

На правах рукописи



БРАГИНЕЦ Юлия Петровна

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРХНЕГО ЗНАЧЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА НЕЙТРОНА
КРИСТАЛЛ-ДИФРАКЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Специальность: 01.04.16. – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Воронин Владимир Владимирович,
заместитель директора по научной работе
ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» НИЦ «Курчатовский институт», г. Гатчина.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Потылицын Александр Петрович,
ведущий научный сотрудник кафедры прикладной физики Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,

кандидат физико-математических наук
Садыков Равиль Асхатович,
заведующий сектором конденсированных сред ФГБУН «Институт ядерных исследований» РАН, г. Москва.

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.

Защита состоится 25 января 2017 г. в 17 ч 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.229.29 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, ауд. 118 главного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» <https://www.spbstu.ru>.

Автореферат разослан 9 декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.29
кандидат физико-математических наук,
доцент



Ермакова Наталья Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема существования электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона напрямую связана с такими фундаментальными проблемами физики элементарных частиц, как нарушение T -инвариантности (относительно преобразования обращения времени) и CP -инвариантности (относительно операции комбинированной инверсии координат). Дело в том, что ЭДМ нейтрона может быть отличен от нуля только при одновременном нарушении T - и P -симметрии (P – операция инверсии координат), а следовательно, в силу CPT -теоремы и CP -симметрии. Таким образом, экспериментальное наблюдение ЭДМ нейтрона явилось бы прямым доказательством нарушения T - (а следовательно, и CP -) инвариантности.

Исторически инвариантность относительно CP -преобразования была предложена для восстановления симметрии после того, как в 1956 г. Ц. С. Ву с сотрудниками [1] обнаружила нарушение инвариантности относительно инверсии координат в слабых взаимодействиях, которое было предсказано Т. Д. Ли и Ч. Н. Янгом [2]. Однако оказалось, что CP -инвариантность также нарушается. Ее нарушение было обнаружено в 1964 г. в распаде нейтрального долгоживущего K -мезона на два заряженных π -мезона [3]. Оказалось, что долгоживущий K -мезон, кроме разрешенного для него по CP -четности распада на три π -мезона, в редких случаях (один раз из 600) распадается по CP -запрещенному каналу на два π -мезона. В 2004 г. CP -нарушение было обнаружено в распадах нейтральных B -мезонов, содержащих тяжелые кварки [4, 5].

Косвенным проявлением нарушения CP -инвариантности является барионная асимметрия Вселенной – отсутствие во Вселенной антивещества в сопоставимых с веществом количествах. В 1967 г. А. Д. Сахаров показал, что для объяснения барионной асимметрии Вселенной необходимо выполнение следующих трех условий: во-первых, должно существовать взаимодействие, не сохраняющее барионное число; во-вторых, должно существовать взаимодействие, нарушающее CP -инвариантность; в-третьих, должно отсутствовать термодинамическое равновесие при расширении Вселенной [6]. На основе этих положений возникло множество теоретических моделей, объясняющих барионную асимметрию Вселенной. Следует отметить, что в рамках Стандартной модели барионная асимметрия не находит своего объяснения, хотя в нее можно ввести нарушение CP -инвариантности для объяснения эффектов, обнаруженных в распадах нейтральных K - и B -мезонов. При этом соответствующая величина барионной асимметрии оказывается на уровне $10^{-23} - 10^{-25}$, тогда как наблюдательные данные дают значения $10^{-9} - 10^{-10}$, величина же ЭДМ будет на уровне

$\sim 10^{-31} - 10^{-33} e \cdot \text{см}$, что находится далеко за пределами возможности современной экспериментальной техники измерений.

Теоретические модели за рамками Стандартной модели, объясняющие барионную асимметрию Вселенной, приводят к очень широкому спектру предсказываемых значений для ЭДМ нейтрона. Такие модели дают ограничения на величину ЭДМ нейтрона на уровне $\sim 10^{-26} - 10^{-28} e \cdot \text{см}$. И хотя достижение такого верхнего значения находится на пределе экспериментальных возможностей, все современные эксперименты нацелены на эту задачу. Обнаружение ЭДМ у нейтрона на этом уровне было бы прямым свидетельством в пользу моделей, объединяющих различные взаимодействия, таких как суперсимметричные или модели Великого объединения.

На сегодняшний день наиболее точным методом измерения ЭДМ нейтрона является магниторезонансный метод с использованием ультрахолодных нейтронов (УХН). Этим методом получено лучшее ограничение на величину верхнего предела для ЭДМ нейтрона $D < 2,9 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$ [7]. Дальнейший прогресс в увеличении чувствительности магниторезонансного метода в основном может быть связан с увеличением плотности потока и объема хранимых нейтронов, увеличение же электрического поля и времени хранения ограничено свойствами изолирующих материалов и временем жизни нейтрона. В связи с этим развитие нового кристалл-дифракционного метода поиска ЭДМ нейтрона имеет первостепенную важность, поскольку это принципиально иной метод, имеющий другие систематические эффекты.

Целью настоящей диссертационной работы является развитие нового кристалл-дифракционного метода поиска ЭДМ нейтрона, основанного на использовании гигантских внутрикристаллических электрических полей (вплоть до 10^9 В/см), воздействующих на нейтрон в нецентросимметричном кристалле. В соответствии с этим были поставлены следующие **основные задачи**.

1. Экспериментально убедиться, что при прохождении нейтронов через нецентросимметричный кристалл кварца в условиях, близких к брэгговским, можно контролируемым образом отбирать нейтроны, прошедшие через кристалл в различных по знаку и величине электрических полях, тем самым менять измеряемую величину и направление вращения спина нейтрона.
2. Оценить влияние швингеровского взаимодействия на компоненты поляризации, ответственные за ЭДМ нейтрона, при движении нейтрона под углами, близкими к $\pi/2$, к отражающим плоскостям кристалла.
3. Провести модельный анализ возможных систематических погрешностей эксперимента.

4. Провести анализ возможного увеличения чувствительности полномасштабного эксперимента.

