

УТВЕРЖДАЮ

Директор Объединенного института
ядерных исследований

доктор физико-математических наук
академик РАН



Синий Г.В. Трубников

18 " *04* 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Международной межправительственной организации Объединенный институт ядерных исследований на диссертационную работу Плешанова Николая Константиновича "НЕЙТРОННАЯ СПИНОВАЯ ОПТИКА", представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Основной целью работы являлась всесторонняя разработка базиса для развития предложенного автором нового направления в поляризационной нейтронной оптике – нейтронной спиновой оптики (НСО), в основе которой лежат квантово-механические аспекты взаимодействия поляризованных нейтронов с магнитными слоистыми структурами. В представленной работе получил развитие каждый из аспектов нейтронной спиновой оптики. В нее включены не только новые инструментальные и функциональные возможности, но и анализ поведения спина нейтронов при прохождении магнитных сред и при отражении от магнитных слоистых структур, а также основной метод изучения инновационных покрытий – рефлектометрия поляризованных нейтронов, дополненная 3D- (векторным) анализом поляризации. Объектами исследований являлись слоистые структуры, включающие от одного до сотен ферромагнитных нанослоев Co, Fe и CoFe, прежде всего, с точки зрения их использования в качестве инновационных покрытий НСО.

Актуальность темы настоящей работы связана с настоятельной необходимостью развития неразрушающих нейтронных методов исследования структуры, магнетизма и динамики объектов различных масштабов, имеющих большое научное и прикладное значение, в том числе на мегаустановках, таких как реактор ПИК, а также на проектируемых в настоящее время компактных нейтронных источниках. НСО существенно расширит

инструментарий для эффективного использования поляризованных нейтронов в существующих методах и будет способствовать развитию нейтронных методов исследования.

Диссертация состоит из введения, шести глав, двух приложений и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы, ставится цель и формулируются задачи диссертационной работы, дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов, формулируются выносимые на защиту положения, кратко изложены структура и содержание диссертации, приводится список публикаций, в которых содержатся основные результаты диссертации.

В первой главе представлены физические принципы и приближения, принятые при рассмотрении прохождения тепловых и более холодных поляризованных нейтронов в магнитной среде, их отражения от магнитных слоев; обсуждаются квантово-механическая природа прецессии нейтронного спина и нейтронный эксперимент Вигнера, иллюстрирующий результат квантово-механического измерения; представлены поляризующие нейтронные покрытия, используемые для селекции спина нейтронов.

Во второй главе формулируется уравнение, точно описывающее поведение вектора поляризации вдоль «траектории» нейтрона в магнитном поле; анализируется поведение спина нейтронов с использованием плосковолновых решений уравнения Шредингера для нейтрона в однородном поле, а также доказанной автором теоремы о суперпозиции спиноров. В результате расширена область применения концепции ларморовской прецессии нейтронного спина и уточнена интерпретация ряда экспериментов с ларморовской прецессией; проведено наблюдение нефронтальной прецессии; описаны квантовая нутация и нутационная динамика спина в магнитном поле, способы приготовления пучков нейтронов с нутационной динамикой спина и их возможное применение. Дополнительно анализируются следствия некоммутативности операторов проекции спина и тока вероятности: отличие нейтронной поляризации и поляризации нейтронного пучка, «частичная маскировка» поляризации пучковых нейтронов магнитным полем, индуцированные магнитным полем поляризационные эффекты.

В третьей главе рассмотрено зеркальное отражение поляризованных нейтронов от магнитных слоистых структур с потенциалом, зависящим только от глубины. Для описания отражения нейтронов с прецессирующим спином введено одномерное уравнение Шредингера с двумя сохраняющимися «энергиями»; проведен подробный анализ особенностей их отражения. Коэффициент отражения записан с учетом перекрестной интерференции и перераспределения потоков при спин-зависимой рефракции во внешнем поле; результат обобщен на сечение упругого рассеяния в магнитном поле. Поляризационные эффекты при

отражении нейтронов в двухуровневом состоянии описаны в терминах нутационной динамики. Найдены элементы матрицы отражения нейтронов от границы магнитно неколлинеарных сред в представлении с произвольной осью квантования. Рассмотрены поляризационные эффекты при полном отражении нейтронов; отмечено и объяснено «аномальное» прохождение нейтронов в магнитную стенку. Обобщены численные методы оптики для расчета коэффициентов отражения и поляризационных эффектов при отражении нейтронов от множества слоев с любой по величине и направлению намагниченностью. Получены формулы для элементов матрицы отражения и коэффициентов отражения в приближении слабых внешних полей.

