

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Фундаментальные основы квантовых технологий.

**2. Уровень высшего образования** – магистратура

**3. Направление подготовки:** 03.04.02 Физика (магистратура)

**4. Аннотация:**

Курс «Дополнительные главы квантовой механики» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления».

**5. Объем дисциплины в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся (указывается согласно рабочему плану):**

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 36 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (18 часов занятия лекционного типа, 16 часов занятия семинарского типа, 2 часа коллоквиумов), 36 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

**6. Формируемые компетенции и входные требования для освоения дисциплины, предварительные условия:**

НАЗВАНИЕ КОМПЕТЕНЦИЙ:

СПК-1 Способность свободно владеть профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовой коммуникации.

СПК-2 Способность к поиску, критическому анализу, обобщению и систематизации научной информации в области физики квантовой коммуникации.

СПК-3 Способность организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовой коммуникации, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования.

ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ, УМЕНИЙ, ОПЫТА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ТРЕБУЕМЫЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ

Для того чтобы формирование данных компетенций было возможно, обучающийся, приступивший к освоению образовательной программы, должен:

- **ЗНАТЬ:** основные методы научно-исследовательской деятельности.
- **УМЕТЬ:** выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; избегать автоматического применения стандартных формул и приемов при решении задач.
- **ВЛАДЕТЬ:** навыками сбора, обработки, анализа и систематизации информации по теме исследования; навыками выбора методов и средств решения задач исследования.

Для освоения дисциплины необходимы знания и умения, приобретаемые в рамках дисциплин общей физики «Оптика», «Атомная физика», а также дисциплин «Линейная алгебра» и «Дифференциальные уравнения».

## **7. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий**

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего, часы	В том числе						
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости : коллоквиумы, практические занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.	Всего
1. ВВЕДЕНИЕ. Место квантовой теории в современной картине мира. От классики к квантовой физике		1			1	1 час Повторение лекционного материала.		1
2. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ПОНЯТИЯ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ		1	1		2	2 часа Решение задач 1 часа		3

<p>Пространство волновых функций. Матрицы. Дираковские обозначения. Смысл скалярного произведения. Базисы в пространстве состояний. Операторы. Матрица плотности. Наблюдаемые. Вариационный принцип</p>						<p>Повторение лекционного материала по теме «Математические понятия квантовой теории».</p>		
<p>3. ПРИНЦИПЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ.</p> <p>Квантовая механика замкнутой системы. Разные представления временной (унитарной) эволюции квантовой системы. Представления Шредингера, Гайзенберга и взаимодействия. Функции от операторов в разных представлениях. Гамильтониан в представлении Гайзенберга. Уравнение Гайзенберга. Скобка Пуассона и коммутатор. Чистые, смешанные, перепутанные состояния.. Уравнения в представлении взаимодействия. Измерение.</p>		2	1		3	<p>2 часа Решение задач 1 часа Повторение лекционного материала по теме «Принципы квантовой механики»</p>		3
<p>4. ОДНОМЕРНЫЕ КВАНТОВЫЕ СИСТЕМЫ</p> <p>Структура спектра. Вещественность собственных функций. Структура спектра и асимптотика потенциала. Прямоугольная яма. <math>\delta</math>-яма . Существование уровня в мелкой яме. Осцилляторная теорема. Одномерная задача рассеяния. Пример: рассеяние на ступеньке . Пример: рассеяние на <math>\delta</math>-яме . Общие свойства одномерного рассеяния.</p>		2	2		4	<p>2 часа Решение задач 2 часа Повторение лекционного материала по теме «Одномерные квантовые системы»</p>		3

<p><b>5. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ</b></p> <p>Классическая (колмогоровская) вероятность. Соотношения неопределенностей. Измерение без взаимодействия. Квантовый эффект Зенона. Квантовая (не)локальность. Теорема о невозможности клонирования квантового состояния. Моделирование измерительного прибора. Декогеренция</p>	2	0		2	<p>2 часа Решение задач</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по теме «Основы теории измерений»</p>	3
<p><b>6. ЗАГАДКИ И ПАРАДОКСЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. ИНТЕРПРЕТАЦИИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ.</b> Статистические интерпретации. Копенгагенская интерпретация. Квантовые теории со скрытыми параметрами. Принцип дополнительности Бора. За гранью копенгагенской интерпретации. «АбстрактноеЯ» фон Неймана. Многомировая интерпретация Эверетта.</p> <p><b>7. КВАНТОВАЯ ИНФОРМАТИКА.</b></p> <p>Понятие универсального квантового компьютера. Квантовый параллелизм. Логика и вычисления. Вычисления и необратимость. Обратимые вычисления</p>	2	0		2	<p>2 часа Повторение лекционного материала по теме «Загадки, парадоксы и интерпретации квантовой механики»</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по теме «Квантовая информатика»</p>	4
<p><b>8. ГАРМОНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР.</b></p> <p>Представление чисел заполнения. Симметрии гармонического осциллятора. Представление Гайзенберга для осциллятора. Когерентные состояния гармонического осциллятора. Сжатые состояния. Квантованные поля</p>	2	1		3	<p>2 часа Решение задач</p> <p>2 часа Повторение лекционного материала по теме</p>	3

