ОТЗЫВ

официального оппонента

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.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Современные тенденции в физике конденсированных сред, материаловедении, микро – и наноэлектронике характеризуются возрастающим интересом к исследованию систем, характеризующимися сложной магнитной структурой. Для исследования таких систем требуется совершенствование существующих и развитие новых аналитических методик. Одним из наиболее мощных и информативных методов исследования сложных магнитных систем является рассеяние поляризованных нейтронов, предполагающее получение пучков поляризованных нейтронов и использование поляризационного анализа. Актуальность темы диссертации, посвященной развитию нейтронной спиновой оптики, обусловлена настоятельной необходимостью совершенствования известных и развития новых методов получения и эффективного использования поляризованных нейтронов для исследования широкого класса магнитных систем. Полученные в диссертации результаты, несомненно, будут востребованы при создании и совершенствовании приборной базы реактора ПИК, как это предусмотрено Федеральной научно-технической программой развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 -2027 годы, утвержденной Правительством Российской Федерации 16 марта 2020 года. Рассматриваемые в диссертации вопросы и предлагаемые решения по развитию и использованию спиновой поляризационной оптики непосредственно направлены на развитие методов

исследования, использующих поляризованные нейтроны и позволяющих получать важную физическую информацию, недоступную другим экспериментальным методам, об особенностях структуры и магнетизма материалов, динамики процессов в веществе. Вышесказанное делает тему диссертации крайне важной и актуальной.

СТРУКТУРА И ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, двух приложений, заключения и списка литературы из 213 наименований.

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. Здесь же приводится список публикаций автора по теме диссертации.

Первая глава носит вводный характер, в ней изложены физические принципы и приближения, принятые при рассмотрении распространения 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; обсуждаются поляризующие нейтронные покрытия, используемые для селекции спина нейтронов.

Во Второй главе **с**формулировано уравнение для описания поведения вектора поляризации вдоль «траектории» нейтрона в магнитном поле; проанализировано поведение спина нейтронов в однородном поле, расширена область применения концепции ларморовской прецессии нейтронного спина; 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.

В Третьей главе проанализировано зеркальное отражение поляризованных нейтронов от магнитных слоистых структур с зависящим от глубины потенциалом, Введено одномерное уравнение Шредингера с двумя сохраняющимися «энергиями»; проведен подробный анализ особенностей отражения нейтронов с прецессирующим спином. 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 многослойных структур с произвольной по величине и направлению намагниченностью. Получены формулы для элементов матрицы отражения и коэффициентов отражения в приближении слабых внешних полей.

Четвертая глава посвящена рассмотрению метода рефлектометрии поляризованных нейтронов Приведены примеры использования программ подгонки для анализа рефлектометрических кривых, разработанных 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. Описано экспериментальное 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 нейтронной спиновой оптики для 3D-поляризации и 3D-анализа поляризации пучка.

В Шестой главе предложено и обосновано новое направление– нейтронная спиновая оптика; сформулированы основные принципы, найдены решения для создания базовых элементов с расчетом их эффективности; предложены компактные устройства манипуляции нейтронными спинами, в том числе 3D-поляризаторы и анализаторы, спиновые манипуляторы, гиперполяризаторы. Проведена экспериментальная верификация: предложен метод измерения эффективности зеркальных флипперов, получены точные формулы для расчета их эффективности из интенсивностей,

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.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА РАБОТЫ

Новизна полученных результатов и их научная ценность заключаются в том, что в диссертации впервые предложено и развито новое направление – нейтронная спиновая оптика: проанализировано поведение спина нейтронов в магнитном поле и при отражении нейтронов от магнитных слоев; результаты проведенного анализа применены для развития метода рефлектометрии поляризованных нейтронов, для расширения инструментальных и

функциональных возможностей инновационных покрытий для манипуляций с нейтронными спинами.

В числе наиболее значительных результатов работы следует отметить следующие:

1) Дано писание квантовой нутации и нутационной динамики спина нейтронов в магнитном поле, предложены способы приготовления пучков нейтронов с различной нутационной динамикой спина.
2) Предложены и экспериментально апробированы схемы полной нейтронной рефлектометрии, предполагающие измерение как модулей, так и разностей фаз элементов матрицы отражения.
3) Впервые проведено наблюдение сдвига фазы волновой функции и связанного с ним вращения вектора поляризации при полном отражении нейтронов.
4) Предложен и верифицирован новый эффективный метод улучшения поляризующих нейтронных покрытий с помощью нанопрослоек с отрицательным потенциалом (например, Ti) на каждой из межслойных границ.
5) Сформулированы теоретические основы нового направления - нейтронной спин-манипуляционной оптики - сформулированы основные принципы, найдены решения для создания базовых элементов предложены инновационные компактные устройства для манипуляций с нейтронными спинами.

