

**XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова:
Концентрированные потоки энергии в космической технике,
электронике, экологии и медицине.
Секция «Ядерная физика»**

Моделирование ROT-эффекта в делении методом Монте–Карло

М. Ю. Копач*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Поступила в редакцию 15.04.2025; подписана в печать 17.04.2025)

В работе представлены результаты моделирования ROT-эффекта с использованием метода Монте–Карло и библиотеки GEANT4 [1]. Исследовано влияние геометрии экспериментальной установки, параметров мишени и других факторов на величину наблюдаемой асимметрии. Особое внимание уделено оценке возможности измерения ROT-эффекта путем определения оси деления с помощью регистрации мгновенных нейтронов деления.

PACS: 25.85.Ec

УДК: 539.173.4.

Ключевые слова: нейтронно-индуцированное деление, ROT-эффект, поляризация, моделирование Монте–Карло.

ВВЕДЕНИЕ

Эффект вращения ядра, так называемый ROT-эффект, был впервые обнаружен в угловых распределениях α -частиц тройного деления ядра ^{235}U холодными поляризованными нейтронами [2]. Отличительной особенностью тройного деления является тот факт, что α -частицы испускаются практически перпендикулярно к оси разлета основных осколков (средний угол вылета α -частицы относительно легкого осколка $\sim 83^\circ$). Было обнаружено, что в ответ на изменение поляризации нейтронов, индуцирующих деление, угловое распределение α -частиц смещается, причем направление этого смещения определяется направлением поляризации пучка нейтронов.

Смещение распределений обусловлено вращением поляризованного делящегося ядра перед его распадом на фрагменты. Траектория движения осколков деления, которая при отсутствии вращения являлась прямой линией (далее «первоначальная ось»), становится гиперболической. При увеличении расстояния траектория вырождается в прямую (далее «измеряемая ось»), но смещенную относительно оси деления, которое происходило бы без вращения, на малый угол δ_{FF} (рис. 1). Угловое распределение α -частиц, которое образуется относительно первоначальной оси делящегося ядра, не смещается (строго говоря, смещается, но на меньший угол, чем δ_{FF}), но измеряемая ось, относительно которой наблюдается угловое распределение α -частиц, поворачивается на угол θ . В эксперименте регистрируется измеряемая ось деления, и если ее интерпретировать

как первоначальную, то наблюдается смещение углового распределения α -частиц, хотя все происходит ровно наоборот: угловое распределение не смещается, а ось деления поворачивается.

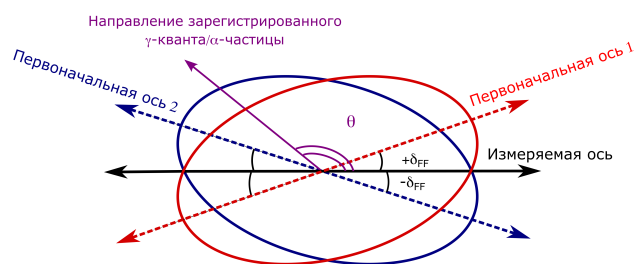


Рис. 1. Красным цветом на рисунке показано деление с положительной поляризацией нейтронов и положительным углом поворота оси, а с отрицательным углом и поляризацией синим цветом. Эллипсы отражают угловую анизотропию γ -квантов или α -частиц. Расстояние от центра до эллипсов стоит интерпретировать как вероятность вылета γ -кванта или α -частицы, которые не поворачиваются, в отличие от оси. Видно, что при вылете частицы под произвольным углом вероятности при разных поляризациях не равны

Впоследствии аналогичный эффект наблюдался в угловых распределениях γ -квантов и нейтронов [3] в двойном делении ^{235}U и ^{233}U . Объяснение того, каким образом угловое распределение γ -квантов образуется относительно именно первоначальной оси деления, было предложено В.В. Новицким [3], используя гипотезу В.М. Струтинского [4] о выстраивании спинов осколков деления в плоскости, ортогональной оси деления, которое приводит к появлению угловой анизотропии испускания γ -квантов из осколков относи-

