсированном направлении σ_{-z} , когда ядро вращается против направления часовой стрелки.

ядра по часовой стрелке, если смотреть на рисунок. Симметричное угловое распределение α -частиц проявляет максимум при 82° , поэтому левая группа детекторов α -частиц располагалась при 68° , тогда как правая при угле 112° . Рассматривались совпадения сигналов с детекторов α -частиц с сигналами от детекторов, зарегистрировавших легкие осколки. Как отмечалось выше, в начальный момент своего рождения низкоэнергичная α -частица увлекается вращающимся кулоновым полем осколков и поворачивается на небольшой угол, много меньший угла смещения легкого осколка. Для простоты рассуждений в первом приближении этим углом пренебрежем. Для детекторов, расположенных под углом 68° , угол между α -частицей и смещенным осколком возрастет, и, следовательно, вероятность регистрации α -частицы возрастает. При реверсе направления поляризации пучка нейтронов, наоборот, угол между α -частицей и смещенным осколком уменьшится, следовательно, вероятность регистрации уменьшится. Набор рассматриваемых событий покажет, что измеряемая асимметрия положительна, как и показано на схеме. Чтобы не перегружать читателя лишней информацией, сообщим, что для группы детекторов α -частиц, расположенных под углом 112° , ситуация будет обратная, и знаки коэффициентов асимметрии окажутся отрицательными, опять же, как показано на рисунке. Очевидно, что картина для нижних групп детекторов α -частиц будет асимметричной картине для верхней группы.

5. Таким образом, выше показано, что развитие в данной работе качественное объяснение ROT-эффекта, примененное к тройному делению ядер ^{235}U , вполне удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными, полученными в статье

[3]. Разумеется, в задачу автора данной статьи не входит вычисление абсолютных значений коэффициентов асимметрии. Однако предлагаемое альтернативное объяснение природы ROT-эффекта будет полезно при интерпретации и планировании новых экспериментов.

Автор благодарен Карине Емельяненко за оформление рисунков, Ф.С. Джепарову за ценные замечания и А.М. Гагарскому за полезное обсуждение.

Работа выполнена в рамках государственного задания Национальному исследовательскому центру «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Jesinger, G. V. Danilyan, A. M. Gagarski, *et al.*, ЯФ **62**, 1723 (1999) [Phys. At. Nucl. **62**, 1608 (1999)].
2. В. Е. Бунаков, С. Г. Кадменский, ЯФ **74**, 1687 (2011).
3. 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**, 13 (2007).
4. A. Gagarski, F. Gönnerwein, 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).
5. И. С. Гусева, Ю. И. Гусев, Изв. РАН. Сер. физ. **71**, 382 (2007).
6. Г. В. Данилян, Т. Вильперт, П. Гранц и др., ЯФ **71**, 2036 (2008).
7. G. V. Danilyan, P. Granz, V. A. Krakhotin, *et al.*, Phys. Lett. B **679**, 25 (2009).
8. Г. В. Данилян, Й. Кленке, Ю. Н. Копач и др., ЯФ **77**, 1 (2014).

ON OBSERVED EFFECTS IN EXPERIMENTS ON THE FISSILE NUCLEI ROTATION (ROT-EFFECTS)

G. V. Danilyan¹⁾

*¹⁾NRC “Kurchatov institute” — Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics,
Moscow, Russia*

In experiments on polarized neutron beams, effects, indicating the rotation of a fissile nucleus, have been observed. The main factor for this conclusion is the asymmetry of the coincidence count between the particle detectors accompanying the fission and the fragment detectors, when reversing the direction of polarization of the neutron beam causing the fission of the studied nuclei. According to the opinions of the discovery authors, the measured asymmetry can be caused by the shift of the angular distribution in the direction in, or against, the direction of the nucleus deformation axis rotation. In most publications, this shift is explained by the rotation of the angular distribution of particles in the direction of rotation of the nuclear fission axis. This article provides a simple and obvious explanation.