Научная новизна и практическая ценность. Впервые реализована возможность выделять с помощью специального кварцевого кристалла-отражателя с регулируемым межплоскостным расстоянием нейтроны, прошедшие через рабочий кристалл кварца в различных по знаку и величине электрических полях. Показано, что такая схема эксперимента в сочетании с системой трехмерного анализа поляризации обладает высокой избирательной способностью к ЭДМ нейтрона, позволяя исключить ложные эффекты, обусловленные швингеровским взаимодействием и остаточными магнитными полями в сверхпроводящем экране системы трехмерного анализа поляризации. Значение ЭДМ нейтрона в тестовом эксперименте составило $D = (2,5 \pm 6,5^{\text{stat}} \pm 5,5^{\text{syst}}) \cdot 10^{-24} e \cdot \text{см}$, что на порядок лучше результата, полученного по деполяризации нейтронного пучка при дифракции по Лауэ для того же самого кристалла кварца [8], и почти на два порядка лучше рекордного для своего времени результата, полученного К. Г. Шаллом и Р. Натансом в первом кристалл-дифракционном эксперименте с использованием брэгговского отражения от центросимметричного поглощающего кристалла [9]. Впервые реализована возможность с помощью специального кварцевого кристалла-отражателя с регулируемым межплоскостным расстоянием управлять знаком и величиной электрического поля, действующего на регистрируемые нейтроны. Проведенный анализ показал, что в полномасштабном эксперименте возможно достичь чувствительности на уровне $\sim 3 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{см}$ за сутки измерения. Предложена новая идея модификации экспериментальной установки с использованием многоцелевого суперзеркального (SM) поляризатора на основе Fe/SiN_x-зеркал, позволяющая увеличить чувствительность до уровня $\sim 2 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{см}$. Впервые предложена и обоснована возможность использовать накопительный вариант установки, позволяющий увеличить время взаимодействия нейтрона с электрическим полем и реализовать потенциал некоторых кристаллов, имеющих более низкое, чем у кристалла кварца, поглощение нейтронов и на порядок большие электрические поля.

Достоверность результатов экспериментальных исследований обусловлена использованием современного математического аппарата квантовой механики, совпадением теоретических расчетов и экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов эксперимента. Достоверность результатов, полученных с помощью компьютерного моделирования, обеспечена применением известных и апробированных методик и их физической непротиворечивостью.

Положения, выносимые на защиту. Показано, что:

- 1) схема эксперимента для поиска ЭДМ нейтрона при прохождении нейтронов через кристалл в условиях, близких к брэгговским, работает. Полученное в тестовом эксперименте значение ЭДМ нейтрона составило $D = (2,5 \pm 6,5^{\text{stat}} \pm 5,5^{\text{syst}}) \cdot 10^{-24} \text{ e} \cdot \text{см}$. Статистическая чувствительность эксперимента к ЭДМ составила $1,6 \cdot 10^{-23} \text{ e} \cdot \text{см}$ за сутки измерения;
- 2) с помощью специального кварцевого кристалла-отражателя с регулируемым межплоскостным расстоянием можно управлять знаком и величиной электрического поля, действующего на регистрируемый нейтрон;
- 3) предложенная схема эксперимента обладает высокой избирательной способностью к ЭДМ нейтрона и позволяет исключить ложные эффекты, обусловленные остаточными магнитными полями и швингеровским взаимодействием;
- 4) в полномасштабном эксперименте может быть достигнута чувствительность на уровне $\sim 3 \cdot 10^{-25} \text{ e} \cdot \text{см}$ за сутки измерения;
- 5) использование многоцелевого SM-поляризатора на основе Fe/SiN_x-зеркал позволит увеличить чувствительность до уровня $\sim 2 \cdot 10^{-25} \text{ e} \cdot \text{см}$ за сутки измерения;
- 6) дальнейшее развитие метода может быть связано с использованием других нецентросимметричных кристаллов и накопительного варианта установки, что позволит в перспективе поднять чувствительность до уровня несколько единиц на $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{см}$ за сутки измерения.

Апробация работы и публикации. Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» с использованием экспериментальной базы ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» НИЦ «Курчатовский институт» (Россия, г. Гатчина) и Института им. Лауэ – Ланжевена (ИЛЛ, Франция, г. Гренобль).

Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях: Молодежной конференции по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и Северо-Запада «ФизикА.СПб» (2010, 2011); Challenges of the World-Wide Experimental Search for the Electric Dipole Moment of the Neutron (2014); Совещании и молодежной конференции по использованию рассеяния нейтронов и синхротронного излучения в конденсированных средах (РНСИ-КС-2014); Конференции молодых ученых и специалистов ПИЯФ НИЦ «Курчатовский институт» (КМУС-2014).

Материалы диссертации опубликованы в 9 работах в российских и зарубежных изданиях (из них 6 работ – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ) и в тезисах 8 докладов на научных конференциях, получено 2 патента на изобретение.

Работа проведена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (НИР № 3.329.2014/К); Комитета по науке и высшей школе «Субсидии в виде гранта для молодых ученых вузов и академических институтов до 35 лет, расположенных на территории Санкт-Петербурга»; правительства Ленинградской области «Именная научная стипендия губернатора Ленинградской области».

Личный вклад автора. При участии автора диссертационной работы были поставлены и сформулированы цели и задачи исследования. Автор непосредственно принимал участие в подготовке и проведении эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом при прохождении нейтронов через нецентросимметричный кристалл в условиях, близких к брэгговским. Самостоятельно обрабатывал и анализировал экспериментальные данные, проводил модельные расчеты возможных систематических эффектов. Автором проведен анализ по увеличению чувствительности в полномасштабном эксперименте, рассмотрены дальнейшие перспективы развития экспериментальной методики.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 104 страницах, содержит 34 рисунка и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определена цель и поставлены основные задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях.

В первой главе дан краткий обзор магниторезонансного и кристалл-дифракционного методов поиска ЭДМ нейтрона, история их развития и современное состояние.