В четвёртой главе представлен стандартный метод рефлектометрии поляризованных нейтронов (РПН) – прямой и неразрушающий метод, чувствительный к морфологическим и магнитным особенностям слоистых структур. В методе измеряются коэффициенты отражения поляризованных нейтронов без переворота и с переворотом спина. Приведены примеры использования программ подгонки, скомпилированных на основе обобщенного матричного метода. Предложен и реализован рефлектометрический вариант эксперимента Вигнера, иллюстрирующий концепцию о результате квантово-механического измерения. Предложен, обоснован и экспериментально подтвержден метод улучшения поляризующих нейтронных покрытий с помощью нанопрослоек с отрицательным потенциалом. Проанализировано влияние отражения нейтронов с переворотом спина на эффективность поляризаторов; обоснование новых требований к магнитным системам позволило улучшить их конструкцию и увеличить эффективность поляризаторов и анализаторов.

В пятой главе предложены схемы нейтронной рефлектометрии для получения более полной информации о магнетизме слоев и наблюдения поляризационных 3D-эффектов при отражении нейтронов, в т.ч. схемы полной нейтронной рефлектометрии для измерения не только модулей, но и разностей фаз элементов матрицы отражения. Тестирована рефлектометрия с векторным анализом поляризации монохроматического пучка; опция включена в концепцию рефлектометров РПН (ИР-8, Москва) и SONATA (ПИК, Гатчина). Проведено наблюдение сдвига фазы волновой функции и связанного с ним вращения вектора поляризации при полном отражении нейтронов. Рассмотрена рефлектометрия нейтронов в двухуровневом состоянии с использованием элементов НСО для 3D-поляризации и 3D-анализа поляризации пучка.

В шестой главе предложено и обосновано новое направление поляризационной нейтронной оптики – нейтронная спиновая оптика (НСО); сформулированы основные принципы, найдены решения для создания базовых элементов с расчетом их эффективности;

предложены компактные устройства манипуляции нейтронными спинами, в том числе 3D-поляризаторы, 3D-анализаторы и спиновые манипуляторы, а также новый тип поляризующих устройств – гиперполяризаторы. Проведена экспериментальная верификация НСО: разработан метод измерения эффективности зеркальных флипперов, получены точные формулы для расчета их эффективности из интенсивностей, найдена эффективность первого зеркального флиппера $97.5 \pm 0.5\%$; проанализированы возможности его улучшения. Обсуждается потенциал НСО для развития нейтронных методов исследования, отмечены такие преимущества НСО по сравнению с существующими спин-манипуляционными устройствами как компактность, бесполевая опция, многофункциональность.

В приложении А приводится полученное автором доказательство теоремы о суперпозиции спиноров с меняющимися во времени фазами.

В приложении Б дан вывод полученных автором формул для экспериментального нахождения эффективности зеркальных флипперов.

В заключении подведены основные итоги работы.

Результаты диссертационной работы важны, представляют большой научный и практический интерес. В работе получил развитие каждый из аспектов нейтронной спиновой оптики: анализ поведения спина нейтронов в магнитном поле и при отражении нейтронов от магнитных слоев; рефлектометрия поляризованных нейтронов; инструментальные и функциональные возможности инновационных покрытий для манипуляций с нейтронными спинами. Полученные результаты определяют направления дальнейшего развития предложенного соискателем нового направления поляризационной нейтронной оптики.

Особо хотелось бы отметить:

- (1) Доказательство теоремы о суперпозиции двух спиноров с изменяющейся разностью фаз (простая математическая теорема, значимая для физики).
- (2) Систематическое применение вместо волновых векторов соответствующих функций оператора Паули (отсюда последовательное, в том числе количественное, описание поведения нейтронного спина, отражения нейтронов и поляризационных эффектов при их отражении).
- (3) Описание квантовой нутации и нутационной динамики спина в магнитном поле, способов приготовления пучков нейтронов с нутационной динамикой спина (несомненно, они найдут свое применение в экспериментальной практике).
- (4) Перспективные предложения по развитию метода рефлектометрии поляризованных нейтронов – схемы полной нейтронной рефлектометрии, обеспечивающие измерение не только модулей, но и разностей фаз элементов матрицы отражения (как следствие, будет доступна более детальная и надежная информация о магнетизме слоев).

(5) Перспективный метод улучшения поляризующих нейтронных покрытий с помощью нанопрослоек Ti (продемонстрирован большой потенциал метода, но он не раскрыт еще в полной мере).

(6) Создание теоретического и экспериментального фундамента для развития нейтронной спин-манипуляционной оптики, раскрытие ее преимуществ и потенциала для развития нейтронных методов исследования.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Новые научные результаты, полученные Н.К. Плешановым, могут быть использованы и представляют интерес для специалистов, занимающихся исследованиями новых магнитных материалов и развитием нейтронной поляризационной техники и новых методов исследований на источниках нейтронов, в следующих организациях: НИЦ «Курчатовский институт», ОИЯИ(Дубна), ПИЯФ (ГАТЧИНА), НИИЯФ (МГУ), ИФМ(Екатеринбург), ИФМ(Нижний Новгород), ИЛЛ(Гренобль, Франция), ESS (Швеция), Юлих(Германия), FRM(Германия) и других. Результаты диссертации могут быть включены в тематические учебные курсы следующих вузов: МГУ, СПГУ, МФТИ, МЭИ и других.