* kopach.my23@physics.msu.ru

тельно оси деления. Согласно данной модели, в момент разрыва шейки делящегося ядра спины возбужденных осколков деления оказываются выстроены в плоскости, ортогональной первоначальной оси деления, и их ориентация не изменяется при отклонении траектории осколков. Соответственно, угловое распределение γ -квантов, как и в случае α -частиц, не смещается, а ось деления поворачивается, что приводит к наблюдаемому смещению углового распределения в зависимости от направления поляризации налетающего нейтрона.

В эксперименте, когда детекторы осколков и γ -квантов расположены в плоскости, ортогональной направлению пучка продольно поляризованных нейтронов (см. рис. 26), ROT-эффект проявляет себя как асимметрия счета детекторов γ -квантов относительно направления поляризации пучка нейтронов. Асимметрия счета совпадений определяется отношением:

$$D(\theta) = \frac{N_+(\theta) - N_-(\theta)}{N_+(\theta) + N_-(\theta)}, \quad (1)$$

здесь $N_+(\theta)$ и $N_-(\theta)$ — количество совпадений сигналов с детекторов γ -квантов и с детекторов осколков, расположенных под углом θ друг к другу в плоскости, ортогональной оси продольно-поляризованного пучка нейтронов, измеренные при двух противоположных направлениях поляризации пучка нейтронов (рис. 1). Амплитуду, т.е. максимальное значение данного коэффициента асимметрии будем называть величиной ROT-эффекта. Она составляет около 10^{-2} для α -частиц при тройном делении и 10^{-4} для γ -квантов при двойном делении ^{235}U . В настоящее время эффект измерен при делении холодными нейтронами, а также нейтронами с энергиями 0.06 эВ и 0.3 эВ в ^{235}U . Большой интерес представляет измерение этого эффекта в резонансной области, а также для других делящихся ядер.

Основная цель данной работы — определение величины эффекта и возможного выигрыша в статистике для установки, состоящей из детекторов мгновенных γ -квантов и нейтронов деления без использования детекторов осколков. Поскольку мгновенные нейтроны деления кинематически фокусируются в направлении вылета осколков деления, их можно использовать в качестве индикатора направления оси деления, с некоторой неопределенностью. Использование такого метода уменьшит величину наблюдаемого эффекта, но может позволить увеличить толщину используемой мишени на несколько порядков.

На рис. 2 показаны схемы экспериментальных установок для измерения ROT-эффекта для α -частиц [5] и для γ -квантов [6].

1. ВИРТУАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

В данной работе компьютерное моделирование ROT-эффекта для γ -квантов проводилось с использованием

программного пакета GEANT4. За основу была взята геометрия экспериментальной установки из [6]. На рис. 3 (слева) представлена схема виртуальной установки, для которой проводилось моделирование. Двусторонняя мишень из ^{235}U (отмечена зеленым цветом) размерами 40×100 мм окружена 8 пластиковыми детекторами γ -квантов (отмечены желтым цветом). Их размер составляет $\varnothing 70 \times 120$ мм, и они расположены под углами $\pm 22.5^\circ$, $\pm 67.5^\circ$, $\pm 112.5^\circ$, $\pm 157.5^\circ$ относительно нормали к мишени. Синим цветом показаны 10 детекторов осколков деления размерами 32×140 мм, расположенных с одинаковым азимутальным шагом 22.5° и расстоянием до центра мишени 100 мм.

Новый метод измерения подразумевает регистрацию мгновенных нейтронов деления и использование их в качестве оси деления. Исходя из этого, пропадает необходимость использования детекторов осколков. Схема виртуальной установки для нового метода представлена на рис. 3 (справа). Она состоит из 20 детекторов размером $\varnothing 90 \times 300$ мм, равномерно расположенных с интервалом 18° по окружности радиусом 400 мм. Детекторы используются для одновременной регистрации как γ -квантов, так и нейтронов. В эксперименте они будут разделены по времени пролета. В центре установки находится мишень из $^{235}\text{UO}_2$ размером $\varnothing 50 \times 10$ мм.

