

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Квантовая метрология и квантовые сенсоры
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных проблем физики квантовых технологий
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составили:

А.В. Лебедев, канд. физ.-мат. наук, доцент

М.В. Суслов, канд. физ.-мат. наук, ассистент

Г.Б. Лесовик, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, руководитель образовательной программы

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных проблем физики квантовых технологий
29.03.2025

Аннотация

В курсе даются знания о современной квантовой метрологии и устройстве квантовых сенсоров. Подробно рассматривается квантовая теория измерений, позволяющая разрабатывать новые методы сверхточных измерений. Особое внимание уделяется основным квантовым алгоритмам оценки фазы. Даются примеры выбора подходящих способов измерений исходя из постановки задачи.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

Дать студентам знания о современной квантовой метрологии и устройстве квантовых сенсоров.

Дать углубленные знания квантовой теории измерений, позволяющие разрабатывать новые методы сверхточных измерений.

Задачи дисциплины

- углубленное изучение теории измерений.
- изучение теоретических пределов повышения точности измерений.
- изучение современных способов повышения точности измерений, основанных на квантовых эффектах.
- изучение вариантов реализации квантовых сенсоров с помощью различных физических систем, в том числе с помощью кубитов.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- принципы и главные результаты теории измерений
- основные принципы квантовой метрологии
- основные квантовые алгоритмы оценки фазы
- основные варианты реализации квантовых сенсоров

уметь:

- описывать процесс измерения квантовыми детекторами
- выбирать подходящие способы измерений исходя из постановки задачи
- строить теорию измерения для конкретных величин применительно к конкретным условиям эксперимента

владеть:

- методами описания процесса измерения в любых физических системах
- методами разработки квантовых сенсоров
- методами анализа результатов измерений в сложных системах

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение. Статистическое описание процесса измерения. Вывод стандартного квантового предела.	6			7
2	Общий обзор теории измерений в квантовой механике.	8			8
3	Квантовые алгоритмы оценки фазы.	8			8
4	Физическая реализация квантовых сенсоров.	8			7
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

1. Введение. Статистическое описание процесса измерения. Вывод стандартного квантового предела.

Дается общее понятие о процессе измерения как о случайном процессе. На примере измерения проекции спина $1/2$ выводится формула для величины среднеквадратичного отклонения поляризации спина.

2. Общий обзор теории измерений в квантовой механике.

Приводится эвристический метод вывода правила Борна. С помощью описания отложенных квантовых измерений выводится постулат фон Неймана о повторных измерениях. Излагается общая теория POVM измерений.

3. Квантовые алгоритмы оценки фазы.

Излагается квантовый и полуклассические алгоритмы оценки фазы на основе преобразования Фурье. Излагаются алгоритмы Китаева и гибридные алгоритмы на основе Байесовской теории.

4. Физическая реализация квантовых сенсоров.

Дается обзор существующих квантовых сенсоров. Особое внимание уделяется квантовым сенсорам магнитного поля на основе сверхпроводящих кубитов типа «трансмон», рассмотрен также кутритный вариант сенсора. Описаны оптические сенсоры на основе когерентного лазерного излучения.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Мультимедийное оборудование (проектор, экран), доска, мел или маркеры.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Квантовая теория проверки гипотез и оценивания [Текст]/К. Хелстром, -М., Мир, 1979
2. Статистическая теория обнаружения сигналов [Текст]/К. Хелстром, пер. с англ. Г. Ю. Кобзарева под ред. Ю. Б. Кобзарева, -М., Иностран. лит., 1963
3. Измерение малых сил в физических экспериментах [Текст], монография/В. Б. Брагинский, А. Б. Манукин, -М., Наука, 1974
4. M.V. Suslov, G.B. Lesovik, G. Blatter, Quantum Abacus for counting and factorizing numbers, Phys. Rev. A 83, 052317 (2011) [20 pages]; arXiv:1011.3646, WoS: 000290758100005, Scopus: 2-s2.0-79961117846.

