

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Физика холодных атомов и квантовые вычисления на атомных системах

**2. Уровень высшего образования** – магистратура

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

**4. Аннотация:**

Курс «Физика холодных атомов и квантовые вычисления на атомных системах» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления». Дисциплина обеспечивает теоретическую подготовку студентов в области лазерного охлаждения, физики холодных атомов и ионов, теории взаимодействия лазерного излучения с атомными системами и квантовых вычислений на атомных системах. В курсе рассматриваются методы лазерного охлаждения и захвата заряженных ионов в электромагнитные ловушки, принципы захвата нейтральных атомов в оптические и магнитные ловушки, обсуждаются существующие типы ловушек для атомов и ионов. Физика холодных атомов и ионов рассматривается в приложении к задачам реализации на этих физических системах квантовых вычислений.

**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 квантовых вычислений.

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

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

## ПОРОГОВЫЙ (ВХОДНОЙ) УРОВНЬ 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», «Электромагнетизм», «Атомная физика» и теоретической физики «Электродинамика», «Квантовая теория». «Статистическая физика». Желательно предварительное освоение материала обязательной части программы магистратуры: дисциплины профиля «Введение в квантовую информацию» и «Введение в квантовые вычисления», «Дополнительный главы квантовой механики».

### 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 контрольные занятия и др.*	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка рефератов и т.п.	Всего
<b>1. Введение</b> Обзор и история развития методов лазерного охлаждения. Преимущества и недостатки физической модели квантовых вычислений на основе холодных атомов и ионов.		1			1	1 час Знакомство с обзорами по теме.		1

<p><b>2. Лазерное охлаждение и захват нейтральных атомов</b></p> <p>§1. Необходимые сведения из теории взаимодействия излучения с веществом. Нестационарная теория возмущений. Двухуровневая система. Вектор Блоха. Взаимодействие двухуровневой системы с внешним классическим полем. Спонтанное излучение, естественная ширина линии. Оптические уравнения Блоха. Эффект насыщения. Световые сдвиги уровней.</p> <p>§2. Механическое действие излучения на двухуровневый атом Давление света. Силы, действующие со стороны поля на покоящийся атом. Силы, действующие на движущийся атом, случаи бегущей и стоячей волны.</p> <p>§3. Взаимодействие излучения с многоуровневыми атомами. Многоуровневый атом на примере атомов щелочных металлов. Тонкая и сверхтонкая структура уровней. Угловой момент и правила отбора. Оптические переходы в многоуровневых атомах. Радиальная и угловая часть дипольного матричного элемента.</p> <p>§4. Общие свойства лазерного охлаждения. Кинетическая теория и распределение Максвелла-Больцмана. Термодинамика лазерного охлаждения.</p>	8	5		13	<p>1 час Решение задач по теме взаимодействие двухуровневой системы с классическим полем</p> <p>1 час Решение задач по теме Механическое действие лазерного излучения на двухуровневый атом.</p> <p>4 часа Повторение лекционного материала и решение задач по теме термодинамика лазерного охлаждения.</p>		6
---	---	---	--	----	---	--	---

<p>Случайные блуждания. Уравнение Фоккера-Планка и пределы достижимой температуры при лазерном охлаждении.</p> <p>§5. Методы и механизмы лазерного охлаждения атомов.</p> <p>Методы замедления атомных пучков. Оптические патоки, одномерная теория для слабой интенсивности излучения. Доплеровский предел и субдоплеровское охлаждение. Сизифов механизм охлаждения. Охлаждение за счёт градиента поляризации: случаи <math>\text{lin}\perp\text{lin}</math> и <math>\sigma^+ - \sigma^-</math>. Теория субдоплеровского охлаждения. Предел отдачи. Охлаждение ниже предела отдачи.</p> <p>§5. Ловушки для нейтральных атомов.</p> <p>Магнитные ловушки для атомов. Классическое движение атомов в магнитной ловушке. Квантование движения в магнитных ловушках. Атомные чипы. Оптические ловушки для нейтральных атомов. Магнито-оптическая ловушка. Захват и охлаждение атомов в МОЛ. Дипольные ловушки. Дипольные микроловушки и захват одиночных атомов. Оптические решетки.</p> <p>§6. Бозе-Эйнштейновский конденсат.</p> <p>Испарительное охлаждение. Скорость и пределы испарительного охлаждения. Получение Бозе-Эйнштейновского конденсата. Эксперименты по</p>									
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

наблюдению когерентных эффектов в БЭК. БЭК в оптических решетках, квантовые фазовые переходы.								
<p><b>3. Захват и охлаждение заряженных ионов</b></p> <p>§7. Электромагнитные ловушки для заряженных ионов. Принципы захвата заряженных частиц. Ловушки Пеннинга и Пауля. Спектр движения в ловушках Пеннинга и Пауля. Квантовая динамика ионов в ловушках. Многосекционные ловушки. Планарные ионные ловушки, ионные чипы.</p> <p>§8. Методы охлаждения ионов в ловушках. Радиационное охлаждение. Охлаждение с помощью буферного газа. Лазерное охлаждение: доплеровское охлаждение, рамановское охлаждение, охлаждение в режиме электромагнитно-индуцированной прозрачности</p>	3	3	2 часа Коллоквиум по темам «Захват и лазерное охлаждение нейтральных атомов и заряженных ионов»	6	2 часа Решение задач по теме динамика заряженных ионов в ловушках.  6 часов Подготовка к коллоквиуму			8
<p><b>4. Квантовые вычисления с ионами в ловушках</b></p> <p>§8. Теоретические основы ионных вычислений. Способы реализации физических кубитов в ионных системах. Методы реализации однокубитных вентиляей, радиочастотные и рамановские вентили. Методы реализации измерений. Методы реализации двухкубитных вентиляей. Фононные моды, как квантовые шины данных. Вентиль Сирака-Цоллера. Вентиль Мельмера-Соренсена, геометрические</p>	3	3		6				4