Вторая глава является теоретической и посвящена особенностям дифракции и нейтронной оптики в нецентросимметричном кристалле. В начале кратко изложены основные понятия кристаллографии и вводится разложение потенциала кристалла по векторам обратной решетки. Далее показано, что в

нецентросимметричном кристалле положение «ядерных» плоскостей смещено относительно положения «электрических». Это приводит к тому, что в кристалле появляется дополнительное выделенное направление, и, как следствие, в области максимумов и минимумов ядерного потенциала, где концентрируются нейтроны, возникают сильные внутрикристаллические электрические поля противоположного знака:

$$E(\mathbf{r}) = -\text{grad}V_g^E(\mathbf{r}) = 2v_g^E \mathbf{g} \sin(\mathbf{g}\mathbf{r} + \Delta\phi_g), \quad (1)$$

где $V_g^E(\mathbf{r})$ – электрический потенциал кристалла для некоторой системы кристаллографических плоскостей \mathbf{g} ; v_g^E – амплитуда электрического потенциала кристалла; $\Delta\phi_g$ – сдвиг фазы между электрическим и ядерным потенциалами кристалла.

В работе [10] показано, что для кристалла α -кварца такие поля могут достигать 10^8 – 10^9 В/см.

Наличие ненулевого электрического поля $E(\mathbf{r})$ в области максимумов и минимумов ядерного потенциала будет приводить к дополнительному взаимодействию нейтрона с системой кристаллографических плоскостей \mathbf{g} за счет наличия у него магнитного и электрического дипольных моментов. Тогда амплитуда \mathbf{g} гармоник периодической части потенциала становится зависящей от ориентации спина нейтрона:

$$|V(\mathbf{g})| = v_g^N - \boldsymbol{\mu}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{H}_g^S) - D(\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E}_g), \quad (2)$$

где v_g^N – амплитуда ядерного потенциала кристалла; $\boldsymbol{\sigma}$ – ориентация спина нейтрона; $\boldsymbol{\mu} = \mu\boldsymbol{\sigma} = \mu_N g_n \mathbf{S}$ – магнитный момент нейтрона, где $\mu_N = \frac{\hbar e}{2m_p c}$ – ядерный магнетон (m_p – масса протона, e – заряд электрона), g_n – гиромагнитное отношение для нейтрона, \mathbf{S} – спин нейтрона; $\mathbf{H}_g^S = \frac{[\mathbf{E}_g \mathbf{v}_{||}]}{c}$ – швингеровское магнитное поле в системе покоя нейтрона, связанное со средним электрическим полем $\mathbf{E}_g = v_g^E \mathbf{g} \sin \Delta\phi_g$, $\mathbf{v}_{||}$ – компонента скорости нейтрона вдоль кристаллографических плоскостей; $\mathbf{D} = D \cdot \boldsymbol{\sigma}$ – ЭДМ нейтрона.

При прохождении нейтронов через кристалл в условиях, близких к брэгговским, когда нейтрон распространяется в кристалле перпендикулярно кристаллографическим плоскостям, волновая функция нейтрона в первом порядке теории возмущения будет иметь вид [11]

$$\Psi \equiv \exp(i\mathbf{k}_0\mathbf{r}) \left(1 + \sum_{\mathbf{g}} \frac{V(\mathbf{g})}{2\Delta_g^E} \exp(i\mathbf{g}\mathbf{r}) \right), \quad (3)$$

где $\Delta_g^e = (E_k - E_{k_g})/2$ – параметр отклонения от точного условия Брэгга в энергетических единицах, $E_k = \frac{\hbar^2}{2m} \mathbf{k}^2$ и $E_{k_g} = \frac{\hbar^2}{2m} \mathbf{k}_g^2$ – энергии прямых и отраженных нейтронов соответственно, \mathbf{k} и $\mathbf{k}_g = \mathbf{k} + \mathbf{g}$ – волновые векторы прямых и отраженных нейтронов соответственно.

Суммарное по всем электрическим плоскостям электрическое поле, действующее на нейтрон в кристалле, усредненное по волновой функции (3), будет иметь вид

$$\mathbf{E}_{sum} = \sum_g \frac{\mathbf{E}_g}{\omega_g} = \frac{2m}{\hbar^2} \sum_g \frac{\mathbf{E}_g |V(\mathbf{g})|}{\Delta_g}, \quad (4)$$

где $\omega_g = \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\Delta_g}{|V(\mathbf{g})|}$ – безразмерный параметр отклонения от точного условия Брэгга; $\Delta_g = (\mathbf{k}_g^2 - \mathbf{k}^2)/2$ – параметр отклонения от условия Брэгга для системы плоскостей \mathbf{g} .

Из формулы (4) видно, что знак и величина электрического поля \mathbf{E}_{sum} определяются знаком и величиной параметра отклонения от точного условия Брэгга Δ_g . Таким образом, выделяя из всего пучка нейтроны с определенным параметром отклонения от условия Брэгга, можно эффективно менять знак и величину электрического поля.

Спиновая зависимость волнового вектора приведет к прецессии спина нейтрона вокруг направления $(\mu \mathbf{H}_{sum}^S + D \mathbf{E}_{sum})$, тогда угол поворота спина при прохождении расстояния L в кристалле будет равен

$$\varphi = \frac{2\mu \left((\mathbf{H}_{sum}^S)^2 + (\mathbf{H}_{sum}^D)^2 \right)^{1/2}}{\hbar} \frac{L}{v_{\perp}}, \quad (5)$$

где $\mathbf{H}_{sum}^S = \frac{[\mathbf{E}_{sum} \mathbf{v}_{||}]}{c}$ – швингеровское магнитное поле, связанное с суммарным электрическим полем \mathbf{E}_{sum} ; $\mathbf{H}_{sum}^D = \frac{\mathbf{E}_{sum} \mathbf{D}}{\mu}$ – эффективное магнитное поле, возникающее за счет взаимодействия ЭДМ с суммарным электрическим полем; L – длина рабочего кристалла; \mathbf{v}_{\perp} – компонента скорости нейтрона, направленная перпендикулярно кристаллографическим плоскостям.

Третья глава посвящена тестовому эксперименту и его результатам.

Тестовый эксперимент был проведен на пучке холодных нейтронов PF1b реактора ИЛЛ. Схема экспериментальной установки изображена на рисунке 1.

