

Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред

V Всероссийская научно-практическая конференция
(с международным участием)

(Дубна, 24–27 ноября 2025 г.)

Сборник тезисов докладов

Под общей редакцией кандидата физико-математических наук В. И. Боднарчука

Дубна
Государственный университет «Дубна»
2025

УДК 539.1.07:538.9
ББК 22.35в672я431
З 15-3

З 15-3 Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред : V Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) (Дубна, 24–27 ноября 2025 г.) : сборник тезисов докладов / под общ. ред. В. И. Боднарчука. – Дубна : Государственный университет «Дубна», 2025. – 48 с.

ISBN 978-5-89847-742-4

Представлены тезисы докладов участников V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» по проблемам проведения экспериментов в области нейтронной физики, разработки измерительного оборудования, а также основных направлений фундаментальных и прикладных исследований. Адресовано научным сотрудникам и преподавателям, специализирующимся в данной области, учащимся вузов, а также всем интересующимся данной тематикой.

Конференция проводится совместно с Объединенным институтом ядерных исследований в рамках выполнения работ первого этапа исследовательской программы гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме «Развитие аппаратно-методической базы для решения научных и прикладных задач на источниках нейтронов разного типа» (Соглашения между Минобрнауки России и ОИЯИ от 05 июня 2025 г. № 075-10-2025-153 о предоставлении субсидии)

УДК 539.1.07:538.9
ББК 22.35в672я431

Редакционная коллегия:

Немченко И. Б., д.т.н., и.о. проректора по научной работе и инновациям;
Пискунова О. И., к.т.н., директор инженерно-физического института.

Материалы сборника представлены в авторской редакции. Авторы несут полную ответственность за достоверность информации и возможность её опубликования в открытой печати.

Научное издание

Подписано в печать 11.11.2024. Формат 60×90/8.
Усл. печ. л. 6. Тираж экз. 57. Заказ № 19.

ФГБОУ ВО «Университет «Дубна» 141980, г. Дубна Московской обл., ул. Университетская, 19

ISBN 978-5-89847-742-4

© Государственный университет «Дубна», 2025

ФОНОННЫЕ СПЕКТРЫ α И γ ФАЗ И ЛИНИЯ РАВНОВЕСИЯ $\alpha \leftrightarrow \gamma$ НА T - P ДИАГРАММЕ ДИГИДРИДА МАГНИЯ

Т. А. Аксенова^{1*}, В. И. Кулаков¹, Р. И. Усманов^{1,2}

¹Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Россия,

²Научно исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

*e-mail: aksenova@issp.ac.ru

Дигидрид магния (7.6 масс.% H_2) — перспективный материал для водородной энергетики. Его практическое применение ограничено высокой температурой десорбции водорода (~400 °C). Перспективным направлением является исследование менее термостойких модификаций MgH_2 , в частности, орторомбической фазы высокого давления γ - MgH_2 , образующейся из тетрагональной α -фазы и сохраняющейся при нормальных условиях [1].

Прямое экспериментальное определение положения линии фазового равновесия $\alpha \leftrightarrow \gamma$ на T - P диаграмме MgH_2 невозможно из-за большого барического гистерезиса этого превращения при умеренных температурах. Ранее была экспериментально установлена только одна точка равновесия $P = 1.5 \pm 0.5$ ГПа, $T = 700$ °C [1], но она не согласуется с расчетными линиями $\alpha \leftrightarrow \gamma$ равновесия из работ [2–4]. В нынешней работе мы рассчитали линию $\alpha \leftrightarrow \gamma$ равновесия, изучив колебательный спектр γ - MgH_2 методом неупругого рассеяния нейтронов (НРН).

Метод НРН является предпочтительным для изучения динамики решетки водородсодержащих материалов благодаря исключительно большому сечению рассеяния нейтронов на ядрах водорода и отсутствию правил отбора. Это позволяет получить спектры плотности фононных состояний $g(E)$ и рассчитать изохорную теплоемкость $C_V(T)$. Поскольку дигидриды магния – диэлектрики, их теплоемкость $C_V(T)$ полностью определяется колебательным спектром вплоть до самых высоких температур.

Колебательный спектр α -фазы MgH_2 был ранее исследован на нейтронном спектрометре SEQUOIA в Окриджской национальной лаборатории в США при $T = 7$ К [5] (сплошная кривая на рис. 1). Мы синтезировали массивный (около 130 мг) и практически однофазный образец γ -фазы MgH_2 при $P = 5$ ГПа и $T = 600$ °C и исследовали его на том же спектрометре в тех же условиях (кривая с открытыми кружками на рис. 1). Несмотря на различия в спектрах $g(E)$, рассчитанные из них зависимости $C_V(T)$ оказались очень близки (рис. 2).

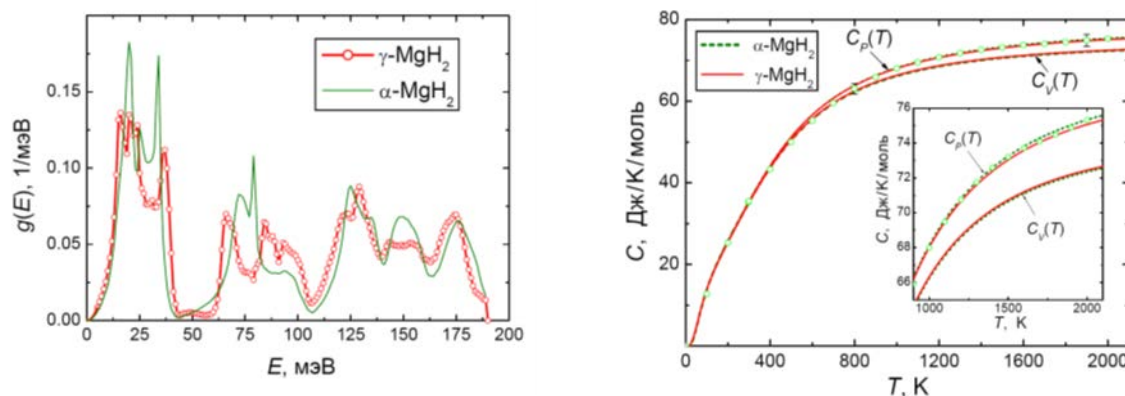


Рисунок 1. (слева) Спектры $g(E)$ плотности фононных состояний α - MgH_2 [5] и γ - MgH_2 (данная работа), полученные методом НРН при $T = 7$ К.

Рисунок 2. (справа) Температурные зависимости теплоемкостей C_V и C_P для α - MgH_2 [5] и γ - MgH_2 по данным НРН.

Изобарные теплоемкости $C_P(T)$ были получены из $C_V(T)$ добавлением поправки $\Delta C_{PV} = \alpha^2 VT/\chi$. Экспериментальные значения сжимаемости χ мы взяли из работы [6]. Температурные зависимости объема $V(T)$ и коэффициента объемного теплового расширения $\alpha(T)$ были определены в результате рентген-дифракционного исследования на синхротронном источнике в Аргоннской национальной лаборатории в США при $T = 11$ –300 К (рис. 3). Для экстраполяции на более высокие температуры использовался полуэмпирический закон Грюнайзена $\alpha(T) \sim C_V(T)$.

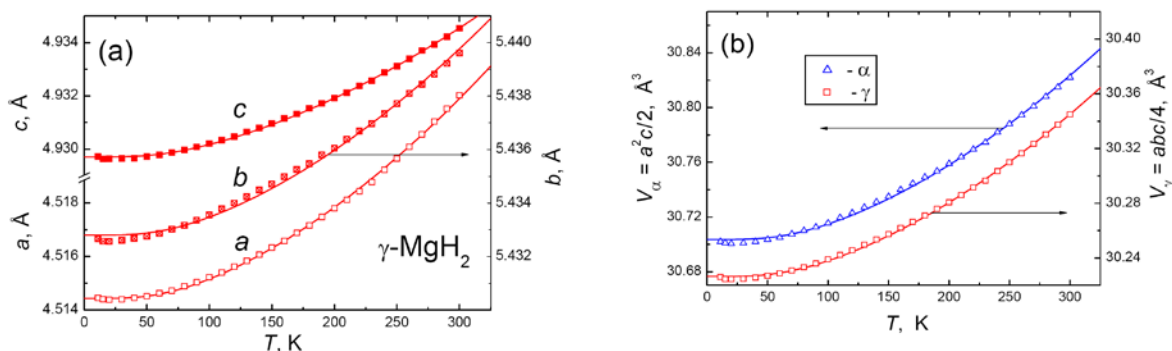


Рисунок 3. Температурные зависимости параметров решетки фазы γ -MgH₂ (a) и атомного объема фаз α -MgH₂ и γ -MgH₂ (b).

Рассчитанные зависимости $C_p(T)$ для α -MgH₂ и γ -MgH₂ приведены на рис. 2. Зависимость для α -MgH₂ хорошо согласуется с литературными данными [7]. $C_p(T)$ для γ -MgH₂ в пределах погрешности совпадает с $C_p(T)$ для α -фазы, что приводит к практически параллельным температурным зависимостям стандартной энергии Гиббса этих фаз. В результате линия $\alpha \leftrightarrow \gamma$ равновесия оказывается почти вертикальной при $P \sim 1.3$ – 1.5 ГПа (рис. 4). Эта линия согласуется с расчетами [2–4] при $T = 0$ К. Отклонение расчетных кривых [2–4] от вертикали можно объяснить небольшой погрешностью в расчетах теплоемкости γ -фазы.

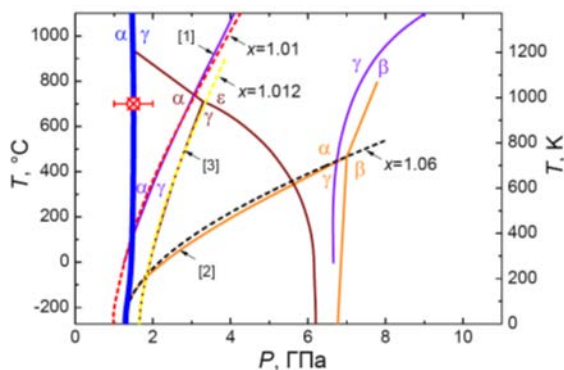


Рисунок 4. T - P диаграмма фазовых равновесий в MgH₂. Сплошная жирная кривая – линия $\alpha \leftrightarrow \gamma$ равновесия по данным НРН. Пунктирные кривые – аппроксимация расчетных линий $\alpha \leftrightarrow \gamma$ из работ [2–4] путем увеличения теплоемкости γ -фазы на, соответственно, 1.2, 1 и 6 %.

Таким образом, можно с высокой долей уверенности утверждать, что линия фазового равновесия $\alpha \leftrightarrow \gamma$ в MgH₂ близка к вертикали $P = 1.4 \pm 0.5$ ГПа в широком диапазоне температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Bastide J.-P., Bonnetot B. et al. Polymorphisme de l'hydru de magnesium sous haute pression // Mat. Res. Bull. – 1980. – Vol. 15. – P. 1779-1787.
2. Yartys V.A., Lototsky M.V. et al. Magnesium based materials for hydrogen based energy storage: Past, present and future // Int. J. Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – P. 7809-7859.
3. Moser D., Baldissin G., et al. The pressure–temperature phase diagram of MgH₂ and isotopic substitution // J. Phys.: Cond. Matter. – 2011. – Vol. 23. – P. 1-9.
4. AlMatrouk H.S., Chihai V. et al. Density functional study of the thermodynamic properties and phase diagram of the magnesium hydride // Calphad. – 2018. – Vol. 60. – P. 7-15.
5. Kolesnikov A.I., Antonov V.E. et al. Neutron spectroscopy of magnesium dihydride // J. Alloys Compounds. – 2011. – Vol. 509, Suppl. 1. – P. S599-S603.
6. Vajeeston P., Ravindran P. et al. Structural stability and pressure-induced phase transitions in MgH₂ // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 73. – P. 224102.
7. Chase M.W. NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition. // J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph. – 1998. – Vol. 9. – P. 1-1951.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИКЛАДНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

Е. В. Алтынбаев^{1,2*}, К. В. Гоголинский^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9,

²НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 188300, Россия, г. Гатчина, Орлова Роща, д.1
e-mail: altynbaev_ev@pnpi.nrcki.ru

Методы рассеяния нейтронов на выведенных пучках являются мощным инструментом для исследования структуры и динамики материалов на атомном и молекулярном уровнях. Эти методы широко применяются в физике конденсированного состояния, химии, биологии и материаловедении. Основная идея заключается в анализе взаимодействия нейтронов с веществом, что позволяет получать информацию о структуре, магнитных свойствах и других характеристиках материала.

Основные методы рассеяния нейтронов в области материаловедения включают:

1. Дифракция нейтронов используется для изучения кристаллической структуры материалов. Ввиду нулевого заряда, нейтроны рассеиваются на атомных ядрах, в результате, анализ дифракционной картины позволяет определить положение атомов в кристаллической решетке, в том числе их смещение относительно невозмущенного состояния. Данный метод особенно полезен для изучения легких элементов (например, водорода), которые слабо рассеивают рентгеновские лучи, а также поиска различных изотопов.

2. Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН) применяется для исследования наноструктур, таких как полимеры, коллоиды, биологические макромолекулы. Метод МУРН позволяет изучать объекты и неоднородности в материалах размером от 1 до 1000 нм.

3. Методы нейтронной визуализации (радиография и томография) используется для исследования материалов и их неоднородностей на масштабах от 30 мкм до 1000 см.

Использование такой особенности нейтрона, как ненулевой спин, позволяет эффективно исследовать не только атомную, но и магнитную структуру вещества. Кроме того, высокая проникающая способность нейтрона, в силу его нулевого заряда, предоставляет уникальные возможности по неразрушающему контролю объемных образцов, например, изделий аддитивных производств. Возможность изотопного контрастирования позволяет эффективно контролировать процессы заводораживания, охрупчивания, радиационных повреждений и окисления материалов.

Основной проблемой активного внедрения методов рассеяния нейтронов, при этом, остается отсутствие системы метрологического обеспечения нейтронных методов исследования вещества. Для решения данной задачи предлагается создание эталонного источника нейтронов на базе линейного протонного ускорителя с соответствующей исследовательской инфраструктурой, направленной на решение задач по использованию рассеяния нейтронов в качестве методов неразрушающего контроля вещества.

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ НЕЙТРОННЫМИ УСТАНОВКАМИ

Н. О. Антропов¹, А. И. Попов^{1,2}, А. А. Смирнов², Е. А. Кравцов^{1,2}

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*e-mail: lowealpinei@gmail.com

Современные тенденции в нейтронной физике состоят в выводе из эксплуатации среднепоточных нейтронных реакторов и строительстве вместо них крайне ограниченного числа высокопоточных источников нейтронов. Пучковое время на этих реакторах будет крайне ограни-

чено и, скорее всего, будет предполагать проведение исключительно уникальных экспериментов. Большинство задач в исследованиях конденсированных сред не требуют таких больших потоков нейтронов и решаются на среднепоточных реакторах. Выходом является строительство компактных источников нейтронов, в которых за счет оптимизации небольшого числа инструментов можно добиться тех же потоков нейтронов, как и на среднепоточных реакторах.

Нейтроны на компактном источнике получают за счет низкоэнергетических реакций при бомбардировке протонами мишени, причем, при этом не производятся и используются делящиеся материалы, и установка является экологически чистой. Консорциумом из ведущих российских нейтронных центров разрабатывается проект DARIA (compact neutron source Dedicated to Academic Research and Industrial Applications) по созданию в России сети компактных источников нейтронов, пилотный проект планируется реализовать в Екатеринбурге. Строительство прототипа компактного источника нейтронов DARIA является одной из приоритетных целей для развития различных сфер науки и техники в области физики твердого тела на Урале. На компактном источнике может быть установлено 1-2 мишенных сборки, до 5 различных нейтронных инструментов на каждой.

Одной из основных задач при проектировании установок подобного типа является задание оптимальных параметров времяпролетной оптики, требуемых под конкретные условия эксперимента. Элементы такой оптики включают в себя большое число параметров: время импульса протонного ускорителя, геометрические размеры нейтронных труб, расстояние от замедлителя до формирователя нейтронного импульса, параметры согласующийся между собой прерывателей и т.д. Зная влияние каждого из параметров и используя как классические алгоритмы машинного обучения (k-ближайших соседей, линейная регрессия, деревья решений и др.), так и современные ансамблевые методы (беггинг, бустинг), а также глубокое обучение с использованием нейронных сетей разной архитектуры, можно производить оптимизационный машинный расчет параметров установки по требованиям к энергетическому спектру и длительности пучка в установке.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021г).

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ФРЕЙМВОРК ОБРАБОТКИ 2D НЕЙТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ

*Антропов Н.О.^{1,2} Попов А.И.^{a,b} Кравцов Е.А.^{1,2} Смирнов А.А.² Новосёлов И.Э.²
Максимов Д.А.³*

¹ Институт металлургии им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИМЕТ УрО РАН), 620108, Россия, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина", 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

³ Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук, 620066, Россия, г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20

*e-mail: 79126678476@mail.ru

В данной работе представлен новый подход к постобработке данных времяпролетной нейтронной дифракции. Обработываемые данные – двумерные изображения времяпролетной нейтронной дифракции. В работе авторы использовали инструменты глубокого обучения, традиционно применяемые в компьютерном зрении. Решение направлено на поддержку и оптимизацию нейтронных экспериментов за счёт повышения качества и доступности данных.

Авторы предлагают оригинальный метод уточнения и постобработки двумерных изображений нейтронной дифракции (TOF diffraction). Были реализованы следующие архитектуры нейронных сетей: ResNet — для классификации 2D дифракционных картин; U-Net и SuperResolution CNN — для сегментации, фильтрации, снижения шума и усиления интенсивно-

сти нейтронного сигнала. Эксперименты показали, что предложенный подход эффективно повышает интенсивность сигнала, улучшает разделение дифракционных пиков и снижает уровень шума.

МАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА В BiFeO_3

А. В. Баглов^{1,2}, Л. С. Хорошко^{1,2}, М. В. Силибин³, Д. В. Карпинский^{3,4}, И. Д. Карнов⁵*

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

³Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Москва, Россия

⁴Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

⁵Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: baglov@bsu.by

В последние десятилетия научное сообщество проявляет повышенный интерес к мультиферроикам как с точки зрения фундаментальных исследований, так и в контексте перспектив их практического применения [1, 2]. Среди этих материалов особое место занимают феррит висмута (BiFeO_3) и родственные ему сложные оксиды, ключевым преимуществом которых является проявление магнитоэлектрического эффекта при комнатной температуре [3, 4]. Наибольший научный интерес представляют оксиды на основе феррита висмута, находящиеся вблизи морфотропных фазовых границ. Соединения, характеризующиеся двух- или трехфазным структурным состоянием, обусловленным их химическим составом, имеют принципиальное значение для изучения закономерностей формирования фазовых границ, а также для анализа факторов, определяющих температурные и концентрационные диапазоны существования различных структурных фаз. В таких соединениях за магнитные свойства отвечают ионы железа, магнитная конфигурация которых зависит как от их концентрации, так и от типа соседних атомов. Такие системы являются сильнокоррелированными и представляют интерес с точки зрения корректного теоретического описания, для чего в физике твердого тела наибольшее распространение получила теория функционала плотности, а в случае сильнокоррелированных систем – ее расширение с введением специальной поправки Хаббарда в обменно-корреляционный функционал. Исследования зонной структуры и распределения электронных состояний феррита висмута на таком уровне теории известны, однако исследованию магнитных моментов отводится недостаточно внимания.

Целью данной работы является анализ влияния величины поправки Хаббарда U на магнитный момент ионов железа в феррите висмута и сопоставление теоретических результатов с данными нейтронной дифракции.

Исследование магнитных свойств проводили с помощью численного квантово-механического моделирования методами из первых принципов в рамках теории функционала плотности и теории псевдопотенциала, имплементированных в пакете OpenMX [5–7]. В качестве модельной системы использовали ортоферрит висмута в кубической сингонии. Для обеспечения магнитного упорядочения G-типа строили сверхъединицу $2 \times 2 \times 2$. Интегрирование в первой зоне Бриллюэна проводили по Г-центрированной регулярной сетке k-точек размером $4 \times 4 \times 4$. Все расчеты проводили в рамках приближения локальной плотности (LDA) с использованием обменно-корреляционного функционала CA-PZ. Использовали двойной валентно-расщепленный базис с сохраняющими норму псевдопотенциалами для всех элементов. Для более точного учета кулоновской корреляции d-электронов железа при вычислении энергии использовали поправку Хаббарда U в упрощенном вращательно-инвариантном виде. Величина параметра U составляла от 0 эВ до 5 эВ с шагом 1 эВ, дополнительно было использовано значение 5,8 эВ, которое было получено самосогласованным образом методом линейного отклика. Магнитные моменты ионов рассчитывались в рамках анализа заселенностей по Малликену, суммирующего интегралы перекрывания оптимизированных псевдоатомных орбиталей, использующихся в качестве базиса в пакете OpenMX. Так как в данном методе получаемый ре-

зультат зависит от полноты базиса, мы дополнительно использовали анализ заселенностей по Вороному, в рамках которого интегрируется электронная плотность в объеме многогранника с центром на ионе, для которого проводится анализ, что приводит к менее зависящим от базиса результатам.

