

## Рабочая программа дисциплины

**1. Название дисциплины:** Физические модели квантовых вычислений

**2. Уровень высшего образования** – магистратура

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

**4. Аннотация:**

Курс «Физические модели квантовых вычислений» является профильной дисциплиной магистерской программы «Квантовые вычисления». Дисциплина обеспечивает подготовку студентов в области реализации квантовых вычислительных процедур с помощью существующих квантовых систем. В рамках курсов будут освещены основные критерии, которым должны удовлетворять искусственные управляемые квантовые системы для полноценного выполнения квантовых алгоритмов, методы тестирования и оценки качества используемой системы, а также различные экспериментальные системы, применяемые в настоящее время для демонстрации элементарных квантовых алгоритмов – линейно-оптическая система, холодные атомы и ионы, захваченные в ловушки, сверхпроводящие квантовые цепи, полупроводниковые системы, центры окраски в кристаллах, а также ряд других систем. Целью данного курса является максимально полное освещение технических аспектов реализации квантовых алгоритмов с помощью искусственно-созданных квантовых систем.

**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 (34 часов занятия лекционного 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» и теоретической физики «Квантовая механика», а также дисциплин «Линейная алгебра» и «Теория вероятностей». Желательно предварительное освоение материала вариативной части программы бакалавриата: дисциплин профиля «Нелинейные волны и нелинейная оптика».

## **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
<p><b>1. Введение</b></p> <p>§1. Введение в теорию квантовых вычислений. Носители квантовой информации – кубиты. Квантовые гейты. Универсальный набор квантовых гейтов. Принципы проектирования квантовых алгоритмов. Цифровые и аналоговые квантовые вычислители. Гейтовая и кластерная модели квантового компьютера, адиабатические квантовые вычислители.</p> <p>§2. Критерии соответствия квантовой системы. Изолированная квантовая система. Математическая</p>		6			6	6 часов Ознакомление с теорией квантовый вычислений.		6

<p>модель описания кубита. Сфера Блоха. Однокубитные и многокубитные системы. Измерения в вычислительном и произвольном базисах. Формализм квантовых схем. Критерии ДиВинченцо. Связанность квантового вычислителя. Сравнительный анализ существующих физических систем по критериям ДиВинченцо. Тестирование квантовых систем. Метод randomized benchmarking и randomized compiling.</p> <p>§3. Принципы работы квантовых кодов коррекции ошибок.</p> <p>Типы шумовых воздействий на кубиты. Понятие декогерентизации. Избыточное кодирование. Пороговая теорема. Проблема квантового превосходства универсального квантового компьютера. «Шумный» квантовый компьютер. Способы демонстрации квантового превосходства с помощью «шумного» квантового компьютера.</p>								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

<p><b>2. Принципы построения физических квантовых систем для реализации алгоритмов квантовых вычислений.</b></p> <p>§4. Линейно-оптическая модель. Кодирование квантовой информации в линейно-оптической модели. Оптические двухкубитные гейты с использованием нелинейных элементов. Модель Книлл-Лафламма-Милберна (КЛМ). Гейт нелинейного сдвига фаз. CZ гейт в модели КЛМ. Другие возможные реализации CZ-гейта. Условная реализация гейтов. Экспериментальная демонстрация двухкубитных гейтов. Экспериментальная демонстрация выполнения квантовых алгоритмов в гейтовой модели. Протокол Нильсена. Протокол Брауна-Рудольфа. Баллистические квантовые вычисления. Пороговое значение вероятности успешного срабатывания двухкубитного гейта для формирования универсального вычислительного кластерного состояния. Неуниверсальные квантовые вычисления – boson sampling.</p> <p>§5. Реализация линейно-оптических квантовых вычислений Физические устройства для реализации линейно-оптических вычислений. Объемная и интегральная оптика для квантовых вычислений, сравнительный анализ. Интегрально-оптические технологии для</p>	28	2	30	<p>4 часа Повторение лекционного материала по темам «Линейно-оптическая модель» и «Эксперименты по линейно-оптическим квантовым вычислениям»</p> <p>4 часа Повторение лекционного материала по теме «Сверхпроводящие квантовые цепи»</p> <p>6 часов Подготовка к коллоквиуму</p> <p>4 часа Повторение лекционного материала по темам «Холодные ионы» и «Холодные атомы»</p> <p>4 часа Повторение лекционного материала по темам «NV центры в алмазе» и</p>		
---	----	---	----	--	--	--