Пучок нейтронов (1) из нейтронотода попадал на монохроматор (2), который выбирал из всего пучка нейтроны с нужной нам длиной волны ($\sim 5 \text{ \AA}$). Для поляризации пучка использовался многощелевой SM-поляризатор (3). Направление начальной поляризации задавалось спин-флиппером (4).

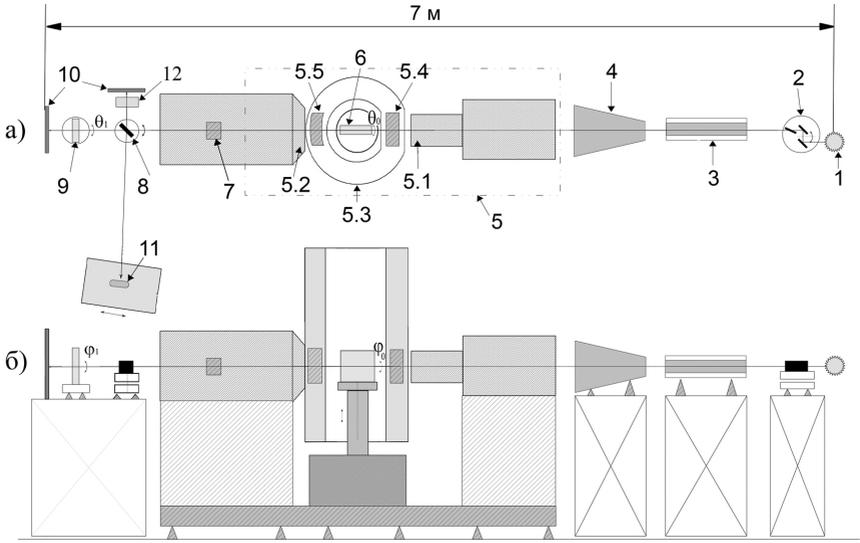


Рисунок 1 — Схема экспериментальной установки для тестового эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом: а — вид сверху, б — вид сбоку: 1 — пучок холодных нейтронов PF1b реактора ILL; 2 — трехкристалльный PG-монохроматор; 3 — SM-поляризатор; 4 — спин-флиппер; 5 — система трехмерного анализа поляризации CRYOPAD, которая представляет из себя: 5.1 и 5.2 — входной и выходной нутаторы соответственно, 5.3 — сверхпроводящий экран, 5.4 и 5.5 — катушки прецессии внутри экрана; 6 — рабочий кристалл кварца; 7 — He^3 -ячейка; 8 — полупрозрачный PG-монохроматор; 9 — кварцевый кристалл-отражатель; 10 — поглотитель нейтронов; 11 — позиционно-чувствительный детектор; 12 — монитор пучка. Для юстировки все кристаллы были установлены на поворотные столики: θ_0 и θ_1 — вертикальные углы между осью пучка и нормальными к отражающим плоскостям рабочего кристалла и кристалл-отражателя соответственно, φ_0 и φ_1 — горизонтальные углы между осью пучка и нормальными к отражающим плоскостям рабочего кристалла и кристалл-отражателя соответственно

На выходе из спин-флиппера получали монохроматический пучок поляризованных нейтронов, который попадал на рабочий кристалл из кварца (6), помещенный в сверхпроводящий экран (5.3) системы сферического анализа поляризации CRYOPAD (Cryogenic Polarization-Analysis Devices) (5) [12]. Таким образом, рабочий кристалл был помещен в область практически нулевого эффективного магнитного поля $\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_{sum}^S + \mathbf{H}_{sum}^D + \mathbf{H}^R$, в котором происходила свободная прецессия спина нейтрона за счет швингеровского взаимодействия магнитного момента с электрическим полем (\mathbf{H}_{sum}^S), ЭДМ взаимодействия с электрическим

полем (\mathbf{H}_{sum}^D) и взаимодействия магнитного момента с остаточным магнитным полем внутри CRYOPAD (\mathbf{H}^R). Тогда угол поворота в эффективном магнитном поле можно представить в виде $\varphi = q_n \tau \mathbf{H}_{eff}$, где τ – время пребывания нейтрона в этом поле.

Направление начальной поляризации пучка нейтронов и направление анализа поляризации определялись магнитными полями на входе (5.1) и выходе (5.2) сверхпроводящего экрана. В рабочем состоянии эти магнитные поля были перпендикулярны электрическому полю кристалла и друг другу. Таким образом, измеряемая поляризация была близка к нулю в рабочем режиме. Наличие ЭДМ должно приводить к появлению ненулевой величины поляризации, знак которой зависит от знака электрического поля, действовавшего на нейтрон в кристалле.

Для выделения нейтронов с определенным параметром отклонения от точного условия Брэгга использовался специальный кварцевый кристалл-отражатель (9), который размещался в параллельное к рабочему кристаллу кварца (6) положение (схема отражения под $\pi/2$). Рабочий кристалл кварца (6) удерживался при температуре T_0 , температура кварцевого кристалла-отражателя (9) могла варьироваться в пределах $T_1 = T_0 \pm \Delta T$. Изменение температуры кристалла-отражателя (9) приводило к изменению его межплоскостного расстояния на величину $d_1 = d_0(1 \pm \alpha_T \Delta T)$, где d_0 – межплоскостное расстояние рабочего кристалла; α_T – коэффициент теплового расширения кварца в направлении перпендикулярном отражающим плоскостям. Изменение знака ΔT приводило к изменению знака смещения Δ_g и, как следствие, к реверсу знака электрического поля, действующего на нейтрон, проходящий через кристалл (см. выражение (4)). Следует отметить, что схема отражения под $\pi/2$ позволяла не только выбирать из всего пучка нейтроны с определенным параметром отклонения от условия Брэгга, но и избавиться от ложного эффекта, появляющегося за счет швингеровского взаимодействия, так как

$$\varphi^S = \frac{\mathbf{E}_{sum} \mathbf{v}_{\parallel} \mu L}{c \hbar v_{\perp}} = \frac{\mathbf{E}_{sum} \mu L}{c \hbar} \operatorname{ctg}(\theta_B) \xrightarrow{\theta_B \rightarrow \pi/2} 0, \quad (6)$$

где θ_B – угол Брэгга.