На графике зависимости магнитного момента иона железа от величины поправки Хаббарда U можно выделить две области: первая от 0 эВ до 3 эВ; вторая от 4 до 5,8 эВ (рис. 1). В первой области магнитные моменты монотонно и линейно возрастают от 3,75 до 3,98 μ_B для метода Малликена, и от 3,93 до 4,29 μ_B для метода Вороного. В этой области система находится в состоянии гибридизации Fe-3d и O-2p состояний, что и приводит к занижению магнитного момента вследствие делокализации электронной плотности. Тем не менее более выраженное увеличение магнитного момента в методе Вороного говорит об усиливающейся локализации Fe-3d с ростом величины поправки Хаббарда и перераспределении электронной плотности внутри многогранника, центрированного на ионе железа.

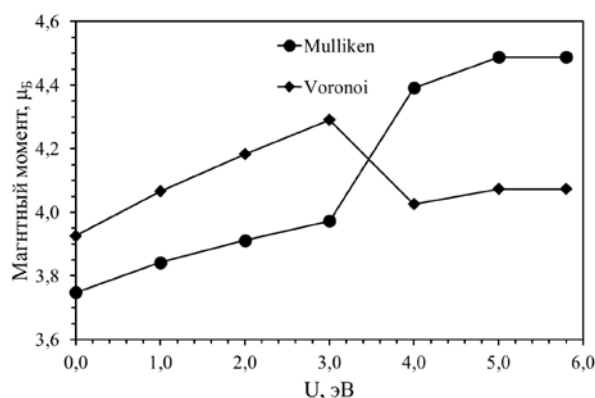


Рисунок 1. Распределение величины магнитного момента ионов железа при различных значениях поправки Хаббарда.

В области между 3 и 4 эВ система переходит в состояние «коррелированный изолятор» (переход Мотта-Хаббарда), при этом наблюдается резкий рост (0,44 μ_B) магнитного момента в методе Малликена и резкое уменьшение (0,27 μ_B) в методе Вороного, что говорит о сильной локализации Fe-3d и, соответственно, уменьшению вклада O-2p состояний, ранее находившихся в гибридизированном состоянии. С ростом U наблюдается «плато» выше 5 эВ, что говорит о переходе иона железа в высокоспиновое состояние ($S = 5/2$), что подтверждается полученными нами экспериментальными результатами [5]. Полученные магнитные моменты по Малликену (4,49 μ_B) отлично согласуются с нашими экспериментальными данными 4,37–4,64 μ_B , а по Вороному (4,07 μ_B) – с расчетами других групп.

Представленные результаты служат убедительной демонстрацией возможности корректного описания электронной структуры BiFeO_3 в рамках формализма LDA+ U . Значение параметра U в диапазоне 4,0–5,8 эВ является физически обоснованным, так как при его использовании корректно воспроизводится состояние коррелированного изолятора самого материала, правильный магнитный момент иона железа и его высокоспиновое состояние.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (23-19-00347); исследования частично поддержаны в рамках задания № 2.25 (№ гос.регистрации 20240603) подпрограммы «Наноструктура» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии». Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borisevich, A.Y., Eliseev, E.A., Morozovska, A.N., Cheng, C.-J., Lin, J.-Y., Chu Y.H., Kan, D., Takeuchi, I., Nagarajan, V., Kalinin, S.V., Tomic-scale evolution of modulated phases at the ferroelectric–antiferroelectric morphotropic phase boundary controlled by flexoelectric interaction // Nat. Commun. 3 (2012) 775.

2. Pullar, R.C. Hexagonal ferrites: a review of the synthesis, properties and applications of hexaferrite ceramics // Prog. Mater. Sci. 57 (2012) 1191–1334.
3. Fusil, S., Garcia, V., Barthelemy, A., Bibes, M. Magnetoelectric devices for spintronics // Annu. Rev. Mater. Res. 44 (2014) 91–116.
4. Zanolli, Z., Wojdeł, J.C., Iniguez, J., Ghosez, P. Electric control of the magnetization in BiFeO₃/LaFeO₃ superlattices // Phys. Rev. B: Condens. Matter 88 (2013), 060102.
5. Karpinsky, D.V. [et al.] Magnetic properties of BiFeO₃–BaTiO₃ ceramics in the morphotropic phase boundary: a role of crystal structure and structural parameters // J. Magn. and Mag. Mater. 539 (2021) 168409.

ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ФУРЬЕ-ДИФРАКТОМЕТРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ: ВВОД В СТРОЙ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

А. М. Балагуров¹, А.А. Богдзель¹, К.В. Булатов¹, В.А. Дроздов¹, Б. Ержанов¹, В.В. Журавлев¹, В.Х. Као¹, Е.И. Литвиненко¹, В.М. Милков¹, С.М. Мурашкевич¹, М.М. Подлесный¹, С. В. Сумников¹, В.В. Швецов¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* e-mail: sumnikov@nf.jinr.ru

В 2024 году была проведена модернизация детекторной системы Фурье- дифрактометра высокого разрешения (ФДВР) действующего на импульсном реакторе ИБР-2. ФДВР – уникальный спектрометр по времени пролета, на котором реализован корреляционный метод набора данных с использованием быстрого Фурье-прерывателя. Такой подход позволил на сравнительно небольшой пролетной базе, 20 метров между прерывателем и образцом, достигнуть разрешения по межплоскостному расстоянию, d_{hkl} , на уровне 1.5×10^{-3} . В исходной версии ФДВР регистрация рассеянных на образце нейтронов осуществлялась сцинтилляционным детектором на ⁶Li-стеклах с полным телесным углом 0.16 ср. Важной особенностью ФДВР является возможность переключения между модами высокого разрешения и высокой светосилы (без использования фурье-прерывателя) с разрешением $\Delta d/d \approx 0.015$. Нейтронограммы, измеренные с высоким разрешением, для этого, как правило, требуется (1 – 3) часа времени, используются для прецизионного уточнения структуры и для анализа профилей дифракционных пиков. Во второй моде полный дифракционный спектр может быть измерен с необходимой статистикой за время (1 – 5) минут, и она применяется для анализа фазовых трансформаций в материале в реальном времени.

Новый детектор (ДОР-А, рис. 1), разработанный в ЛНФ имени И.М.Франка, имеет полный телесный угол $\Omega_D \approx 2$ ср и перекрывает область углов рассеяния $2\theta = (133-175)^\circ$. Детектор имеет многоэлементную структуру и содержит 6 кольцевыхборок (колец) из сцинтилляционных экранов, выполненных из тонкого (0.42 мм) ZnS(Ag)/⁶LiF пластика. Всего детектор состоит из 108 независимых элементов, повторяющих форму поверхности геометрической фокусировки [1]. Сбор и проводка света от сцинтилляционных экранов на фотоумножители осуществляется оптическими спектросмещающими волокнами. Детальное описание особенностей применения ZnS(Ag)/⁶LiF сцинтилляторов приведено в работе [2].

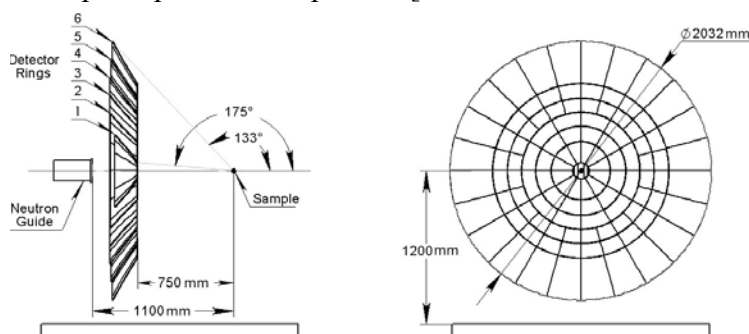


Рисунок 1. Схема многокольцевого, многоэлементного сцинтилляционного детектора ДОР-А, вид сбоку и вид спереди.

Дифракционные эксперименты, выполненные после монтажа и настройки детектора, показали хорошее соответствие с ожидаемыми характеристиками, что обусловлено высоким качеством его изготовления. Пример измеренного спектра приведен на рис. 2.

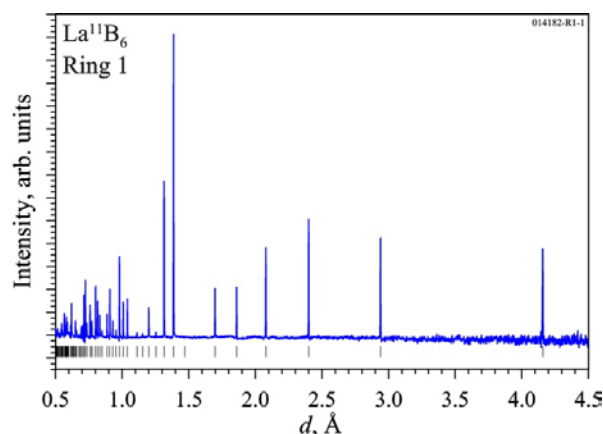


Рисунок 2. Дифракционный спектр стандартного поликристалла La^{11}B_6 . Показаны данные от кольца 1, нормированные на эффективный спектр.

Точная подгонка модулей и соблюдение пространственно-временной фокусировки позволяют суммировать спектры от элементов внутри одного кольца без введения дополнительных поправок. При максимальной частоте вращения Фурье-прерывателя 6000 об/мин $\Delta d/d \approx 0.001$ в широком диапазоне d_{hkl} (рис.3). В настоящее время ведутся работы по настройке электроники детектора. Проведенная модернизация детекторной системы заметно улучшила параметры ФДВР по разрешающей способности и светосиле и обусловила появление новых возможностей в проведении дифракционных экспериментов.

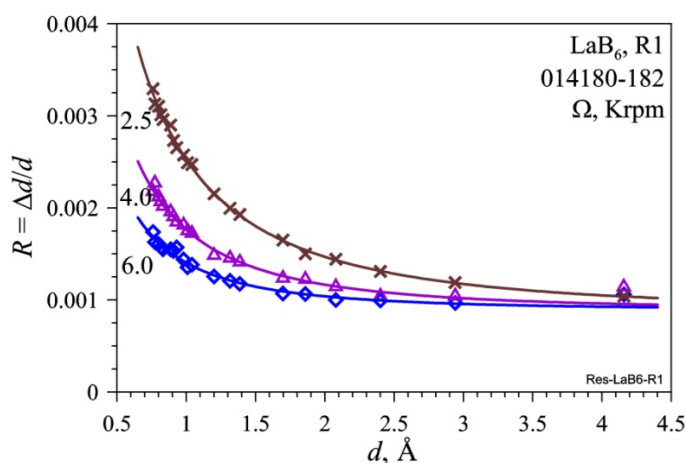


Рисунок 3. Функции разрешения ДОР-А для первого кольца при скоростях вращения Фурье-прерывателя 2500, 4000 и 6000 об/мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kruglov V.V., Balagurov A.M., Belova M.O. et al. "Wide-aperture back-scattering detector (BSD) for the High-Resolution Fourier Diffractometer (HRFD) at the IBR-2 reactor" J. Neutron Research 23 (2021) 243–250.
2. E.S. Kuzmin, A.M. Balagurov, G.D. Bokuchava et al. "Detector for the FSD Fourier Diffractometer based on $\text{ZnS}(\text{Ag})/{}^6\text{LiF}$ Scintillation Screen and Wavelength shifting Fibers Readout" J. Neutron Research (2002), 31–41.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО ДИФРАКТОМЕТРА С ВАРЬИРУЕМОЙ ПРОЛЕТНОЙ БАЗОЙ НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ «РАДЭКС» ИЯИ РАН

Д. А. Бучный^{1*}, Д. Н. Трунов¹, В. С. Литвин^{1,2}, С. Н. Аксенов¹, В. Н. Марин¹, Р. А. Садыков¹

¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

² Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

* e-mail: buchnyy@inr.ru

В состав экспериментального комплекса ИЯИ РАН входит импульсный источник нейтронов spallation-типа «РАДЭКС» на базе линейного ускорителя протонов. Нейтроны отводятся от замедлителя источника по 3 горизонтальным каналам под углом не более 5° к оси протонного пучка, что позволяет получать высокие потоки нейтронов особенно в эпитепловой области спектра.

В настоящее время ведется проектирование нового нейтронного дифрактометра на одном из каналов источника. В качестве детекторов нейтронов будущей экспериментальной установки выступают кольца, собранные из линейных нейтронных счетчиков на основе сцинтилляторов ZnS(Ag):LiF и световодов из органического стекла (ПММА), которые ранее были описаны и проанализированы в работах [1,2]. Планируется, что в исходном положении кольцевые детекторы нейтронов будут центрированы по оси пучка с возможностью поворота в её плоскости, что позволяет получать времяпролетные дифрактограммы сразу с нескольких углов рассеяния, либо быстрее набирать статистику по одному углу в зависимости от потребностей эксперимента. Кроме того, горизонтальный канал источника «РАДЭКС» состоит из нескольких отдельных секций вакуумных труб, что позволяет менять пролетную базу установки. На рисунке 1 приведено схематическое изображение системы транспортировки нейтронов от источника к дифрактометру. Установка дифрактометра возможна на пролетных базах 9 м и 30 м, что соответствует его расположению между различными сегментами вакуумной трубы диаметром 200 мм.

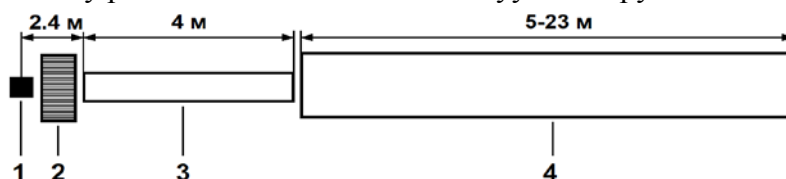


Рисунок 1. Схема горизонтального нейтронного канала источника РАДЭКС:

1 - вольфрамовая мишень, 2 - водяной замедлитель нейтронов, 3 - вакуумная труба диаметром 100 мм, 4 - вакуумная труба диаметром 200 мм.

В данной работе было проведено моделирование нескольких конфигураций проектируемого дифрактометра методами Монте-Карло для оценки возможного разрешения установки, а также интенсивности, расходимости и формы нейтронного пучка, который можно подать на образец при варьированной пролетной базе установки. В частности, проведен численный эксперимент по рассеянию нейтронов на порошковом образце Fe и их последующей регистрации кольцевыми детекторами, расположенными под углом дифракции $2\theta = 90^\circ$ на расстоянии 300 мм от образца. Также рассмотрена возможность установки нейтронных труб в различные секции вакуумной трубы диаметра 200 мм (Рис. 1) с суперзеркальным покрытием с показателем $m = 2, 3, 4$. Рассмотрены прямые нейтронные трубы и трапециевидные нейтронные трубы-концентраторы.

На рисунке 2 приведены полученные в ходе Монте-Карло моделирования нейтронные дифрактограммы при различных пролетных базах установки, по оценке ширины пиков которых проведен анализ разрешающей способности будущей установки. Оценка разрешения проводилась при показателе $m=2$ и составляет от $2.2 \pm 0.3\%$ (при пролетной базе 30 м) до $3.2 \pm 0.4\%$ (при пролетной базе 9 м) в зависимости от используемого нейтронного канала. На основании полученных данных выработаны рекомендации для проектирования нового дифрактометра и его нейтронно-проводной системы.

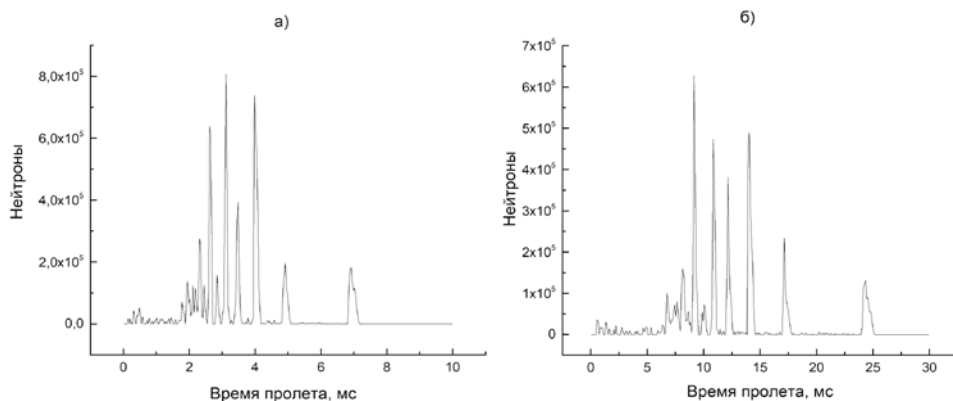


Рисунок 2. Модельные времяпролетные дифрактограммы, полученные от образца поликристаллического Fe на проектируемом дифрактометре при пролетных базах 9м (а) и 30м (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марин В. Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н. и др. Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей // Приборы и техника эксперимента. №1. 2018. – С. 5-12
2. Бучный Д.А., Литвин В.С., Трунов Д.Н. и др. Моделирование эффективности и разрешения регистрации нейтронов сцинтилляционным счетчиком на базе ZnS (Ag): 6LiF // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. №12. 2022. – С. 38-47.

ОСОБЕННОСТИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ ИБУПРОФЕНА И ЕГО НАТРИЕВОЙ СОЛИ ПО ДАННЫМ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

П. А. Гергелезхиу^{1,2*}, Е. В. Ракша¹, Е. А. Горемычкин¹, А. Б. Ерьсько¹, Л. И. Савостина³,
Д. М. Худоба¹

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Дубне, Дубна, Россия

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

* e-mail: gergelezhiu@jinr.ru

Ибупрофен ((RS)-2-(4-изобутилфенил)пропионовая кислота) – нестероидный противовоспалительный препарат из перечня жизненно важных лекарств РФ. Помимо клинического применения, ибупрофен – широко используемый объект модельных исследований для апробирования и демонстрации возможностей новых методов анализа молекулярной структуры, динамики и физико-химических характеристик биоактивных веществ, а также при разработке и оптимизации новых лекарственных форм и систем направленной транспортировки лекарств. Ибупрофен и его натриевая соль (как более растворимая форма) представляют собой рацемическую смесь двух энантиомеров – R и S. Биологическую активность проявляют преимущественно S-энантиомеры, в то время как R-форма *in vivo* подвергается метаболической инверсии с образованием активного S-энантиомера.

В данной работе представлены результаты исследований структуры и молекулярной динамики ибупрофена и его натриевой соли с использованием комбинации экспериментальных (ИК-, Раман-спектроскопия и некогерентное неупругое рассеяние нейтронов (НРН)) и расчетных (DFT на уровне теории BP86/def2-TZVP) методов. В качестве моделей для DFT-расчетов использовались R и S-энантиомеры ибупрофена и соответствующие 2-(4-изобутилфенил)-пропионат-анионы, ионные пары, а также димерные кластеры (R-S димеры) ибупрофена и ибупрофена натрия, образованные различными энантиомерами (Рис. 1). Экспериментальные исследования методом НРН выполнены с использованием времяпролетного спектрометра с об-

ратной геометрией НЕРА на высокопоточном импульсном реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, г. Дубна) и существенно дополняют данные по молекулярной динамике ибупрофена, полученные методами ИК- и Раман-спектроскопии [1].

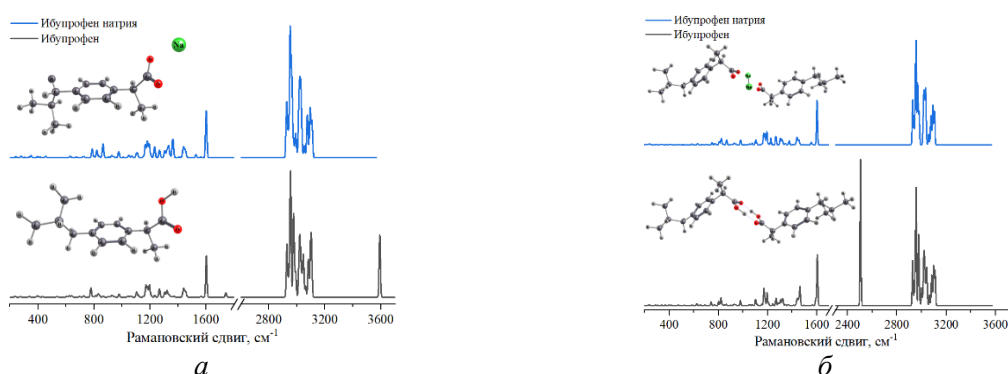


Рисунок 1. Раман-спектры ибупрофена и ибупрофена натрия на уровне теории BP86/def2-TZVP в приближении мономолекулярной (а) и димерной (б) моделей

Работа выполнена при поддержке гранта молодым ученым и специалистам ОИЯИ 24-402-01.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6. Gergelezhiu P. et al. Structure and Dynamics Investigation of Ibuprofen Dimers by DFT Method. Physics of Particles and Nuclei Letters, 22, 2025. – Pp. 1102-11.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ ZnS(Ag) С ^6Li ИЛИ ^{10}B ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д.М. Громушкин*, Е.П. Волков, А.Н. Дмитриева, А.Ю. Коновалова, Ю.Н. Мишутина, А.А. Петрухин, С.С. Хохлов, И.А. Шульженко, И.И. Яшин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

*e-mail: DMGromushkin@mephi.ru

Регистрация нейтронов важна для многих экспериментов и исследований как в фундаментальных, так и в прикладных задачах. В последнее время получил распространение отдельный класс детекторов на основе твердых сцинтилляторов ZnS(Ag) с добавлением захватчика нейтронов ^6Li или ^{10}B . Подобные детекторы могут использоваться и для регистрации низких потоков нейтронов $10^{-3} - 10^0 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ за счет отбора нейтронов по форме сигналов, что позволяет регистрировать единичные нейтроны.