Моделирование проводилось для двух макетов, показанных на рис. 3, с одинаковым количеством событий деления $N_{events} = 5 \times 10^8$. Используемая физическая модель в GEANT4 — «QGSP_BIC». Другие настройки моделирования в GEANT4 были заданы по умолчанию. В симуляции использовались реальные γ -кванты и нейтроны, которые разделялись по времени пролета, что позволило учесть эффективность регистрации нейтронов и γ -квантов, а также эффекты перерасеяния частиц между соседними детекторами и наложения сигналов при одновременной регистрации двух частиц в одном и том же детекторе. Применение реальных частиц также позволило промоделировать поглощение и рассеяние частиц в толстой мишени. В ранее опубликованной работе [7] проводилось упрощенное моделирование с использованием виртуальных частиц «geantino», которые не взаимодействуют с веществом. Соответственно, вышеприведенные эффекты не были учтены.

2. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При каждом акте деления образовывались два осколка деления, вылетающих из случайной точки внутри мишени в противоположных направлениях. Направление оси разлета осколков генерировалось случайным образом. Из-за особенности мишени, использовавшейся в работе [6], при моделировании эксперимента с детекторами осколков и 8 детекторами γ -квантов только один осколок вылетал из мишени. Мишень была выполнена в виде двустороннего напыления

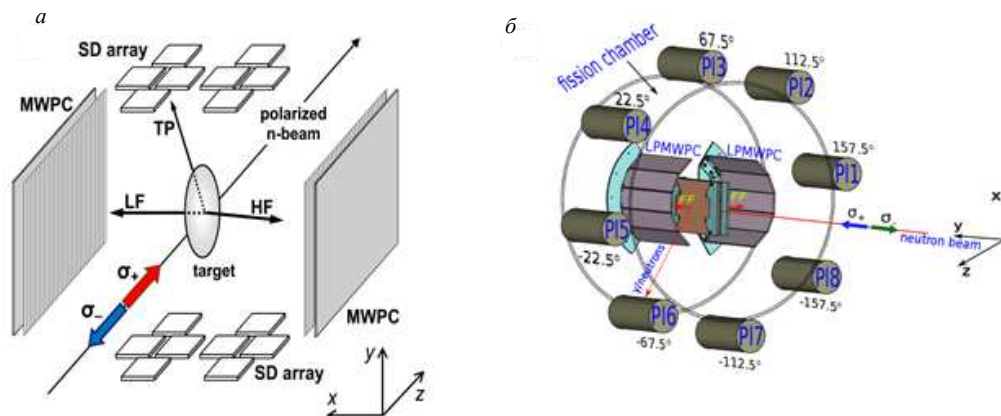


Рис. 2. *a* — Схема экспериментальной установки из [5], *б* — схема экспериментальной установки из [6]

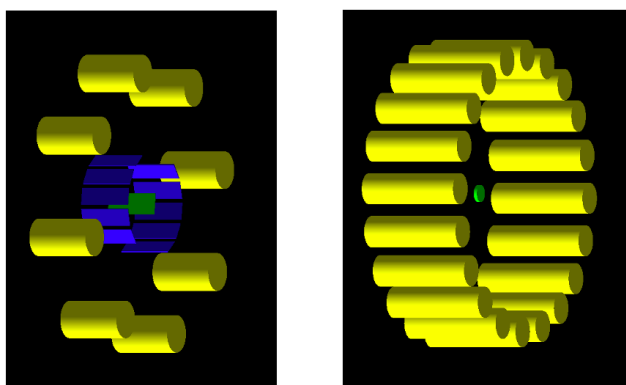


Рис. 3. Слева: виртуальная установка с детекторами осколков деления и 8 детекторами γ -квантов; справа: виртуальная установка с 20 детекторами γ -квантов и нейтронов

тонкого слоя урана на толстую алюминиевую подложку, непрозрачную для осколков деления. Поэтому для простоты считается, что один осколок всегда может покинуть мишень, второй же обязательно поглотится подложкой. В установке с 20 детекторами оба осколка поглощались в мишени, так как предполагается использование толстой мишени.