						«Гармонический осциллятор»		
9. ВРАЩЕНИЯ И МОМЕНТЫ. Группа вращений. Представления вращений. Спин $\frac{1}{2}$ , Спин 1.		3	2		5	2 часа Решение задач 2 часа Повторение лекционного материала по теме «Вращения и моменты»		2
10. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМА С ПОЛЕМ. <i>Полуклассическая теория.</i> Гамильтониан двухуровневого атома в поле излучения. Метод амплитуд вероятности. Оператор плотности ДА. Учет столкновений между атомами. Вынужденное испускание и поглощение. <i>Квантовая теория.</i> Гамильтониан взаимодействия. Взаимодействие одиночного двухуровневого атома с одномодовым полем. Теория Вайскопфа-Вигнера.		3	2		5	2 часа Решение задач 2 часа Повторение лекционного материала по теме «Взаимодействие атома с полем»		2
11. КВАНТОВАЯ СТАТИСТИКА Статистический оператор. Некоторые свойства статистического оператора. Уравнение движения для оператора $\rho$ . Чистое состояние. Энтропия. Матрица плотности для частиц со спином $1/2$ . Характеристическая функция. Распределение Пуассона. Экспоненциальное распределение		3	2		5	2 часа Решение задач 2 часа Повторение лекционного материала по теме		2

						«Квантовая статистика»		
<b>Промежуточная аттестация - зачет</b>			4		4	10 часов Подготовка к промежуточной аттестации (зачету).		10
<b>Итого</b>		18	16	2	36			36

\* Текущий контроль успеваемости в рамках занятий семинарского типа реализуется в форме обсуждения.

### 8. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине:

8.1 Основная и дополнительная литература доступная студентам через Интернет или по запросу лектору.

8.2 Электронные презентации основных тем дисциплины доступные через сайт Центра квантовых технологий:  
<https://www.qotlabs.org/>.

### 9. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

Типовые вопросы к зачету:

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

ВЛАДЕТЬ: профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений (B1, СПК-1).

ВЛАДЕТЬ: навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (B2, СПК-2).

**ВЛАДЕТЬ:** навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).

**УМЕТЬ:** анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).

**УМЕТЬ:** осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений (У2, СПК-2).

**УМЕТЬ:** организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3).

**ЗНАТЬ:** методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений (З1, СПК-1).

**ЗНАТЬ:** способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (З2, СПК-2).

**ЗНАТЬ:** методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (З3, СПК-3).

Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Критерии оценивания результатов обучения				
	1	2	3	4	5
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в

информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).		информации в области физики квантовых вычислений	физической информации в области физики квантовых вычислений	физической информации в области физики квантовых вычислений	области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, СПК-2).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений

<p><i>УМЕТЬ:</i> анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов (У1, СПК-1).</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов</p>
<p><i>УМЕТЬ:</i> осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений (У2, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление умения осуществлять поиск, критический анализ, обобщать и систематизировать научную информацию в области физики квантовых вычислений</p>

<p><i>УМЕТЬ:</i> организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования (У3, СПК-3)</p>	<p>Отсутствие умения</p>	<p>Фрагментарное проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление умения организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>Успешное и систематическое проявление организовывать и планировать исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области физики квантовых вычислений, и решать их с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>
<p><i>ЗНАТЬ:</i> методы анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений (31, СПК-1)</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний методов анализа и оценки современных научных достижений, а также методов генерирования новой физической информации при решении исследовательских и практических задач в области физики квантовых вычислений</p>

<p><b>ЗНАТЬ:</b> способы критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (32, СПК-2).</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний способов критического анализа и систематизации научной информации при решении исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>
<p><b>ЗНАТЬ:</b> методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, СПК-3)</p>	<p>Отсутствие знаний</p>	<p>Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но не систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>	<p>Успешное и систематическое проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования</p>

## 10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная литература

## Дополнительная литература

### **11. Перечень ресурсов Интернет необходимых для освоения дисциплины:**

### **12. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

Для освоения дисциплины необходимо посещение интерактивных занятий (лекций и семинаров) и регулярная самостоятельная работа в течение семестра. Для большей части тем курса имеются электронные презентации, выложенные на сайте ЦКИ. Рекомендуется перед лекцией скачать соответствующую презентацию и иметь ее на интерактивном занятии на ноутбуке или планшете в режиме off-line или в распечатанном виде, используя как основу конспекта для собственных пометок и комментариев.

### **13. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости):**

При реализации учебной работы в рамках дисциплины «Фундаментальные основы квантовых технологий» используются средства дистанционного сопровождения учебного процесса в форме сайтов с материалами лекций и семинарских занятий. Курс имеет электронные версии (презентации) лекций. Лекции читаются с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования.

### **14. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Любая аудитория, оснащенная проекционным оборудованием с возможностью подключения к ноутбуку, экраном, и учебной доской.