

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

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

Рабочая программа дисциплины (модуля)

по дисциплине:	Introduction to Quantum Metrology/Основы квантовой метрологии
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра Российского квантового центра
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 15 час.

Всего часов: 45, всего зач. ед.: 1

Программу составили:

А.А. Головизин, канд. физ.-мат. наук

В.В. Сошенко

Программа обсуждена на заседании кафедры Российского квантового центра 30.03.2020

Аннотация

Курс посвящен рассмотрению основных принципов и последних научных достижений в области квантовой метрологии. Квантовая метрология базируется на использовании квантовых состояний отдельных частиц либо системы в качестве сенсоров, за счет чего достигаются показатели (чувствительность, точность и др.), превосходящие классические измерительные приборы.

Яркими примерами квантовых сенсоров являются датчики магнитного поля на основе сверхпроводников, атомов в ячейках и NV-центров, гироскопы, оптические часы и атомные интерферометры, и гравиметры. Новое определение Международной Системы Единиц через фундаментальные константы во многом мотивировано высокой точностью различных квантовых сенсоров.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

ознакомить студентов с основными принципами квантовой метрологии.

Задачи дисциплины

расширить кругозор студентов в области квантовой механики, познакомить студентов с физическими платформами, используемыми для квантовых сенсоров.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
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
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

основы квантовой метрологии и магнитометрии, физические платформы, на которых реализованы квантовые вычислители и сенсоры, реализацию алгоритмов и измерений на них.

уметь:

объяснять основные процессы в квантовой метрологии и в работе квантовых сенсоров, производить оценку производительности квантовых сенсоров.

владеть:

математическим аппаратом квантовой механики, в особенности относящимся к квантовым вычислениям и измерениям.

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	Физические платформы	4			2
2	Квантовые логические операции	2			1
3	Оптические часы	4			2
4	Атомные интерферометры, гравиметры	2			1
5	Неклассические состояния в квантовой метрологии	2			1
6	Магнитометрия	6			3

7	Термометрия в наномасштабе	2			1
8	Ядерно-магнитно-резонансная гироскопия	2			1
9	Электрометрия	2			1
10	Методы улучшения чувствительности	4			2
Итого часов		30			15
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		45 час., 1 зач.ед.			

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

Семестр: 2 (Весенний)

1. Физические платформы

Физические платформы: холодные атомы, холодные ионы, искусственные атомы, фотоны.

Будут рассмотрены основные физические платформы, на которых основаны оптические часы, атомные интерферометры и гравиметры. Разобраны методы получения и подготовки частиц, н.р. лазерное охлаждение, процессы накачки и поляризации. Обсуждены преимущества и недостатки различных платформ в конкретном применении.

2. Квантовые логические операции

Будут рассмотрены основные операции, производимые над атомами (ионами, фотонами) для подготовки и считывания состояний. Будет разобран метод квантовой логики, в котором используется спаринг-ион для считывания внутреннего состояния «часового» иона.

3. Оптические часы

Будут рассмотрен принцип работы оптических часов, а также существующие часы на одиночных и ансамблях ионах, на нейтральных атомах в решетках, ядерные переходы. Будет обсуждаться систематические сдвиги и погрешности оптических часов, а также их стабильность и точность.

4. Атомные интерферометры, гравиметры

Будут рассмотрены принципы работы атомных интерферометров и гравиметров, а также используемые атомные ансамбли. Будет обсуждаться их чувствительность к различным внешним полям, и способы их измерения. Будут проанализированы достижимые характеристики интерферометров и гравиметров и ограничивающие факторы.

5. Неклассические состояния в квантовой метрологии

Будут рассмотрены примеры использования неклассических состояний света либо атомных ансамблей для улучшения характеристик квантовых сенсоров. Например, использование сжатых состояний для преодоления стандартного квантового предела шума.

6. Магнитометрия

Центры окраски в алмазе (азот-вакансия, кремний-вакансия), структура уровней основного оптического состояния NV центра, принципы оптической поляризации и считывания состояния NV центра. Принцип работы ДС- магнитометра на NV центре, оценка точности магнитометра. Сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД). Принцип работы ВЧ-СКВИД магнитометра и СКВИД магнетометра на постоянном токе. Чувствительность СКВИД магнитометров. Магнитометр на рубидиевой ячейке.

7. Термометрия в наномасштабе

Термометрия живой клетки с использованием центров окраски в наноалмазах. Принципы измерения температуры с помощью центров окраски в наноалмазах.