Для каждого акта деления генерировалось определенное количество γ -квантов и нейтронов в соответствии с распределением множественности этих частиц. Множественность γ -квантов генерировалась в соответствии с распределением Пуассона со средним значением 7 [8], множественность нейтронов имела вид двумерного нормального распределения со средними значениями 1.4 и 1 для легких и тяжелых осколков соответственно [8]. Распределение нейтронов и γ -квантов по энергии имело вид распределения Максвелла с температурами нейтронов 0.91 и 0.93 МэВ для легких и тяжелых осколков соответственно [9] и температурой γ -квантов 1 МэВ [10]. Нейтроны испускались изотропно в системе центра масс каждого осколка, в лабораторной системе их скорости складывались со скоростями

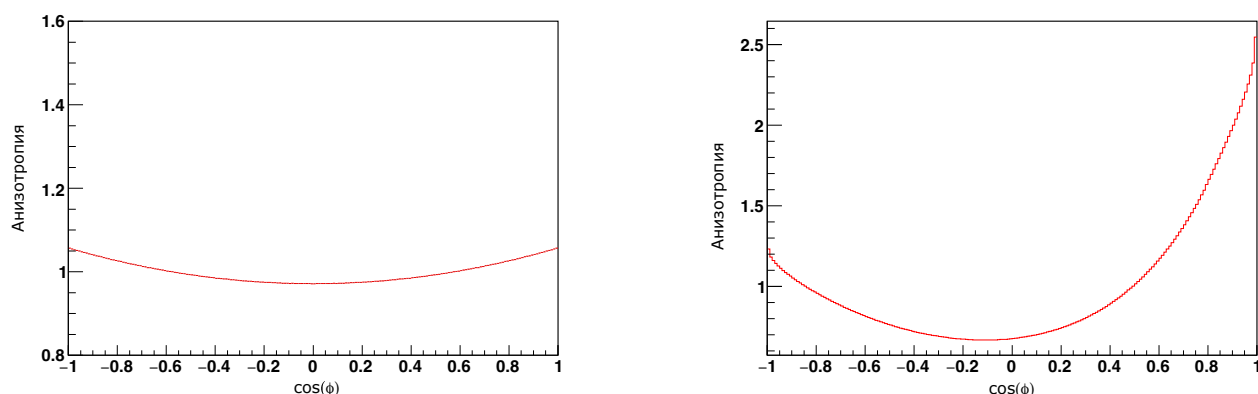
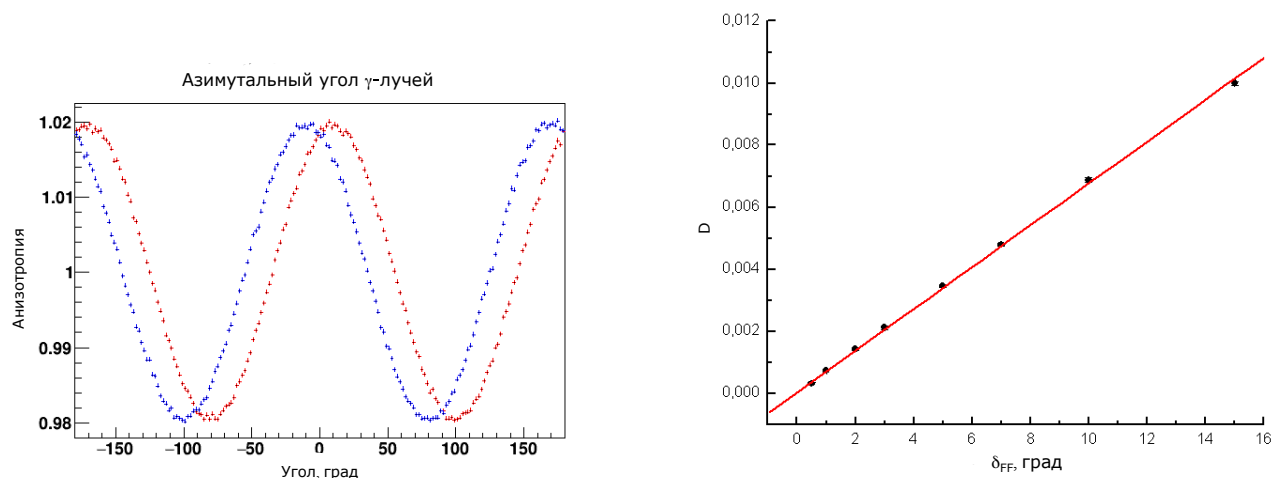
осколков деления. γ -кванты испускались анизотропно относительно оси деления с коэффициентом анизотропии 10% [11]. Полученные в результате моделирования анизотропии нейтронов и γ -квантов относительно оси деления в лабораторной системе показаны на рис. 4.