В работе описываются детекторы нейтронов, созданные на основе подобных сцинтилляторов, которые применяются в Экспериментальном комплексе НЕВОД (НИЯУ МИФИ) [1] для решения как фундаментальных (исследование широких атмосферных ливней [2, 3] и вариаций космических лучей [4, 5]), так и прикладных (контроль радиационного фона и регистрация антинейтрино от реактора [6]) задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальный комплекс НЕВОД: монография / М.Б. Амелчаков [и др.]. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2022. – 259 с.
2. D. Gromushkin, V. Alekseenko, A. Petrukhin, et al. The array for EAS neutron component detection. JINST (2014), 9, C08028.
3. D.M. Gromushkin, F.A. Bogdanov, S.S. Khokhlov, et al. The array of scintillation detectors with natural boron for EAS neutrons investigations. JINST (2017), 12(6). C07029.
4. M.B. Amelchakov, A. Chiavassa, A.N. Dmitrieva, et al. The PRISMA-36 array for studying variations of the thermal neutron flux. Nucl. Instrum. Methods A. (2025), 1076 170547.

5. E.P. Volkov, D. M. Gromushkin, V. V. Kindin, et al. Analysis of the Powerful Forbush Decreases of 2024, Based on Data from Unshielded Neutron Detectors at the Experimental Complex NEVOD. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. (2025), 89 (6), pp. 826–829.
6. D.M. Gromushkin, A.N. Dmitrieva, A.A. Lukovnikov, et al. Neutron Module of a Solid-State Detector for Measuring Antineutrinos Using the Inverse Beta-Decay Reaction. Phys. of Part. and Nuc. (2025), 56(3), pp. 674–682.

ПРЕДСКАЗАНИЕ АСИМПТОТИК КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ РАССЕЯННЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВАНИИ АЛГЕБРАИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАРУШЕНИЯ СИММЕТРИИ

Е.Л. Гудков

Государственный университет «Дубна»

*e-mail: gel.22@uni-dubna.ru

В данной работе предлагается новая алгебраическая теория расчета корреляционных функций. Она включает в себя математический аппарат функционального анализа (аксиоматической КТП), теории времен возвращения Пуанкаре и эргодической теории. С помощью построения алгебры наблюдаемых значений системы опирающаяся на следующие теоремы.

Теорема 1. Пусть A — C^* -алгебра с единицей $I \subset A$ — замкнут двусторонний идеал $\pi: A \rightarrow B(H)$ — неприводимое представление в сепарабельном гильбертовом пространстве H $\omega \in H$ — циклический вектор единичной нормы $[\omega] = 1$, α -инвариантное состояние $\{g_n\} \subset G$ — последовательность, уходящая на бесконечность, такая что представления $\pi \circ \alpha_{g_n}$ унитарно эквивалентны π . У нас есть физическая система, описываемая алгеброй наблюдаемых A . Ключевая идея теоремы: Даже если состояние инвариантно

$$\phi(\alpha(a)) = \phi(a)$$

измерение наблюдаемой a может "почувствовать" нарушенную симметрию. Мера этого эффекта оценивается через "некомпактную часть" наблюдаемой a , то есть через ее норму в факторалгебре. Тогда для любого $a \in A$ выполняется:

1. Оценка разности матричных элементов:

$$|\langle \omega, \pi(a)\omega \rangle - \langle \omega, \pi(\alpha(a))\omega \rangle| \leq \|a\|_q.$$

2. Если $I = \mathcal{K}(H)$ — идеал компактных операторов, то существует последовательность $\{g_n\}$, для которой достигается предельное равенство:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|\pi(\alpha_{g_n}(a)) - \langle \omega, \pi(\alpha_{g_n}(a))\omega \rangle I_H\| = 2 \|a\|_q,$$

причём сходимость понимается в слабой операторной топологии.

3. Оператор $T(a) = w\text{-}\lim_{n \rightarrow \infty} (\pi(\alpha_{g_n}(a)) - \langle \omega, \pi(\alpha_{g_n}(a))\omega \rangle I_H)$ слабо замкнут.

Установленная теорема дает количественную характеристику спонтанного нарушения симметрии через идеальную структуру C^* -алгебры — факторнорму. Введем понятие «факторнормы». Факторнорма элемента

$$\|a\|_q = \inf_{x \in I} \|[a - x]\|_{x \in I} > 0$$

численное значение которого совпадает с параметром порядка системы. Из этой теоремы в свою очередь можно вывести следующий результат для корреляторов.

Теорема 2 Для $a, b \in A$ и идеала $I = \{x: \omega(x) = 0\}$:

$$\|ab\|_I \leq \sqrt{\omega(a^*a)\omega(b^*b)}$$

Равенство достигается, когда a и b "максимально некоррелированы" в состоянии ω . Данная теория позволяет установить следующие предсказания на поведение корреляционных функций на асимптотике.

Результаты 1. Экспоненциальное убывание корреляционной функции на пространственной бес-

конечности. 2. Оператор намагниченности $\|M\|$ является параметром порядка элементом идеала симметричной фазы. 3. Получена следующая формула расчета параметра намагниченности в парамагнитной фазе с помощью формализма факторнорм

$$[M_q]_q^2 = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V^2} \int_V \int_V \langle M_z(\vec{r}) M_z(\vec{r}') \rangle d^3r d^3r'$$

Используя приближение спиновых s-волн можно получить следующие выражения пригодные для численного расчета формулы В парамагнитной фазе $|M_q| \neq 0$ поэтому определяется диагональными корреляторам

$$S(q\omega) = \frac{\chi_0 \Gamma_q}{\omega^2 + \Gamma_q^2} \frac{1}{1 + (q\xi^2)} \cdot F_R(\omega, T)$$

поэтому флуктуации определяются диагональными корреляторами. Можно предложить следующий вывод корреляционной функции

$$[M_q] = 0$$

при $T > T_c$ Это означает, что оператор намагниченности принадлежит идеалу симметричных состояний. Теория предсказывает дополнительные резонансы в спектрах рассеяния связанные с появлением дополнительных брэгговских пиков в спектре.

1. Экспоненциальное убывание корреляционной функции на пространственной бесконечности.
2. Оператор намагниченности $\|M\|$ является параметром порядка элементом идеала симметричной фазы.
3. Получена следующая формула расчета параметра намагниченности в парамагнитной фазе с помощью формализма факторнорм

$$[M]_q^2 = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V^2} \int_V \int_V \langle M_z(\vec{r}) M_z(\vec{r}') \rangle d^3r d^3r'$$

4. Пики возвращения Пуанкаре - дискретные спектральные особенности
5. Модификация формы линии - асимметрия и эксцесс лоренцева пика
6. Нарушение скейлинга - поправки к скейлинговой функции
7. Температурные осцилляции - немонотонная температурная зависимость

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С. С. Хоружего «Введение в алгебраическую квантовую теорию поля» 1986 г. издательством «Наука»
2. Haag, R. Local Quantum Physics: Fields, Particles, Algebras. Springer, 1996.
3. Shirane, G., Shapiro, S.M., Tranquada, J.M. Neutron Scattering with a Triple-Axis Spectrometer. Cambridge University Press, 2002.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОГО УПОРЯДОЧЕНИЯ В ТОНКОЙ ПЛЁНКЕ Ho

Д.И. Десятериков^{1*}, Е.А. Кравцов¹, В.Д. Жакетов², Ю.В. Никитенко², В.В. Проглядо¹, Е.А. Степанова.³

¹ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

²ОИЯИ, Дубна

³УрФУ, Екатеринбург

*e-mail: devidor@yandex.ru

В докладе изложены результаты исследования магнитной структуры тонкой плёнки Ho методами нейтронной рефлектометрии и магнитометрии. Объёмные монокристаллы Ho обладают сложной H-T магнитной фазовой диаграммой, для этого редкоземельного металла характерно существование периодического геликоидального магнитного упорядочения в широком диапазоне температур и полей, которое при температурах ниже 20 К и малых значениях внешнего магнитного поля может трансформироваться в коническое магнитное упорядочение с периодом, соизмеримым с параметром решётки с Ho [1,2]. При этом известно [4], что в тонких плёнках Ho возникают существенные отличия в температурах магнитных фазовых переходов.

В настоящей работе, удалось прийти к следующим заключениям:

1) В плёнке Ho формируется периодическое магнитное упорядочение при температурах, ниже T_N для объёмного Ho, однако дальнейшее уменьшение температуры не приводит к формированию соизмеримой конической фазы

2) Воздействие магнитного поля в плоскости образца приводит к формированию веерной магнитной фазы, а затем — ферромагнитной фазы.

3) При величине внешнего магнитного поля 10 кЭ, плёнка Ho демонстрирует температурный гистерезис и сложное поведение ZFC зависимости, интерпретация которого затруднена без проведения дополнительных исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Спин» № 122021000036-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Magnetic and magnetothermal properties, and the magnetic phase diagram of single-crystal holmium along the easy magnetization direction [Текст]/ V.I. Zverev, A.M. Tishin, Z. Min, K. A. Gschneidner Jr, V. K. Pecharsky// J. Phys.: Condens. Matter.— 2015.— Vol. 27. — P. 146002.

2. Magnetic structure of holmium [Текст]/ M.J. Pechan, C. Stassis// J. Appl. Phys.— 1984.— Vol. 55. — P. 1900.

3. Finite-Size Effect on Magnetic Ordering Temperatures in Long-Period Antiferromagnets: Holmium Thin Films [Текст]/ E. Weschke, H. Ott, E. Schierle, C. Schüßler-Langeheine, D. V. Vyalikh, G. Kaindl, V. Leiner, M. Ay, T. Schmitte, H. Zabel, P. J. Jensen// Phys. Rev. Lett.— 2004.— Vol. 93, N 15. — P. 157204.

НЕЙТРОННЫЕ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК Tb

Жезляев Г.Е.^{1,2}, Десятериков Д.И.¹, Кравцов Е.А.^{1,2}, Жакетов В.Д.^{3,4}, Колупаев Е.Д.^{4,5}, Черников А.Н.⁴

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁵Физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Тяжёлые редкоземельные металлы (РЗМ) от гадолиния до иттербия — представляют собой уникальный объект для фундаментальных исследований в области магнетизма. Эти

металлы химически схожи и имеют близкую кристаллическую структуру типа ГПУ, но обладают сильно различающимися магнитными моментами и магнитной анизотропией одиночного иона, что обуславливает замечательное разнообразие их магнитных структур. В частности, у объёмных образцов Tb, Dy, Ho в определённом диапазоне температур наблюдается геликоидальное магнитное упорядочение, которое характеризуется поворотом магнитных моментов, лежащих в базисной плоскости, на некоторый постоянный угол, и как следствие такая система имеет период магнитного упорядочения. Возникает интерес рассмотреть магнитный порядок под влиянием эпитаксиальных напряжений и пониженной размерности.

В данной работе рассмотрена структура $\text{Al}_2\text{O}_3(\alpha\text{-pl})/\text{Nb}(49\text{нм})/\text{Tb}(97\text{нм})/\text{Nb}(27\text{нм})$, слой $\text{Nb}(49\text{нм})$ использовался в качестве буферного, слой $\text{Nb}(27\text{нм})$ в качестве защитного. Толщина слоёв определена из обработки кривых рентгеновской рефлектометрии. С помощью рентгеновской дифракции в симметричной геометрии было подтверждено наличие ориентационных отношений вдоль нормали образца $\text{Al}_2\text{O}_3(11\text{-}20)\|\text{Nb}(110)\|\text{Tb}(0001)$, а также $\text{Al}_2\text{O}_3(1\text{-}10\text{-}2)\|\text{Nb}(001)\|\text{Tb}(-2110)$ в плоскости образца с помощью асимметричной геометрии. По данным рефлектометрии и дифракции выяснено наличие в слое тербия его оксидов.

Измерения по рефлектометрии поляризованных нейтронов производились на инструменте РЕМУР на реакторе ИБР-2 (Дубна). Кривые рефлектометрии были измерены с помощью пучка поляризованных нейтронов при различных температурах образца. Период магнитной структуры рассчитывался из положения магнитного Брэгга по Q_z , который в свою очередь распространяется и в диффузную область. Таким образом была получена зависимость периода геликоиды и её угла поворота от температуры.

ДЕКОРИРОВАННЫЕ РЕШЁТКИ КАГОМЕ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КАНДИДАТЫ НА СПИН-ЖИДКОСТНОЕ ПОВЕДЕНИЕ.

С. В. Журенко^{1,2*}, А. В. Ткачёв², Н.Е. Гервиц¹, А. А. Гуппиус^{1,2}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

*e-mail: Zhurenko.Sergey@gmail.com

Фрустрированные магнитные материалы интенсивно изучаются в физики конденсированного состояния на предмет реализации различных состояний, такие как квантовые спиновые жидкости [1], сверхпроводимость [2] и топологические состояния [3]. Среди фрустрированных решёток решётка кагоме считается одной из наиболее перспективных. Магнитные ионы в такой системе расположены в сетке, состоящей из правильных шестиугольников и треугольников, расположенных в шахматном порядке. В настоящее время реализация подобного расположения магнитно-активных ионов было обнаружено в ряде богатых медью минералах: гербертсмитите, вольбортите, францисите, авдононите и аверьевите. Последние два минерала были открыты после Большого трещинного Толбачинского извержения на Камчатке.

Аверьевит $\text{Cu}_5\text{O}_2(\text{VO}_4)_2 \cdot n\text{MCl}$ ($\text{M} = \text{Rb}, \text{Cs}, \text{Cu}^+$) является минералом-включением фуमारольных солей, обнаруженных среди других продуктов испарения, богатых галогенидами меди и оксидами пентавалентного ванадия. Было высказано предположение, что тетраэдры $(\text{OSi}_4)^{6+}$ играют важную роль в транспорте меди в вулканических газах, что объясняет обилие минералов, содержащих такие фрагменты в окрестностях таких вулканов, как Исалько (Сальвадор), Везувий (Италия) или Толбачик (Российская Федерация). [4]

Магнитная подсистема данных соединений характеризуется дополнительными магнитно-активными ионами, расположенными как над, так и под треугольниками в решётке кагоме, формируя тетраэдры. Такая тетраэдрическая геометрия вносит геометрическую фрустрацию, поскольку обменные взаимодействия внутри OSi_4 являются антиферромагнитными (AFM).

Кристаллическая структура материалов семейства аверьевита представлена на рисунке 1. Два неэквивалентных иона Cu^{2+} образуют слои кагоме ($\text{Cu}\#1$), в то время как другие ионы меди формируют две треугольные сетки, закрывающие эти плоскости.

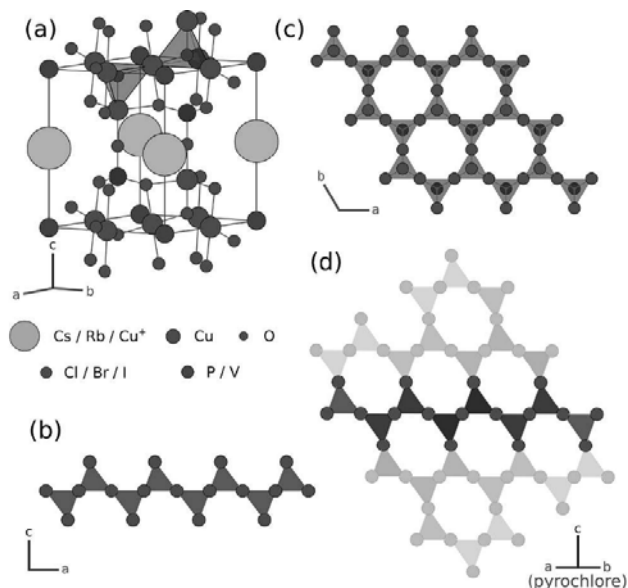


Рисунок 1. Кристаллическая структура аналогов аверьевита. На панели (а) показана элементарная ячейка, состоящая из каркаса $\text{OCu}_4\text{-PO}_4$ с характерными каналами, заполненными Cs/Rb/Cu. Тетраэдры OCu_4 , имеющие общие ребра, образуют декорированную решётку, показанную на панелях (b) и (c). Панель (d) решётка кагоме. [5]

Синтетический аналог аверьевита $(\text{CsCl})\text{Cu}_5\text{V}_2\text{O}_{10}$ характеризуется парамагнитной температурой Кюри–Вейсса $\Theta = -185$ К и упорядочивается антиферромагнитно при $T_N = 24$ К [6]. Показано, что дальний магнитный порядок подавляется при замещении меди цинком [7]. На величину обменных взаимодействий можно влиять, варьируя катион в тетраэдрических группах TO_4 ($T = \text{P}, \text{V}$). Поскольку арсенаты могут быть изоструктурны фосфатам и ванадатам, нами был проведен синтез и исследование кристаллической структуры и физических свойств аверьевитоподобного арсената $(\text{CsCl})\text{Cu}_5\text{As}_2\text{O}_{10}$.

Обнаружен структурный фазовый переход первого рода из тригональной в моноклинную при температуре ~ 310 К.

Спектры ядерного магнитного резонанса (ЯМР) были измерены на ядрах ^{133}Cs (ядерный спин $I = 7/2$, гиромагнитное отношение $\gamma = 5.62$ МГц/Тл, квадрупольный момент $Q = -0.00355$ барн) в постоянном магнитном поле 5.5 Тл в температурном диапазоне 7 - 300 К.

Проведённые термодинамические измерения, а также данные ЯМР свидетельствуют о том, что основное квантовое состояние $(\text{CsCl})\text{Cu}_5\text{O}_2(\text{AsO}_4)_2$ является скошенным антиферромагнетиком с $T_N = 21$ К, что сопоставимо с температурами упорядочения в соединениях $(\text{CsCl})\text{Cu}_5\text{P}_2\text{O}_{10}$ (13.6 К) [8] и $(\text{CsCl})\text{Cu}_5\text{V}_2\text{O}_{10}$ (24 К) [6]. Примечательно, что температуры магнитного упорядочения в семействе аверьевита слабо зависят от величин обменных взаимодействий ионов Cu в слоях кагоме и с декорирующими ионами Cu.

Перспективы совместного исследования соединений со структурой Кагоме ЯМР-спектроскопией и нейтронными методами весьма многообещающая. ЯМР-спектроскопия позволяет получать детальную информацию о локальной электронной и магнитной структуре, а также спиновой динамике. В то же время нейтронное рассеяние позволяет получить пространственную информацию и позволяет непосредственно наблюдать магнитные возбуждения и структурные особенности.

Совместное использование этих методов открывает новые возможности для глубокого изучения основного состояния геометрически фрустрированных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balents, L. Quantum mechanics in a spin. Nature 540, 534–535 (2016). DOI: 10.1038/540534a
2. Lee, P. A. From High Temperature Superconductivity to Quantum Spin Liquid: Progress in Strong Correlation Physics. Rep. Prog. Phys. 2008, 71, 012501. DOI: 10.1088/0034-4885/71/1/012501

3. Chisnell, R; Helton, J. S.; Freedman, D. E.; Singh, D. K; Bewley, R. L.; Nocera, D. G.; Lee, Y. S. Topological Magnon Bands in a Kagome Lattice Ferromagnet. *Phys. Rev. Lett.* 2015, 115, 147201. **DOI:** 10.1103/PhysRevLett.115.147201
4. Sergey V. Krivovichev, Olivier Mentré, Oleg I. Siidra, Marie Colmont, and Stanislav K. Filatov, Anion-Centered Tetrahedra in Inorganic Compounds, *Chemical Reviews* 2013 113 (8), 6459-6535. **DOI:** 10.1021/cr3004696
5. Michal J. Winiarski, Thao T. Tran, Juan R. Chamorro, and Tyrel M. McQueen, (CsX)Cu₅O₂(PO₄)₂ (X = Cl, Br, I): A Family of Cu²⁺ S = 1/2 Compounds with Capped-Kagomé Networks Composed of OCu₄ Units, *Inorganic Chemistry* 2019 58 (7), 4328-4336. **DOI:** 10.1021/acs.inorgchem.8b03464
6. Starova G.L., Krivovichev S.V., Fundamensky V.S., Filatov S.K., The crystal structure of averievite, Cu₅O₂(VO₄)₂.nMX: comparison with related compounds. *Mineralogical Magazine*. 1997;61(406):441-446. **DOI:** 10.1180/minmag.1997.061.406.09
7. Pekov, I. V.; Krivovichev, S. V.; Chukanov, N. V.; Yapaskurt, V. O.; & Sidorov, E. G. Avdoninite: New data, crystal structure and refined formula K₂Cu₅Cl₈(OH)₄·2H₂O. *Geology of Ore Deposits*, 2016, 58(7), 568-578. **DOI:** 10.1134/S1075701516070084
8. Chao Liu, Tiejian Chang, Shilei Wang, Shun Zhou, Xiaoli Wang, Chuanyan Fan, Lu Han, Feiyu Li, Huifen Ren, Shanpeng Wang, Yu-Sheng Chen, and Junjie Zhang, Cascade of Phase Transitions and Large Magnetic Anisotropy in a Triangle-Kagome-Triangle Trilayer Antiferromagnet, *Chemistry of Materials* 2024 36 (19), 9516-9525. **DOI:** 10.1021/acs.chemmater.4c01342

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТМАССОВЫХ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ СО СПОСОБНОСТЬЮ РАЗДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО ФОРМЕ ИМПУЛЬСА

Козин Т.М.^{1*}, Суслов И.А.^{1,2}, Немченко И.Б.^{1,2}

¹Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Российская федерация.

² Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Российская федерация.

*e-mail: tixon250904@gmail.com

Описаны результаты разработки метода получения пластмассовых сцинтилляторов (ПС), обладающие способностью к разделению нейтронов и гамма-квантов по форме импульса. Обсуждаются методы получения таких ПС. Лучшие характеристики достигнуты для образца на основе сшитого полистирола с увеличенной концентрацией сцинтилляционной добавки равной 35%. В качестве сшивателя использован дивинилбензол, в качестве сцинтилляционной добавки – 2,5-дифенилоксазол, а в качестве сместителя спектра – 1,4-бис(5-фенилоксазол-2-ил)бензол. Фактор разделения [1] для данного образца составил 0,65±0,05, световыход 0,64±0,04 относительно стандартного образца.

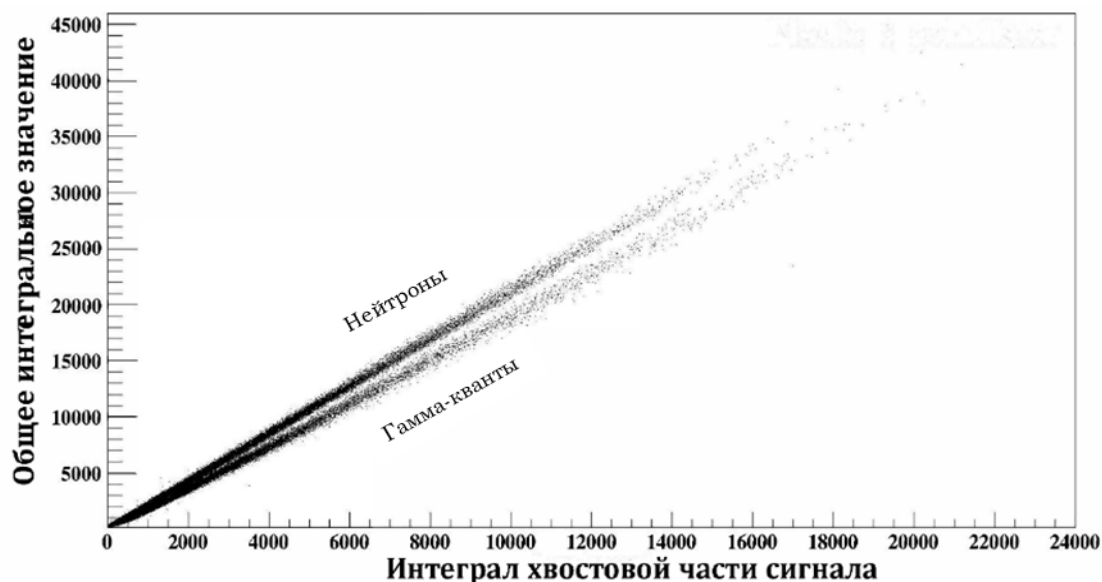


Рисунок. 1. Разделение нейтронов и гамма-квантов по форме импульса образцом ПС с концентрацией 2,5-дифенилоксазола, составляющей 35%

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghosh P., Laramore D., McGregor D.S. // *Nucl. Instr. Methods A.* – 2020. – Vol. 984. – DOI: 10.1016/j.nima.2020.164496.

СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА НАНОПОРОШКОВ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА γ -Fe₂O₃ и Fe₃O₄, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДАМИ «МЯГКОЙ» ХИМИИ

**Г.П. Копица^{1,2*}, Т.В. Хамова², А.М. Николаев², А.С. Коваленко², Ю.Е. Горшкова³,
О.В. Геращенко¹, А.Е. Баранчиков⁴, О.А. Шилова²**

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

² Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИХС, Санкт-Петербург, Россия

³ Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

⁴ Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, Москва, Россия

*e-mail: kopitsa_gp@pnpi.nrcki.ru

Магнитные наночастицы оксидов железа привлекают непрестанный интерес исследователей, благодаря широкому спектру применений в различных областях, таких как магнитно-резонансная томография, запоминающие устройства, сенсоры, спинтроника, магнитная адресная доставка лекарств, биомедицина, очистка окружающей среды. В последнее время наночастицы оксидов железа стали представлять особый интерес для растениеводства, поскольку оказывают положительное влияние на рост, развитие и продуктивность сельскохозяйственных растений.

Для получения нанопорошков оксидов железа используют различные способы синтеза: химическое осаждение, механохимический метод, эмульсионный метод, гидротермальный метод, микродуговой плазменный метод, а также золь-гель метод. Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам химического осаждения и золь-гель метода относятся простота и дешевизна технологического процесса, высокая химическая однородность получаемых материалов, низкая температуры их синтеза, возможность контролируемого управления свойствами материалов.

В настоящей работе [1,2] комплексом методов: РФА, СЭМ, низкотемпературной адсорбции азота, индукционным методом измерения намагниченности, мессбауэровской спектро-

скопии, МУРР и МУРПН было проведено исследование структурных и магнитных свойств нанопорошков оксидов железа (магнетита и маггемита), полученных методами: химического осаждения из растворов хлоридов железа FeCl_2 и FeCl_3 при комнатной температуре с последующей сушкой при 100°C в течение 24 ч; и золь-гель синтеза из растворов этиленгликоля ($\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$) и нитрата железа ($\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) с последующей термообработкой в течение 2 часов при 300°C в вакууме (Fe_3O_4) или на воздухе ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

Из анализа экспериментальных сечений $d\Sigma(q)/d\Omega$ малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов получен вид ядерного и магнитного корреляторов, а также магнитно-ядерного кросс-коррелятора, определены характерные радиусы ядерных R_n , магнитных R_m и магнитно-ядерных корреляций R_{mn} . Проведено сравнение данных МУРПН с результатами, полученными методами: РФА, СЭМ, низкотемпературной адсорбции азота, МУРР, мессбауэровской спектроскопии и индукционного измерения намагниченности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T.V. Khamova, O.A. Shilova, Yu.E. Gorshkova, N.V. Tsvigun, O.V. Geraschenko, A.E. Baranchikov, O.R. Udalova, A.S. Zhuravleva, G.G. Panova; G.P. Kopitsa // Study of the structure and bioactivity of powdered iron oxides synthesized by sol-gel method // NANOSYSTEMS: PHYSICS, CHEMISTRY, MATHEMATICS, 2022, Vol. 13, N. 4, pp. 414 – 429.
2. О. А. Шилова, А. С. Коваленко, А. М. Николаев, Т. В. Хамова, И. Ю. Кручинина, Г. П. Копица // Структура и свойства магнитных нанопорошков твердых растворов магнетит-маггемитового ряда, полученных водным синтезом и золь-гель методом // Журнал неорганической химии, 2024, Т. 69, № 3, с. 1 – 10.

БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ В НИЗКОЙ ДОЗЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРАЙМИНГА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЛЕРАНТНОСТИ ТРИТИКАЛЕ (*X TRITICOSECALE*) К АБИОТИЧЕСКИМ СТРЕССАМ

А.И. Кругляк^{1,2*}, Ю.В. Алексеёнок¹, П.Ю. Волкова³, А.С. Дорошкевич¹, А.А. Соловьев^{2,4}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия

³ Независимый исследователь, Бельгия

⁴ Всероссийский центр карантина растений, Раменский, Россия

*e-mail: Anastasiya.Kruglyak@nf.jinr.ru

Множество биотических и абиотических стрессовых факторов наносят вред растениям, вызывая заболевания, которые препятствуют нормальному росту и развитию. В сельскохозяйственном секторе абиотический стресс является одной из основных причин значительных финансовых и производственных потерь. Поэтому в современных условиях изменения климата повышение устойчивости сельскохозяйственных культур к абиотическим стрессам (засуха, засоление, температурные колебания) становится критически важной задачей [1]. Такие стрессы приводят к окислительному повреждению клеток и значительным потерям продуктивности [2]. Перспективным подходом является праймирование – предобработка семян мягким стресс-фактором, который активирует защитные системы растения, создавая «стрессовую память» [2]. В отличие от химических методов, физическое праймирование, в частности, малыми дозами ионизирующего излучения, является экологически чистым и эффективным. Быстрые нейтроны, обладающие высокой плотностью ионизации, представляют особый интерес, так как могут запускать более мощный адаптивный ответ по сравнению с гамма-излучением, однако их праймирующий потенциал изучен недостаточно.

В работе изучалось воздействие быстрых нейтронов (ускоритель ЭГ-5, ОИЯИ, Дубна) в различных дозах на семена тритикале. Основным критерием отбора пороговой (праймирующей) дозы являлось отсутствие статистически значимого ингибирования морфобиологических параметров (длина корней и побегов).

Установлено, что доза 5 Гр является пороговой: она не оказывала достоверного негативного влияния на ростовые показатели проростков, в отличие от более высоких доз, которые вызывали значительное угнетение. Поэтому она была идентифицирована как наилучший кандидат в качестве эффективного инструмента для адаптивного ответа.

В настоящее время проводятся эксперименты по проверке гипотезы о том, что предпосевная обработка семян быстрыми нейтронами выбранной дозой формирует кросс-толерантность к различным абиотическим стрессам. Данный подход имеет значительный потенциал для практического применения в селекции и семеноводстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ghosh S., Majee M. Antioxidants // *Vitamins and Hormones*. – 2023. – Vol. 123. – P. 1-28.
2. Song W., Shao H., Zheng A., Zhao L., Xu Y. Advances in Roles of Salicylic Acid in Plant Tolerance Responses to Biotic and Abiotic Stresses // *Plants*. – 2023. – Vol. 12. – №19. – 3475.

КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ

Т.В. Кулевой

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
e-mail: kulevoy@itep.ru

Компактный источник нейтронов на основе линейного ускорителя протонов (КИН) DARIA, разрабатываемый коллективом специалистов из ряда ведущих научных организаций призван стать пилотным образцом серийной установки, предназначенной для оснащения научных центров страны удобным и доступным инструментарием научных исследований на нейтронных пучках. Созданная сеть установок, охватывающая территорию всей страны от Калининграда до Дальнего Востока, позволит обеспечить развитие новых методов проведения исследований на нейтронных потоках, оборудование для их проведения, а также постоянное пополнение и повышение квалификации нейтронного научного сообщества страны.

Разрабатываемый под научным руководством НИЦ «Курчатовский институт» КИН DARIA включает линейный ускоритель, мишенную сборку на основе бериллия и несколько нейтронных станций. На выходе ускорителя в базовой комплектации предполагается иметь ускоренный пучок протонов с энергией 13 МэВ, током пучка 100 мА, длительностью импульса 100 мкс и частотой следования 100 имп/с. Использование бериллиевой мишени и набора соответствующих модераторов обеспечит формирование на исследуемых образцах поток нейтронов требуемой энергии с интенсивностью аналогичной той, что достигается на исследовательских реакторах малой мощности.

На сегодняшний день выполнены все работы по разработке технологий ключевых элементов ускорителя установки КИН DARIA, что позволяет заявлять об освоении всех технологий, требуемых для изготовления КИН DARIA, и готовности к изготовлению пилотного образца установки

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К (ИЯФ, Г. АЛМАТЫ, КАЗАХСТАН) С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА VITESS

Д.А. Куликбаева^{1,2}, Б. Мухаметулы^{1,2,3}, В.И. Боднарчук³, К.Назаров^{1,2}, Р. Нурулин^{1,2}

¹Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: kulikbayeva@inp.kz

Сегодня неразрушающий метод нейтронной рефлектометрии активно применяется для изучения поверхностей, тонких плёнок и многослойных структур в наномасштабе (от 1 до 100 нм).

Установка нейтронной рефлектометрии находится на №4 горизонтальном канале исследовательского комплекса реактора ВВР-К, Алматы, Казахстан. Данный рефлектометр нейтронов, оснащён двух-кристальным монохроматором для возможности варьирования длины волны (энергии) нейтронов и от увода прямой видимости пучка относительно активной зоны реактора, при неизменной геометрии установки. [1]

Для сравнения результатов и принятия решений в доработке установки в будущем необходима симуляционная модель. VITESS это программный пакет с открытым исходным кодом для моделирования экспериментов по рассеянию нейтронов. Он включает в себя все известные приборы, такие как нейтронная оптика (например, направляющие, апертуры, линзы), селекторы длины волны (например, дисковые прерыватели, селекторы скорости) и растущее разнообразие образцов.

Моделирование VITESS осуществляется с помощью метода трассировки лучей по методу Монте-Карло. Детали приборов представлены модулями, которые независимо друг от друга работают в трубной конструкции во время моделирования. Нейтроны передаются от одного модуля к другому в пакетах. [2]

В данном докладе будет сообщаться о принципиальной схеме, концепции установки нейтронной рефлектометрии, а также о результатах по развитию метода нейтронной рефлектометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Majkrzak, C. F. (2023). The development of neutron reflectometry as a probe of the nanoscale structure of polymer thin film systems—founded on the pioneering work of Professor Thomas P. Russell. *Nanoscale*, 15(10), 4725-4737.
2. Lieutenant, K., Zsigmond, G., Manoshin, S., Fromme, M., Bordallo, H. N., Champion, D., ... & Mezei, F. (2004, October). Neutron instrument simulation and optimization using the software package VITESS. In *Advances in Computational Methods for X-Ray and Neutron Optics* (Vol. 5536, pp. 134-145). SPIE.

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОДЕРЖАЩИХ БОР НАНОСТРУКТУР

В.Т. Лебедев^{1*}, Ф.М. Шахов², А.В. Швидченко², А.Т. Дидейкин², А.Я. Вуль²

¹Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова

НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*email: lebedev_vt@pnpi.nrcki.ru

Активные разработки препаратов на основе наноструктур для биомедицины с возможностями объединения диагностических и терапевтических функций ориентированы на разнообразные по физической природе объекты, включая металлические и оксидные частицы, фулле-

рены и эндофуллерены, нанотрубки, графен и производные, а также гибридные структуры, комбинирующие магнитные, люминесцентные и фотокаталитические свойства для целей терапии при использовании магнитно-резонансной томографии (МРТ), фотодинамической терапии (ФДТ), гипертермии и других методов [1,2]. Например, примечателен прогресс ядерной медицины в области альфа-радиотерапии с применением магнитных наночастиц для целевой контролируемой доставки радиофармпрепаратов [3].

Вместе с этим, благодаря появлению в нашей стране мощного источника нейтронов [4,5] крайне важно развитие нейтрон-захватной терапии, успешно применяемой в ядерных центрах [6] и прошедшей стадию испытаний на животных в России [7]. В этой связи авторы развивают исследования в целях разработки нейтрон-захватных препаратов на основе изотопа ^{10}B с высоким сечением поглощения для тепловых и эпитепловых нейтронов, применяя алмазные платформы не только для размещения этого изотопа, но и придания легированным наночастицам сильных люминесцентных [8], а также магнитных свойств путем прививки атомов 3d элементов к алмазным граням [9] для создания высокого магнитного контраста в МРТ диагностике.

Совершенствование технологий получения и модификации детонационных наноалмазов [10] заданного размера в диапазоне от 3 до 6 нм при небольшой дисперсности (20 %) позволяют готовить кристаллы высокого качества без оболочек аморфного углерода (фрагментов графена) с различными привитыми функциональными группами ($\text{H, OH, COOH, SO}_3\text{H}$) для регулирования поверхностного потенциала (положительного, отрицательного) [10]. По данным рассеяния нейтронов этим обеспечивается устойчивость водных алмазных дисперсий [11] для биомедицинских применений, расширяются возможности модификации алмазов лекарственными препаратами. На следующих этапах исследований авторы связывали наноалмазы с борофеном, получая гибриды, формирующие водные коллоиды. Проводимые биологические испытания позволят установить оптимальные пропорции компонент для формирования гибридных структур – прототипов нейтрон-захватных препаратов на основе ^{10}B .

Работа поддержана РФ (грант 25-19-00240).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

3. Diez-Pascual A. M., Rahdar A. Functional Nanomaterials in Biomedicine: Current Uses and Potential Applications. // ChemMedChem., 2022, V. 17(16), e202200142 (1-15).
4. Owida1 H. Abu, Turab N. M., Al-Nabulsi J. Carbon nanomaterials advancements for biomedical applications. // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 2023, V. 12 № 2, 891-901 Pp.
5. Моходоева О.Б., Шкинев В.М., Дженлода Р.Х., Заходяева Ю.А., Вошкин А.А. Разработка радиофармпрепаратов для альфа-радиотерапии на основе магнитных наночастиц. Известия вузов. Ядерная энергетика, 2018, №4, 128-137 с.
6. Ковальчук М.В., Воронин В.В., Гаврилов С.В., Гартвик А.В., Дьячков М.В., Ипатов Д.А., Матвеев В.А., Тарнавич В.В., Ульянов В.А. Исследовательский реактор ПИК. Первые эксперименты. Кристаллография, 2022, Т. 67, № 5, 785-794 с.
7. Ковальчук М.В., Воронин В.В., Григорьев С.В., Серебров А.П. Приборная база ректора ПИК. // Кристаллография, 2021, Т. 66, № 2, 191-213 с.
8. Kankaanranta L., Seppala T., Koivunovo H., et al. Boron Neutron capture therapy
9. in the treatment of locally recurred head and neck cancer. // Int J Radiat Oncol Biol Phys., V. 2007, V. 69, № 2, 475-482 Pp.
10. Shakhov F. M., Abyzov A. M., Kidalov S.V., Krasilin A. A., Lähderanta E., Lebedev V.T. Shamshur D. V., Takai K. Boron-doped diamond synthesized at high-pressure and high-temperature with metal catalyst. // J. of Phys. and Chem. of Solids, 2017, V 103, 224-237 Pp.
11. Panich A.M., Salti M., Aleksenskii A. E., Kulvelis Yu. V., Chizhikova A., Vul A. Ya., Shames A. I. Suspensions of manganese-grafted nanodiamonds: Preparation, NMR, and MRI study. // Diamond & Related Materials, 2023, V. 131, 109591 (1-7).
12. Vul A.Ya., Eidelman E.D., Aleksenskiy A.E., Shvidchenko A.V., Dideikin A.T., Yuferev V.S., Lebedev V.T., Kulvelis Yu.V., Avdeev M.V. Transition sol-gel in nanodiamond hydrosols. // Carbon, 2017, V. 114, 242-249 Pp.

13. Lebedev V.T., Kulvelis Yu.V., Kuklin A.I., Vul A.Ya. Neutron Study of Multilevel Structures of Diamond Gels. // Condens. Matter, 2016, V.1, № 2, 1-9 Pp.

НЕЙТРОННАЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРИРОВАННЫХ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ Gd

М.В.Макарова^{1,2}, Д. И. Девятериков¹, В. В. Матюхов¹, В. В. Проглядо¹, Е.А.Кравцов^{1,2}

¹ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, РФ

²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

*e-mail: makarova@imp.uran.ru

Известно, что плёнки редкоземельных металлов (РЗМ), покрытые каталитическими слоями Au, Ni, Pt, Pd и др. [1-4] легко поглощают водород [4] из окружающей атмосферы при малых давлениях водорода. Варьируя давление водорода, можно контролируемым образом изменять концентрацию водорода в слоях редкоземельных металлов, изменяя их структурные, магнитные и электронные свойства.

В данном докладе представлены результаты, полученные комбинированным применением низкотемпературной магнитометрии и рефлектометрии поляризованных нейтронов. Было изучено влияние гидрирования на структурные и магнитные свойства многослойных плёнок Gd и наноструктур [Gd(t)/Fe(35 Å)]₁₀.