<p>создания линейных интерферометров. Принципы формирования пассивных интегрально-оптических схем. Принципы разработки и создания активных интегрально-оптических схем. Источники фотонов на базе спонтанных процессов рассеяния. Источники фотонов на базе одиночных эмиттеров. Детекторы одиночных фотонов на базе лавинных фотодиодов. Детекторы одиночных фотонов на базе сверхпроводящих устройств. Экспериментальная реализация одно- и двухкубитных квантовых гейтов. Условная реализация двухкубитных гейтов. Демонстрация квантовых алгоритмов с помощью линейно-оптических систем. Алгоритм Шора. Алгоритм оценки фазы. Реализация boson sampling.</p> <p>§6. Квантовые оптические вычисления с непрерывными переменными. Квадратурные компоненты оптического поля. Измерение квадратурных компонент поля. Гомодинное детектирование. Многомодовые перепутанные состояния с непрерывными переменными. Генерация кластерных высокоразмерных состояний. Оценки порога ошибок для масштабирования вычислительных систем с непрерывными переменными.</p> <p>§7. Сверхпроводящие квантовые цепи. Физика сверхпроводящих квантовых систем.</p>					<p>«Полупроводниковые квантовые системы»</p> <p>6 часов Подготовка к зачету</p>		
--	--	--	--	--	---	--	--

<p>Эффект Джозефсона. Принципы формирования двухуровневых квантовых систем в сверхпроводящих квантовых цепях. Зарядовый, потоковый и фазовый типы кубитов. Современные системы для формирования кубитов: 2D и 3D трансмон, иксмон и др. Основные характеристики сверхпроводящих кубитов и сравнительный анализ существующих систем. Методы управления кубитами. Приготовление, преобразование и считывание состояния. Квантовая электродинамика трансмона в микроволновом резонаторе (сQED). Способы связи трансмонов: емкостная связь, резонаторная связь и джозефсоновская связь. Реализация одно- и двухкубитных квантовых гейтов. Гейты CNOT и CZ, качество приготовления, время выполнения и другие характеристики. Методы приготовления и томографии квантовых состояний систем сверхпроводящих кубитов. Эксперименты по квантовой телепортации с использованием сверхпроводящих схем. Основные процессы декогерентизации в сверхпроводящих квантовых цепях. Активные и пассивные методы развязки кубитов и термостата. Квантовая коррекция ошибок и поверхностный код. Эксперименты по реализации квантовых алгоритмов. Алгоритм оценки фазы. Экспериментальная демонстрация цифровой симуляции изинговской и гейзенберговской</p>								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

системы спинов. Реализация алгоритмов для квантово-химических расчетов. Оценка энергии основного состояния молекул водорода, гидрида лития и гидрида бериллия. Адиабатические квантовые вычисления. Квантовый отжиг и решение многомерных задач глобальной оптимизации.

#### §8. Холодные ионы.

Физика холодных ионов в ловушках. Гамильтониан иона, взаимодействующего с лазерным полем. Критерии выбора иона для экспериментов по квантовым вычислениям. Конфигурация ловушки, физика захвата иона в радиочастотную ловушку. Ловушка Пауля и ловушка Пеннинга. Методы охлаждения ионов в ловушках. Методы инициализации и считывания ионных кубитов. Селективное считывание квантовых состояний в системе ионов. Однокубитные преобразования. Двухкубитные преобразования. Гейт Цирака-Цоллера. Гейт Мельмера-Соренсена. Геометрический двухкубитный гейт. Randomized benchmarking одно- и двухкубитных ионных гейтов. Основные механизмы декогерентизации в ионных квантовых вычислительных системах. Подпространства, свободные от декогерентизации. Экспериментальная демонстрация квантовой телепортации. Реализация квантовых алгоритмов с помощью ионных систем. Алгоритм Дойча-Йожи.



<p>Реализация задач квантовой симуляции с помощью холодных ионов. Ионные чипы, разработка масштабируемого ионного квантового компьютера.</p> <p>§9. Холодные атомы.  Физика холодных ионов в ловушках. Методы захвата атомов. Магнито-оптическая ловушка. Дипольная ловушка. Методы охлаждения атомов в ловушках. Кодирование квантовой информации в атомной системе. Инициализация и считывание состояний кубитов. Методы реализации однокубитных гейтов. Ридберговские состояния атомов. Схемы возбуждения атомов в ридберговские состояния. Основные источники декогерентизации атомов в ловушках. Двухкубитные гейты. Перепутывающий гейт на основе эффекта ридберговской блокады. Альтернативные подходы к реализации двухкубитных гейтов. Реализация многокубитных гейтов с использованием диполь-дипольного взаимодействия ридберговских атомов. Способы создания масштабируемых системы холодные атомов. Оптические решетки. Голографические дипольные ловушки. Методы индивидуальной адресации атомов в больших массивах. Квантовые симуляторы на основе атомных систем. Симуляция многочастичных задач с помощью массивов атомов.</p>								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

