

**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**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Основы квантовой метрологии
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра Российского квантового центра
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	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: 60 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составили:

А.А. Головизин, канд. физ.-мат. наук

В.В. Сошенко, ассистент

Программа обсуждена на заседании кафедры Российского квантового центра 29.01.2025

## 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			8
2	Квантовые логические операции	2			4
3	Оптические часы	4			8
4	Атомные интерферометры, гравиметры	2			4
5	Неклассические состояния в квантовой метрологии	2			4
6	Магнитометрия	6			12

7	Термометрия в наномасштабе	2			4
8	Ядерно-магнитно-резонансная гироскопия	2			4
9	Электрометрия	2			4
10	Методы улучшения чувствительности	4			8
Итого часов		30			60
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 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 DC- 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 наноамазах.

## 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, ассистент

## 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 «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  $T_2^* = 1\mu\text{с}$  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).
11. AC магнитометр на NV центре. Отличия от DC магнитометра. Оценка чувствительности.

## 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.