<p>вентили.</p> <p>§9. Экспериментальные реализации ионных вычислений.</p> <p>Первые эксперименты с одиночными ионами, перепутывание кубита и фононной моды, реализация вентиля Сирака-Цоллера. Реализация вентиля Мельмера-Соренсена. Рандомизированный бенчмаркинг и величина ошибок на вентиль в ионной модели.</p> <p>§9. Перспективы ионных вычислений.</p> <p>Основные механизмы декогеренции для ионных кубитов. Методы борьбы с декогеренцией. Перспективы реализации коррекции ошибок. Аналоговые симуляции в ионной модели вычислений.</p>						<p>2 часа</p> <p>Повторение лекционного материала по теме «Квантовые вычисления с ионами в ловушках».</p>		
<p><b>5. Квантовые вычисления с нейтральными атомами</b></p> <p>§11. Теоретические основы вычислений с нейтральными атомами.</p> <p>Способы реализации физических кубитов в атомных системах. Кубиты на одиночных атомах и ансамблевое кодирование. Методы реализации однокубитных вентилях. Методы реализации измерений. Методы реализации двухкубитных вентилях. Столкновительные вентили. Ридберговские атомы, взаимодействие ридберговских атомов, резонансы Фёрстера. Ридберговские двухкубитные вентили.</p> <p>§9. Экспериментальные реализации атомных</p>	3	3			6	<p>1 час</p> <p>Решение задач на определение параметров рамановских и радиочастотных вентилях.</p> <p>1 час</p> <p>Решение задач на тему ридберговские</p>		2

<p>вычислений.</p> <p>Методы формирования атомных вычислительных регистров. Основные экспериментальные трудности при реализации одно- и двухкубитных вентиляей. Причины и механизмы декогеренции и ошибок в вентиляях.</p> <p>§9. Перспективы атомных вычислений.</p> <p>Способы борьбы с декогеренцией и ошибками в атомных вычислительных регистрах. Пределы ошибок одно- и двухкубитных вентиляей, перспективы реализации кодов коррекции ошибок. Аналоговые симуляции в атомной модели вычислений.</p>						<p>двухкубитные вентили для атомных квантовых вычислений</p> <p>2 часа</p> <p>Повторение лекционного материала по теме «Квантовые вычисления с нейтральными атомами».</p>		
<b>Промежуточная аттестация - экзамен</b>			4		4	15 часов Подготовка к промежуточной аттестации (экзамену).		15
<b>Итого</b>	<b>72</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 ЦКТ ФФ МГУ:

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

Типовые вопросы к экзамену:

1. Взаимодействие двухуровневой системы с внешним классическим полем. Эффект насыщения.



2. Силы, действующие со стороны поля на движущийся атом, случаи бегущей и стоячей волны.
3. Термодинамика лазерного охлаждения
4. Охлаждение за счёт градиента поляризации: случаи  $\text{lin}\perp\text{lin}$  и  $\sigma^+ - \sigma^-$ .
5. Захват и охлаждение атомов в магнито-оптической ловушке
6. Спектр движения захваченных ионов в ловушках Пеннинга и Пауля.
7. Вентиль Мельмера-Соренсена, геометрические вентили для квантовых вычислений на ионах.
8. Способы борьбы с декогеренцией и ошибками в атомных вычислительных регистрах.

#### ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ (ПОКАЗАТЕЛИ ДОСТИЖЕНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ ОСВОЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЙ)

**ВЛАДЕТЬ:** профессиональными знаниями для анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).

**ВЛАДЕТЬ:** навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики квантовых вычислений (В2, 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 (32, СПК-2).

ЗНАТЬ: методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (33, 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 информации в области физики квантовых вычислений (В1, СПК-1).	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и систематическое применение навыков анализа и синтеза физической информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области физики	В целом успешное, но не систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной	Успешное и систематическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и систематизации научной информации в области

квантовых вычислений (В2, СПК-2).		квантовых вычислений	физики квантовых вычислений	информации в области физики квантовых вычислений	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
<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).	Отсутствие умения	Фрагментарное проявление умения анализировать альтернативные варианты решения исследовательских задач в области физики квантовых вычислений и оценивать потенциальные выигрыши/проигрыши реализации этих вариантов	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	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	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><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 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><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><i>ЗНАТЬ:</i> 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>

<b>ЗНАТЬ:</b> методы организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования (ЗЗ, СПК-3)	Отсутствие знаний	Фрагментарное проявление знаний методов организации и планирования исследований в области физики квантовых вычислений, включая способы решения задач с помощью современной аппаратуры и оборудования	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	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	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
--	-------------------	--	--	--	---

## 10. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

### Основная литература

1. H. Metcalf, P. van der Straten. Laser Cooling and Trapping. Springer-Verlag, New York, (1999)
2. F.G.Major, V.N.Gheorghe, G.Werth. Charged Particle Traps. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2005)

### Дополнительная литература

3. D. Leibfried et al. Quantum dynamics of single trapped ions, Rev. Mod. Phys. 75, 281 (2003)
4. R. Blatt, C. F. Roos. Quantum simulations with trapped ions, Nature Phys. 8, 277 (2012)
5. A.Bermudez et al. Assessing the progress of trapped-ion processors towards fault-tolerant quantum computation, Phys. Rev. X 7, 041061 (2017)
6. M.Saffman. Quantum computing with atomic qubits and Rydberg interactions: Progress and challenges, J. Phys. B. 49, 202001 (2016)

## 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 материалы, выложенные на сайте Центра. 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 «Физика холодных атомов и квантовые вычисления на атомных системах» 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.