Высокий уровень и фундаментальность проведенных исследований не вызывает сомнений. Тем не менее, сама представленная диссертация не лишена некоторых недостатков, которые носят частный характер и не влияют на общую оценку работы, а именно:

(1) Нейтрон имел спин до написания диссертации и, соответственно, был термин **”спиновая оптика”**. Представляется, что было бы более правильно вместо термина **”спиновая оптика”** ввести термин **”спин-прецессионная оптика”**

(2) На стр. 38 диссертации говорится о том, что нейтронно-оптический потенциал, описывающий взаимодействие нейтрона со средой, применим при малых переданных импульсах. Желательно было бы написать соотношение, которому удовлетворяет переданный момент (или волновой вектор), чтобы представить о каких значениях переданного импульса идет речь.

(3) С. 39: Неточность в выражении “В частности, уравнение движения спина также формулируется в системе координат покоящегося нейтрона “. Но нейтрон ведь не покоится. Следовало бы писать “в системе координат, связанной с нейтроном”.

(4) С. 39: Величина $|\Psi(\mathbf{r},t)|^2$ пропорциональна вероятности обнаружения нейтрона в объеме $dxdydz$ в точке \mathbf{r} в интервал времени $(t, t+dt)$. Всё-таки, по моему мнению, правильно говорить “в точке \mathbf{r} в момент времени t ”.

- (5) С. 42: Автор пишет "Квантовая теория предсказывает, что результирующий пучок не будет смесью состояний с противоположными спинами; вместо этого следует ожидать, что вектор поляризации результирующего пучка **будет в плоскости**, перпендикулярной поляризации начального пучка". Следовало бы сказать, что "в общем случае вектор поляризации будет **наклонён к плоскости**, перпендикулярной поляризации начального пучка".
- (6) С. 51: Автор пишет "Использование суперзеркал увеличивает пропускную способность нейтронно-оптических поляризаторов". Точнее было бы сказать, что "увеличивает диапазон изменения волнового вектора нейтрона".
- (7) С. 105: В общем случае с произвольными ядерным и магнитным потенциалами точное решение уравнения Шредингера и нахождение оператора отражения \hat{r} невозможно. Следовало бы уточнить, что "с произвольными координатными зависимостями потенциалов".

Несмотря на отмеченные недостатки, в целом представленная диссертационная работа производит очень благоприятное впечатление. Несомненно, она вносит весомый вклад в развитие бурно развивающихся методов исследования слоистых наноструктур. В частности, существенно расширяются представления о возможностях поляризационной нейтронной оптики и нейтронной рефлектометрии. Развитие методов исследований является необходимым условием научного прогресса, расширяет доступную область знаний и способствует более глубокому пониманию природных закономерностей. В данном случае новые экспериментальные возможности будут способствовать развитию новых уникальных методов, использующих поляризованные нейтроны и позволяющих получать важную физическую информацию, недоступную другим экспериментальным методам, об особенностях структуры и магнетизма материалов, динамики процессов в веществе.

Диссертация написана достаточно подробно и понятно, в ней представлено много поясняющих иллюстраций, рисунков и таблиц с экспериментальными данными. Диссертация основана на большом количестве (26) научных работ. Полученные в диссертации результаты опубликованы в ведущих физических журналах и представлены специалистам на 27 конференциях, докладывались на семинарах. Н.К. Плешанов – хорошо известный специалист в поляризационной нейтронной оптике и рефлектометрии поляризованных нейтронов, разработчик поляризующих нейтронных покрытий и нейтронных рефлектометров, экспериментатор с большим опытом работы на нейтронных рефлектометрах. Им продемонстрированы как высокий теоретический, так и высокий экспериментальный уровень

в решении задач нейтронной оптики, нейтронной поляризационной рефлектометрии и магнитных наноструктур.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы. Тема и общее направление работы соответствует паспорту специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики в пп. 1, 2, 5, 8. Области исследований: 1. Изучение физических явлений и процессов, которые могут быть использованы для создания принципиально новых приборов и методов экспериментальной физики. 2. Разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений. 5. Разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики. 8. Разработка методов математической обработки экспериментальных результатов. Моделирование физических явлений и процессов.

Всё вышесказанное позволяет утверждать, что представленная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.01, а Плешанов Николай Константинович заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук.

Отзыв составлен Ю.В. Никитенко на основании прочтения им диссертации и автореферата, а также выполненного доклада Плешанова Н.К. на семинаре Научно-экспериментального отдела нейтронных исследований конденсированных сред (НЭОНИКС) лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) им. И.М.Франка Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) 11 января 2021г, протокол № 64 от 11.01.2021г.

Ведущий научный сотрудник ЛНФ им. И.М. Франка ОИЯИ

доктор физ.-мат. наук

Ю.В. Никитенко

Директор ЛНФ им. И.М. Франка ОИЯИ

В.Н.Швецов

Адрес: ул. Жолио-Кюри, г. Дубна, Московская область, РОССИЯ, 141980

Телефон: (849621) 65059

Адрес электронной почты: post@jinr.ru