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные автором результаты являются достаточно общими и могут быть использованы для дальнейшего развития нового направления - нейтронной спин-манипуляционной оптики, они будут востребованы при

создании новых нейтронных инструментов на высокопоточных реакторах, где предложенные автором методики можно было бы реализовать в полном объеме и расширить инструментальную базу для эффективного использования поляризованных нейтронов в существующих методах исследования и в развитии инновационных методов.

Значительную научную ценность представляет проделанный автором анализ 3D-поведения спина нейтронов при прохождении магнитных сред и отражении от магнитных слоев, на основе которого возможно дальнейшее развитие метода рефлектометрии поляризованых нейтронов.

Новые научные результаты, полученные соискателем, могут быть использованы в исследованиях исследованиями новых магнитных материалов методами нейтронного рассеяния, будут способствовать совершенствованию нейтронной поляризационной техники и развитию новых методов исследований на источниках нейтронов, в таких организациях как НИЦ «Курчатовский институт» (Москва), ОИЯИ (Дубна), ПИЯФ НИЦ КИ (Гатчина), НИИЯФ МГУ (Москва), ИФМ Уро РАН (Екатеринбург) и других.

ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОБОСНОВАННОСТЬ ВЫВОДОВ

В своей работе автор использует надежное сертифицированное оборудовании, апробированные экспериментальные методики, он достаточно корректно использует известные теоретические подходы для проведения теоретических расчетов и для анализа полученных результатов, для обоснования выводов и рекомендаций. Развитые им методы расчета основаны на известных квантово-механических подходах, применяемых другими авторами. Большинство полученных результатов обосновываются детальными расчетами, экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с использованными

теоретическими моделями и существующими представлениями. Результаты и выводы диссертанта обоснованы и достоверны.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ В ЦЕЛОМ

В целом, диссертация представляет цельное, законченное исследование, выполненное на высоком уровне. Автором получены оригинальные результаты, имеющие несомненное научное и практическое значение. В диссертационной работе развиты важные аспекты 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. Основные положения диссертации нашли отражение в публикациях автора, апробированы на международных и всероссийских научных конференциях.

Вместе с тем, следует отметить ряд недостатков в содержании и оформлении диссертации:

1. Во введении, в частности, на стр. 12, даются ссылки на автореферат диссертации, что представляется нелогичным.
2. В определении вектора поляризации, заданного уравнением (2.33), в знаменателе стоит матричный элемент от дельта-функции. Определенный таким образом вектор поляризации не соответствует стандартному определению наблюдаемых в квантовой механике.
3. Введенная уравнением (2.37) функция $\Psi(t)$ не является решением уравнения Шредингера, такие функции не образуют полный ортогональный базис. Заданная с помощью этих функций в уравнении (2.39) плотность вероятности не соответствует стандартному определению плотности вероятности, основанному на использовании волновых функций (2.26).

4. Согласно положениям квантовой механики, нейтрон с различной вероятностью находится во всех точках конфигурационного пространства. Введение траектории движения нейтрона из некоторой точки требует задания начальных/граничных условий, что не было сделано.
5. В определении функции Ψ(t) в уравнении (2.37) одновременно присутствуют такие несовместимые переменные как скорость (импульс) и координата. Согласно соотношениям неопределенности, одновременное задание этих переменных невозможно. Следует пояснить, что понимается в данном случае под скоростью. Почему не используется выражение для скорости (либо ее ожидаемого значения), которое можно получить с помощью стандартного уравнения движения $v = \frac{i}{\hbar}[H, r]$?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высказанные критические замечания не снижают научной новизны и практической ценности выполненной работы, не опровергают основных научных положений и результатов диссертации и не оказывают решающего влияния на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Плешанова Николая Константиновича "Нейтронная спиновая оптика" представляет собой завершённое научное исследование, выполненное автором самостоятельно на высоком научном уровне. Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие большое практическое и научное значение. Диссертация написана грамотно и аккуратно оформлена. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, отражает ее основные результаты и выводы, которые обсуждены на научных конференциях и достаточно полно опубликованы в научной печати, в том числе в изданиях, определенных ВАК.

Работа соответствует требованиям ВАК и пункту 14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, соответствует специальности 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики, а ее автор Плешанов Николай Константинович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук, согласно пунктам 1, 2, 5 и 8 паспорта специальности 01.04.01.

Официальный оппонент
Главный научный сотрудник
лаборатории квантовой наноспинтроники
Института физики металлов УрО РАН
доктор физико-математических наук Е.А. Кравцов

24 февраля 2021 г.

Адрес: ИФМ УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, 620108, Екатеринбург
Тел. (343) 3783591
Факс (343) 374 5244
e-mail kravtsov@imp.uran.ru

Подпись Кравцова Е.А.
заверяю
Ученый секретарь ИФМ УрО РАН
И.Ю. Арапова
«19» февраля 2021 г.

9