Поляризация пучка измерялась с помощью He^3 -ячейки (7). После анализа поляризации из He^3 -ячейки нейтроны попадали на PG-монокроматор (8) с коэффициентом пропускания 50 %. Нейтроны, не отраженные полупрозрачным PG-монокроматором, попадали на кварцевый кристалл-отражатель (9). Отражаясь под $\pi/2$ от кварцевого кристалла-отражателя, нейтроны снова по-

падали на полупрозрачный PG-монокроматор, отражались от него и попадали на позиционно-чувствительный детектор (11). Нейтроны, не отраженные кристалл-отражателем, поглощались ловушкой пучка (10).

Все измерения проводились при двух температурах: $\Delta T^{(-)} = -2,0$ К и $\Delta T^{(+)} = 0,4$ К, соответствующих двум направлениям внутрикристаллического электрического поля. Тогда если принять, что нейтроны в установке распространяются вдоль оси z (электрическое поле будет также направлено вдоль оси z), то искомый эффект будет представлять собой разницу

$$\Delta P(x, y) = \frac{1}{2}(P^{(+)}(x, y) - P^{(-)}(x, y)), \quad (7)$$

где $P^{(+)}(x, y)$ и $P^{(-)}(x, y)$ – поляризация пучка для двух направлений электрического поля кристалла $\pm E$, соответственно зависящая от координат x и y позиционно-чувствительного детектора.

Пользуясь аппаратом векторной алгебры, для наглядности удобно измеряемую в эксперименте величину поляризации представить в виде $\Delta \mathbf{P}_{out} = (\mathbf{h}_{out} \cdot \Delta \mathbf{M} \mathbf{P}_{in})$, где \mathbf{h}_{out} – единичный вектор в направлении анализа поляризации; \mathbf{P}_{in} – вектор начальной поляризации; $\Delta \mathbf{M}$ – изменение матрицы преобразования начальной поляризации при реверсе электрического поля:

$$\Delta \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & -(H_z^R \Delta \tau / \tau_0 + H_z^D) q_n \tau_0 & (H_y^R \Delta \tau / \tau_0 + H_y^S) q_n \tau_0 \\ (H_z^R \Delta \tau / \tau_0 + H_z^D) q_n \tau_0 & 0 & -(H_x^R \Delta \tau / \tau_0 + H_x^S) q_n \tau_0 \\ -(H_y^R \Delta \tau / \tau_0 + H_y^S) q_n \tau_0 & (H_x^R \Delta \tau / \tau_0 + H_x^S) q_n \tau_0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\tau_0 = (\tau^{(+)} + \tau^{(-)})/2$ и $\Delta \tau = (\tau^{(+)} - \tau^{(-)})/2$, $\tau^{(+)}$ и $\tau^{(-)}$ – время пребывания нейтронов в области действия электрических полей противоположного знака.

Если начальная поляризация направлена вдоль оси x , то с учетом (8) выражение (7) примет вид

$$\Delta \mathbf{P}(x, y) = \begin{pmatrix} P_{xx} \\ P_{yx} \\ P_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ P_x (H_z^R \Delta \tau / \tau_0 + H_z^D) q_n \tau_0 \\ -P_x (H_y^R \Delta \tau / \tau_0 + H_y^S) q_n \tau_0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Аналогичным образом для начальной поляризации, направленной по y , можно записать:

$$\Delta \mathbf{P}(x, y) = \begin{pmatrix} P_{xy} \\ P_{yy} \\ P_{zy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P_y (H_z^R \Delta \tau / \tau_0 + H_z^D) q_n \tau_0 \\ 0 \\ P_y (H_x^R \Delta \tau / \tau_0 + H_x^S) q_n \tau_0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Пространственные распределения компонент поляризации $\Delta P_{zx}(x)$ и $\Delta P_{zy}(y)$, отвечающих за швингеровское взаимодействие, приведены на рисунке 2. Приблизительная оценка возможной систематической ошибки за счет

швингеровского магнитного поля дает величину $D^S < 5 \cdot 10^{-24} \text{ e} \cdot \text{см}$. Величина внутрикристаллического электрического поля в эксперименте составила $E = (0,7 \pm 0,1) \cdot 10^8 \text{ В/см}$.

На рисунке 3 приведены пространственные распределения компонент поляризации ΔP_{xy} и ΔP_{yx} , которые несут информацию об ЭДМ нейтрона. Видно, что на уровне имеющейся точности вклада от швингеровского взаимодействия в эти компоненты поляризации не наблюдается.

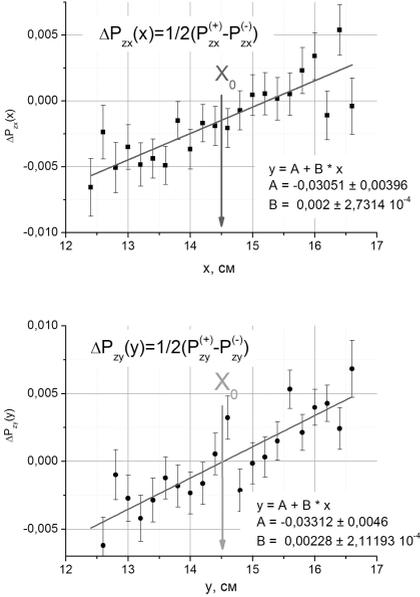


Рисунок 2 — ΔP_{zx} и ΔP_{yz} — компоненты поляризации, несущие информацию о величине швингеровского взаимодействия, от координаты x или y позиционно-чувствительного детектора соответственно