Плёнки Gd и наноструктур [Gd(t)/Fe(35 Å)]₁₀ изготовлены методом высоковакуумного магнетронного распыления на монокристаллических подложках (001)Si. Измерения рефлектометрии поляризованных нейтронов были выполнены на времяпролетном рефлектометре MR на исследовательском реакторе CSNS (Китай).

Установлено, что в слоях гидроксида гадолиния вблизи межслойных границ формируются слои толщиной примерно 12 Å, в которых значительно снижена концентрация водорода, а величина магнитного момента при комнатной температуре близка к значению магнитного момента объёмного гадолиния при низких температурах. Данное явление можно связать с эффектом близости слоев Fe, известным в негидрированных сверхрешётках Fe/Gd.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

14. L. J. Bannenberg, B. Boshuizen, F. A. Nugroho, H. Schreuders. ACS Appl. Mater. Interfaces, 13 (44), 52530–52541 (2021). DOI: 10.1021/acsami.1c13240
15. И. А. Лихачёв, И. А. Субботин, и др. ФММ, 124 (12), 1186 (2023).
16. P. Tessier, D. Fruchart, D. Givord Magnetic properties of epitaxial gadolinium hydride films. Journal of Alloys and Compounds Vols 330–332, pp. 369, 2002.
17. V. Leiner, M. Ay, H. Zabel Hydrogen and the magnetic interlayer exchange coupling: Variable magnetic interlayer correlation in Ho/Y superlattices, Phys. Rev. B vol. 70, no. 104429, 2004.

АНИЗОТРОПНЫЕ СПИНОВЫЕ ЛЕСТНИЦЫ В ОРТОПИРОКСЕНЕ CoGeO₃

П. А. Максимов^{1,2*}, А. Ф. Губкин², А. В. Ушаков², А. И. Колесников³, М. S. Cook⁴, М. А. McGuire⁴, G. J. Redhammer⁵, А. Подлесняк³, С. В. Стрельцов²

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия 141980

² Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия 620990

³ Neutron Scattering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA

⁴ Materials Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA

⁵ Department of Chemistry and Physics of Materials, University of Salzburg, Salzburg A-5020, Austria

*e-mail: maksimov@theor.jinr.ru

В данном докладе будут представлены данные термодинамических и нейтронных измерений в ортопироксене CoGeO₃, где магнитные ионы Co²⁺ формируют квазиодномерную структуру

ру спиновых лестниц. Мы покажем, что неколлинеарное магнитное состояние, которое формируется ниже $T_N=32$ К, может быть стабилизировано сильной локальной одноосной анизотропией эффективных спинов $j_{\text{eff}}=1/2$, которая вызвана искажениями октаэдров лигандов. Данные неупругого нейтронного рассеяния позволяют нам определить обменные интегралы магнитного гамильтониана и описать эффективную модель магнитных взаимодействий. Получившаяся модель подтверждает описание CoGeO_3 как спиновой лестницы с сильной изинговской анизотропией.

Работа поддержана грантом РНФ 23-12-00159.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maksimov P.A. et al. Ising spin ladders of orthopyroxene CoGeO_3 . // arXiv:2508.03664 [cond-mat.str-el]

ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ КЛАССИЧЕСКИХ ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА И ПОСТ-ТЕСТА ТЬЮКИ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО НА ПРИМЕРЕ ВЫБОРОК ИЗ НЕГАУССОВЫХ ГАММА-РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЖОНСОНА

А. А. Масликов^{1*}, П. А. Масликов²

¹ Филиал «Протвино» государственного университета «Дубна», Протвино, РФ

² ФГАОУ ВО «УрФУ» студент по программе магистратуры института радиоэлектроники и информационных технологий, Екатеринбург, Российская Федерация

*e-mail: masspref@yandex.ru

В своей работе мы продолжили исследовать мощности классических критериев множественных сравнений, в случае применения их к маленьким выборкам, взятых из распределений, отличных от нормального [1]. В различных областях науки при проведении исследований невозможно или нецелесообразно проводить большое количество испытаний. Например, в медицине при (до)клинических исследованиях. В этом исследовании мы изучали мощность критериев множественных сравнений, применяемых к искажённым нормальным распределениям (Гамма-распределения и распределения Джонсона). Были применены компьютерные симуляции, построенные по принципу метода Монте-Карло [2]. Для нахождения случайных значений элементов выборок из различных распределений и вычисления мощности исследуемых критериев использовались программы, написанные в пакете Wolfram Mathematica (WM) с подключением генератора Вихрь-Мерсенна [3].

Универсальность непараметрических ранговых критериев вступает в противоречие с необходимой высокой мощностью, типичной для параметрических критериев, которые используются при условии нормального распределения. Это вызывает необходимость изучить вопрос – насколько уместен отказ от применения традиционных параметрических тестов для негауссовых данных [4].

Ошибка второго рода (β -ошибка, ложноотрицательное заключение) — ситуация, когда неверно принята гипотеза H_0 и отвергнута верная гипотеза H_1 . Вероятность ошибки второго рода обозначают β . Величина $(1 - \beta)$ называется мощностью критерия. Мощность критерия зависит от объема выборки и от установленного уровня значимости. Чем выше мощность критерия, тем более точно он выявляет различия между выборками.

В своей работе мы исследуем мощность критериев множественных сравнений, применяемых к искажённым нормальным распределениям, так как далеко не всегда мы можем быть уверены, что наша выборка имеет нормальное распределение, что требуется согласно классическим критериям. *Тест Тьюки*, также известный как метод попарных сравнений Тьюки [5], является статистическим методом, применяемым после проведения дисперсионного анализа (ANOVA). Этот тест позволяет сравнивать все возможные пары средних значений групп для корректного выявления статистически значимых различий между ними. *Критерий Шаниро-Уилка* проверяет гипотезу о том, что выборка была взята из нормального распределения. Кри-

терий Шапиро–Уилка обладает наибольшей мощностью при заданной значимости по сравнению с другими тестами.

Каждый раз использовались 4 выборки по 10 элементов из распределений, отличных от нормального, а именно Гамма-распределение, распределение Джонсона и их инверсий, а также стандартное нормальное распределение (в качестве эталонного). В каждой программе выборки отличаются на величину сдвига, которая изменяется пропорционально среднеквадратическому отклонению σ изучаемого распределения. Сдвиг изменялся от $0,0 \sigma$ до $0,7 \sigma$ с шагом $0,1 \sigma$.

Гамма-распределение выбрано с параметрами (3, 3). Функция плотности распределения при

таких параметрах имеет вид: $f(x) = \frac{1}{54} e^{-x/3} x^2$. Распределение Джонсона выбрано с типом логнормальное распределение (SL) и параметрами $(\gamma, \delta, \mu, \sigma) = (0.1; 1; 0; 1)$, γ и δ называются "параметрами формы", μ - "параметром местоположения", σ - "параметром масштаба".

Функция плотности распределения: $f(x) = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\ln(x))}}{\sqrt{2\pi x}}$.

Программа каждый раз сравнивает 100 000 четвёрок выборок и определяет долю различных четвёрок по ANOVA и Tukey (мощность) при заданном уровне значимости 0.05, а также количество выборок признанных ненормальными по Шапиро-Уилку (в долевым выражении). Всего использовано $5 \times 8 = 40$ таких программ, для каждого распределения и шага. Результаты оформлены в виде таблиц и графиков (см., например, Рисунок 1).

Контроль за нормальностью всех выборок посредством теста Шапиро-Уилка показал, что для Гамма-распределения более 17% выборок идентифицируются как ненормальные на уровне значимости 0.05, а для использованного распределения Джонсона – более 61%. Т.е. следуя стандартной операционной процедуре большинство четвёрок выборок мы должны были бы исследовать маломощными непараметрическими критериями. Также оценивалась погрешность вычисления мощности критерия Тьюки в двух контрольных точках $0,2 \sigma$ и $0,5 \sigma$ для всех пяти видов распределений. В результате расчётов мы получили значения погрешности от 0.0015 до 0.0028, что является хорошим результатом.

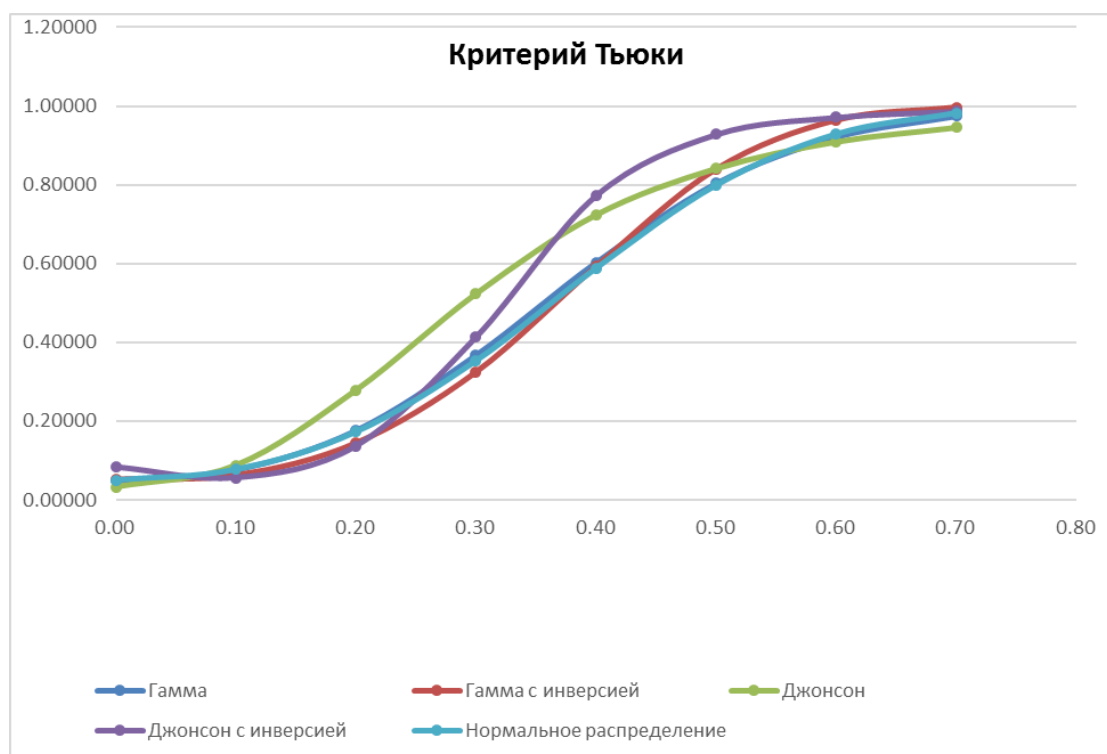


Рисунок 1. Графики мощности критерия Тьюки в зависимости от сдвига в единицах σ .

Графики мощностей дисперсионного анализа и пост-критерия Тьюки примерно повторяют друг друга. Значения мощностей для Гамма-распределение почти совпадает с нормальным, для гамма с инверсией график немного отличается, что вполне справедливо. Графики распреде-

ления Джонсона отличаются сильнее и показывают бóльшие значения мощностей. Формы графиков примерно одинаковые для критерия Тьюки и дисперсионного анализа. Всё это говорит о корректной работе критериев. Таким образом, можно сделать вывод, что данный опыт применения классических параметрических критериев к ненормальным выборкам дал хорошие результаты и не следует отвергать их в пользу непараметрических ранговых критериев только в силу ненормальности (негауссовости) выборок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдобаев В.Н., Артемьева А.Д., Масликов А.А. Исследование поведения классических критериев множественных сравнений, на ненормальных неоднородных распределениях, методом Монте-Карло; Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. - 2021. - №3. - С. 72-80. // Алдобаев В.Н., Артемьева А.Д., Масликов А.А., В.И. Саморокова В.И. Вторая Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) (Дубна, 21–23 ноября 2022 г.) Сборник тезисов докладов, с.23-24.
2. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Чимитова Е.В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход. - Изд-во НГТУ, 2011. - 888 с.
3. Nishimura, T. Tables of 64-Bit Mersenne Twisters. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation 10 / T. Nishimura. – 2000. – No 4. – P. 348–357. DOI:10.1145/369534.369540.
4. С. Гланц. Медико-биологическая статистика. Пер. с англ. – М., Практика, 1998 – 459 с.
5. Тьюки, Джон (1949). "Сравнение индивидуальных средних в Дисперсионном анализе". Биометрия. 5 (2): 99–114.

ПРОТОТИП ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ФОТОДИОДА С КОНВЕРТОРНЫМ БОРСОДЕРЖАЩИМ СЛОЕМ

***В. В. Матюхов^{1,2*}, А. В. Ищенко², Ю. А. Саламатов¹, М. В. Макарова¹,
В. С. Андреев², Л. В. Виктор², Е. А. Кравцов^{1,2}***

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: vyvmatyukhovimpuran@yandex.ru

В современных ядерных технологиях и радиационном мониторинге важную роль играют детекторы нейтронов, обеспечивающие надежное и точное измерение потока частиц. Одним из перспективных направлений является разработка детекторов на основе кремниевых фотодиодов с борсодержащим конверторным слоем [1,2]. Однако, на сегодняшний день в литературе имеется лишь несколько работ по данному направлению исследований.

В данной работе представлены результаты разработки детектора нейтронов на основе серийного кремниевого фотодиода ФД-20-30К, на поверхность кристалла которого нанесены конверторные борсодержащие слои из карбида бора и нитрида бора (B₄C и BN).

Нанесение покрытий производилось методом импульсного лазерного осаждения при комнатной температуре подложки. Кристалличность структуры и качество поверхности полученных покрытий анализировались методами рентгеновской дифракции и рентгеновской рефлектометрии. Фотодиод с конверторными слоями подключался к зарядочувствительному малошумящему предусилителю и цифровому спектрометру «СПЕКТР-1». Эксперименты проводились с нейтронным источником на основе изотопа ²⁵²Cf, расположенном в сборке из полиэтиленовых замедлителей. Дополнительно проводились эксперименты с источниками гамма- и альфа-излучения, которые позволили оценить энергетический диапазон чувствительности детектора.

Нанесенные на поверхность фотодиодов покрытия из карбида бора и нитрида бора имеют толщину порядка 50 нм. Было показано, методом импульсного лазерного осаждения возможно нанесение конверторных борсодержащих покрытий, сохраняя работоспособность полупроводникового фотодиода. Исследования кристаллической структуры показали, что формируется гексагональный нитрид бора и рентгеноаморфный карбид бора. Эксперименты с источником нейтронов показали, что фотодиоды с конверторными борсодержащими слоями способны регистрировать нейтронное излучение.

В результате проведенных работ показано, что представленный в работе способ регистрации ионизирующих излучений может быть использован для создания позиционно-чувствительных детекторов нейтронов на основе матриц кремниевых фотодиодов с борсодержащими конверторными слоями.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 5 июня 2025 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K.H. Kang, H.B. Jeon, G.N. Kim, et al. Journal of the Korean Physical Society. 65, 1374–1378 (2014).
2. P. Chaudhari, A. Singh, A. Topkar, R. Dusane. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 779, 33–38 (2015).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОПОРНОГО СЛОЯ ГАДОЛИНИЯ В НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Е. С. Никова^{*}, Ю. А. Саламатов, Е. А. Кравцов

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

^{*}e-mail: e.nikova@mail.ru

Актуальным направлением в рефлектометрии поляризованных нейтронов является поиск возможности экспериментального определения амплитуды отражения нейтронов и дальнейшего модельно-независимого расчёта потенциала взаимодействия. На основе подхода, предложенного в работах [1, 2], был разработан метод опорного слоя гадолиния и применен для исследования металлических наногетероструктур на времяпролетных рефлектометрах в q -диапазоне ($0 - 0.05$) \AA^{-1} [3-5]. Структурные параметры исследуемых образцов были уточнены с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта.

Для применения модельно-независимых методов, например, уравнения Гельфанда–Левитана–Марченко, амплитуда отражения должна быть известна на бесконечном диапазоне $q \in (0; +\infty)$ \AA^{-1} . На практике нужно получить максимально длинный диапазон, как минимум до $q \sim 0.1$ \AA^{-1} . Основная сложность заключена в том, что при простых измерениях на трёх различных углах получаем смещённые друг относительно друга диапазоны; их пересечение, где возможен анализ кривых, оказывается достаточно узким.

Поэтому была предложена модификация метода опорного слоя гадолиния, которая позволяет получить экспериментальные данные на максимально возможном для конкретного инструмента диапазоне изменения величины q . Суть состоит в том, что берется несколько малых q -диапазонов так, чтобы в каждом можно было получить три различных, полностью перекрывающихся рефлектометрических кривых. Затем на каждом малом диапазоне определяется амплитуда отражения. Полученные результаты сшиваются между собой. Таким образом, эта величина оказывается известной на значительно более широком диапазоне, чем исходные. В частности, можно хорошо описать как область полного внешнего отражения, так и «хвост» кривой.

Экспериментальная апробация метода была проведена на системах $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Cr}(110\text{\AA})/\text{Fe}(90\text{\AA})/\text{Cr}(9\text{\AA})/\text{Fe}(70\text{\AA})/\text{Cr}(50\text{\AA})/\text{RL}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ti}(160\text{\AA})/\text{RL}$. Здесь $\text{RL} = \text{Gd}(25\text{\AA})/\text{V}(20\text{\AA})/\text{Gd}(25\text{\AA})/\text{V}(100\text{\AA})$ – элемент структуры, выступающий в качестве опорного слоя. Небольшой слой ванадия между слоями гадолиния позволил несколько усилить эффект от резонансных свойств гадолиния и, тем самым, увеличить различие между рефлектометрическими кривыми, полученными на близких углах. Верхний слой ванадия необходим для защиты образца от окисления.

Спектры отражения нейтронов были измерены на многоцелевом рефлектометре (MR) нейтронного источника CSNS (China Spallation Neutron Source, Дунгуань). Магнитная система типа Fe/Cr/Fe была исследована с использованием поляризационного анализа. Рассчитанные амплитуды отражения для обеих систем в сравнении с модельными кривыми для систем без опорного слоя приведены на рисунках 1-3.

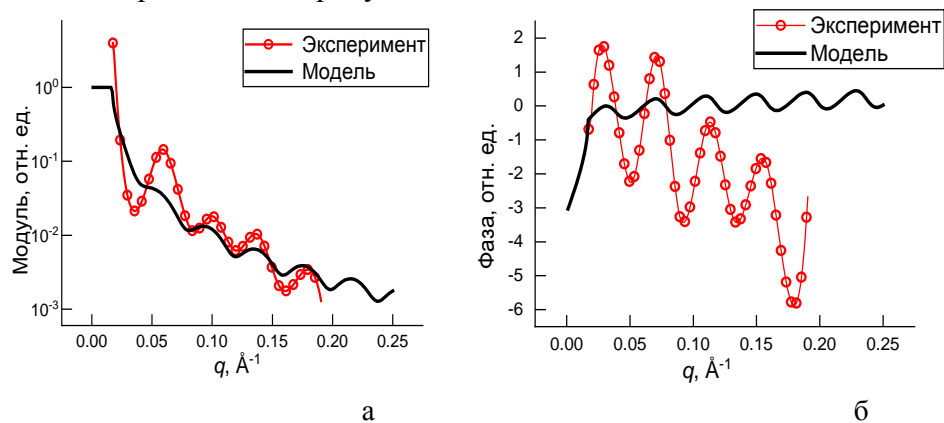


Рисунок 1. Амплитуда отражения для системы $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}(160\text{\AA})$. (а – модуль, б – фаза).

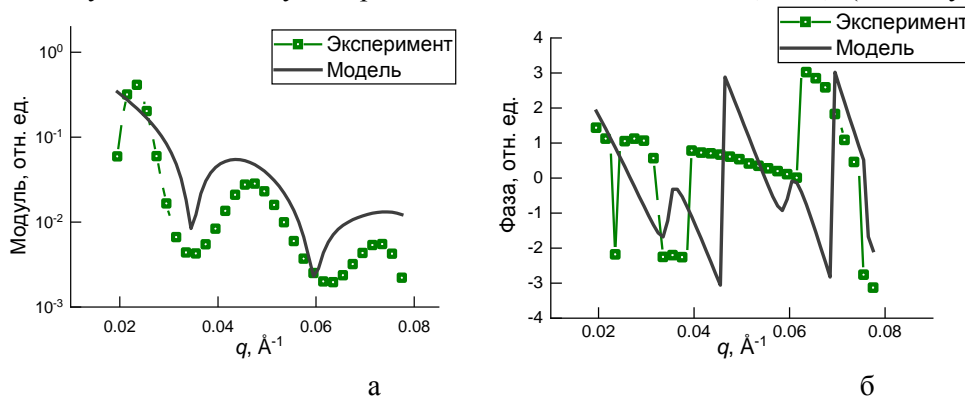


Рисунок 2. Амплитуда отражения для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Cr}(110\text{\AA})/\text{Fe}(90\text{\AA})/\text{Cr}(9\text{\AA})/\text{Fe}(70\text{\AA})/\text{Cr}(50\text{\AA})$ для канала рассеяния «++». (а – модуль, б – фаза).