<p>§10. NV-центры в алмазах.  Формирование центров окраски в алмазах. Типы центров окраски: NV-центры, SiV центры и др. NV<sup>-1</sup> центр окраски. Электронная структура NV<sup>-1</sup> центра. Нулевая фононная линия. Кодирование квантовой информации с помощью NV центров. Электронный и ядерный кубит. Инициализация и считывание квантовой информации. Однокубитные гейты. Двухкубитные гейты. Создание перепутывания между удаленными NV-центрами. Технические аспекты оптической адресации NV центров. Реализация квантовых алгоритмов с использованием NV-центров. Методы контролируемого создания NV центров в заданной области. Квантовая память на ядерной подсистеме NV центра. Квантовые сети на основе NV центров.</p> <p>§11. Полупроводниковые квантовые системы.  Примесные атомы в изотопически чистом кремнии. Модель Кейна. Кодирование квантовой информации в ядерной подсистеме примесного атома. Инициализация и считывание. Однокубитные гейты. Спин-спиновое взаимодействие. Двухкубитные гейты. Основные каналы декогерентизации. Модель Лосса-ДиВинченцо. Двумерный электронный газ. Формирование электростатического потенциала квантовой точки. Химический потенциал квантовой</p>								
---	--	--	--	--	--	--	--	--

<p>точки. Инициализация и считывание состояний квантовой точки. Одноэлектронные транзисторы. Однокубитные гейты. Двухкубитные гейты.</p> <p><b>Промежуточная аттестация - зачет</b></p>							
<b>Итого</b>		2			2		3

\* 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.

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

Типовые контрольные вопросы и темы для обсуждения:

1. Кодирование квантовой информации. Кубит, сфера Блоха.
2. Кодирования квантовых состояний в непрерывные переменные
3. Цифровые и аналоговые квантовые вычислители.
4. Критерии ДиВинченцо.
5. Методы тестирования реальных квантовых вычислительных устройств. Randomized benchmarking.
6. Модель Книлла-Лафламма-Милберна. Квазивероятностный двухкубитный гейт.
7. Типы кубитов в сверхпроводящих квантовых цепях. Механизмы связи между кубитами.
8. Методы охлаждения ионов в ловушках.
9. Масштабирование ионных и атомных систем. Голографические ловушки и оптические решетки.
10. Электронная структура NV<sup>-1</sup> центра.
11. Модель Лосса-ДиВинченцо. Способы искусственного формирования квантовых точек в полупроводниковых структурах.

Типовые вопросы к зачету:

1. Элементарная единица квантовой информации – кубит. Сфера Блоха. Измерения в вычислительном и произвольном базисах.

2. Кодирование квантовой информации в непрерывные переменные. Измерение непрерывных переменных оптических полей. Гомодинное детектирование.
3. Кластерные состояния с непрерывными переменными.
4. Критерии ДиВинченцо. Сравнительный анализ существующих квантовых вычислительных систем с точки зрения критериев ДиВинченцо.
5. Тестирование квантовых вычислительных устройств. Методы randomized benchmarking и randomized compiling.
6. Типы шумовых воздействий на кубиты. Понятие декогерентизации. «Шумный» квантовый компьютер.
7. Способы кодирования информации в линейно-оптической модели с использованием различных степеней свободы фотона.
8. Вероятностные двухкубитные гейты. Теорема о невозможности детерминистического измерения в полном белловском базисе в линейно-оптических системах.
9. Модель Книлла-Лафламма-Милберна. Гейт нелинейного сдвига фаз. Квазидетерминистический двухкубитный CZ гейт в модели Книлла-Лафламма-Милберна.
10. Эффект Джозефсона. Зарядовый, потоковый и фазовый типы кубитов в сверхпроводящих системах.
11. Современные системы для формирования кубитов: трансмон, иксмон и др.
12. Квантовая электродинамика трансмона в микроволновом резонаторе.
13. Механизмы связи трансмонов: емкостная связь, резонаторная связь, джозефсоновская связь. Реализация одно- и двухкубитных гейтов.
14. Эксперименты по реализации квантовых алгоритмов. Экспериментальная демонстрация цифровой симуляции изинговской и гейзенберговской системы спинов.
15. Адиабатические квантовые вычисления. Квантовый отжиг.
16. Гамильтониан иона, взаимодействующего с лазерным полем. Критерии выбора иона для экспериментов по квантовым вычислениям.
17. Конфигурация ловушки, физика захвата иона в радиочастотную ловушку. Ловушка Пауля и ловушка Пеннинга. Методы охлаждения ионов в ловушках.
18. Однокубитные преобразования. Гейт Цирака-Цоллера. Геометрический двухкубитный гейт.
19. Реализация квантовых алгоритмов с помощью ионных систем. Алгоритм Дойча-Йожи. Реализация задач квантовой симуляции с помощью холодных ионов.
20. Кодирование квантовой информации в атомной системе. Инициализация и считывание состояний кубитов.
21. Перепутывающий гейт на основе эффекта ридберговской блокады. Альтернативные подходы к реализации двухкубитных гейтов.
22. Способы создания масштабируемых системы холодные атомы. Оптические решетки. Голографические дипольные ловушки.
23. Типы центров окраски: NV-центры, SiV центры и др. NV-1 центр окраски. Электронная структура NV-1 центра.
24. Модель Лосса-ДиВинченцо. Двумерный электронный газ. Формирование электростатического потенциала квантовой точки.