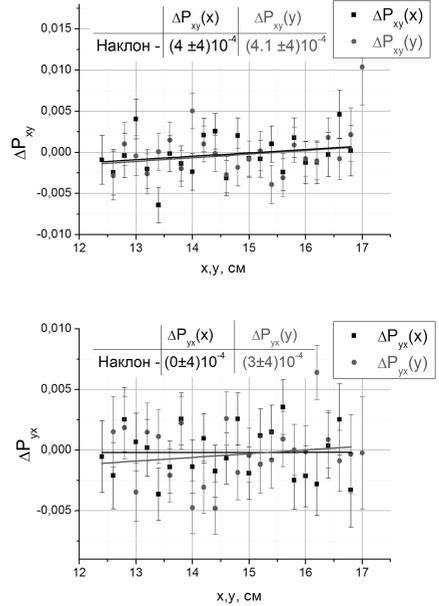


Рисунок 3 — ΔP_{xy} и ΔP_{yx} — компоненты поляризации, несущие информацию о величине ЭДМ нейтрона, в зависимости от координат x или y позиционно-чувствительного детектора соответственно

На рисунке 4 представлены суммарные результаты измерения компонент поляризации ΔP_{xy} и ΔP_{yx} , несущих информацию о величине ЭДМ нейтрона. Угол поворота спина нейтрона за счет ЭДМ нейтрона равен

$$\Delta\varphi^D = (0,9 \pm 2,3) \cdot 10^{-4}.$$

Соответственно, величина ЭДМ нейтрона будет равна

$$D = (2,5 \pm 6,5^{\text{stat}} \pm 5,5^{\text{syst}}) \cdot 10^{-24} \text{ e} \cdot \text{см}.$$

При этом статистическая чувствительность эксперимента к ЭДМ составила $1,6 \cdot 10^{-23} \text{ e} \cdot \text{см}$ за сутки измерений и была ограничена скоростью счета нейтронов.

Нейтроны, проходящие через рабочий кристалл под действием внутрискристаллических электрических полей разного знака, имеют чуть разные длины волн, и, следовательно, время их пребывания в кристалле тоже разное. Эта временная разница была измерена в эксперименте и составила $\Delta\tau/\tau_0 < 5 \cdot 10^{-4}$. Комбинация остаточного поля внутри CRYOPAD ($H \sim 2\text{--}4 \text{ мГс}$) и временная разница приводят к систематическому эффекту, соответствующему $D^H < 4,5 \cdot 10^{-25} \text{ e} \cdot \text{см}$.

Время стабилизации эксперимента контролировалось монитором пучка (позиция 12 на рисунке 1). Разница измеряемой поляризации от монитора пучка после переверота электрического поля составила $\Delta P^T < 2 \cdot 10^{-5}$, что соответствует $D^T < 10^{-24} \text{ e} \cdot \text{см}$.

Выявлен еще один эффект, который мог добавить дополнительную систематическую ошибку. После переключения знака электрического поля детектором регистрировалось пространственное смещение пучка $\Delta y = 0,03 \text{ см}$. В нашем случае это смещение было вызвано начальной юстировкой кристалла-отражателя. Также такая зависимость могла появиться из-за цилиндрической формы выходного окна CRYOPAD и наличия остаточного магнитного поля. Суммарный эффект будет приводить к дополнительному повороту спина нейтрона $\Delta P^G = 4 \cdot 10^{-5}$, что соответствует $D^G < 2 \cdot 10^{-24} \text{ e} \cdot \text{см}$.

В четвертой главе описано моделирование экспериментальной установки с помощью симулятора Vitess 2.6. Созданы модули, позволяющие корректно

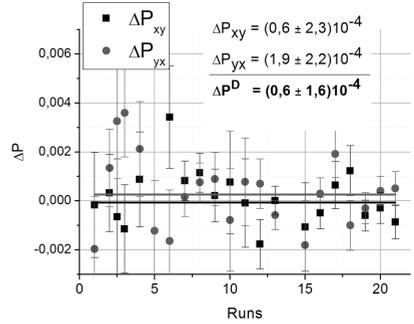


Рисунок 4 — ΔP_{xy} и ΔP_{yx} — компоненты поляризации, несущие информацию о величине ЭДМ нейтрона

описать работу экспериментальной установки. Проведен анализ ложных эффектов, которые могут давать вклад в компоненты поляризации, ответственные за ЭДМ нейтрона.

В пятой главе проведен анализ чувствительности полномасштабного эксперимента.

1. Показано, что механические напряжения, возникшие на поверхности рабочего кристалла кварца после его полировки, приводят к уширению двухкристалльной линии, которое наблюдалось в тестовом эксперименте. Это означало, что нейтроны, проходя через рабочий кристалл, оказывались в области действия электрических полей меньшей величины. Химическая обработка поверхности рабочего кристалла 20 %-ным раствором плавиковой кислоты в течение часа позволила уменьшить ширину двухкристалльной линии с 2,4 до 1,5 К, что соответствует внутрикристаллическому электрическому полю $0,9 \cdot 10^8$ В/см. Таким образом, для этой же схемы эксперимента реальная чувствительность может быть увеличена в $K_W = 1,3$ раз.
2. В работе [13] было показано, что оптимальная длина рабочего кристалла кварца в полномасштабном эксперименте должна составлять 50 см. Таким образом, увеличение длины кристалла с 14 до 50 см дает коэффициент усиления чувствительности $K_L = 3,6$.
3. В тестовом эксперименте использовалась очень малая часть интенсивности всего пучка нейтронов, что было обусловлено особенностями используемого экспериментального оборудования, длиной установки и расходимостью пучка. Для увеличения интенсивности в полномасштабном эксперименте планируется использовать новый, усовершенствованный CRYOPAD, что позволит увеличить площадь рабочего пучка с 5,7 до 72 см². С помощью симулятора Vitess 2.6 была выбрана оптимальная геометрия эксперимента, длина установки при этом составила 5 м вместо 7 м, как это было в тестовом эксперименте. Таким образом, можно получить коэффициент увеличения интенсивности за счет увеличения светосилы установки и длины кристалла, равный $K_N = 12$.

Коэффициент увеличения чувствительности может составить $K_S = K_W \cdot K_L \cdot K_N = 56$. Таким образом, в полномасштабном эксперименте может быть достигнута чувствительность $\sim 3 \cdot 10^{-25}$ е · см в сутки.