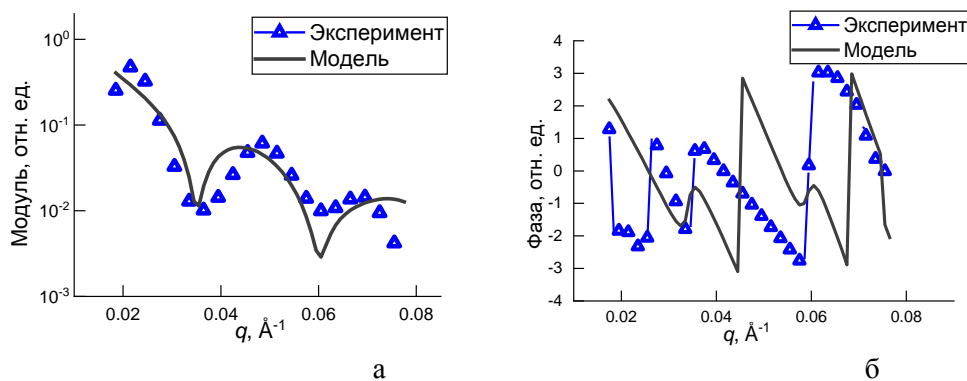


Рисунок 3. Амплитуда отражения для системы $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Cr}(110\text{\AA})/\text{Fe}(90\text{\AA})/\text{Cr}(9\text{\AA})/\text{Fe}(70\text{\AA})/\text{Cr}(50\text{\AA})$ для канала рассеяния «-+». (а – модуль, б – фаза).

Были определены параметры структур (толщина, плотность, шероховатость границы) и упорядочение магнитных моментов в слоях Fe. Результаты хорошо соответствуют номинальным значениям, заданным условиями синтеза. Анализ экспериментальных данных показал, что

предлагаемый метод позволяет определить амплитуду отражения на достаточно широком q -диапазоне. Изменение структуры опорного слоя позволило увеличить различие рефлектометрических кривых, снятых при близких углах падения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН и при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 5 июня 2025 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Majkrzak C.F. and Berk N.F.. Exact determination of the phase in neutron reflectometry// Physical Review B. 1995. V. 52. P. 10827–10830.
2. de Haan V.O., van Well A.A., Sacks P.E., Adenwalla S. and Felcher G.P.. Toward the solution of the inverse problem in neutron reflectometry// Physica B. 1996. V. 221. P. 524–532.
3. Никова Е.С., Саламатов Ю.А., Кравцов Е.А., Макарова М.В., Проглядо В.В., Устинов В.В., Боднарчук В.И., Нагорный А.В. Экспериментальная апробация метода опорного слоя в резонансной нейтронной рефлектометрии // Физика металлов и металловедение. 2019. V. 120. Рр. 913—919.
4. Никова Е. С., Саламатов Ю. А., Кравцов Е. А.. Резонансная нейтронная рефлектометрия на компактном источнике нейтронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. V. 7. P. 102—107.
5. Никова Е.С., Саламатов Ю.А., Кравцов Е.А., Проглядо В.В., Жакетов В.Д., Миляев М.А. Метод опорного слоя Gd в рефлектометрии поляризованных нейтронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. V.16 . P. 15—19.

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРИРОВАННОГО КАТОДА С ПОКРЫТИЕМ B_4C ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

А. С. Оводов^{1*}

¹ Лаборатория Нейтронной Физики им. И.М. Франка, Объединенный Институт Ядерных Исследований, Жолио-Кюри 6, Дубна 141980, Россия

* e-mail:ovodovas@jinr.ru

В данной работе обсуждается вопрос создания структурированных катодов различных конфигураций с покрытием из $^{10}\text{B}_4\text{C}$ для детекторов тепловых нейтронов. Катоды изготавливаются из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм и имеют поверхность Λ -образной формы. Перспективность использования структурированных катодов оценена по расчетам теоретической эффективности однослойного детектора тепловых нейтронов в зависимости от высоты гребня Λ -образной формы, угла при его вершине, расстоянии между соседними вершинами, а также длины волны нейтрона и толщины напыления $^{10}\text{B}_4\text{C}$. В качестве инструмента для численного моделирования использовался программный пакет Geant4.

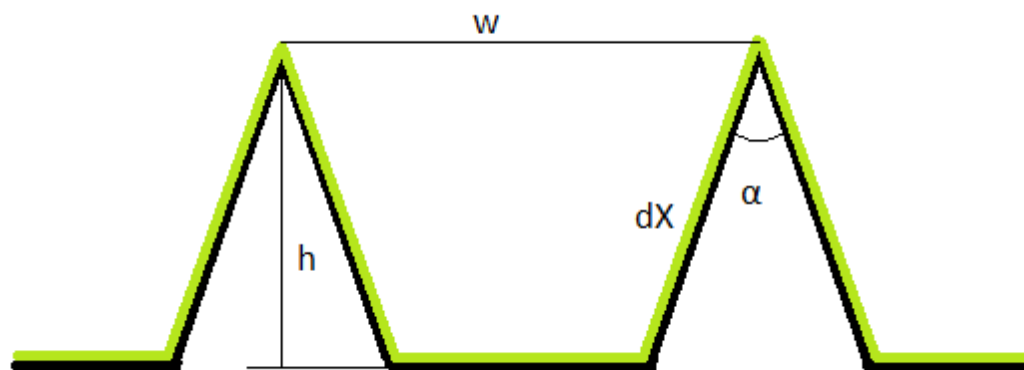


Рисунок 1: схема структурированного катода в профильной проекции

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУР ЛИТИЕВЫХ ОРТОФОСФАТОВ С 3d-ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

П. Е. Ромашко^{1*}, М. А. Сёмкин¹

¹ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*e-mail: polina.romashko.2014@mail.ru

Эксперименты по дифракции нейтронов являются одним из уникальных инструментов одновременной аттестации кристаллической и магнитной структур многокомпонентных систем и материалов содержащих, как легкие, так близкие в периодической таблице магнитоактивные элементы с разными длинами когерентного рассеяния нейтронов. Целью нашей работы является анализ проблем применения дифракции рентгеновских лучей и методов рассеивания нейтронов для изучения особенностей кристаллической и магнитной структур литиевых ортофосфатов $\text{Li}(\text{M}, \text{M}')\text{PO}_4$ с замещением по подрешётке 3d-переходных металлов.

Длины когерентного рассеяния рентгеновских лучей нерегулярным образом зависят от угла рассеяния. С одной стороны, для лёгких элементов (например, водород или литий) имеют малую величину, с другой стороны, для близких (марганец или железо) различаются незначительно. Применение рентген-дифракционных методов исследования для литиевых ортофосфатов ограничивается уточнением параметров кристаллической структуры (КС) с рядом допущений, в частности расчетами КС «на серый атом». Длины когерентного рассеяния нейтронов не зависят от угла рассеяния, имеют достаточную величину для детектирования некоторых лёгких элементов и существенно различаются для 3d-переходных металлов, и кроме того позволяют изучать магнитные структуры исследуемых соединений.

На рис. 1 показаны зависимости длин когерентного рассеяния рентгеновских лучей (f) и нейтронов (b) для элементов, входящих в состав систем ортофосфатов $\text{Li}(\text{M}, \text{M}')\text{PO}_4$ с $\text{M}, \text{M}' = (\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Cu})$. Видно, что длины когерентного рассеяния рентгеновских лучей уменьшаются с величиной вектора рассеяния (Q), в то время как длины рассеяния нейтронов не зависят от него. Таким образом, для детального изучения кристаллической структуры литиевых ортофосфатов с замещением 3d-переходных металлов необходим комплексный подход с применением обеих методик. В работе будут рассмотрены вопросы аттестации параметров кристаллической и магнитной структур на основе системы $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co})\text{PO}_4$ [1].

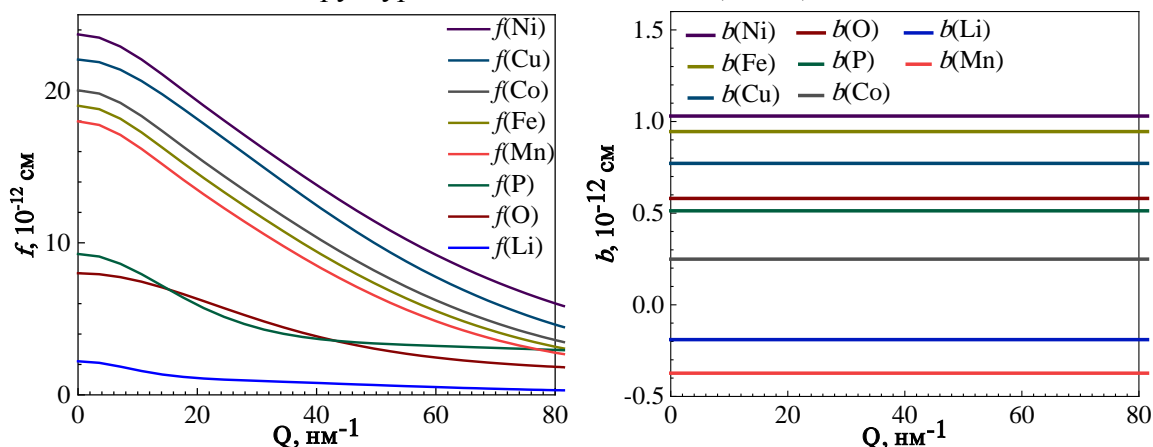


Рисунок. 1. Длины когерентного рассеяния рентгеновских лучей (слева) и нейтронов (справа) для Li, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, P и O.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Института физики металлов УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М. Kumar Rajesh, M.A. Semkin, N.V. Urusova, P.E. Romashko, E.D. Greshnyakov, V. Pryakhina, A.N. Pirogov Raman scattering intensity on $\text{LiNi}_{1-x}\text{Co}_x\text{PO}_4$ series orthophosphates Solid State Communications. — 2025. — V. 404. — P. 116090—116098.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХПРОВОДНИКА С ФЕРРОМАГНЕТИКОМ

Р. Н. Садрадзе^{1}, В. Д. Жакетов^{1,2,3,4}*

¹ Государственный Университет “Дубна” 1, Дубна, Россия

² Объединённый Институт Ядерных Исследований 2, Дубна, Россия

³ Московский Физико-Технический Институт 3, Долгопрудный, Россия

⁴ Московский Государственный Университет 4, Москва, Россия

⁵ Высшая Школа Экономики 5, Москва, Россия

*e-mail: srn.22@uni-dubna.ru

Квазипериодические и периодические структуры.

Периодические структуры представляют собой би-слои с чередованием А/Б. Для них выполняется условие Вульфа-Брэгга для определения периода кристаллической решётки. В то время как у квазипериодических кристаллических решёток чередование слоёв задаётся следующим образом: слой А заменяется слоем Б, слой Б заменяется би-слоем БА. У таких структур отсутствует периодичность, но имеется дальний порядок — у таких решёток отсутствует трансляционная симметрия, но присутствует повторяемость^[3]. При исследовании таких структур методами рентгеновской дифракции и рефлектометрии поляризованных нейтронов, в отличие от периодических, наблюдалось увеличение числа пиков отражения, их интенсивности, а также сдвиг в сторону больших длин волн.

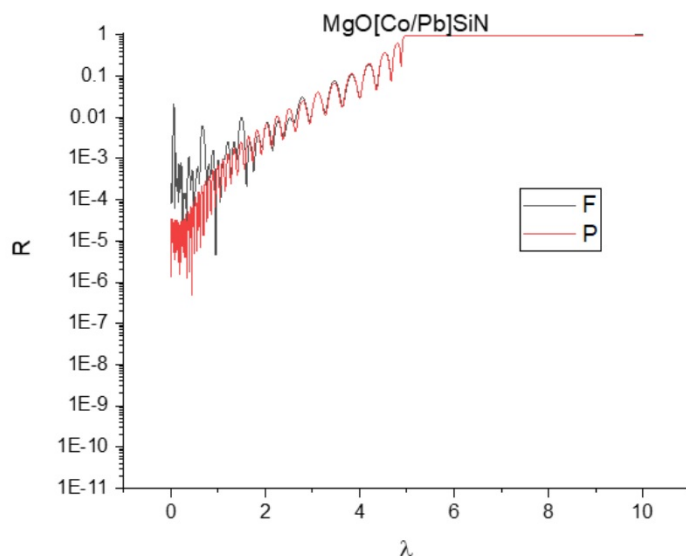


Рисунок 1. Теоретическое сравнение отражения нейтронов без магнитной части потенциала в структурах.

Взаимодействие сверхпроводника с ферромагнетиком

В структурах из ферромагнетика и сверхпроводника вида SFS сосуществует два принципиально отличающихся друг от друга взаимодействия: ферромагнитное и сверхпроводящее. Проникновение эффекта сверхпроводимости характеризуется лондоновской глубиной проникновения. Сильное обменное поле \mathbf{H} разрушает куперовскую пару при её попадании в ферромагнитный слой, но и куперовская пара взаимодействует с ферромагнитным слоем, изменяя конфигурацию намагниченности в F слое^[1,2].

К исследованию методом рефлектометрии поляризованных нейтронов предложено две структуры: периодическая с толщинами слоя А и Б равными 3 нанометра и квазипериодическая структура вида $B(d_1)/C/A(d_2)/C/B(d_1)$, где слои А и Б — ферромагнитные слои кобальта, а слой С

— сверхпроводящие слои свинца толщиной 4.85 нанометров, $d_1 = 6$ нанометров, $d_2 = 3$ нанометра. Метод нейтронной рефлектометрии позволяет увидеть эффект близости и обратный эффект близости при нанометровых масштабах структуры^[4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.I. Buzdin, “Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures” // Institut Universitaire de France and Université Bordeaux 1, CPMOH, UMR5798, F-33405 Talence Cedex, France // arXiv: [0505583](https://arxiv.org/abs/0505583)
2. Фоминов Яков Викторович, “Взаимовлияние сверхпроводимости и магнетизма и особенности нечётных по частоте сверхпроводящих состояний”, Диссертация на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, Черноголовка—2019
3. POLARIZED NEUTRON SCATTERING FOR 2D PERIODIC AND FIBONACCI HETEROSTRUCTURES, Zhaketov V.^{1,2,3,*}, Zaky A. Zaky E.^{1,4}, Norov D.^{1,5}, Dubkova E.³, Sadradze R.³, Kopytov G.⁶, Kolupaev E.D.^{1,5}, Devyaterikov D.I.⁷, Chernikov A.N.¹, Kravtsov E.A.⁷, Nikitenko Yu.V.¹, 1 Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia, 2 Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia, 3 Dubna State University, Dubna, Russia, 4 Beni-Suef University, Egypt, 5 Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, 6 Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, 7 M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia
4. Ю.В. Никитенко, В.Г. Сыромятников, “Рефлектометрия поляризованных нейтронов”, с.173-177.

ПРОТОТИП ОДНОКООРДИНАТНОГО ДЕТЕКТОРА МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ ПЛОСКОЙ КАМЕРЫ: ИЗМЕРЕНИЕ С ЛАБОРАТОРНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЙ

М.А. Самотохин^{a,}, М.О. Петрова^{a,b}*

^a Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна, Россия 141980

^bФГБОУ ВО «Университет «Дубна»,
Дубна, Россия 141980

*e-mail: samotohinmihail00@gmail.com

Повышение надежности и информативности регистрируемой картины рассеяния нейтронных спектрометров является одной из ключевых задач. Использование твердотельного конвертера является не только перспективной альтернативой газового конвертера ^3He , но и необходимой мерой для улучшения характеристик работы и повышения надежности детекторных систем медленных нейтронов. Плоскопараллельная резистивная камера традиционно используется в физике высоких энергий в качестве элементов TOF систем, благодаря рекордному временному разрешению. Данная особенность позволяет использовать линию задержки для определения координаты с высокой точностью.

В рамках доклада будут представлены результаты исследований изготовленного детектора медленных нейтронов на основе плоскопараллельной резистивной камеры с конвертором $^{10}\text{B}_4\text{C}$ с чувствительной областью 150×75 мм и линией задержки вдоль длинной стороны. Также будут описаны особенности отдельных конструктивных элементов детектора и процесса изготовления. Для определения параметров были проведены измерения с различными лабораторными источниками излучения при различных напряжениях. В качестве результатов будут представлены и проанализированы зарядовый и PSD спектр, а также позиция и сумма времени прихода сигналов на оба конца линии задержки относительно анода. На основе проведенного анализа будет обоснован рабочий режим созданного детектора.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МАТЕРИАЛОВ В РАМКАХ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО ПИКА В ПОЛУОГРАНИЧЕННЫХ ОБРАЗЦАХ

И. Сархадов^{1,}, З.А. Шарипов¹, З.К. Тухлиев¹, А.С. Халиль², Х.М. Гафурзода³*

¹ Объединенный институт ядерных исследований, 141980, Дубна, Россия

² Государственный университет, Дубна, Инженерно-физический институт

³ Худжандский государственный университет имени академика Бободжана Гафурова, Худжанд, Таджикистан

*e-mail: ibrohim@jinr.ru

В предыдущих работах были проведены численное моделирование лазерной абляции материалов, возникающих под действием ультракоротких лазерных импульсов в рамках обычной модели уравнения теплопроводности в полуограниченных образцах. Полученные результаты совпадали с результатами других авторов, которые аналогичную задачу решили другим способом. Аналогичное исследование было проведено для случаев лазеров постоянной интенсивности в полуограниченных образцах, которые привели к стационарным волнам лазерной абляции материалов.

В настоящей работе проведено аналогичное численное исследование при непрерывном воздействии лазера постоянной интенсивности на образец в рамках модели термического пика, который состоит из двух взаимосвязанных уравнений для электронного газа и кристаллической решетки. Согласно модели термического пика энергия падающего лазера сперва передается электронному газу, а потом эта энергия передается из электронного газа к кристаллической решетке. В обычной модели уравнения теплопроводности этот эффект не отражен. Действие лазера на образец учтено с помощью функции источника в уравнении теплопроводности электронного газа. При этом нестационарное решение уравнения термического пика, как и в обычной модели уравнения теплопроводности после некоторого времени переходит к его стационарному решению даже при учете температурной зависимости теплофизических параметров материала образца.

При данном подходе выявляется динамика перехода нестационарного решения лазерной абляции материалов к его стационарному решению.

Будут проведены сравнительный анализ полученных численных результатов при учете и не учете температурной зависимости теплофизических параметров материала. Также будут проведены сравнительный анализ результатов применения модели термического пика с результатами обычной модели уравнения теплопроводности.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

Е.О. Серов^{1,}, П.С. Савченков^{1,2}, А.В. Рогачев¹, А.И. Калюканов¹, В.В. Сидоров¹,
В.И. Боднарчук^{1,3,4}, А.В. Белушкин^{1,3,5}*

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

⁵ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

*e-mail: mail@egor-serov.ru

Нейтронная рефлектометрия является мощным и активно развивающимся методом исследования тонких плёнок. На реакторе ИР-8, метод реализован на ГЭК-5 на стенде рефлектометрии поляризованных нейтронов. Для повышения эффективности стенда была проведена глубо-

кая модернизация, которая затронула: узлы монохроматора, поляризатора, образца, коллимационную схему установки и систему автоматизации.

Наиболее важной стала модернизация узла монохроматора. Система позиционирования монохроматора была переработана, в конструкцию добавлена дополнительная ось перемещения, а монокристалл Cu (111) был заменён на HOPG (002). В результате, была получена длина волны нейтронов $\lambda = 2.4 \text{ \AA}$, и увеличение потока нейтронов.

Схема коллимации была перестроена на трёх новых нейтронных регулируемых диафрагмах 80x80 мм, которые позволяют управлять размерами пучка нейтронов с точностью до 5 мкм, как по высоте, так и по ширине. Узел поляризатора и узел образца получили ось вращения вокруг оси распространения пучка нейтронов, также узел образца получил вакуумный стол для образцов с характерными геометрическими размерами: от 20x20 мм до 50x50 мм.

На стенде была развёрнута система автоматического управления TANGO объединившая в себе: ПЧД детектор, источники питания спин-флиппера и 23 электромеханических оси управления нейтронными диафрагмами и оптическими позиционерами, что позволило проводить эксперименты в полуавтоматическом режиме, с большей скоростью и точностью.

В докладе будут рассмотрены основные этапы модернизации и итоговые характеристики стенда рефлектометрии поляризованных нейтронов на ИР-8.