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 (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	Критерии оценивания результатов обучения
-------------	--

результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	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 система- тическое 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 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 сис- тематизации научной информации в области физики квантовых вычислений	Успешное и система- тическое применение навыков поиска, критического анализа, обобщения и сис- тематизации научной информации в области физики квантовых вычислений
<i>ВЛАДЕТЬ:</i> навыками анализа методологических проблем, возникающих	Отсутствие навыков	Фрагментарное применение навыков анализа методологи- ческих проблем, возникающих при	В целом успешное, но не систематическое применение навыков анализа методологи- ческих проблем,	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков анализа методологических проблем,	Успешное и система- тическое применение навыков анализа методологических проблем, возникающих

<p>при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений (В3, СПК-3).</p>		<p>планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>возникающих при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>	<p>при планировании, организации и решении конкретных исследовательских задач в области физики квантовых вычислений</p>
<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 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. М. Нильсен, И. Чанг. Квантовые вычисления и квантовая информация. Мир (2006), ISBN 5-03-003524-9
2. P. Kok, et al. Linear optical quantum computing with photonic qubits. Rev. Mod. Phys. 79, 135 (2007)
3. G. Wendin. Quantum Information Processing with Superconducting Circuits: a Review. Reports on Progress in Physics 80, 10 (2017)
4. H Haeflner, et al. Quantum computing with trapped ions. Physics Reports 469, 4, 155-203 (2008)
5. M. Saffman, T. G. Walker, K. Molmer. Quantum information with Rydberg atoms. Rev. Mod. Phys. 82, 2313 (2010)
6. L. Childress, R. Hanson. Diamond NV centers for quantum computing and quantum networks. MRS Bulletin 38, 2 (2013)
7. M. Veldhorst, H. G. J. Eenink, C. H. Yang, A. S. Dzurak. Silicon CMOS architecture for spin-based quantum computer. Nature Communications 8, 1766 (2017)

### Дополнительная литература

1. J. W. Silverstone, D. Bonneau, J. L. O'Brien, M. G. Thompson. Silicon quantum photonics. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum electronics 22, 6 (2016)
2. Y. Li, P. C. Humphreys, G.J. Mendoza, S. C. Benjamin. Resource Costs for Fault-Tolerant Linear Optical Quantum Computing. Phys. Rev. X 5, 041007 (2015)
3. N.J. Cerf, G. Leuchs, E.S. Polzik, Quantum information with continuous variables of atoms and light. Imperial College Press, 2007.
4. A. Kandala, A. Mezzacapo, K. Temme, M. Takita, M. Brink, J. M. Chow, J. M. Gambetta. Nature 549, 242-246 (2017)
5. C. Hempel, C. Maier, J. Romero, J. McClean, T. Monz, H. Shen, P. Jurcevic, B. P. Lanyon, P. Love, R. Babbush, A. Aspuru-Guzik, R. Blatt, C. F. Roos. Quantum Chemistry Calculations on a Trapped-Ion Quantum Simulator. Phys. Rev. X 8, 031022 (2018)
6. D. Barredo, V. Lienhard, S. de Leseleuc, T. Lahaye, A. Broways. Synthetic three-dimensional atomic structures assembled atom by atom. Nature 561, 79-82 (2018)
7. C. Jones, M. A. Fogarty, A. Morello, M. F. Gyure, A. S. Dzurak, T. D. Ladd. Logical Qubit in a Linear Array of Semiconductor Quantum Dots. Phys. Rev. X 8, 021058 (2018)

#### **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, которые можно получить после прослушивания соответствующей лекции.

#### **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 «Физические модели квантовых вычислений» 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.