В шестой главе рассматриваются возможности дальнейшего усовершенствования экспериментальной установки. В качестве такого усовершенствования предлагается вместо полупрозрачного PG-монокроматора (позиция 8 на

рисунке 1), на котором теряется 75 % интенсивности падающего пучка, использовать стопроцентно отражающий PG-монокроматор совместно с многощелевым SM-поляризатором на основе Fe/SiN_x-зеркал с высокой отражающей способностью. Это позволит увеличить интенсивность в 3 раза и достигнуть чувствительности на уровне $\sim 2 \cdot 10^{-25} e \cdot \text{см}$ за сутки измерения.

Дальнейшее усовершенствование экспериментальной установки может быть связано с использованием других нецентросимметричных кристаллов. Наиболее вероятным кандидатом является кристалл силиката висмута (Bi₁₂SiO₂₀), для которого произведение $E_g \cdot \tau_a$ (где τ_a – время поглощения нейтрона в кристалле) на порядок больше, чем для кристалла α -кварца. Применение такого кристалла позволит достигнуть чувствительности на уровне $\sim 2 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{см}$ за сутки измерения.

Использование нецентросимметричных кристаллов, подобных Bi₁₂SiO₂₀, делает возможным предложить накопительный вариант установки, когда нейтроны хранятся между двумя тонкими кристаллами в области действия сильных внутрискристаллических электрических полей рабочего кристалла. Как и раньше, рабочий кристалл удерживается при температуре T_0 , температура тонких кристаллов варьируется в пределах $\pm \Delta T$. Показано, что для кристалла Bi₁₂SiO₂₀ время хранения нейтрона в такой системе может составить $\tau_k = 8$ мс, при этом нейтроны совершат порядка 80 отражений. Такой вариант установки может позволить поднять чувствительность до уровня несколько единиц на $10^{-27} e \cdot \text{см}$ за сутки измерения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые для поиска ЭДМ нейтрона реализована схема эксперимента при прохождении нейтрона через кристалл в условиях, близких к брэгговским, при углах Брэгга, близких к $\pi/2$. Такая схема эксперимента обладает высокой избирательной способностью к ЭДМ нейтрона и позволяет исключить ложные эффекты, обусловленные остаточными магнитными полями и швингеровским взаимодействием на уровне, ранее недостижимом для экспериментов с холодными нейтронами. Значение ЭДМ нейтрона, полученное в тестовом эксперименте, составило $D = (2,5 \pm 6,5^{\text{stat}} \pm 5,5^{\text{syst}}) \cdot 10^{-24} e \cdot \text{см}$. На сегодняшний день для кристалл-дифракционных экспериментов это лучшее ограничение. Статистическая чувствительность эксперимента к ЭДМ нейтрона составила $1,6 \cdot 10^{-23} e \cdot \text{см}$ за сутки измерений и была ограничена геометрией используемого экспериментального оборудования.

2. Впервые реализована возможность управлять знаком и величиной электрического поля, действующего на регистрируемые нейтроны.
3. Впервые на основе полученных экспериментальных данных показано, что в полномасштабном кристалл-дифракционном эксперименте может быть достигнута чувствительность на уровне $\sim 3 \cdot 10^{-25} \text{ e} \cdot \text{см}$ за сутки измерения.
4. Предложена новая идея модификации экспериментальной установки с использованием многоцелевого SM-поляризатором на основе Fe/SiN_x-зеркал, позволяющая увеличить чувствительность до уровня $\sim 2 \cdot 10^{-25} \text{ e} \cdot \text{см}$ за сутки измерения.
5. Впервые предложена и обоснована возможность использовать накопительный вариант установки, позволяющий увеличить время взаимодействия нейтрона с электрическим полем и реализовать потенциал некоторых кристаллов, имеющих более низкое, чем у кристалла кварца, поглощение нейтронов и на порядок большие электрические поля, что позволит поднять чувствительность до уровня несколько единиц на $10^{-27} \text{ e} \cdot \text{см}$ за сутки измерений.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Способ определения концентрации примесей в монокристалле: пат. 2541700 Рос. Федерация: МПК⁷ G 01 N 23/20 / Федоров В. В., Кузнецов И. А., Лапин Е. Г., Семенихин С. Ю., Воронин В. В., **Брагинец Ю. П.**, Вежлев Е. О.; заявитель и правообладатель ФГБУ «ПИЯФ» НИЦ «Курчатовский институт». – № 2013145161/28; заявл. 08.10.13.; опубл. 20.02.15. Бюл. № 5. – 10 с.: ил.
2. Fedorov, V. V. Search for the Neutron EDM by Crystal-Diffraction Method. Test Experiment and Future Progress / V. V. Fedorov, V. V. Voronin, **Yu. P. Braginetz** // Physica B. – 2011. – V. 406. – P. 2370–2372.
3. Семенихин, С.Ю. Исследование структурного совершенства монокристаллического кварца для эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом / С. Ю. Семенихин, **Ю. П. Брагинец**, В. В. Воронин, И. А. Кузнецов, Е. Г. Лапин, В. В. Федоров, Я. А. Бердников, А. Я. Бердников, Е. О. Вежлев // ЖТФ. – 2011. – Т. 81. – Вып. 3. – С. 71–79; Technical Physics. – 2011. – V. 56. – № 3. – P. 386–394.
4. Fedorov, V. V. Measurement of the Neutron Electric Dipole Moment via Spin Rotation in a Non-Centrosymmetric Crystal / V. V. Fedorov, M. Jentschel,