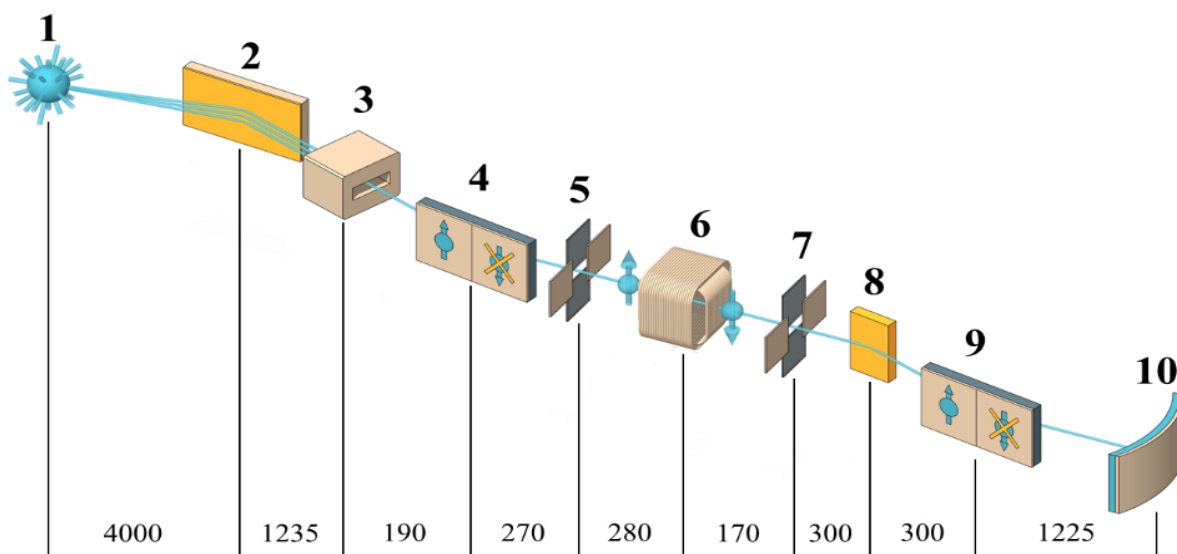


Рис. 1 Оптическая схема стенда нейтронной рефлектометрии: 1 – Реактор ИР-8;

2 – монохроматор HOPG (002); 3 – Стальной коллиматор; 4 – Суперзеркало-поляризатор Fe/Si ($m=3,6$); 5 – регулируемая диафрагма 80x80 мм; 6 – Спин-флиппер Мезея; 7 – регулируемая диафрагма 80x80 мм; 8 – узел образца; 9 – Суперзеркало-анализатор; 10 – He-3 позиционно-чувствительный детектор.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА КРИОГЕННЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ РЕАКТОРА ИБР-2М

О. Л. Сероштанов^{1,2*}, М. В. Булавин^{1,2}

¹ Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*e-mail: seroshtanov@jinr.ru

В нейтронных исследованиях холодные нейтроны используются для анализа структуры и свойств материалов с крупными параметрами решётки — биомолекул, полимеров, наноструктур. В реакторе ИБР-2М [1]. Для их получения применяется комплекс криогенных замедлителей (ККЗ), использующий водородосодержащие материалы (жидкий водород, метан), которые смещают максимум спектра нейтронов в область 1–5 МэВ [2].

ККЗ реактора ИБР-2М включает два взаимосвязанных контура охлаждения, систему вакуумной изоляции, гелиевую криоустановку и пневмотранспорт шариков мезитилена и м-

ксилола [3]. Для обеспечения устойчивой и безопасной эксплуатации требуется надёжная автоматизация технологических процессов, позволяющая контролировать ключевые параметры (температуру, давление, вакуум, расход и чистоту гелия, радиационный фон) и предотвращать развитие аварийных ситуаций.

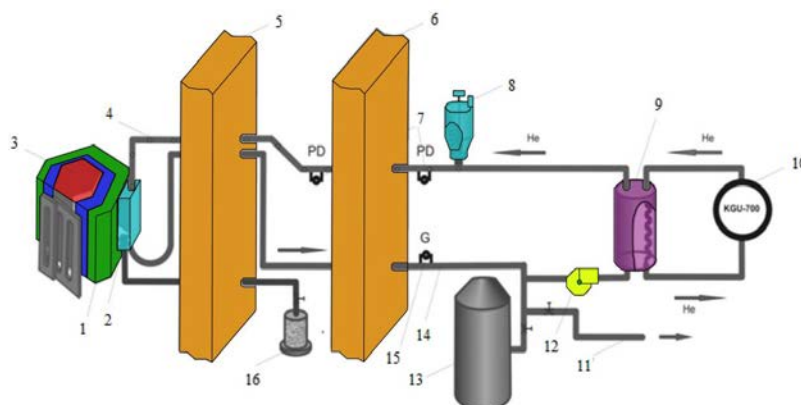


Рисунок 1. Шариковый холодный замедлитель нейтронов реактора ИБР – 2:

1 – водяной замедлитель, 2 – камера холодного замедлителя, 3 – активная зона ИБР-2, 4 – пневмотранспортный трубопровод (первый контур охлаждения), 5, 6 – биологическая защита, 7 – датчики движения замороженных шариков в трубе, 8 – дозирующее устройство, 9 – теплообменник, 10 – криогенная гелиевая машина КГУ-700 и второй контур охлаждения, 11 – трубопровод для аварийного отвода водорода, 12 – газодувка, 13 – газгольдер, 14 – трубопровод отвода гелия от камеры замедлителя, 15 – датчики расхода гелия (трубка Пито), 16 – емкость для слива отработанного мезитилена и м-ксилола.

Автоматизированная система управления построена на базе программируемых логических контроллеров Modicon M241 Ethernet TM241CE40R с промышленными интерфейсами RS-485, Ethernet и протоколами Modbus RTU/TCP. Система обеспечивает сбор данных от контрольно-измерительных приборов (термопар, термодиодов, датчиков давления и вакуума, газоанализаторов) и управление исполнительными механизмами (электропневмоклапанами, вакуумными насосами, газодувкой, загрузочными устройствами).

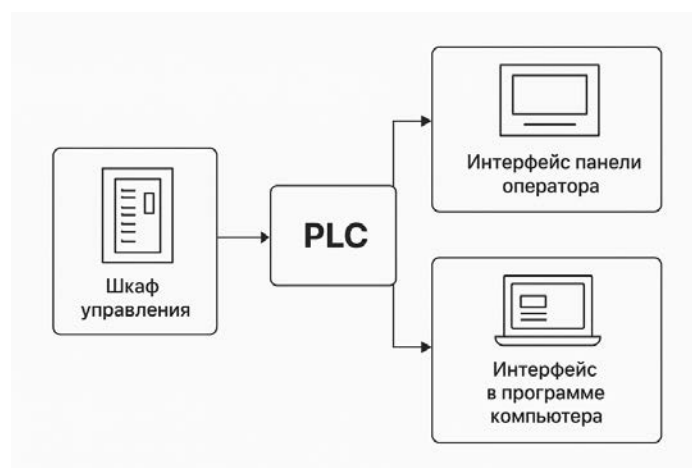


Рисунок 2. Структура объектов автоматизации КЗ201.

Операторское взаимодействие реализовано через панели Weintek cMT2108X2, отображающие мнемосхемы и графики технологических параметров. Программный комплекс, созданный на языке C++, имеет иерархическую структуру, позволяет дистанционно получать данные, анализировать состояние оборудования и реагировать на аварийные сигналы [4]. Встроенные алгоритмы обеспечивают автоматическое квитирование тревог и возможность подключения до 10 удалённых клиентов через CMT Viewer (рис. 3).

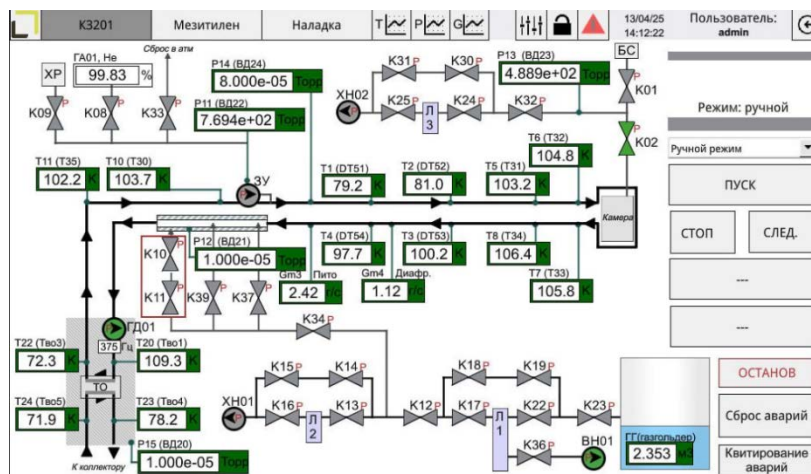


Рис. 3. Структура экрана К3201.

Разработанная система автоматизации переводит ККЗ ИБР-2М на современную архитектуру управления, повышает надёжность и безопасность работы реактора, минимизирует влияние человеческого фактора. В дальнейшем планируется интеграция комплекса с верхним уровнем управления MASTERSCAD 3.X и внедрение модулей предиктивной диагностики и реагирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научные установки реактора ИБР-2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://flnp.jinr.ru/558>.
2. Bauer G.S., Lucas A.T., Sulfredge C.D. A pelletized solid methane moderator for a medium-to-high power neutron source // Proc. 13th Meeting Int. Collab. on Advanced Neutron Sources. – Vil-ligen, 1995. – Vol. 2. – P. 644–652.
3. Холодный замедлитель нейтронов на модернизированном реакторе ИБР-2 / М.В. Булавин, В.Д. Ананьев, А.А. Беляков, А.Е. Верхогляднов, С.А. Куликов, К.А. Мухин и Е.П. Шабалин // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, №2. – С. 131-134.
4. Петухова Т.С. Программный комплекс - «Система контроля криогенного замедлителя реактора ИБР-2». Патент РФ №2020612304, Февраль 11, 2020.

КОМПЛЕКС МЕТОДИЧЕСКИХ И ПРОГРАММНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ НА РЕАКТОРЕ ИР-8

В.В. Сидоров^{*1,2}, П.С. Савченков^{2,1}, Е.О. Серов²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

*e-mail: vladislavvv83@mail.ru

В докладе представлены результаты оптимизации нейтрон-оптической схемы стенда для методических работ с поляризованными нейтронами [1] на базе реактора ИР-8. С использованием численного моделирования методом Монте-Карло, реализованного в программном пакете McStas [2], была определена оптимальная конфигурация нейтрон-оптической схемы стенда. В частности, были получены: оптимальные угол поворота суперзеркала-поляризатора, расстояние между диафрагмами и ширина их раствора. Такая оптимизация позволила обеспечить максимальную интенсивность потока нейтронов на позиции образца при сохранении хорошего разрешения по величине передаваемого квазиволнового вектора нейтронов. Результаты моделирования были учтены при модернизации установки.

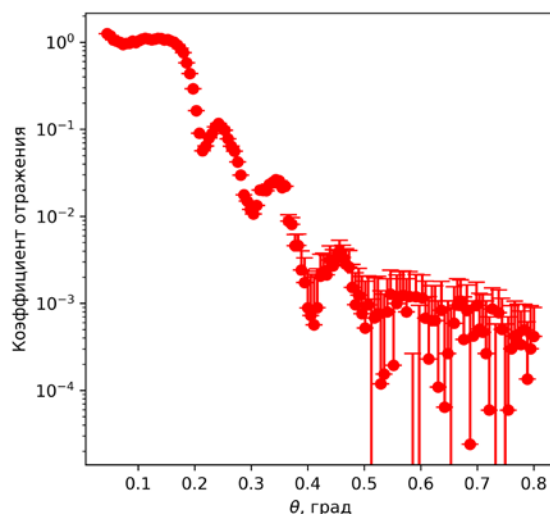


Рисунок. 1: Зависимость коэффициента отражения от угла падения нейтронов на тонкую пленку NiO-Ni-SiO₂

В докладе приведены экспериментальные данные, полученные на тестовом образце — тонкой пленке никеля, напыленной методом магнетронного напыления на кремниевую подложку. Модернизация установки на основе компьютерного моделирования расширила диапазон углов падения нейтронов, доступных для измерений рефлектометрии, а также улучшила соотношение сигнал/фон. Как следствие, выполненная модернизация обеспечивает более точное определение структурных характеристик исследуемых образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серов, Е.О., Савченков, П.С., Рогачев, А.В., Калюканов, А.И., Боднарчук, В.И., Белушкин, А.В. Экспериментальный стенд для методических работ с поляризованными нейтронами на реакторе ИР-8 // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2025. — № 1. — С. 43–48.
2. Willendrup P. K., Lefmann K. McStas (ii): An overview of components, their use, and advice for user contributions //Journal of Neutron Research. – 2021. – Т. 23. – №. 1. – С. 7-27.

ЭВОЛЮЦИЯ НЕЙТРОННОГО СПЕКТРА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В ЕВРОПИИ, ХРОМЕ И КРЕМНИИ

*Н. М. Соболевский, Л. Н. Латышева, Р. М. Джилкибаев, Д. В. Хлюстин**

Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук, Москва, Россия

*e-mail: denhlustin@gmail.com

Представлены результаты численного моделирования спектров нейтронов утечки и спектров поглотившихся нейтронов, которые формируются при распространении потока нейтронов внутри твёрдых тел, состоящих из европия, хрома и кремния природного изотопного состава. Для каждого спектра рассчитаны средняя энергия нейтронов и время диффузии. Рассмотрена сферически симметричная задача диффузии нейтронов с начальной энергией 14,1 МэВ. Моделирование выполнено методом Монте-Карло программным кодом Shield [1,2] с использованием 28-групповых сечений AVBN-78 [3] взаимодействия нейтронов с ядрами рассмотренных природных смесей изотопов.

Задача выполнена с целью установить, каким образом выбор материала мишенной станции линейного ускорителя протонов влияет на интегральный выход нейтронов, их энергетический спектр и диффузионное время. Возможность восстановить захватный спектр мишенной станции, на основе экспериментально измеренного TOF-методом спектра утечки нейтронов, обсуждается.

Полученные результаты предполагается, в целях калибровки, сравнить с результатами аналогичных вычислений, используя программный код SHIELD совместно с 299-групповыми константами ABBN-93 [4], созданных с использованием мировых баз данных по нейтрон-ядерным взаимодействиям в современном их состоянии [5].

Результаты вычислений являются основой для интегральных экспериментов, предложенных ещё в ранних работах [6], возможность постановки которых открывается благодаря высокой интенсивности вторичных нейтронных пучков мишенных станций линейного ускорителя протонов.

Выбранные к рассмотрению материалы мишенных станций линейного ускорителя протонов актуальны также для перспективных реакторов на быстрых нейтронах поколения IV [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dementyev A.V., Sobolevsky N.M. SHIELD – Universal Monte Carlo hadron transport code: scope and application. Radiation Measurement 30 (1999) p.554-557.
2. <https://www.inr.ru/shield>
3. Абагян Л.П., Базянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Групповые константы для расчёта реакторов и защиты. Справочник. Москва, Энергоатомиздат, 1981.
4. Manturov G.N., Nikolayev M.N., Tsibulya A.M. System of group constants ABBN-93. Part 1. Nuclear constants for calculation of neutron and photon fields of emission. VANT, 'Nuclear Constants', №1, 1996, p.59-98.
5. <https://www.bnl.gov>
6. Stavitsky Yu.Ya. Neutron Research based on Moscow Meson Factory. In: 'Program of experimental research at Meson Factory INR RAS', volume 4, Moscow, 1986, p.7-21.
7. Уолтер А., Рейнольдс А. «Реакторы-размножители на быстрых нейтронах», Энергоатомиздат, 1986, с.313.
8. Sobolevsky N.M., Latisheva L.N., Djilkibaev R.M., Khliustin D.V. Evolution of the Neutron Spectrum During Propagation of the Neutron Flux in Solid Bodies. International Conference Nucleus-2024, Dubna, Russia, 2024.
9. Соболевский Н.М., Латышева Л.Н., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Эволюция Нейтронного Спектра при Распространении Потока Нейтронов в Боре-10, Ti и U²³⁸. IV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред», Дубна, 2024.
10. Sobolevsky N.M., Latisheva L.N., Djilkibaev R.M., Khliustin D.V. Simulation of Spectra's Evolution During Propagation of the Neutron Fluxes in Solid Bodies. Session-Conference 'Physics of Fundamental Interactions', Department of Physics, Russian Academy of Sciences. 17-21 February 2025, Presidium RAS, Moscow, Russia.
11. Sobolevsky N.M., Latisheva L.N., Djilkibaev R.M., Khliustin D.V. Evolution of Spectra During Propagation of Neutron Fluxes in Rhenium, Molybdenum and Aluminum. LXXV International Conference 'NUCLEUS-2025. Nuclear physics, elementary particle physics and nuclear technologies'. St. Petersburg State University, 01-06 June 2025, Saint Petersburg, Russia.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ НЕЙТРОННОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА ТНР В ТОМСКЕ

***В. Г. Сыромятников^{1,2*}, В. А. Ульянов¹, М. В. Дьячков¹, М. Р. Колхидашвили¹,
А. В. Пирожков³***

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт” —
Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³ Томский политехнический университет, Томск, Россия

* e-mail: syromyatnikov_vg@npfi.nrcki.ru

Нейтронная рефлектометрия широко используется в современных исследовательских ядерных реакторах для изучения структурных характеристик и магнитных свойств многослойных тонкопленочных наносистем [1,2].

Нейтронный рефлектометр ТНР [3,4] предназначен для проведения исследований магнитных и немагнитных многослойных наносистем, включая аттестацию нейтронно-оптических элементов для нейтронных станций приборной базы реактора ПИК. Рефлектометр ТНР был установлен на 7-м горизонтальном канале реактора ИРТ-Т (Томский политехнический университет). На рефлектометре ТНР с помощью формирователя пучка будет реализована возможность работы с тепловыми нейтронами в режимах измерений с “белыми” неполяризованным/поляризованным пучками и с монохроматическими неполяризованным/поляризованным пучками нейтронов. Переход из одного режима работы в другой осуществляется быстро и не требует перестройки установки. Выбор режима формирователя пучка определяется решаемой физической задачей.

Результаты первых измерений, представленные в данном докладе, демонстрируют широкие экспериментальные возможности нейтронного рефлектометра ТНР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитенко Ю.В., Сыромятников В.Г. Рефлектометрия поляризованных нейтронов, М.: Физматлит, (2013).
2. Боднарчук В.И., Булкин А.П., Кравцов Е.А., Плешанов Н.К., Сыромятников В.Г., Ульянов В.А. Кристаллография, т. **67**, № 1, с. 57, (2022).
3. Syromyatnikov V.G., Pleshanov N.K., Pusenkov V.M., Schebetov A.F., Ul'yanov V.A., Kasman Ya.A., Khakhalin S.I., Kolkhidashvilli M.R., Slyusar V.N., Sumbatyan A.A. Preprint Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, № 2619, 47 p. (2005).
4. Дьячков М.В., Матвеев В.А., Сыромятников В.Г., Тарнавич В.В., Ульянов В.А. Поверхность, № 8, 11, (2024).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПАКТНОГО НЕЙТРОННОГО СУПЕРЗЕРКАЛЬНОГО ТРАНСМИССИОННОГО ПОЛЯРИЗАТОРА НОВОГО ТИПА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

В. Г. Сыромятников^{1,2*}, С. Ю. Семенихин¹, М. В. Ласица¹

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт” —
Петербургский институт ядерной физики, Гатчина, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
*e-mail: syromyatnikov_vg@pnpi.nrcki.ru

В работах [1,2] предложен и кратко рассмотрен новый нейтронный трансмиссионный суперзеркальный кинк (ломаный) поляризатор. В работах [3,4] рассмотрено предложение по увеличению светосилы этого поляризатора за счет добавления второго элемента – прямого поляризующего нейтроновода. При этом значительно, в несколько раз увеличился, угловой диапазон выходящего пучка с высокой поляризацией. Этот поляризатор предназначен для работы в малых магнитных полях, в которых можно использовать реманентные свойства поляризующих суперзеркал. В работе [5] рассмотрен поляризатор, у которого его элементы (кинк и прямой поляризующий нейтроновод) находились в насыщающих магнитных полях. Кроме того, между этими элементами был добавлен спин-флиппер. Показано, что основные параметры этого поляризатора высоки и он может быть использован для ряда нейтронно-физических установок нового исследовательского реактора ПИК (Национальный исследовательский центр “Курчатовский Институт” — Петербургский институт ядерной физики).

В докладе будет представлен Сварог - рассматриваемый компактный нейтронный трансмиссионный суперзеркальный поляризатор с новой магнитной системой. Использование этой магнитной системы позволяет оптимизировать конструкцию поляризатора и уменьшить его длину. Получены и обсуждены основные параметры поляризатора в зависимости от характеристик его элементов. Рассмотрены варианты использования Сварога в экспериментальных установках реактора ПИК. Проведено сравнение данного поляризатора с известными трансмиссионными нейтронными поляризаторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сыромятников В.Г. Патент РФ № 2624633 на изобретение. Приоритет от 21.06.2016.
2. Syromyatnikov V.G., Pusenkov V.M. Journal of Physics: Conf. Ser. **862** (2017) 012028.
3. Сыромятников В.Г. Патент РФ № 2699760 на изобретение. Приоритет от 13.12.2018.
4. Syromyatnikov V.G. ArXiv:1911.02936 [physics.ins-det]
5. Syromyatnikov V.G. ArXiv:2412.00223 [physics.ins-det].