Для моделирования РОТ-эффекта было введено направление поляризации нейтронного пучка вдоль оси симметрии установки. Ось испускания осколка деления была повернута на угол $\pm\delta_{FF}$ вокруг оси поляризации нейтронов. Знак угла поворота был положительным для половины событий и отрицательным для другой половины. Поскольку мгновенные нейтроны деления испускаются из полностью ускоренных осколков, направление испускания нейтронов рассчитывалось относительно повернутой оси деления. При этом угловое распределение γ -квантов было сформировано относительно оси деления до поворота, т.к. спины осколков образуются в момент разрыва ядра [12]. Сдвиг проекции углового распределения γ -квантов на ось поляризации нейтронов при положительном и отрицательном повороте оси деления по сути является наблюдаемым РОТ-эффектом (рис. 5, слева). Путем моделирования была определена зависимость амплитуды величины D от угла поворота оси деления δ_{FF} . Она имеет линейный вид (см. рис. 5, справа). Это позволило провести все расчеты для угла поворота 10° , что примерно на два порядка больше реально наблюдаемых углов. Благодаря линейной зависимости амплитуды D полученные результаты легко пересчитываются для более реалистичных и меньших углов поворота.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 показаны угловые распределения γ -квантов (слева) и угловая зависимость асимметрии РОТ-эффекта (справа), рассчитанные по формуле (1), сгенерированные с помощью GEANT4 для трех случаев:

a — для идеального случая, предполагающего реги-


 Рис. 4. Угловая анизотропия испускания мгновенных γ -квантов (слева) и нейтронов (справа) относительно оси деления

 Рис. 5. Зависимость коэффициента анизотропии от азимутального угла для угла поворота оси деления $\delta_{FF}=10^\circ$ (слева) и зависимость амплитуды эффекта от угла поворота оси деления δ_{FF} (справа)

страцию всех частиц со 100% эффективностью в полном телесном угле 4π ;

б — для установки с 8 детекторами γ -квантов и детекторами осколков (см. рис. 3, слева);

в — для установки с 20 детекторами γ -квантов и нейтронов (см. рис. 3, справа).

Следует заметить, что при анализе смоделированных данных для установки с детекторами осколков и 8 детекторами γ -квантов использовался угол между центрами сработавших детекторов осколков и γ -квантов (синие квадратики на рис. 6). В силу симметрии установки таких углов четыре для левого рисунка (пространственный угол между осколком и γ -квантом) и восемь для правого (проекция угла на плоскость, перпендикулярную оси поляризации пучка нейтронов). При анализе данных для установки с 20 детекторами (зеленые треугольники на рис. 6) направление вылета каждого зарегистрированного нейтрона деления (опре-

деляемое как направление от центра мишени к центру сработавшего детектора) принималось за направление оси деления.