Дополнительная литература

1. D. Oehri, A.V. Lebedev, G.B. Lesovik, G. Blatter, Projective versus weak measurement of charge in a mesoscopic conductor, Phys. Rev. B 90, 075312 (2014); arXiv:1406.4762, WoS: 000341268900007, Scopus: 2-s2.0-84935470492.
2. G.B. Lesovik, F. Hassler, G. Blatter, Using qubits to measure fidelity in mesoscopic systems, Phys. Rev. Lett. 96, 106801 (2006); cond-mat/0507200.
3. G.B. Lesovik, A.V. Lebedev, V. Mounutcharyan, T. Martin, Detection of gravity waves by phase modulation of the light from a distant star, Phys. Rev. D 71, 122001 (2005) [12 pages]; astro-ph/0506602.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. G.B.Lesovik, M.V. Suslov, G. Blatter, Quantum divisibility test and its application in mesoscopic physics, arXiv:0906.4960.
2. <https://www.nature.com/nphoton/journal/v5/n4/full/nphoton.2011.35.html>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Для подготовки к итоговой аттестации по предмету лучше всего пользоваться материалами лекций.

Дополнительные источники для самостоятельного изучения:

Büch H., Mahapatra S., Rahman R, Morello A, Simmons MY., Spin readout and addressability of phosphorus-donor clusters in silicon, Nature. Comm. 4, 2017 (2013).

Vandersypen, Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance, Nature 414, 883 (2001).

Quantum-state engineering with Josephson-junction devices, Rev. Mod. Phys. 73, 357 (2001).

Qavity quantum electrodynamics for superconducting electrical circuits: An architecture for quantum computation, Phys. Rev. 69, 062320 (2004).

Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box, PHYSICAL REVIEW A 76, 042319 2007.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных проблем физики квантовых технологий
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Разработчики:

А.В. Лебедев, канд. физ.-мат. наук, доцент

М.В. Суслов, канд. физ.-мат. наук, ассистент

Г.Б. Лесовик, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, руководитель образовательной программы

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая метрология и квантовые сенсоры» обучающийся должен:

знать:

- принципы и главные результаты теории измерений
- основные принципы квантовой метрологии
- основные квантовые алгоритмы оценки фазы
- основные варианты реализации квантовых сенсоров

уметь:

- описывать процесс измерения квантовыми детекторами
- выбирать подходящие способы измерений исходя из постановки задачи
- строить теорию измерения для конкретных величин применительно к конкретным условиям эксперимента

владеть:

- методами описания процесса измерения в любых физических системах
- методами разработки квантовых сенсоров
- методами анализа результатов измерений в сложных системах

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Не предусмотрено.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Примерный перечень вопросов:

1. Вывести формулу для стандартного квантового предела.
2. Объяснить качественно происхождения зависимости точности измерения от времени.
3. В чем разница между PV и POV измерениями.
4. Проанализировать эксперимент Штерна Герлаха.
5. Объяснить разницу между алгоритмом Китаева и алгоритмом, основанным на полуклассическом преобразовании Фурье.
6. Показать, что в кутритном случае можно определить знак магнитного поля.
7. Перечислить и кратко охарактеризовать известные реализации сенсоров.
8. Постулат фон Неймана о повторных измерениях
9. Алгоритмы на основе Баесовской теории
10. Кутритный вариант сенсора

Примеры билетов:

Билет 1.

1. Вывод стандартного квантового предела.
2. Квантовый алгоритм оценки фазы Китаева.

Билет 2.

1. Физическая реализация квантовых сенсоров на основе сверхпроводящего кубита (трансмона).
2. Квантовый алгоритм оценки фазы на основе преобразования Фурье.

Критерии оценивания

- оценка "отлично (10)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;
- оценка "отлично (9)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений;
- оценка "отлично (8)" выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, и правильное обоснование принятых решений;
- оценка "хорошо (7)" выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка "хорошо (6)" выставляется студенту, если он знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка "хорошо (5)" выставляется студенту, если он знает материал, по существу излагает его, умеет применить полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;
- оценка "удовлетворительно (4)" выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировка базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом владеющему основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и способному применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

- оценка "удовлетворительно (3)" выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировка базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом владеющему фрагментарно основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и способному применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;
- оценка "неудовлетворительно (2)" выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач;
- оценка "неудовлетворительно (1)" выставляется студенту, который не знает формулировок основных понятий дисциплины.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется в форме устного экзамена.

Во время проведения экзамена обучающиеся могут пользоваться только программой дисциплины.

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 1 астрономический час на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.