8. Ядерно-магнитно-резонансная гироскопия

Гироскоп на базе ансамбля ядерных спинов ксенона. Принцип работы, режим поддержания вынужденной прецессии.

9. Электрометрия

Электрометрия с использованием ридберговских атомов. Электрометрия с использованием центров окраски в алмазе.

10. Методы улучшения чувствительности

Методы улучшения чувствительности. Коррекция ошибок. Неразрушающее измерение.

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

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Введение в физику сверхпроводников [Текст] : учеб. пособие для физ. спец. вузов : доп. М-вом высш. и сред. спец. образования СССР / В. В. Шмидт .— М. : Наука, 1982 .— 237 с. - Библиогр.: с. 230-232. - Предм. указ.: с. 233-235. - 10 500 экз.
- Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Пер. с англ. —М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 512 с. - ISBN 978-5-9221-1096-9

Дополнительная литература

- Dmitry Budker, Derek Kimball Optical Magnetometry/ Cambridge University press, 2013 – 412с. -ISBN 9780511846380
- Ludlow A. D. et al. Optical atomic clocks //Reviews of Modern Physics. – 2015. – Т. 87. – №. 2. – С. 637.
- Pezze L. et al. Quantum metrology with nonclassical states of atomic ensembles //Reviews of Modern Physics. – 2018. – Т. 90. – №. 3. – С. 035005.

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

- lib.mipt.ru

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

- На лекциях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.
- Microsoft PowerPoint

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

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

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 Российского квантового центра
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Дифференцированный зачет

Разработчики:

А.А. Головизин, канд. физ.-мат. наук
В.В. Сошенко

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
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
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Introduction to Quantum Metrology/Основы квантовой метрологии» обучающийся должен:

знать:

основы квантовой метрологии и магнитометрии, физические платформы, на которых реализованы квантовые вычислители и сенсоры, реализацию алгоритмов и измерений на них.

уметь:

объяснять основные процессы в квантовой метрологии и в работе квантовых сенсоров, производить оценку производительности квантовых сенсоров.

владеть:

математическим аппаратом квантовой механики, в особенности относящимся к квантовым вычислениям и измерениям.

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

Разобрать одну из предложенных статей. Примеры статей:

- Coherent laser spectroscopy of highly charged ions using quantum logic;
- High-sensitivity magnetometry with a single atom in a superposition of two circular Rydberg states;
- Variational Spin-Squeezing Algorithms on Programmable Quantum Sensors;
- A quantum network of clocks.

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

Примеры контрольных заданий

1. Вычислить необходимое время интегрирования сигнала стандарта частоты для достижения относительной систематической погрешности $1E-18$ при опросе атомного ансамбля раби-импульсом длительностью 800 мс. Период измерений 1с, число атомов 10000, частота часового перехода 430 ТГц.
2. Какую коррекцию частоты необходимо внести при сличении двух оптических часов с разностью высот 400 метров.
3. Рассчитать разность гравитационного потенциала на экваторе и полюсах.
4. Рассчитать теоретический предел чувствительности по дробовому шуму фотонов DC магнетометра с временем когерентности $T_2^* = 1\text{мкс}$ и контрастом флюоресценции 30%.
5. Какую площадь может иметь РЧ СКВИД, чтобы динамический диапазон был $>1\text{мкТл}$

Перечень контрольных вопросов

1. Различные виды шумов, их спектр и девиация Аллана.
2. Характеристики квантовых сенсоров, чувствительность, стабильность. Способы опроса. Стандартный квантовый предел измерений.
3. Принцип работы атомных часов. Основные микроволновые и оптические часы.
4. Основные систематические сдвиги и источники погрешностей оптических часов.
5. Атомные гравиметры, принципы работы. Используемые единицы и характерные значения гравитационного поля от различных источников (Луна, экватор и полюса, и т.п.). Сравнение классических и атомных гравиметров.
6. Магнитометр на NV центре. Расчёт чувствительности магнитометра в случае одиночного NV и ансамбля центров окраски
7. Магнитометр на атомах Рубидия. Чувствительность магнитометра.
8. Гироскоп на ансамбле атомов ксенона. Режим поддержания вынужденной прецессии.
9. Эффект Джозефсона. SQUID. Принцип работы DC-SQUID магнетометра. Чувствительность SQUID магнетометра.
10. Поляризация ядерного спина азота в NV центре в режиме пересечения уровней возбужденного состояния(ESLAC).

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - 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 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

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

Дифференцированный зачёт проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.