Вследствие особенностей регистрации нейтронов и γ -квантов в такой установке угловое распределение заметно отличается от привычного и имеет наклон, который обусловлен поглощением частиц в толстой мишени. Наклон объясняется тем, что при испускании нейтрона и γ -кванта из точки, расположенной ближе к краю мишени вероятность того, что хотя бы одна из частиц будет поглощена (или рассеяна) в мишени больше для случая, когда нейтрон и γ -квант испускаются в противоположных направлениях, что соответствует $\cos(\theta)$ близкому к -1 . Точка $\cos(\theta) = 1$ отсутствует из-за невозможности регистрации в одном детекторе двух частиц. А отклонение точки вблизи $\cos(\theta) = 1$ (соответствует регистрации нейтрона γ -кванта в двух соседних детекторах) обусловлено невозможностью реги-

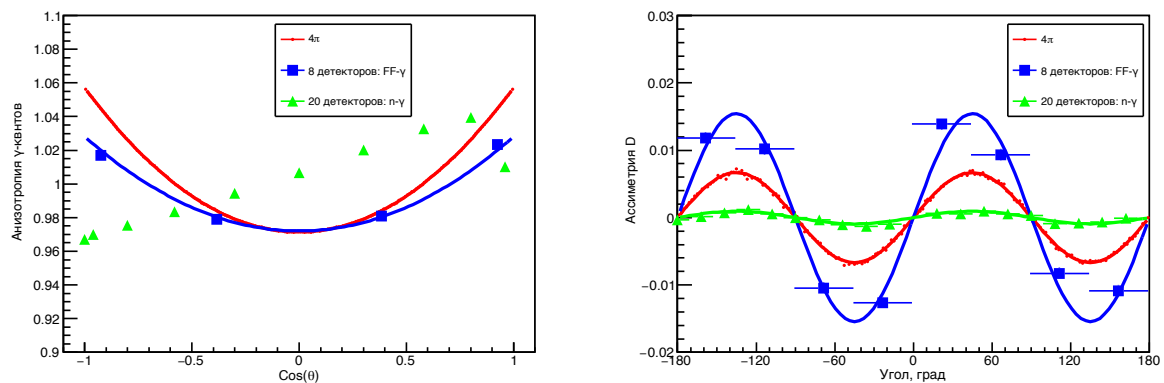


Рис. 6. Угловые распределения γ -квантов (слева) и угловая зависимость ROT-асимметрии (справа) для трех вариантов расчета

Таблица. Результирующие коэффициенты асимметрии

Виртуальная установка	4 π	8 детекторов: FF- γ	20 детекторов: n- γ
Коэффициент асимметрии $R_\gamma \times 10^{-5}$	6.68 ± 0.02	15.4 ± 0.5	0.94 ± 0.09
Относительная ошибка	0.3%	3.2%	9.6%

страции наложенных событий, возникающих в случае, когда γ -квант перерассеивается и попадает в тот же соседний детектор, что и нейтрон. Следует заметить, что несмотря на причудливую форму углового распределения в этом случае, параметр асимметрии ROT-эффекта D (см. рис. 6, справа) имеет обычную синусоидальную форму, при этом амплитуда эффекта становится заметно меньшей вследствие того, что направление вылета нейтрона может заметно отклоняться от реального направления оси деления.