БИОДЕСТРУКЦИЯ НЕФТИ ПРИ ПОМОЩИ ШТАММА ASPERGILLUS NIGER F-4815D

В.В. Тутучкина¹, А.З. Мундубаев^{2*}, Э.В. Бабынин²

¹ Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН, Казань, Россия.

² ФИЦ КазНЦ РАН

*e-mail: mindubaev-az@yandex.ru

Нефти и нефтепродукты - основные загрязнители окружающей среды на сегодняшний день. Нефтепродукты в плане токсичности менее опасны для окружающей среды, чем соединения фосфора, но производятся и потребляются в значительно больших объемах. В представленном исследовании исследовалась биodeградация нефти с месторождения Первомайское (Республика Татарстан). В качестве микроорганизма деструктора выбран *Aspergillus niger* F-4815D, который ранее уже применялся для биodeградации белого фосфора и показал себя эффективным и универсальным деструктором токсичных загрязнителей [1].

Культуры высевались в планшеты Corning, скорость роста оценивалась микропланшетным ридером Infinite F200 Pro, Tecan (Австрия). Посев производился в среду состава (г/л) NaCl

2.5; MgSO_4 0.5; KNO_3 2.0, глюкоза 8.0. Хроматомасс-спектрометрическое (ГХ-МС) исследование проводилось на газовом хроматографе “Agilent 6890N” с масс-спектрометрическим детектором “5973 N” (“Agilent Technologies”, США).

Обращает внимание то, что в присутствии микроорганизмов с нефтями происходят изменения. На 18 сутки после посева стало заметно, что в среде, содержащей глюкозу в качестве основного источника углерода, нефть изменила консистенцию: утратила текучесть и собралась в комки. В среде без глюкозы нефти остались без изменений – по всей видимости, рост *A. niger* в ней не начался.

Мы провели более углубленное исследование методом ГХ-МС. Усредненное из трех анализов ГХ-МС количество сигналов в стерильной нефти месторождения Первомайское (негативный контроль), нефти с посевом F-4815D без глюкозы и с глюкозой, составило 25, 21 и 8, соответственно. То есть, в присутствии глюкозы в качестве основного источника углерода, нефть подвергается грибом глубокой деструкции. Без глюкозы деструкция тоже присутствует, но медленная и неглубокая. Получены следующие результаты химического состава. Наименьшее количество компонентов, выявленных ГХ-МС, 18, в варианте с глюкозой (таблица). В этом варианте появляются сигналы соединений, окисленных кислородом (кетонов, лактонов). Это означает, что разросшаяся на глюкозе биомасса гриба осуществляет биodeградацию компонентов нефти. Гриб, в первую очередь, метаболизирует алканы как нормального, так и разветвленного строения. Ароматические соединения разлагаются хуже. Кроме того, хорошо разложились компоненты нефти явно биологического происхождения – триацилглицерины (триглицериды) и амид гексадеценовой кислоты. Вероятно, эти соединения образовались обитавшими в нефти бактериями, погибшими в результате автоклавирования.

Наиболее сложный состав (39 компонентов) в негативном контроле, в стерильной нефти. В посеве *A. niger* F-4815D без глюкозы количество компонентов составляет промежуточную величину, равную 30. Из этого можно сделать заключение, что *A. niger* способен существовать в присутствии нефти в качестве единственного источника углерода и осуществлять ее биodeградацию, однако процесс этот очень медленный, а биодеструкция менее глубокая, чем в присутствии глюкозы. Данный результат тоже хорошо соотносится с представленными выше.

Можно сделать вывод о том, что нефти подвергаются частичной биodeградации штаммом аспергилла, но только при наличии дополнительных легкоусваиваемых источников углерода. В принципе, дорогостоящую глюкозу можно заменить сельскохозяйственными отходами. При этом, нефть меняет консистенцию и становится комковатой. В перспективе, это открывает возможности для создания методов сбора нефти, поскольку комки собираются легче, чем жидкая пленка.

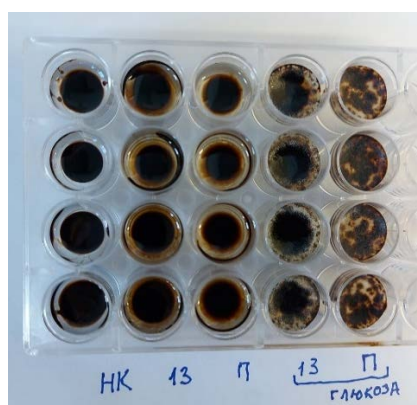


Рисунок 1. Аспергилл на нефти растет только в присутствии глюкозы. П – Первомайское, 13 – Ново-Шешминское месторождение. НК – негативный контроль. Снимок сделан через 36 суток после посева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миндубаев А.З., Бабынин Э.В., Бабаев В.М., Тутучкина В.В., Минзанова С.Т., Миронова Л.Г., Караева Ю.В. Штамм *Aspergillus niger* AM1 как агент биodeградации нефти и

НЕЙТРОННО-РАДИАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ФИЛЬТРАТОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

***О.В. Чакилев**, С. В. Колесников, С. Г. Рудаков**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

*e-mail: OVChakilev@mephi.ru

Контроль содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в промышленном фильтрате важен в производственных процессах, поскольку содержание РЗЭ в фильтрате может повлиять на качество конечного продукта. Избыток или недостаток этих элементов может привести к ухудшению свойств материала. РЗЭ имеет высокую экономическую ценность, и их утилизация или рециркуляция из продуктов выщелачивания может быть важным аспектом управления ресурсами. Контроль содержания может оптимизировать процессы извлечения и переработки.

В настоящее время существует несколько доступных методов обнаружения РЗЭ в фильтрате, включая масс-спектрометрию с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), атомно-эмиссионную спектроскопию с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) и рентгенофлуоресцентную спектроскопию. Однако эти методы требуют подготовки образцов и используются только для поверхностного или приповерхностного анализа (XRF). Нейтронно-активационный анализ с использованием реактора также используется для анализа содержания РЗЭ. Однако эксперименты на реакторах требуют много времени и во многих случаях ресурсозатратны. Технология быстрого нейтронно-радиационного анализа (PGNAA) с использованием генератора нейтронов обладает множеством преимуществ, связанных с неразрушающим, многоэлементным и объемным определением элементного состава образцов. Следовательно, он доступен для определения элементов в режиме реального времени и анализа на месте и может применяться в промышленности, например, для анализа токсичных веществ, обнаружения тяжелых металлов, особенно в пробах воды.

В данной работе были успешно определены РЗЭ в водных растворах с использованием нейтронно-радиационного метода.

Методика нейтронно-радиационного анализа основана на регистрации вторичного гамма-излучения образца, возникающего в реакциях радиационного захвата термализованных нейтронов. Образец в виде соли редкоземельных элементов растворялся в воде для получения однородного водного раствора. Образец расположен в цилиндрическом контейнере объемом 300 мл. В качестве источника быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ в установке используется генератор ИНГ-07Т, в качестве гамма-детектора - сцинтилляционный детектор на основе монокристалла LaBr₃(Ce) размерами Ø76x76 мм. Получены энергетические спектры гамма излучения радиационного захвата образцов водных растворов, содержащих Gd, Sm, Nd, Eu. Затем проанализированы площади пиков редкоземельных элементов с их соответствующими концентрациями в образце. После корректировки эффекта самопоглощения нейтронов нелинейный отклик между площадью пиков и концентрациями элементов был преобразован в линейный, и калибровочные кривые были использованы для расчета минимально обнаруживаемых концентраций (MDC).



Рисунок 1. Установка нейтронно-радиационного анализа

Таблица 1. Минимально обнаруживаемые концентрации Gd, Sm, Nd, Eu в водных растворах в различных работах.

Источник (поток н/с)	Детектор	Время набора, с.	Объем водного раствора, л.	MDC Gd, мг/л (ppm)	MDC Sm, мг/л (ppm)	MDC Eu, мг/л (ppm)	MDC Nd, г/л	Ссылка
Am-Be $6.6 \cdot 10^5$	HPGe	3600	50	27.49	4.77	-	1.077	[1]
Am-Be $1 \cdot 10^7$	Жидкостный сцинтилляционный детектор $54,2 \times$ $54,2 \times 65,2 \text{ см}^3$.	150	9,8	0.426	-	-	-	[2]
DT 10^8	LaBr3	1800	0.3	11 ± 3	$4.7 \pm$ 1.4	21 ± 6	$1.4 \pm$ 0.4	Данная работа

В результате работы была разработана экспериментальная установка, основанная на нейтронно-радиационном методе для возможности обнаружения РЗЭ в фильтрате. Наконец, полученные результаты свидетельствуют о том, что он может быть использован в качестве приемлемого метода обнаружения РЗЭ в фильтрате, образующемся в ходе промышленного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ling, Y., Chen, J., Cai, P. et al. Determining rare-earth elements in aqueous solutions using PGNAА technology. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 331, 2022. – Pp. 1101–1108.
2. Xie Y., Cheng C., Zhang W., et al. Feasibility study of on-line monitoring gadolinium based on neutron induced gamma activation. Applied Radiation and Isotopes, 197:110817, 2023.

ЭВОЛЮЦИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРИРОДЕ НЕЙТРОНА

А.В. Шнитко¹, П.В. Кудан^{2}*

¹Сколковский институт науки и технологий, Москва, РФ

²НЦ «АЛИУМ», Красногорск, Московская область, РФ

* e-mail: pavel.v.kudan@gmail.com

В докладе представлена история изменения представлений о нейтроне с момента его предсказания Нобелевским лауреатом Э. Резерфордом в 1920 году как составной частицы, образованной одним протоном и одной отрицательной частицей, под которой, на основе принятой в то время протон-электронной модели ядра, понимался электрон [1].

Подробно рассмотрен этап пересмотра представлений о нейтроне, включавший попытки синтеза нейтрона из водорода Нобелевским лауреатом Э. Резерфордом совместно с будущим Нобелевским лауреатом Дж. Чедвиком, открытие последним нейтрона в продуктах реакции альфа-частицы с ядром атома бериллия в 1932 году [2] и опровержение им протон-электронной модели путем установления факта, что электрон имеет недостаточную массу для того, чтобы выступать партнером протона в образовании нейтрона, что, в отсутствии информации о существовании отрицательных частиц иных, чем электрон, привело к убеждению о том, что нейтрон является не составной частицей, включающей протон, а настолько же фундаментальной частицей как протон, что послужило причиной признания протон-нейтронной модели ядра в 1934 году [3].

Рассмотрен исторический этап, не связанный с пересмотром представлений о природе нейтрона, но заложивший основы для улучшения представлений о месте нейтрона среди частиц и включающий предсказание будущим Нобелевским лауреатом Х. Югавой существования мезонов, открытием π^+ -мезона будущим Нобелевским лауреатом С.Ф. Пауэллом в 1947 году, последующим открытием π^0 -мезона, странного K^0 -мезона, странного Λ^0 -гиперона и других странных частиц, а также первой попыткой их систематизации С. Сакатой с созданием модели, в которой нейтрон рассматривался не просто как фундаментальная частица, а, наряду с протоном и странным Λ^0 -гипероном, как одна из трех фундаментальных частиц, образующих составные частицы.

Рассмотрены причины последующего крушения представлений о фундаментальности нейтрона и установления будущим Нобелевским лауреатом М. Гелл-Манном современных представлений о нейтронах, наряду с протоном и рядом других частиц, как не фундаментальных, а составных частицах, образованных кварками, частицами с дробными зарядами $\pm 1/3$ либо $\pm 2/3$, постулированными ненаблюдаемыми в свободном виде.

Рассмотрены возможные изменения представлений о природе нейтрона, связанные с появлением в 2023 году протон-пионной модели нейтрона и ядра [4,5], описывающей протон и π^- -мезон (отрицательный пион) как фундаментальные частицы, а нейтрон как составную частицу, образованную одним протоном и одним отрицательным пионом в общем соответствии с исходной моделью Э. Резерфорда с уточнением, что по сочетанию заряда, массы, спина и SU(3)-симметрии не электрон, а отрицательный пион может рассматриваться как отрицательная частица, партнер протона в формировании нейтрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rutherford E. // Proc. R. Soc. Lond. A, 1920, V.96, N.687, P. 374-400
2. Chadwick J. // Proc. R. Soc. A, 1932 V.136, N.830, P.692-708
3. Chadwick J., Goldhaber M. // Nature, 1934, V.134, P.237-238
4. Kudan P.V. et al. // Int. Exh. & Conf. Intst. Anal. "BCEIA". Peking. 2023. P.78
5. Kudan P.V. // Int. Conf. Nucl. Phys. "NUCLEUS". Sarov. 2023. P.69

Содержание

<i>Аксенова Т. А., Кулаков В. И., Усманов Р. И.</i> Фононные спектры α и γ фаз и линия равновесия $\alpha \leftrightarrow \gamma$ на T - P диаграмме дигидрида магния.....	3
<i>Алтынбаев Е. В., Гоголинский К. В.</i> Перспективы прикладного использования методов рассеяния нейтронов.....	5
<i>Антропов Н. О., Попов А. И., Смирнов А. А., Кравцов Е. А.</i> Применение машинного обучения в управлении нейтронными установками.....	5
<i>Антропов Н.О., Попов А.И., Кравцов Е.А., Смирнов А.А., Новосёлов И.Э., Максимов Д.А.</i> Нейросетевой фреймворк обработки 2D нейтронной дифракции.....	6
<i>Баглов А. В., Хорошко Л. С., Силибин М. В., Карпинский Д. В., Карпов И. Д.</i> Магнитное состояние ионов железа в BiFeO_3	7
<i>Балагуров А. М., Богдзель А.А., Булатов К.В., Дроздов В.А., Ержанов Б., Журавлев В.В., Као В.Х., Литвиненко Е.И., Милков В.М., Мурашкевич С.М., Подлесный М.М., Сумников С. В., Швецов В.В.</i> Широкоапертурный детектор для фурье-дифрактометра высокого разрешения: ввод в строй и первые результаты	9
<i>Бучный Д. А., Трунов Д. Н., Литвин В. С., Аксенов С. Н., Марин В. Н., Садыков Р. А.</i> Моделирование нейтронного дифрактометра с варьруемой пролетной базой на импульсном источнике «РАДЭКС» ИЯИ РАН	11
<i>Гергележиу П. А. , Ракша Е. В., Горемычкин Е. А., Ереско А. Б., Савостина Л. И., Худоба Д. М.</i> особенности молекулярной динамики ибупрофена и его натриевой соли по данным колебательной спектроскопии и квантово-химических расчетов.....	12
<i>Громушкин Д.М., Волков Е.П., Дмитриева А.Н., Коновалова А.Ю., Мишутина Ю.Н. , Петрухин А.А., Хохлов С.С., Шульженко И.А., Яшин И.И.</i> Сцинтилляционные детекторы нейтронов $\text{ZnS}(\text{Ag})$ с 6Li или 10B для фундаментальных и прикладных исследований	13
<i>Гудков Е.Л.</i> Предсказание асимптотик корреляционных функций рассеянных нейтронов на основании алгебраической теории нарушения симметрии.....	14
<i>Девятериков Д.И., Кравцов Е.А., Жакетов В.Д., Никитенко Ю.В., Проглядо В.В., Степанова Е.А.</i> Особенности магнитного упорядочения в тонкой плёнке Ho	16
<i>Жезляев Г.Е., Девятериков Д.И., Кравцов Е.А., Жакетов В.Д., Колупаев Е.Д., Черников А.Н.</i> Нейтронные и рентгеновские исследования тонких плёнок Tb	16
<i>Журенко С. В., Ткачёв А. В., Гервиц Н.Е., Гиппиус А. А.</i> Декорированные решётки кагоме как перспективный кандидаты на спин-жидкостное поведение	17
<i>Козин Т.М., Суслов И.А., Немченко И.Б.</i> Разработка и исследование пластмассовых сцинтилляторов со способностью разделения частиц по форме импульса	19
<i>Копица Г.П., Хамова Т.В., Николаев А.М., Коваленко А.С., Горшкова Ю.Е., Геращенко О.В., Баранчиков А.Е., Шилова О.А.</i> Структура и магнитные свойства нанопорошков оксидов железа $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4 , синтезированных методами «мягкой» химии.....	20
<i>Кругляк А.И., Алексеёнок Ю.В., Волкова П.Ю., Дорошкевич А.С., Соловьев А.А.</i> Быстрые нейтроны в низкой дозе как инструмент прайминга для повышения толерантности тритикале ($X\text{ TRITICOSECALE}$) к абиотическим стрессам.....	21
<i>Кулевой Т.В.</i> Компактный источник нейтронов на основе линейного ускорителя протонов	22
<i>Куликбаева Д.А., Мухаметулы Б., Боднарчук В.И., Назаров К., Нурулин Р.</i> Моделирование установки нейтронной рефлектометрии на реакторе ВВР-К (ИЯФ, г. Алматы, Казахстан) с помощью программного комплекса VITESS	23
<i>Лебедев В.Т., Шахов Ф.М., Швидченко А.В., Дидейкин А.Т., Вуль А.Я.</i> Перспективы создания препаратов для нейтрон-захватной терапии с использованием содержащих бор наноструктур	23
<i>Макарова М.В., Девятериков Д. И., Матюхов В. В., Проглядо В. В., Кравцов Е.А.</i> Нейтронная рефлектометрия для исследования гидрированных наногетероструктур на основе Gd	25
<i>Максимов П. А., Губкин А. Ф., Ушаков А. В., Колесников А. И., Cook M. S., McGuire M. A., Redhammer G. J., Подлесняк А., Стрельцов С. В.</i> Анизотропные спиновые лестницы в ортопироксене CoGeO_3	25

<i>Масликов А. А., Масликов П. А.</i> Исследование мощности классического дисперсионного анализа и пост-теста Тьюки методом Монте-Карло на примере выборок из негауссовых гамма-распределения и распределения Джонсона	26
<i>Матюхов В. В., Ищенко А. В., Саламатов Ю. А., Макарова М. В., Андреев В. С., Викторов Л. В., Кравцов Е. А.</i> Прототип детектора нейтронов на основе фотодиода с конверторным борсодержащим слоем.....	28
<i>Никова Е. С., Саламатов Ю. А., Кравцов Е. А.</i> Восстановление потенциала взаимодействия с использованием метода опорного слоя гадолиния в нейтронной рефлектометрии	29
<i>Оводов А. С.</i> Разработка структурированного катода с покрытием В4С для детекторов тепловых нейтронов.....	31
<i>Ромашко П. Е., Сёмкин М. А.</i> Проблемы применения дифракционных методов для изучения структур литиевых ортофосфатов с 3d-переходными металлами.....	32
<i>Садрадзе Р. Н., Жакетов В. Д.</i> Моделирование эксперимента рефлектометрии поляризованных нейтронов для исследования взаимодействия сверхпроводника с ферромагнетиком.....	33
<i>Самотохин М.А., Петрова М.О.</i> Прототип однокоординатного детектора медленных нейтронов на основе плоской камеры: измерение с лабораторными источниками излучений	34
<i>Сархадов И., Шарипов З.А., Тухлиев З.К., Халиль А.С., Гафурзода Х.М.</i> Численное моделирование стационарных волн лазерной абляции материалов в рамках модели термического пика в полуограниченных образцах.....	35
<i>Серов Е.О., Савченков П.С., Рогачев А.В., Калюканов А.И., Сидоров В.В., Боднарчук В.И., Белишкин А.В.</i> Модернизация стенда нейтронной рефлектометрии на реакторе ИР-8.....	35
<i>Сериштанов О. Л., Булавин М. В.</i> Система автоматизации комплекса криогенных замедлителей реактора ИБР-2М.....	36
<i>Сидоров В.В., Савченков П.С., Серов Е.О.</i> Комплекс методических и программных решений для оптимизации нейтронной рефлектометрии на реакторе ИР-8.....	38
<i>Соболевский Н. М., Латышева Л. Н., Джилкибаев Р. М., Хлюстин Д. В.</i> Эволюция нейтронного спектра при распространении потока нейтронов в европии, хrome и кремнии	39
<i>Сыромятников В. Г., Ульянов В. А., Дьячков М. В., Колхидашвили М. Р., Пирожков А. В.</i> Экспериментальные возможности нейтронного рефлектометра ТНР в Томске.....	41
<i>Сыромятников В. Г., Семенихин С. Ю., Ласица М. В.</i> Использование компактного нейтронного суперзеркального трансмиссионного поляризатора нового типа в эксперименте	42
<i>Тутучкина В.В., Миндубаев А.З., Бабынин Э.В.</i> Биодеструкция нефти при помощи штамма <i>Aspergillus niger</i> F-4815D	42
<i>Чакилев О.В., Колесников С. В., Рудаков С. Г.</i> Нейтронно-радиационный анализ фильтратов редкоземельных элементов.....	44
<i>Шнитко А.В., Кудан П.В.</i> Эволюция представлений о природе нейтрона	46