- I. A. Kuznetsov, E. G. Lapin, E. Lelie'vre-Berna, V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, S. Yu. Semenikhin, T. Soldner, V. V. Voronin, **Yu. P. Braginetz** // Phys. Lett. B. – 2010. – V. 694. – P. 22–25.
5. Способ определения относительного изменения межплоскостных расстояний совершенных кристаллов: пат. 2394228 Рос. Федерация МПК⁷ G 01 N 23/20 / Федоров В. В., Кузнецов И. А., Лапин Е. Г., Семенихин С. Ю., Воронин В. В., **Брагинец Ю. П.**, Амосов К. Ю.; заявитель и правообладатель УРАН ПИЯФ РАН. – № 2009104107/28; заявл. 03.02.09.; опубл. 10.07.10. Бюл. № 19. – 8 с.: ил.
 6. Fedorov, V. V. Measurement of the Neutron Electric Dipole Moment by Crystal Diffraction / V. V. Fedorov, M. Jentschel, I. A. Kuznetsov, E. G. Lapin, E. Lelie'vre-Berna, V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, S. Yu. Semenikhin, T. Soldner, F. Tasset, V. V. Voronin, **Yu. P. Braginetz** // Nucl. Inst. Methods Phys. Res, Sect. A. – 2009. – V. 611. – P. 124–128.
 7. Fedorov, V. V. Perspectives for nEDM Search by Crystal Diffraction. Test Experiment and Results / V. V. Fedorov, M. Jentschel, I. A. Kuznetsov, E. G. Lapin, E. Lelie'vre-Berna, V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, S. Yu. Semenikhin, T. Soldner, V. V. Voronin, **Yu. P. Braginetz** // Nucl. Phys. A. – 2009. – V. 827. – P. 538–540.
 8. Семенихин, С. Ю. Анализ совершенства кристаллов кварца для эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом / С. Ю. Семенихин, **Ю. П. Брагинец**, В. В. Воронин, И. А. Кузнецов, Е. Г. Лапин, В. В. Федоров, Я. А. Бердников, А. Я. Бердников, Е. О. Вежлев. – Гатчина: Препринт ПИЯФ 2818. – 2009. – 33 с.
 9. Fedorov, V. V. Neutron Volumetric Test of Interplanar Distances of Highly Perfect Crystals / V. V. Fedorov, I. A. Kuznetsov, E. G. Lapin, S. Yu. Semenikhin, V. V. Voronin, **Yu. P. Braginetz**, K. Yu. Amosov // Nucl. Inst. Methods Phys. Res., Sect A. – 2008. – V. 593. – P. 472–474.
 10. Fedorov, V. V. Test Experiment for the Neutron EDM Search by Crystal-Diffraction Method / V. V. Fedorov, M. Jentschel, I. A. Kuznetsov, E. G. Lapin, E. Lelie'vre-Berna, V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, S. Yu. Semenikhin, T. Soldner, F. Tasset, V. V. Voronin, **Yu. P. Braginetz**. – Gatchina: PNPI Preprint 2789. – 2008. – 20 p.
 11. Fedorov, V. V. Neutron Volumetric Analysis of a High Perfect Crystal Quality / V. V. Fedorov, I. A. Kuznetsov, E. G. Lapin, S. Yu. Semenikhin, V. V. Voronin,

Yu. P. Braginetz, K. Yu. Amosov. – Gatchina: PNPI Preprint 2748. – 2007. – 11 p.

Список литературы

- [1] Wu, C. S. Further Experiments on β Decay of Polarized Nuclei / C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes, R. P. Hudson // Phys. Rev. – 1957. – V. 106. – P. 1361–1363.
- [2] Lee, T. D. Question of Parity Conservation in Weak Interactions / T. D. Lee, C. N. Yang // Phys. Rev. – 1956. – V. 104. – P. 254–258.
- [3] Christenson, J. H. Evidence for the 2π Decay of the K_2^0 Meson / J. H. Christenson, J. W. Cronin, V. L. Fitch, R. Turlay // Phys. Rev. Lett. – 1964. – V. 13 – P. 138–140.
- [4] Abe, K. Observation of Large CP Violation and Evidence for Direct CP Violation in $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ Decays / K. Abe *et.al.* (Belle Collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2004. – V. 93. – P. 021601.
- [5] Aubert, B Direct CP Violating Asymmetry in $B^0, K^+\pi^-$ Decays / B. Aubert, R. Godang *et.al.* (BABAR Collaboration) // Phys. Rev. Lett. – 2004. – V. 93. – P. 131801.
- [6] Сахаров, А. Д. Нарушение CP-инвариантности, C-асимметрия и барионная асимметрия Вселенной / А. Д. Сахаров // Письма в ЖЭТФ. – 1967. – Т. 5. – С. 32–35.
- [7] Baker, C. A. Improved Experimental Limit on the Electric Dipole Moment of the Neutron / C. A. Baker, D. D. Doyle, P. Geltenbort P. Geltenbort, K. Green, M. G. D. van der Grinten, P. G. Harris, P. Iaydjiev, S. N. Ivanov, D. J. R. May, J. M. Pendlebury, J. D. Richardson, D. Shiers and K. F. Smith // Phys. Rev. – 2006. – V. 97. – P. 131801.
- [8] Fedorov, V. V. Test Experiment to Search for a Neutron EDM by the Laue Diffraction Method / V. V. Fedorov, E. G. Lapin, E. Lelievre-Berna, V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, S. Yu. Semikhin, T. Soldner, F. Tasset, V. V. Voronin // Phys. Lett. B. – 2005. – arXiv:hep-ex/0512064.
- [9] Shull, C. G. Search for a Neutron Electric Dipole Moment by a Scattering Experiment. / C. G. Shull, R. Nathans // Phys. Rev. – 1967. – V. 19. – P. 384–386.

- [10] Алексеев, В. Л. Измерение сильного электрического внутрикристаллического поля в швингеровском взаимодействии дифрагирующих нейтронов / В. Л. Алексеев, В. В. Воронин, Е. Г. Лапин, Е. К. Леушкин, В. Л. Румянцев, О. И. Сумбаев, В. В. Федоров // ЖЭТФ. – 1989. – Т. 96. – С. 1921–1926.
- [11] Федоров, В.В. Нейтронная физика: учебное пособие / В.В. Федоров. – СПб.: Изд-во ПИЯФ РАН, 2004. – 334 с.
- [12] Tasset, F. Spherical Neutron Polarimetry with Cryopad-II / F. Tasset, P. J. Brown, E. Lelievre-Berna, T. Roberts, S. Pujol, J. Allibon, E. Bourgeat-Lami // Phys. B. – 1999. – V. 267–268. – P. 69–74.
- [13] Воронин, В. В. Дифракция нейтронов и другие нейтронооптические эффекты в нецентросимметричных кристаллах и их использование для исследований в области фундаментальной физики: дис. ... д-ра физ.-мат. наук 01.04.16 / Воронин Владимир Владимирович. – СПб. – 2006. – 180 с.