Полученные моделированные кривые (рис. 6 справа) были подогнаны с использованием формулы

$$D(\theta) = R_\gamma \cdot \sin(2\theta), \tag{2}$$

а затем коэффициент асимметрии R_γ был уменьшен до реалистичного угла поворота 0.1° в соответствии с линейной зависимостью эффекта от угла поворота. Результирующие коэффициенты асимметрии для трех случаев приведены в таблице. Входные данные ($N_+()$; $N_-()$) являются случайными величинами, их распределение соответствует Пуассоновскому. Их ошибка посчитана в соответствии с ошибкой распределения Пуассона. Ошибка величины ROT-эффекта была получена путем минимизации функционала хи-квадрат.

Видно, что в геометрии эксперимента из [6] асимметрия ROT-эффекта увеличивается по сравнению с полным распределением в 4π из-за выбора оптимального расположения детекторов в плоскости, перпенди-

кулярной направлению поляризации нейтронов. Однако в этом случае погрешность существенно возрастает. Для планируемой установки с 20 детекторами эффект уменьшился в 7 раз по сравнению с виртуальной установкой работы [5], в то время как относительная ошибка увеличилась в ~ 3 раза при том же количестве событий деления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В новой установке осколки деления не регистрируются, поэтому можно использовать более толстую мишень, что позволит увеличить массу урана в мишени с 80 мг до 80 г и существенно повысить светосилу эксперимента. Ожидается увеличение статистики на 3 порядка по сравнению с работой [6]. Согласно проведенным расчетам, с учетом трехкратного роста ошибки при одном и том же количестве делений, относительная ошибка определения коэффициента асимметрии R_γ может быть уменьшена на порядок при использовании установки без детекторов осколков относительно установки с применением детекторов осколков, при одинаковых временах экспериментов и одинаковой плотности потока нейтронов.

Автор выражает благодарность Ю.Н. Копачу за всяческую помощь в проделанной работе и В.Л. Кузнецову за идею использования мгновенных нейтронов деления.

- [1] Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al. // Geant4 — a simulation toolkit. NIM A. **506**. 250 (2003).
[2] Goennenwein F., Muttterer M., GagarSKI A. et al. // Phys. Lett. B. **652**. 13 (2007).
[3] Danilyan G.V., Klenke J., Krakhotin V.A. et al. // Phys. At. Nucl. **77**. 677 (2014).
[4] Струтинский В. М. // ЖЭТФ **37**. 861 (1959).
[5] GagarSKI A., Goennenwein F., Guseva I. et al. // Phys.Rev.C. **93**. 054619 (2016).
[6] Berikov D., Ahmadov G., Kopatch Yu. et al. // Phys.Rev.C. **104**. 024607 (2021).
[7] Kopatch M.Y., Kopatch Y.N., Kuznetsov V.L. // Phys. Part. Nucl. Lett. **22/2**. 188 (2025).
[8] ENDF/B-II Evaluated Nuclear Data Library. <https://www.nndc.bnl.gov/endl-b2/>
[9] Воробьев А.С., Щербаков О.А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерные константы. 2011–2012. **1-2**. С. 37.
[10] Гундорин Н.А., Дука-Зойоми А., Климан Я., Криштин-ак Й. // Атомная энергия. **66**. 394 (1989).
[11] Petrov G. // Sov. Phys. JETP. **20**. 188 (1965).
[12] Wilson J. N., Thisse D., Lebois M. et al. // Nature. **590**. 1387 (2021).

Monte-Carlo simulation of the ROT-effect in fission

М. У. Копач

*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: kopach.my23@physics.msu.ru*

The paper presents the results of ROT-effect modeling using the Monte-Carlo method and the GEANT4 library [1]. The influence of the experimental setup geometry, target parameters and other factors on the magnitude of the observed asymmetry is investigated. Particular attention is paid to assessing the possibility of measuring the ROT-effect by determining the fission axis using the registration of prompt fission neutrons.

PACS: 25.85.Ec.

Keywords: neutron-induced fission, ROT-effect, polarization, Monte-Carlo simulation.

Received 15 April 2025.

Сведения об авторе

Копач Михаил Юрьевич — студент; e-mail: kopach.my23@physics.msu.ru.